วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ

TEMPERATURE-INSENSITIVE UNIVERSAL CURRENT CONVEYOR

สุชาติ สงวนไว้

SUCHART SA-NGUANWAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-627-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ

TEMPERATURE-INSENSITIVE UNIVERSAL CURRENT CONVEYOR

T043265

สุชาต สงวนไว้

SUCHART SA-NGUANWAI

เลขหมู่..........

เลขทะเบียน 43265

วัน, เดือน, ปี 8 ส.ค. 2545

b..........

i..........

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-627-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEMPERATURE-INSENSITIVE UNIVERSAL CURRENT CONVEYOR

SUCHART SA-NGUANWAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2002

ISBN 974-648-627-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ

TEMPERATURE-INSENSITIVE UNIVERSAL CURRENT CONVEYOR

ชื่อนักศึกษา นายสุชาต สงวนไว้

รหัสประจำตัว 42061174

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย ริ้วรุ่งจา	[signature]
ผศ.พลผดุง ผดุงกุล	[signature]
ผศ.ดร.วรากร เกษมสุวรรณ์	[signature]
ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ	[signature]
ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ	[signature]

วัน/เดือนปี ที่สอบ 21 กุมภาพันธ์ 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ...)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....15.....เดือน.....[illegible].....พ.ศ....2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ
	Temperature-Insensitive Universal Current Conveyor
นักศึกษา	นายสุชาต สงวนไว้
รหัสประจำตัว	42061174
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอหลักการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ ที่สามารถปรับเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง และวงจรสายพานกระแสยุคที่สามได้ โดยไม่ต้องเพิ่มหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ให้กับวงจร โดยวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์นี้ยังสามารถปรับขนาดกระแสถ่ายโอนได้โดยใช้วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความถูกต้องแม่นยำสูง การออกแบบวงจรได้นำหลักการของโอทีเอ (OTA) มาปรับปรุง เพื่อให้วงจรมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและกระแสสอดคล้องกับสายพานกระแสในแต่ละยุค นอกจากนั้นวงจรยังได้รับการปรับปรุงในด้านการทำงานอีกนั่นคือ วงจรมีช่วงปฏิบัติงานกว้างขึ้น และวงจรมีเสถียรภาพโดยไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพื่อเป็นการยืนยันหลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการจำลองการทำงานโดยการวิเคราะห์วงจรด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป PSpice ซึ่งผลที่ได้จากการเลียนแบบเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Temperature-Insensitive Universal Current Conveyor
Student	Mr.Suchart Sa-nguanwai
Student ID	42061174
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assistant Professor Kiattisak Kumwachara

ABSTRACT

The objective of this thesis proposes the design of Universal current conveyor which can be adapted to first, second, and third generation current conveyor without adding or modifying its elements. This Universal current conveyor can be electronically tuned transfer current magnitude, which give higher accurate result. In designing circuit, OTA concept was applied in order to give voltage and current property to each generation. Moreover, it has been improved to be insensitive to temperature change and to have wide dynamic range. To confirm the theoretical design of the schemes are demonstrated by PSpice simulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ คมวัชระ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้ ความคิดริเริ่ม คำปรึกษาและคำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยและพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนจบหลักสูตร

ขอขอบคุณ คุณเฉลิมภัณฑ์ ฟองสมุทร ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ รวมทั้งห้องปฏิบัติการ Mixed Signal Processing ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณมณีรัตน์ พรหมสถิต ที่ช่วยเรียบเรียงและจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนสนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ด้วยดีตลอดมา

สุชาต สงวนไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูป VIII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 กล่าวนำ 1

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ 1

1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์ 2

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ 2

บทที่ 2 วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สาม 4

2.1 บทนำ 4

2.2 วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง 4

2.3 วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง 5

2.3.1 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ 7

2.3.2 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส 8

2.4 วงจรสายพานกระแสยุคที่สาม 9

2.5 บทสรุป 10

บทที่ 3 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้โอทีเอ ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ 11

3.1 บทนำ 11

3.2 หลักการพื้นฐาน 11

3.3 วงจรขยายโอทีเอ 13

3.3.1 หลักการพื้นฐานโอทีเอ 13

3.3.2 วงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว 14

3.3.3 วงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท 17

3.3.4 วงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.5 ช่วงปฏิบัติงาน....20

3.3.6 ค่าอุณหภูมิในโอทีเอ....20

3.3.7 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของโอทีเอ....22

3.3.8 ค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของโอทีเอ....23

3.3.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของโอทีเอ....24

3.4 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส....26

3.4.1 หลักการทำงานของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส....26

3.4.2 การหาค่าคลาดเคลื่อนของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส....28

3.4.3 ช่วงปฏิบัติงานแรงดันด้านอินพุทของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส....29

3.4.4 ช่วงปฏิบัติงานแรงดันด้านเอาท์พุทของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส....31

3.4.5 ผลของอุณหภูมิของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส....33

3.4.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส....35

3.4.7 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม....37

3.5 บทสรุป....37

บทที่ 4 การออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์....38

4.1 บทนำ....38

4.2 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์....38

4.2.1 หลักการทำงาน....39

4.2.2 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Y....40

4.2.3 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท X....42

4.2.4 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Z^+, Z^-....43

4.2.5 การวิเคราะห์ค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$....44

4.2.6 การวิเคราะห์ค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$....44

4.2.7 ช่วงปฏิบัติงานของแรงดัน....44

4.2.8 ผลตอบสนองทางความถี่....45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice 46

4.3.1 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์......46

4.3.2 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์.......47

4.3.3 การเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์.............................49

4.3.4 การเลียนแบบช่วงแรงดันปฏิบัติงานวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 50

4.3.5 การเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 51

4.4. ผลจากการทดลองการทำงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 53

4.4.1 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 53

4.4.2 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 54

4.5 บทสรุป 55

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์...56

5.1 บทนำ..56

5.2 การใช้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง 56

5.3 การใช้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม..............58

5.4 ผลจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice 60

5.4.1 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์...61

5.4.2 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_y}{i_x}$

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์...62

5.4.3 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์...63

5.4.4 การเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานเอนกประสงค์...64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 ผลจากการทดลองการทำงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 65

5.5.1 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 65

5.5.2 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 66

5.6 บทสรุป 67

บทที่ 6 บทสรุปและวิจารณ์ 68

6.1 บทสรุปและวิจารณ์ 68

6.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยและพัฒนาต่อ 68

เอกสารอ้างอิง 69

ภาคผนวก 71

ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_o กับแรงดัน V_{in} และค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (g_m) ของวงจรดิฟเฟอร์เรนเชียล 72

ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานทางอินพุท และเอาท์พุทของวงจรสะท้อนกระแสแบบคลาสโคด 76

ภาคผนวก ค. ผลการวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 80

ประวัติผู้เขียน 104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สายพานกระแสยุคที่หนึ่ง	4
2.2	สายพานกระแสยุคที่สอง	6
2.3	สายพานกระแสยุคที่สองแบบปรับค่าได้โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์	7
2.4	สายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส	8
2.5	สายพานกระแสยุคที่สาม	9
3.1	วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	11
3.2	วงจรขยายความแตกต่าง	12
3.3	วงจรสมมูลย์ทางอุดมคติของโอทีเอ	14
3.4	สัญลักษณ์ของโอทีเอ	14
3.5	วงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว	15
3.6	สัญลักษณ์วงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว	16
3.7	วงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท	17
3.8	สัญลักษณ์วงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท	18
3.9	วงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท	19
3.10	สัญลักษณ์วงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท	19
3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาท์พุทกับแรงดันอินพุท	20
3.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาท์พุทกับอุณหภูมิ	21
3.13	วงจรสมมูลย์ของวงจรขยายความแตกต่าง	22
3.14	โมเดลของสัญญาณขนาดเล็กของโอทีเอ	24
3.15	วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้วงจรขยายโอทีเอ	26
3.16	วงจรภายในของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้วงจรขยายโอทีเอ	26
3.17	สัญลักษณ์วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	27
3.18	ช่วงปฏิบัติงานของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	31
3.19	ผลของอุณหภูมิของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	34
3.20	แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	35
3.21	แสดงค่า THD ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 สัญลักษณ์สายพานกระแสเอนกประสงค์ 39

4.2 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่สร้างจากโอทีเอ 39

4.3 วงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ 40

4.4 วงจรสมมูลย์สัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส 41

4.5 วงจรสมมูลย์สัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสหาค่า อิมพีแดนซ์ที่พอร์ท X 42

4.6 แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice 47

4.7 แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ด้วยโปรแกรม PSpice 48

4.8 แสดงการเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ ด้วยโปรแกรม PSpice 49

4.9 แสดงการเลียนแบบช่วงแรงดันปฏิบัติงาน ด้วยโปรแกรม PSpice 50

4.10 แสดงการเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่ $\frac{i_z}{i_x}$ ด้วยโปรแกรม PSpice 51

4.11 แสดงการเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่ $\frac{i_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice 52

4.12 แสดงการเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่ $\frac{v_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice 52

4.13 แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ 54

4.14 แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ 55

5.1 สัญลักษณ์วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง 56

5.2 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ที่สร้างจากโอทีเอ 57

5.3 วงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง 57

5.4 สัญลักษณ์วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม 58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.5	วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สามที่สร้างจากโอทีเอ	59
5.6	วงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม	59
5.7	แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice	61
5.8	แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_y}{i_x}$ ด้วยโปรแกรม PSpice	62
5.9	แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ด้วยโปรแกรม PSpice	63
5.10	แสดงการเลียนแบบค่าของอุณหภูมิ ด้วยโปรแกรม PSpice	64
5.11	แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$	65
5.12	แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$	66
ก.1	วงจรขยายความแตกต่าง	72
ข.1	วงจรสะท้อนกระแสแบบคลาสโคด	76
ข.2	วงจรสมมูลย์ของวงจรสะท้อนกระแสแบบคลาสโคด	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาและเจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมาก โดยเฉพาะชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ได้ถูกนำมาสร้างในรูปแบบวงจรรวม (Integrated Circuit) หรือที่เรียกว่า ไอซี (IC) โดยเริ่มจากระบบสูญญากาศมาเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มีลักษณะเป็นดิสครีท (Discrete) ในการออกแบบวงจรรวมได้มีการนำเสนอการออกแบบโดยใช้หลักการใหม่ๆ ขึ้นมาอย่างมากมาย เพื่อให้สามารถนำวงจรไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายและมีขนาดเล็ก ตลอดจนออกแบบปรับปรุงแก้ไขวงจรที่มีอยู่แล้วให้มีคุณสมบัติและมีประสิทธิภาพในการทำงาน เพื่อให้ได้ค่าความละเอียดความแม่นยำในการทำงานที่ดียิ่งขึ้นและมีผลตอบสนองต่อความถี่ในการปฏิบัติงานที่สูงตามไปด้วย รวมทั้งการพยายามออกแบบวงจรให้วงจรมีความยุ่งยากน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่ายและมีราคาต่อวงจรต่ำ

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ จัดอยู่ในกลุ่มวงจรย่อยที่ทำงานในรูปของกระแสโดยที่อินพุทเป็นแรงดันและเอาท์พุทเป็นกระแสและจากคุณลักษณะของวงจรย่อยแบบนี้จะเรียกว่าเป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (V/I) ซึ่งวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิจะเป็นการรวมเอาวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สองและยุคที่สาม (CCI, CCII และ CCIII) ไว้ด้วยกัน โดยไม่ต้องเพิ่มหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ให้กับวงจร ซึ่งการออกแบบวงจรใช้หลักการของวงจรขยายแบบดิฟเฟอร์เรนเชียลและมีการชดเชยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลง รวมทั้งสามารถปรับขนาดของกระแสถ่ายโอนได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งให้ค่าที่เที่ยงตรง ทำให้มีความสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

จากการศึกษาค้นคว้าและทำการวิจัยของวงจรสายพานกระแสที่เป็นยุคที่หนึ่ง ยุคที่สองและยุคที่สาม (CCI, CCII และ CCIII) ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานเฉพาะ โดยที่วงจรสายพานกระแสในแต่ละยุคอาจจะเหมาะสมกับวงจรชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้นและมีการทำงานขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิรอบข้าง จึงทำให้ผลการทำงานของวงจรผิดพลาดไป ดังนั้นในการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ (Temperature-Insensitive Universal Current Conveyor) จึงได้กำหนดวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ไว้ดังนี้คือ

1. เพื่อศึกษาค้นคว้า วิจัยและพัฒนาในการรวมวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สาม
2. เพื่อศึกษาค้นคว้าวิจัยการชดเชยผลของอุณหภูมิในวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์
3. เพื่อที่จะสามารถนำเอาวงจรที่ได้ออกแบบขึ้นดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย
4. ออกแบบวงจร โดยใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยที่สุด
5. สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้

1.3 หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการนำเสนอการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ (Temperature-Insensitive Universal Current Conveyor) โดยใช้หลักการของวงจรขยายแบบดิฟเฟอร์เรนเชียล และทำการชดเชยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นให้ลดน้อยลง ปรับเปลี่ยนช่วงปฏิบัติงานได้เพื่อความเหมาะสมกับระดับสัญญาณอินพุทที่เข้ามาและควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรโดยใช้กระแสไบอัส สามารถปรับขนาดของกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สองและยุคที่สาม ได้โดยไม่ต้องเพิ่มหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ให้กับวงจร

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทและภาคผนวกอีก 3 ภาคโดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำจะเป็นการกล่าวนำถึงวัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 กล่าวถึงนิยามของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สองและยุคที่สาม รวมถึงข้อจำกัด ของวงจรสายพานกระแสในแต่ละยุค

บทที่ 3 กล่าวถึงวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส โดยใช้หลักการของวงจรขยายโอทีเอ การชดเชยผลของอุณหภูมิ ทฤษฎีการทำงานเบื้องต้นของวงจรขยายโอทีเอ และหลักการทำงานของวงจรขยายโอทีเอ ช่วงปฏิบัติงาน อุณหภูมิ และความถี่ในโอทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice การทดลองการทำงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

บทที่ 5 กล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ ที่สามารถทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง และวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลงานที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งได้นำเสนอแนวทางในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

ในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นภาคผนวกซึ่งจะรวบรวมการวิเคราะห์สมการต่างๆ ของแต่ละบทเอาไว้ ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก. จะเป็นการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_O กับแรงดัน V_{in} และค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (g_m) ของวงจรขยายดิฟเฟอร์เรนเชียล

ภาคผนวก ข. จะเป็นการวิเคราะห์หาค่าความต้านทานทางอินพุทและเอาท์พุทของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

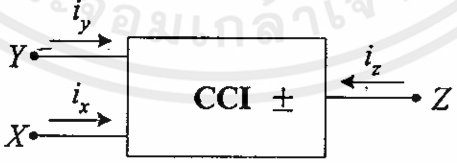
บทที่ 2
วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สาม

2.1 บทนำ

วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) จัดเป็นอุปกรณ์ Active Building Block ที่มี 3 พอร์ท ซึ่งนิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เพราะว่าวงจรสายพานกระแสสามารถใช้ในการประมวลสัญญาณได้ทั้งในโหมดแรงดัน (Voltage Mode) และโหมดกระแส (Current Mode) อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบวงจรต่างๆ ได้อีกมากมายเช่น วงจรไจเรเตอร์ (Gyrator) [1], วงจรฟังก์ชั่นทางคณิตศาสตร์ วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทั่วไป (Generalized Impedance Converter) [2], วงจรกรองความถี่ (Filter) [3] และวงจรกำเนิดความถี่ (Oscillator) [4] เป็นต้น โดยในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสในยุคต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง และวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม

2.2 วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง

วงจรสายพานกระแส (Current Conveyor) ได้มีการนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1968 โดย A. Sedra และ K.C. Smith [5] ซึ่งเรียกว่า วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง (First-Generation Current Conveyor : CCI) จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ Active Building Block ที่มี 3 พอร์ท (Port) คือ พอร์ท X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สายพานกระแสยุคที่หนึ่ง (CCI)

หลักการทำงานของวงจร คือ ถ้ามีแรงดันตกคร่อมด้านอินพุทที่พอร์ท Y แล้วจะทำให้มีแรงดันค่าเท่ากันเกิดขึ้นที่พอร์ท X ในทำนองเดียวกัน ถ้ามีกระแสไฟฟ้าผ่านพอร์ท X ก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเท่ากันผ่านที่พอร์ท Y และกระแสไฟฟ้าค่าเดียวกันนี้จะถูกนำพา (Conveyor) ไปด้านเอาท์พุทที่พอร์ท Z

คุณสมบัติของเนทเวอร์ค (Network) สามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ (Hybrid Parameter) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่พอร์ทต่างๆได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

จากสมการที่ (2.1) จะได้ว่า

$$i_y = i_x \tag{2.2}$$

$$v_x = v_y \tag{2.3}$$

$$i_z = \pm i_x \tag{2.4}$$

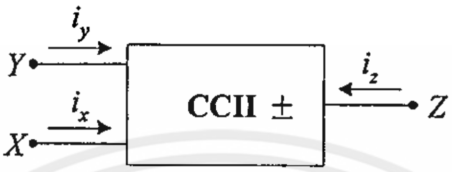
จากสมการที่ (2.1) จะเห็นว่า h_{32} มีค่าเป็น ±1 ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X เป็น $i_z = \pm i_x$ ดังสมการที่ (2.4) กรณี $i_z = i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X มีทิศทางการไหลในทิศทางเดียวกัน เรียกว่าวงจรสายพานกระแสชนิดบวก (CCI+) กรณี $i_z = -i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X มีทิศทางการไหลตรงกันข้าม เรียกว่าวงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCI-) และที่ h_{12} มีค่าเป็น 1 ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_y ที่พอร์ท Y เท่ากับ กระแส i_x ที่พอร์ท X

2.3 วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง

ในปี ค.ศ. 1970 A. Sedra และ K.C Smith [6] ได้เสนอแนวความคิดใหม่ในการออกแบบวงจรสายพานกระแสโดยทำการปรับค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ทางด้านอินพุทที่พอร์ท Y ให้มีค่าสูงขึ้นจากวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ซึ่งเรียกว่าวงจรสายพานกระแสยุคที่สอง (Second Generation Current Conveyor : CCII) และต่อมาได้มีการนำไปออกแบบสร้างวงจรสายพานกระแสยุคที่สองรูปแบบต่างๆ เช่น วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบปรับค่าได้โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronically Tunable Second- Generation Current Conveyor) และวงจรสายพานกระแสยุคที่สองซึ่งควบคุมได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส (Second-Generation Current Conveyor) โดยสัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสยุคที่สอง จะแสดงดังในรูปที่ 2.2 และคุณสมบัติเนทเวอร์ค (Network) ของวงจรสายพานกระแสยุคที่สอง สามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ (Hybrid Parameter) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่พอร์ทต่างๆ ได้ดังสมการที่ (2.5)



รูปที่ 2.2 สายพานกระแสยุคที่สอง (CCII)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

จากสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

$$i_y = 0 \tag{2.6}$$

$$v_x = v_y \tag{2.7}$$

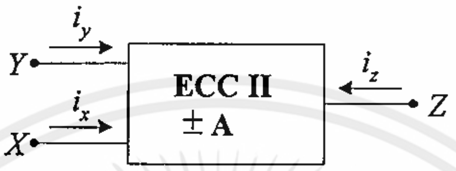
$$i_z = \pm i_x \tag{2.8}$$

จากสมการที่ (2.5) จะเห็นว่า h_{12} มีค่าเป็น 0 ทำให้ได้ค่ากระแส i_y ที่พอร์ท Y มีค่าเป็น 0 ซึ่งก็คือค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Y นั้นจะต้องมีค่าสูงมากๆ ส่วน h_{21} มีค่าเป็น 1 ทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน v_x ที่พอร์ท X กับแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y มีค่าเท่ากันและ h_{32} มีค่าเป็น ±1 ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X เป็น $i_z = \pm i_x$ ดังสมการที่ (2.8) กรณี $i_z = i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X มีทิศทางการไหลในทิศทางเดียวกัน เรียกว่าวงจรสายพานกระแสชนิดบวก (CCII+) กรณี $i_z = -i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X มีทิศทางการไหลตรงกันข้าม เรียกว่าวงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCII-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

วงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronically Tunable Second- Generation Current Conveyor : ECCII) สามารถแทนด้วยเนทเวอร์ค (Network) 3 พอร์ท คือ พอร์ท *X*, *Y* และ *Z* ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สายพานกระแสยุคที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

คุณสมบัติของเนทเวอร์ค (Network) สามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ (Hybrid Parameter) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่พอร์ทต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

จากสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$i_y = 0 \tag{2.10}$$

$$v_x = v_y \tag{2.11}$$

$$i_z = \pm A i_x \tag{2.12}$$

จากสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่า h_{32} มีค่าเป็น $\pm A$ ซึ่งสามารถปรับค่าได้ และจะทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_z ที่พอร์ท *Z* และกระแส i_x ที่พอร์ท *X* เป็น $i_z = \pm A i_x$ ดังสมการที่ (2.12) กรณี $i_z = A i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท *Z* และกระแส i_x ที่พอร์ท *X* มีทิศทางการไหลในทิศทางเดียวกัน เรียกว่า วงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าได้ชนิดบวก (ECCII+) กรณี $i_z = -A i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท *Z* และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

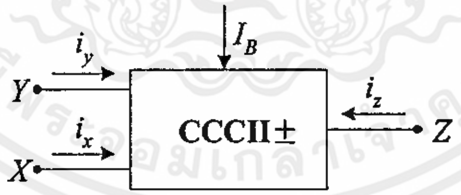
กระแส i_x ที่พอร์ท X มีทิศทางการไหลในทิศทางตรงกันข้าม เรียกว่า วงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าได้ชนิดลบ (ECCII-)

คุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสที่พอร์ทต่าง ๆ ตามสมการที่ (2.10) ถึงสมการที่ (2.12) เนทเวอร์คดังกล่าว อิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Y, Z^+ และ Z^- จะต้องมีค่าสูงมาก และอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท X จะต้องมีค่าต่ำมาก

2.3.2 วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส

วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส (Second-Generation Current Conveyor : CCCII) ได้พัฒนาขึ้นโดย A. Fabre [7-8] ซึ่งใช้วงจรทรานส์ลิเนียร์ลูป มาต่อร่วมกับวงจรสะท้อนกระแส และสามารถนำไปใช้งานได้ในย่านความถี่สูง [9] วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส จะมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับวงจรสายพานกระแสยุคที่สอง แต่จะแตกต่างกันตรงที่เมื่อใช้กระแสไบอัสป้อนให้กับวงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส ที่มีค่าไม่สูงมาก จะทำให้เกิดค่าความต้านทานแฝงปรากฏขึ้น (Parasitic Resistance) หรือค่าความต้านทานภายในเกิดขึ้นที่พอร์ท (Port) X ของวงจรสายพานกระแส (R_X) ค่าความต้านทานนี้จะแปรผกผันกับค่ากระแสไบอัสจากภายนอก และจะแปรผกผันตรงกับอุณหภูมิรอบข้าง

วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแสสามารถแทนด้วยเนทเวอร์ค (Network) 3 พอร์ท คือ พอร์ท X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส

เมื่อพิจารณารวมค่าความต้านทานภายใน R_X แล้ว จากจุด Y ถึงจุด X จะสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ในรูปทั่วไปของวงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส ดังสมการที่ (2.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_X & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

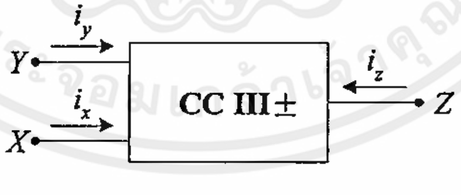
ค่า h_{22} จะเป็นค่าความต้านทานภายในที่พอร์ท X ของวงจรสายพานกระแส ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า R_X นี้ จะขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิรอบข้าง และสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการแปรค่ากระแสไบอัส I_B ซึ่งเป็นกระแสไบอัสจากภายนอกนั่นเอง โดยค่า R_X จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (2.14)

$$R_x = \frac{V_T}{2I_B} \tag{2.14}$$

เมื่อ V_T คือ แรงดันความร้อน (Thermal Voltage)

2.4 วงจรสายพานกระแสยุคที่สาม

เมื่อเร็วๆ นี้ได้มีการนำเสนอวงจรสายพานกระแสขึ้นมาใหม่อีกชนิดหนึ่ง [10] ซึ่งจะมีคุณลักษณะที่สามารถนำไปทำการตรวจจับกระแสในอุปกรณ์แบบลอยตัวได้ (Floating current sensing device) และได้ถูกนิยามขึ้นว่า วงจรสายพานกระแสยุคที่สาม (Third Generation Current Conveyor : CCIII) วงจรสายพานกระแสยุคที่สาม สามารถแทนด้วยเนทเวอร์ค (Network) 3 พอร์ท คือ พอร์ท X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สายพานกระแสยุคที่สาม

คุณสมบัติของเนทเวอร์ค (Network) สามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ (Hybrid Parameter)ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่พอร์ทต่าง ๆ ได้ดังสมการที่ (2.15)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

จากสมการที่ (2.15) จะได้ว่า

$$i_y = -i_x \tag{2.16}$$

$$v_x = v_y \tag{2.17}$$

$$i_z = \pm i_x \tag{2.18}$$

จากสมการที่ (2.15) จะเห็นว่าที่ h_{12} มีค่าเป็น -1 ซึ่งจะแตกต่างไปจากเดิมที่มีค่าเป็น 1 และ 0 เท่านั้น ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_y ที่พอร์ท Y และ กระแส i_x ที่พอร์ท X เป็น $i_y = -i_x$ h_{32} มีค่าเป็น ±1 ทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X เป็น $i_z = \pm i_x$ ดังสมการที่ (2.18) กรณี $i_z = i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X มีทิศทางการไหลในทิศทางเดียวกัน เรียกว่าวงจรสายพานกระแสชนิดบวก(CCIII+) กรณี $i_z = -i_x$ กระแส i_z ที่พอร์ท Z และกระแส i_x ที่พอร์ท X มีทิศทางการไหลตรงกันข้าม เรียกว่าวงจรสายพานกระแสชนิดลบ (CCIII-)

2.5 บทสรุป

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงหลักการทำงานพื้นฐานของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง ซึ่งวงจรสายพานกระแสยุคที่สองสามารถจำแนกออกได้เป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส และวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม รวมทั้งคุณสมบัติของเนทเวอร์ค (Network) ที่อธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ (Hybrid parameter) และสมการที่แสดงคุณลักษณะเฉพาะของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบปรับค่าโดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรสายพานกระแสยุคที่สองแบบควบคุมได้ด้วยกระแส และวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำค่าความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังกล่าวที่ได้จากสมการ โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรสายพานกระแสในแต่ละยุคจะให้ค่าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งวงจรสายพานกระแสในแต่ละยุคอาจจะเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรชนิดใดชนิดหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

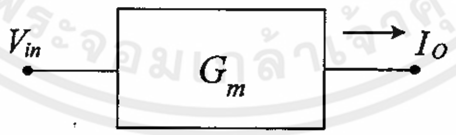
วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้โอทีเอ ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ

3.1 บทนำ

ปัจจุบันการประมวลผลสัญญาณในโหมดกระแส (Current Mode) ได้มีบทบาทอย่างมาก เนื่องจากการประมวลผลในโหมดกระแสจะมีข้อดีกว่าการประมวลผลในโหมดแรงดันหลายประการ เช่น ความถี่ในการใช้งานกว้าง (Wide Bandwidth) และช่วงปฏิบัติการทำงานกว้าง (Wide Dynamic Range) ดังนั้นวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสจึงนิยมนำมาสร้างเป็นวงจรรวมสำเร็จรูป ทำหน้าที่เปลี่ยนค่าแรงดันที่จุดเข้าให้เป็นกระแสที่จุดออกและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส วงจรขยายโอทีเอรูปแบบต่างๆ วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้โอทีเอที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิและสมรรถนะต่างๆ ของวงจร

3.2 หลักการพื้นฐาน

วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (V/I) จะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าแรงดันที่อินพุทให้เป็นกระแสที่เอาท์พุท จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ (Active Element) และทำงานในลักษณะโวล์ทเตจคอนโทรลเคอร์เรนน์ซอร์ท (Voltage Controlled Current Source : VCCS) อัตราการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (Transconductance) หรือ G_m แสดงดังรูปที่ 3.1



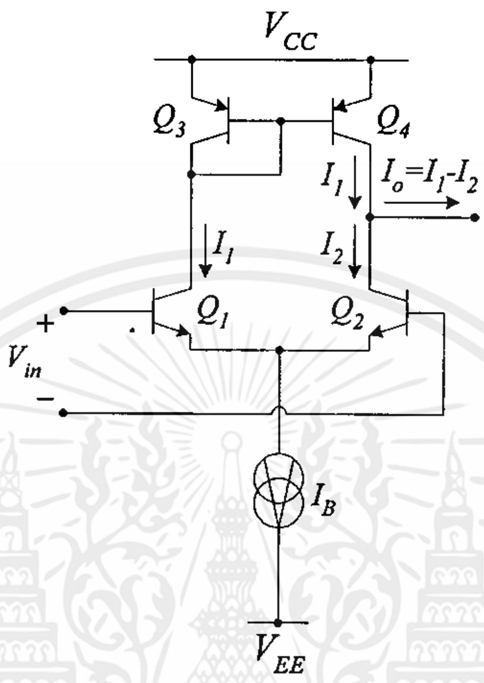
รูปที่ 3.1 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

จากรูปที่ 3.1 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันและกระแส ได้ดังสมการที่ (3.1)

$$I_O = G_m V_{in} \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายความแตกต่าง (Differential Amplifier) ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัว และแหล่งจ่ายกระแสคงที่ 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรขยายความแตกต่าง

จากวงจรในรูปที่ 3.2 จะมีทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 เป็นวงจรขยายความแตกต่างแบบดิฟเฟอร์เรนเชียล ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส ส่วนทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 เป็นวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งมีค่าอัตราการสะท้อนกระแสเท่ากับหนึ่ง โดยมีกระแส I_B เป็นกระแสไบอัสให้กับวงจร เมื่อป้อนสัญญาณแรงดันเข้ามาที่ V_{in} จะทำให้เกิดกระแส I_1 และ I_2 ขึ้นที่ Q_1 และ Q_2 ตามลำดับแล้วกระแส I_1 จะถูกสะท้อนกระแส เนื่องจากวงจรสะท้อนแบบลบของทรานซิสเตอร์ Q_3 และ Q_4 ไปหักลบออกจากกระแส I_2 ที่เกิดขึ้นที่ทรานซิส Q_2 แล้วได้กระแสออกเป็นกระแส I_O ซึ่งมีค่าเท่ากับ $I_1 - I_2$ ต่อไป

จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I_O กับค่าแรงดันที่อินพุท V_{in} ของวงจรขยายความแตกต่างในรูปที่ 3.4 มีค่าเป็นดังสมการที่ (3.2) [ดูการวิเคราะห์ได้ในภาคผนวก ก.]

$$I_O = I_B \tanh\left[\frac{V_{in}}{2V_T}\right] \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.2) สามารถหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m)ได้จาก

$$g_m = \frac{dI_o}{dV_{in}}\bigg|_{V_{in}=0}$$

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \tag{3.3}$$

ดังนั้น

$$I_o = \frac{I_B}{2V_T} V_{in}$$

$$= g_m V_{in} \tag{3.4}$$

ซึ่ง V_T คือ ค่าแรงดันความร้อน (Thermal Voltage) มีค่าประมาณ 26 mV.

3.3 วงจรขยายโอทีเอ

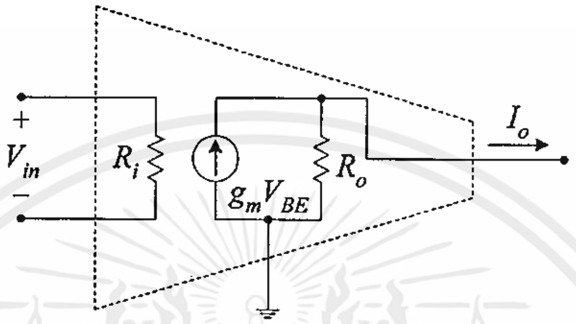
วงจรขยายทรานส์คอนดักแตนซ์ (Operational Transconductance Amplifier) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า วงจรขยายโอทีเอ (OTA) มีหลักการมาจากวงจรขยายออปแอมป์ (Operational Amplifier : Op-Amp) โดยวงจรขยายโอทีเอ (OTA) ทำหน้าที่เปลี่ยนค่าแรงดันที่อินพุทให้เป็นกระแสที่เอาท์พุท และจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีค่าแบนด์วิทธ์สูงกว่าออปแอมป์ธรรมดาทั่วไป เป็นวงจรที่ใช้งานทางด้านการประมวลผลสัญญาณแบบอนาลอกในลักษณะของโหมดกระแส (Current Mode) รวมทั้งมีการนำมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เช่น วงจรแอคทีฟฟิลเตอร์ [11-12] วงจรออสซิลเลเตอร์ วงจรสังเคราะห์ความต้านทาน [13] และวงจรขยายสัญญาณแบบอินสทรูเม้นท์ (Instrument Amplifier) [14] เป็นต้น

3.3.1 หลักการพื้นฐานโอทีเอ

วงจรขยายทรานส์คอนดักแตนซ์ (Operational Transconductance Amplifier : OTA) จัดเป็นวงจรขยายอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส และจัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ (Active Element) จะทำงานในลักษณะโวล์เตจคอนโทรลเคอร์เรนน์ซอร์ท (Voltage Controlled Current Source : VCCS) อัตราการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าเรียกว่า ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Transconductance) หรือ g_m โดยทั่วไปโอทีเอ (OTA) จะสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอยู่ในรูปแบบของวงจรรวมและมีคุณสมบัติพื้นฐานคือ มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์และเอาท์พุทอิมพีแดนซ์สูง ส่วนค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ของโอทีเอ สามารถควบคุมได้โดยกระแสไบอัสจากภายนอก สำหรับวงจรสมมูลย์ทางอุดมคติ และสัญลักษณ์ของโอทีเอจะแสดงดังในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลย์ทางอุดมคติของโอทีเอ

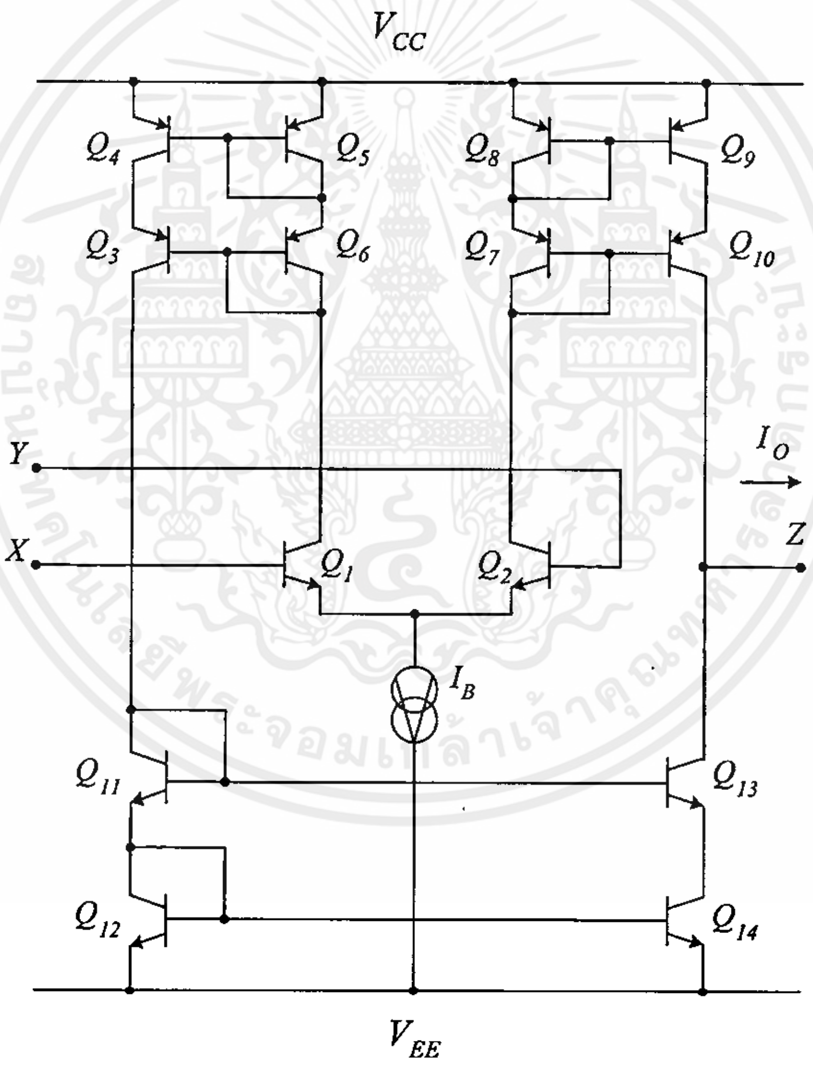
รูปที่ 3.4 สัญลักษณ์ของโอทีเอ

3.3.2 วงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว

การทำงานของวงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว (Single Output) ในรูปที่ 3.5 จะกำหนดให้ค่าอัตราการขยายกระแส (β) ของทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าสูงมาก ๆ และกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับกระแสคอลเลคเตอร์ กระแส I_B เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่คือ กระแสไบอัสของโอทีเอ โดยวงจรจะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_1 กับ Q_2 จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความแตกต่างพื้นฐาน หรือวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส โดยกระแส I_B จะแยกไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 กับ Q_2 เป็น I_{C1} และ I_{C2} ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ $I_B/2$ โดยกระแส I_{C2} จะไหลผ่านเข้าสู่วงจรสะท้อนกระแสแบบลบที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_7 ถึง Q_{10} ซึ่งมีอัตราการสะท้อนกระแสเป็นหนึ่งเท่า แล้วจะทำการสะท้อนกระแสจาก I_{C7} ซึ่งมีค่าเท่ากับ I_{C2} ไปยัง I_{C10} โดยกระแส I_{C10} จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

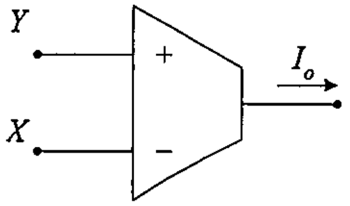
I_{C2} ในส่วนกระแส I_{C1} จะไหลเข้าสู่วงจรสะท้อนกระแสแบบลบที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_3 ถึง Q_6 ดังนั้นกระแส I_{C6} = I_{C1} จะถูกสะท้อนไปยัง I_{C3} หลังจากนั้นจะมีการสะท้อนกระแสอีกครั้งหนึ่งจาก $I_{C6} = I_{C11} = I_{C1}$ ไปยัง I_{C13} โดยวงจรสะท้อนกระแสแบบบวกที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{11} ถึง Q_{14} โดยอัตราการสะท้อนกระแสของวงจรสะท้อนกระแสทั้งสองมีค่าเป็นหนึ่งเท่า กระแส I_{C13} จะมีค่าเท่ากับ I_{C1} ซึ่งจากกระแสที่จุดออกของวงจรขยายโอทีเอ กระแส I_O จะมีค่าเท่ากับผลต่างของกระแส I_{C10} กับ I_{C13} ดังนั้นจึงทำให้กระแส I_O มีค่าเท่ากับ I_{C2} - I_{C1} หรือ I_{C10}- I_{C13} ถ้าสัญญาณอินพุท V_{in} = 0 กระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1 จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $I_B/2$ ในกรณีนี้จะพบว่าไม่มีค่ากระแสเอาท์พุท I_O ออกมา กล่าวคือกระแสเอาท์พุท I_O มีค่าเป็น 0 นั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.5 วงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 สัญลักษณ์วงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว

ในกรณีสัญญาณอินพุท V_{in} มีค่าไม่เป็นศูนย์ สัญญาณนี้จะบังคับให้กระแส I_{C1} ของ Q_1 และกระแส I_{C2} ของ Q_2 มีค่าไม่เท่ากัน เพราะเนื่องจากค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_O) และแรงดันไฟฟ้าระหว่างเบสและอิมิตเตอร์ (V_{BE}) ของทรานซิสเตอร์ อยู่ในรูปของเอกโปแนนเชียล ดังนั้นสำหรับในกรณีที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 มีความสมพงษ์กันทุกประการ จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_O กับแรงดันไฟฟ้า V_{in} จากสมการที่ (3.5) เหมือนกับสมการที่ (3.2)

$$I_O = I_B \tanh\left[\frac{V_{in}}{2V_T}\right] \tag{3.5}$$

โดยที่สามารถจะกระจายอนุกรมในเทอมของ tanh ออกได้เป็น

$$\tanh X = X - \frac{1}{3}X^3 + \frac{2}{15}X^5 - ... \tag{3.6}$$

แทนค่าสมการที่ (3.6) ในสมการที่ (3.5) จะได้

$$I_O = I_B\left[\frac{V_{in}}{2V_T}\right] - \frac{1}{3}I_B\left[\frac{V_{in}}{2V_T}\right]^3 + \frac{2}{15}I_B\left[\frac{V_{in}}{2V_T}\right]^5 - ... \tag{3.7}$$

จากสมการที่ (3.7) ถ้า $V_{in} \ll 1$ ตั้งแต่เทอมที่ 2 เป็นต้นไป จะมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นจะได้ว่า $\tanh X \cong X$ จากสมการที่ (3.7) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_O = \frac{I_B}{2V_T}V_{in} \tag{3.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

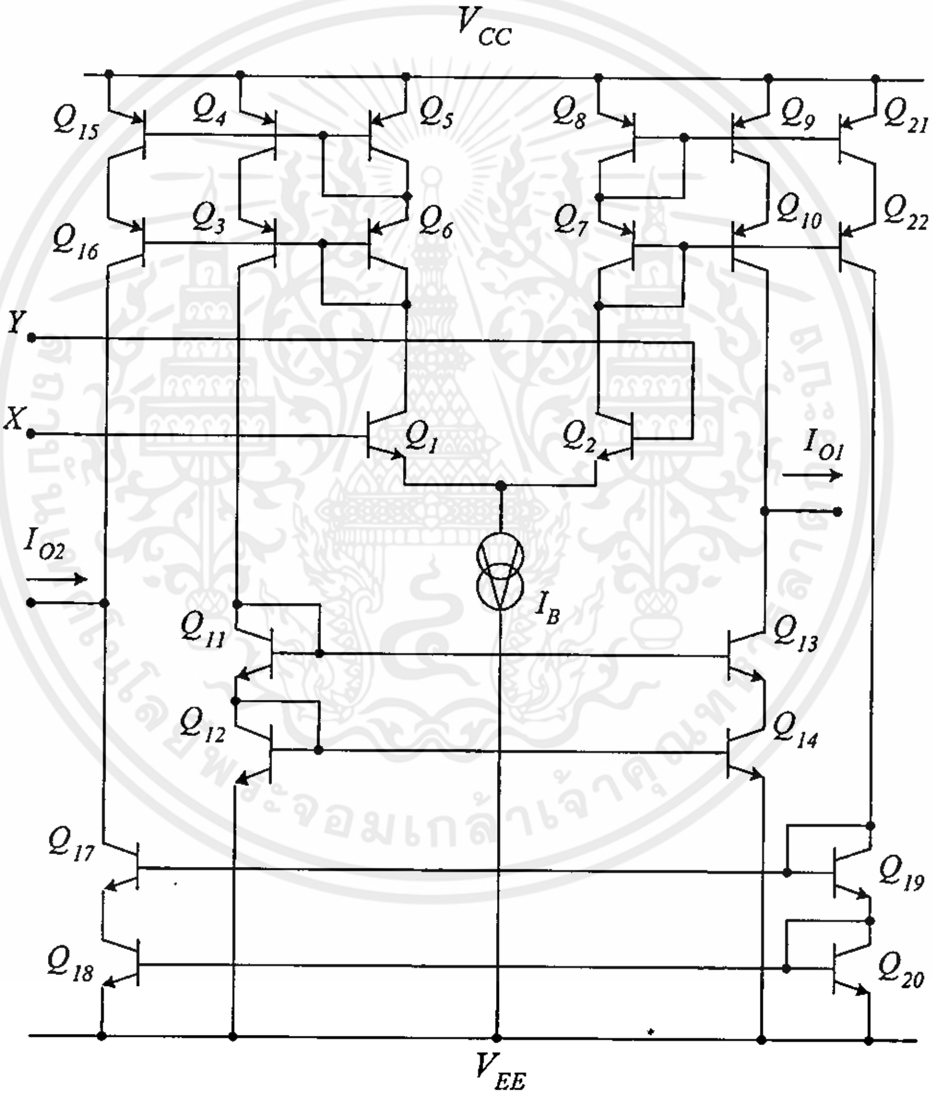
หรือ

$$I_o = g_m V_{in} \tag{3.9}$$

โดยที่

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \tag{3.10}$$

3.3.3 วงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท

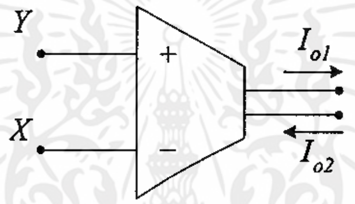


รูปที่ 3.7 วงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

43265

ในส่วนการทำงานของวงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท (Double Output) แสดงดังรูปที่ 3.7 ในส่วนของกระแส I_{O1} นั้นจะยังคงมีรูปแบบการทำงานเหมือนเดิมซึ่งมีค่าเท่ากับ I_{C2} - I_{C1} เพียงแต่กระแส I_{O2} นั้นจะทำการเพิ่มวงจรสะท้อนกระแสขึ้นมาอีกหนึ่งชุด ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{17} ถึง Q_{20} และชุดสำเนากระแส (Copy) สองชุดประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{15} กับ Q_{16} และ Q_{21}กับ Q_{22} โดยที่กระแส I_{C3} จะถูกสำเนา (Copy) มีค่าเท่ากับ $I_{C16} = I_{C1}$ และกระแส I_{C10} จะถูกสำเนา (Copy) มีค่าเท่ากับ $I_{C22} = I_{C2}$ และจะไหลเข้าสู่วงจรสะท้อนกระแสแบบบวกที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{17} ถึง Q_{20} ด้วยอัตราการสะท้อนเป็นหนึ่งเท่า ดังนั้นกระแส $I_{C22} = I_{C17} = I_{C2}$ ซึ่งจากกระแสเอาท์พุทของวงจรขยายโอทีเอที่เพิ่มขึ้น จะมีค่าผลต่างของกระแส I_{C16} กับ I_{C17} ดังนั้นจึงทำให้กระแส I_{O2} มีค่าเท่ากับ I_{C2} - I_{C1} หรือ I_{C17}- I_{C16} นั่นเอง

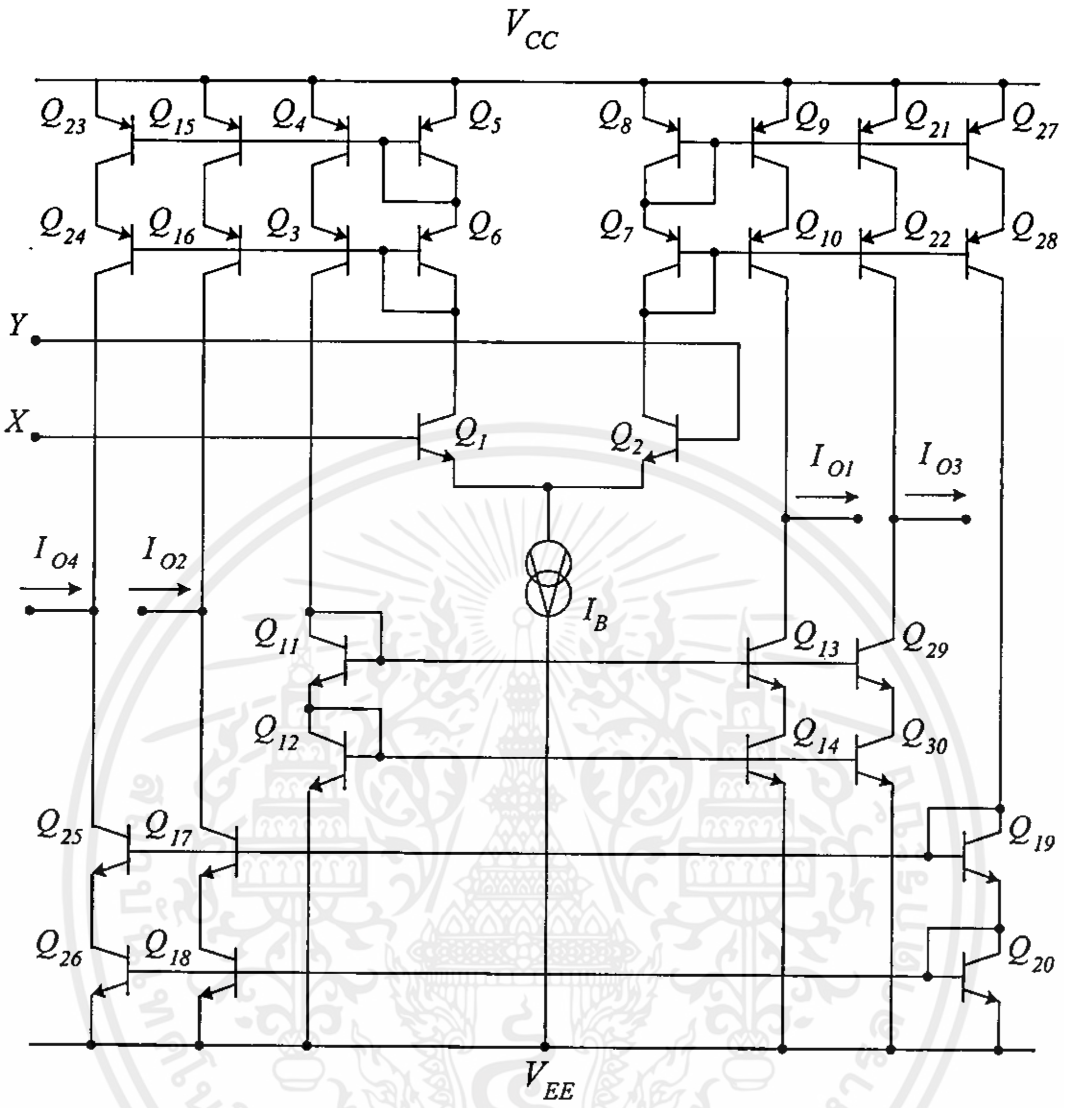


รูปที่ 3.8 สัญลักษณ์วงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท

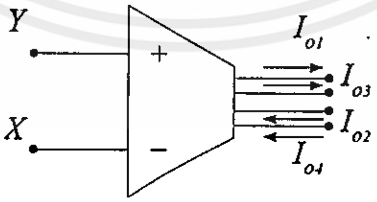
3.3.4 วงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท

ในส่วนการทำงานของวงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท (Multi-Output) ในรูปที่ 3.9 จะทำการเพิ่มวงจรสำเนากระแส (Copy) ขึ้นมาอีกสี่ชุด ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{23} ถึง Q_{30} โดยที่กระแส I_{C13} จะถูกสำเนา มีค่าเท่ากับ $I_{C29} = I_{C1}$ และกระแส I_{C10} จะถูกสำเนา มีค่าเท่ากับ $I_{C22} = I_{C2}$ โดยที่กระแสเอาท์พุท (I_{O3}) อีกชุดหนึ่งของวงจรจะมีค่าผลต่างเท่ากับกระแส I_{C22} - I_{C29} ส่วนกระแส I_{C16} จะถูกสำเนามีค่าเท่ากับ $I_{C24} = I_{C1}$ และกระแส I_{C22} จะถูกสำเนา (Copy) มีค่าเท่ากับ $I_{C28} = I_{C2}$ และจะไหลเข้าสู่วงจรสะท้อนกระแสแบบบวกที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{17} ถึง Q_{20} ด้วยอัตราการสะท้อนเป็นหนึ่งเท่า ดังนั้นกระแส I_{C17} มีค่าเท่ากับ $I_{C28} = I_{C2}$ และจะถูกสำเนา มีค่าเท่ากับ I_{C25} ซึ่งจากกระแสเอาท์พุท (I_{O4}) ของวงจรที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าผลต่างเท่ากับกระแส I_{C25} - I_{C24}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท



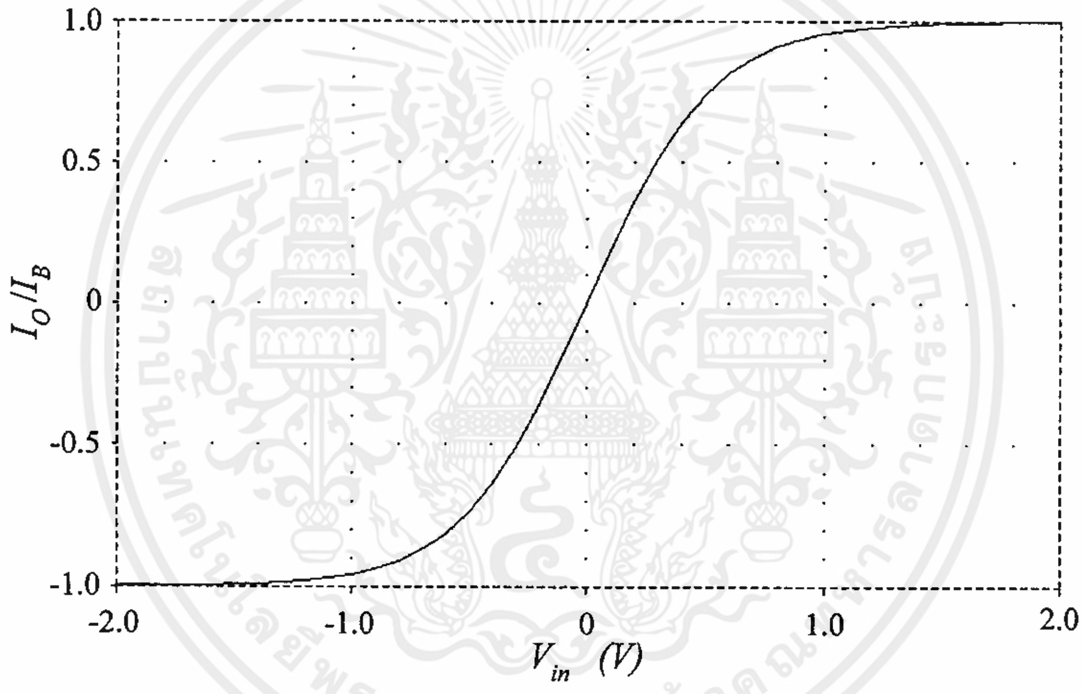
รูปที่ 3.10 สัญลักษณ์วงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ช่วงปฏิบัติงาน

จากสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.5) สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสเอาท์พุท I_{O1} กับค่าแรงดันอินพุท V_{in} ได้ดังรูปที่ 3.11 จากกราฟจะพบว่าค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์จะมีความสัมพันธ์อยู่ในลักษณะของฟังก์ชั่นไฮเปอร์โบล่าแทนเจนท์ (Hyperbolic – Tangent) โดยในช่วงเชิงเส้นจะอยู่ในช่วงแคบๆ แล้วจากนั้นก็จะเข้าสู่ช่วงอิ่มตัว

จากรูปที่ 3.11จะเห็นได้ว่าช่วงปฏิบัติงานของแรงดันอินพุท V_{in} จะมีค่าเป็นเชิงเส้น ซึ่งจะอยู่ในช่วง โดยประมาณมีค่าเท่ากับ ± 25 mV.

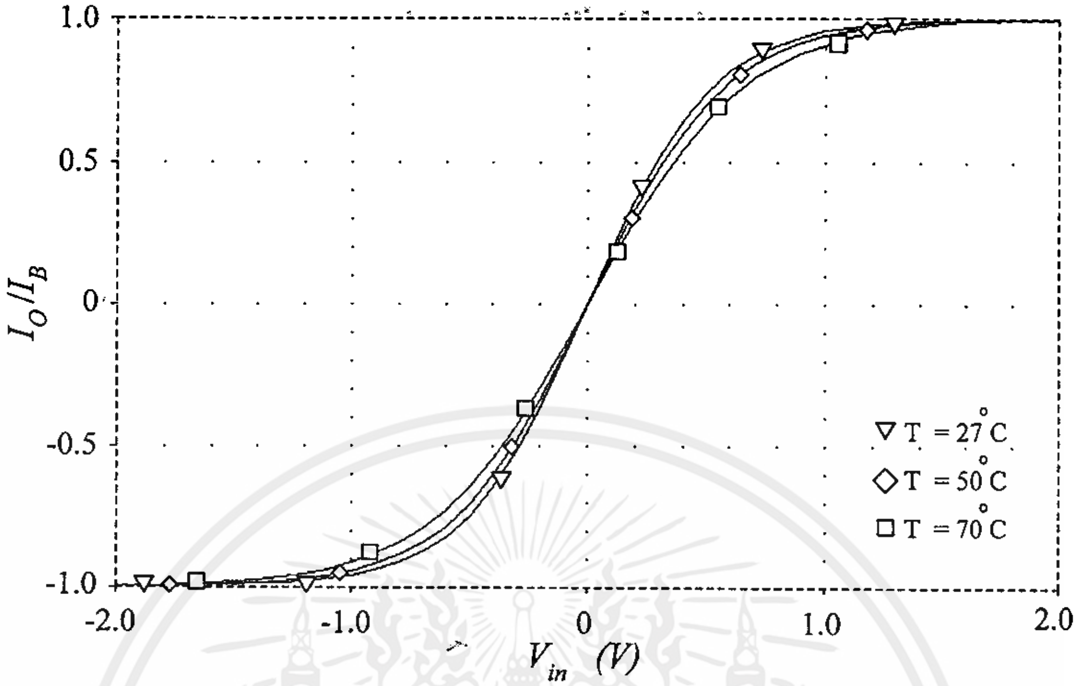


รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเอาท์พุทกับแรงดันอินพุท

3.3.6 ค่าอุณหภูมิในโอทีเอ

จากสมการที่ (3.10) พบว่าค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (g_m) ของวงจรที่เกิดขึ้นสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้จากค่าของกระแส I_B ซึ่งทำให้วงจรดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมค่า g_m ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปแปรผกผันไปตามค่าของ V_T

เอกสารนี้...ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเอาท์พุทกับอุณหภูมิ

โดยที่

$$V_T = \frac{kT}{q} \tag{3.11}$$

k = ค่าคงที่ของ Boltzmann'Constant มีค่าเท่ากับ 1.38 X 10^{-23} J/°K

T = ค่าอุณหภูมิรอบข้าง

q = ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (Electron Charge) มีค่าเท่ากับ 1.602 X 10^{-19} C

แทนค่าสมการที่ (3.11) ลงในสมการที่ (3.10) จะได้

$$I_o = \frac{I_B}{\frac{2kT}{q}} V_{in}$$

(3.12)

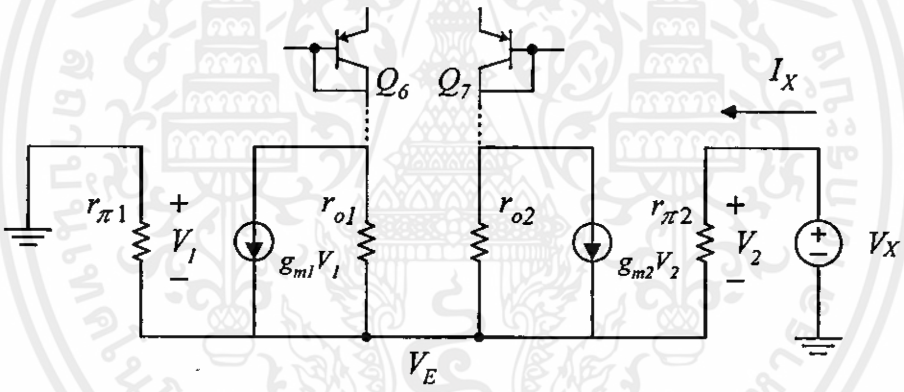
$$I_o = \frac{q}{2kT} I_B V_{in}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (3.12)จะเห็นว่าค่ากระแสเอาท์พุท I_O จะแปรผกผันกับค่าของอุณหภูมิ(T) ซึ่งถ้าค่าอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นค่าของกระแสเอาท์พุท I_O ก็จะมีค่าลดลง หรือสรุปได้ว่ากระแสเอาท์พุท I_O จะขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิรอบข้างด้วย รูปที่ 3.12 จะแสดงผลของอุณหภูมิที่มีผลกระทบต่อค่ากระแสเอาท์พุท โดยจะกำหนดให้ค่าอุณหภูมิ มีค่าเป็นดังนี้ 27°C, 50°C และ 70°C จากกราฟจะพบว่าค่ากระแสเอาท์พุท I_O จะมีค่าลดลงเมื่อค่าของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

3.3.7 ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของโอทีเอ

การหาค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุทของโอทีเอจะหาได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์อินพุทของโอทีก็คือ ความต้านทานทางอินพุทของวงจรขยายความแตกต่างของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 นั่นเอง จะสามารถหาค่าได้โดยแทนวงจรสมมูลย์ของสัญญาณขนาดใหญ่ลงในรูปที่ 3.5 จะได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลย์ของวงจรขยายความแตกต่าง

จากรูปที่ 3.13 กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน r_{o1} และ r_{o2} ซึ่งจะมีค่าน้อยมากสามารถที่จะไม่นำมาพิจารณาได้

พิจารณาที่ Node V_E จะได้

$$\frac{V_1}{r_{\pi 1}}+g_{m1}V_1+\frac{V_2}{r_{\pi 2}}+g_{m2}V_2=0 \qquad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$V_1 = V_2 - V_X \tag{3.14}$$

แทนค่าสมการที่ (3.14) ลงในสมการที่ (3.13) จะได้

$$\left(\frac{1}{r_{\pi 2}} + g_{m2}\right)V_X = \left(\frac{1}{r_{\pi 1}} + g_{m1} + \frac{1}{r_{\pi 2}} + g_{m2}\right)V_1 \tag{3.15}$$

ซึ่ง

$$V_2 = I_X r_{\pi 2} \tag{3.16}$$

แทนค่าสมการที่ (3.16) ลงในสมการที่ (3.15) โดยที่ $r_\pi = r_{\pi 1} = r_{\pi 2}$ และ $g_m = g_{m1} = g_{m2}$ จะได้ว่า

$$R_i = \frac{V_X}{I_X} = 2r_\pi \tag{3.17}$$

โดยที่ R_i คือ ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของโอทีเอ

3.3.8 ค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของโอทีเอ

การหาค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาท์พุทของโอทีเอจะหาได้โดยพิจารณาจากวงจรในรูปที่ 3.5 จะได้เท่ากับความต้านทานที่จุดออกของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด 2 ชุด ซึ่งต่อขนานกันอยู่จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ Q_7 ถึง Q_{10} [ดูการวิเคราะห์ได้ในภาคผนวก ข] และทรานซิสเตอร์ Q_{11} ถึง Q_{14} ดังนั้นค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ จะมีค่าดังสมการที่ (3.18)

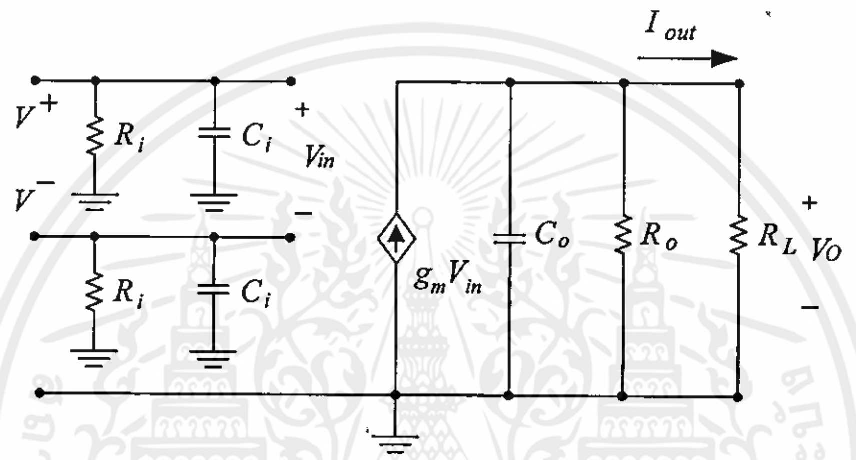
$$R_O = \frac{\beta_{PNP}\, r_{o10}}{2} \,//\, \frac{\beta_{NPN}\, r_{o13}}{2} \tag{3.18}$$

โดยที่ R_O คือ เอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของโอทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของโอทีเอ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในทุกระบบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะมีค่าโพลที่มีค่านัยสำคัญที่สุดอยู่หนึ่งโพล (Single Dominante Pole) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกให้รู้ว่า วงจรนั้นสามารถที่จะมีผลตอบสนองทางความถี่ได้ดีที่สุดที่ความถี่เท่าไหร่ โดยในวงจรขยายโอทีเอก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นเราสามารถที่จะแสดงค่าโมเดลของสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Model) ของโอทีเอดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โมเดลของสัญญาณขนาดเล็กของโอทีเอ

R_i คือ ความต้านทานทางด้านอินพุทของโอทีเอ

R_o คือ ความต้านทานทางด้านเอาท์พุทของโอทีเอ

C_i คือ คาปาซิแตนซ์ทางด้านอินพุทของโอทีเอ

C_o คือ คาปาซิแตนซ์ทางด้านเอาท์พุทของโอทีเอ

โดยที่มีค่าฟังก์ชั่นการส่งผ่าน (Transfer Function) ของกระแสต่อแรงดัน [15] จะแสดงได้ดังสมการที่ (3.19)

$$I_{O(s)} = \frac{g_m}{1+\frac{s}{\omega_c}} V_{in(s)} \tag{3.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง

g_m คือ ทรานส์คอนดักแตนซ์ของโอทีเอ

ω_c คือ ค่าความถี่คัทออฟที่ –3dB (Cutoff Frequency)

จากรูปที่ 3.14 จะสามารถหาค่าอัตราขยายแรงดันของสัญญาณขนาดเล็ก $\left(\frac{V_O}{V_{in}}\right)$ ได้มีค่าเท่ากับ

$$A_{v(j\omega)} = \frac{g_m(R_o \,//\, R_L)}{1 + j\omega(R_o \,//\, R_L)C_o} \tag{3.20}$$

หรือ

$$A_{v(S)} = \frac{A_{vo}}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \tag{3.21}$$

ซึ่งค่าความถี่คัทออฟที่ –3dB จะมีค่าเท่ากับ

$$\omega_c = \frac{1}{(R_o \,//\, R_L)C_o} \tag{3.22}$$

อัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) ที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเป็น

$$A_{vo} = \frac{qI_B}{2K_T}(R_o \,//\, R_L) \tag{3.23}$$

โดยจะขึ้นอยู่กับกระแสไบอัสจากภายนอก จากคุณลักษณะนี้เราจะได้ว่าค่าความถี่ที่มีอัตราขยายมีค่าเท่ากับหนึ่ง (Unity Gain Frequency) หรือผลของอัตราขยายแบนวิดส์ (GBW:Gain Bandwidth Product) มีค่าเท่ากับ

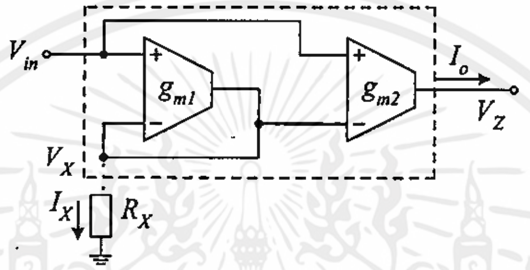
$$GBW = A_{vo}\omega_c = \frac{g_m}{C_o} \tag{3.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

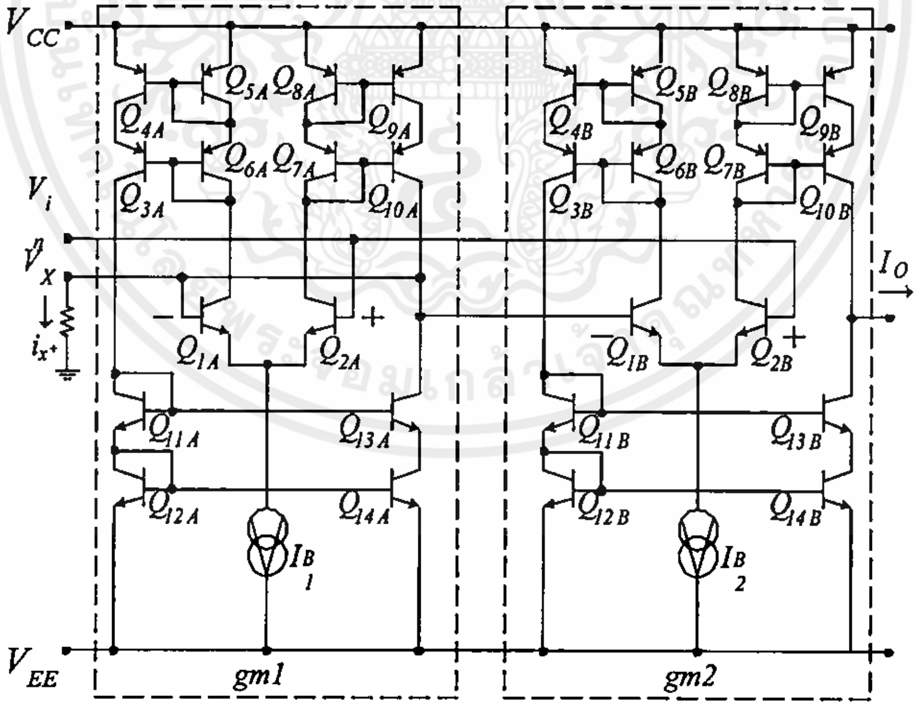
3.4 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสที่ได้นำเสนอนี้ จะมีข้อดีกว่าแบบเดิมที่ใช้ OTA เพียงตัวเดียว ซึ่งข้อดีคือ ช่วงปฏิบัติงานของสัญญาณอินพุทกว้างขึ้นและผลของอุณหภูมิจะลดลง อีกทั้งยังปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

3.4.1 หลักการทำงานของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส



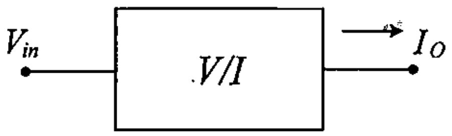
รูปที่ 3.15 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้วงจรขยายโอทีเอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.16 วงจรภายในของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้วงจรขยายโอทีเอ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ... ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 สัญลักษณ์วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

หลักการของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้วงจรขยายโอทีเอ แสดงในรูปที่ 3.15 โดยที่กระแส I_{B1} และ I_{B2} เป็นกระแสไบอัสจากภายนอกของ OTA_1 และ OTA_2 ตามลำดับ ค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (g_m) ของวงจรขยายโอทีเอจะมีค่าเท่ากับ $I_B/2V_T$ เมื่อ V_T คือ แรงดันความร้อน การทำงานของวงจร เมื่อให้แรงดัน $V_{in} > 0$ เข้าที่ขาอินพุท (+) ของ OTA_1 แรงดัน V_{in} จะถูกส่งผ่านไปยังขาอินพุท (-) ของ OTA_1 มีค่าเท่ากับ V_X แรงดัน V_X จะถูกเปลี่ยนเป็นกระแส $I_X = V_X/R$ ในขณะเดียวกันขาอินพุทของ OTA_2 จะต่ออยู่กับแรงดัน V_{in} และ V_X ด้วย จึงทำให้เกิดกระแส I_O ที่เอาท์พุทของ OTA_2 ซึ่ง OTA_1 และ OTA_2 นี้ สามารถแปรค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ได้โดยการแปรค่ากระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} ตามลำดับทำให้กระแส I_O จะถูกขยายให้มีค่ามากหรือน้อยกว่า I_X ได้

จากรูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_X และกระแส I_O จะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้
พิจารณาที่ OTA_1 จะได้ว่า

$$I_x = g_{m1}(V_{in} - V_x) \tag{3.25}$$

และ

$$V_x = I_x R_x \tag{3.26}$$

แทนสมการที่ (3.25) ลงในสมการที่ (3.26) จะได้

$$V_x = \frac{g_{m1}R_x}{1+g_{m1}R_x} V_{in} \tag{3.27}$$

จากสมการที่ (3.27) เนื่องจาก $g_{m1}R_x >> 1$ จะได้ $V_x \approx V_{in}$
พิจารณาที่ OTA_2 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_o = g_{m2}(V_{in} - V_x) \tag{3.28}$$

แทนค่าสมการที่ (3.27) ลงในสมการที่ (3.28)

$$I_o = \frac{g_{m2}}{1 + g_{m1} R_x} V_{in} \tag{3.29}$$

จากสมการที่ (3.26) สมการที่ (3.27) และสมการที่ (3.29) จะได้

$$I_o = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} \frac{V_x}{R_x} \tag{3.30}$$

หรือ

$$I_o = \frac{g_{m2}}{g_{m1}} I_x \tag{3.31}$$

โดย $g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}$ และ $g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T}$ แทนค่าในสมการที่ (3.31)

$$I_o = \frac{I_{B2}}{I_{B1}} I_x \tag{3.32}$$

$$= A_i I_x$$

เมื่อ A_i คือ ค่าอัตราขยายกระแสระหว่าง I_{B2} กับ I_{B1}

ซึ่งจากสมการที่ (3.32) ค่ากระแส I_O จะขึ้นอยู่กับกระแส I_{B1} และ I_{B2} โดยไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เนื่องจากค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ g_{m1} และ g_{m2} ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิได้ถูกชดเชยออกไปและอัตราขยายของกระแสไบอัส A_i สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

3.4.2 การหาค่าคลาดเคลื่อนของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

จากสมการที่ (3.27) และสมการที่ (3.29) สามารถหาค่าคลาดเคลื่อน (error) วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสของแรงดัน V_{in} ไปยัง V_X และกระแส I_X ไปยัง I_O ได้ในเทอมของ ε_a ดังนี้

จากสมการที่ (3.27) และสมการที่ (3.29) สามารถเขียนใหม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_x = (1-\varepsilon_a)\, V_{in} \tag{3.33}$$

และ

$$I_o = (1-\varepsilon_a)\frac{I_{B2}}{I_{B1}}\frac{V_{in}}{R_x}$$

$$= (1-\varepsilon_a)\, AG \frac{V_{in}}{R_x} \tag{3.34}$$

โดยที่

$$\varepsilon_a = \frac{1}{1+g_{m1}R_x} \tag{3.35}$$

จากสมการที่ (3.35) ถ้ากำหนดให้ $g_{m1} = 19.2 \times 10^{-3}$ A/V และ R = 10 KΩ จะได้ค่า ε_a เท่ากับ 0.5% ซึ่งจะเห็นได้ว่า ε_a จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าความเที่ยงตรงของวงจรต่ออุณหภูมิสามารถลดลงได้โดยการเพิ่มค่า $g_{m1}R >> 1$

3.4.3 ช่วงปฏิบัติงานแรงดันด้านอินพุทของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (V/I) โดยใช้หลักการของโอทีเอ (OTA) ซึ่งกำหนดให้ I_{B1} และ I_{B2} เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ และจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของ (OTA) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.30) จะเห็นได้ว่า g_{m1} และ g_{m2} ที่เคยขึ้นกับค่าของอุณหภูมิจะถูกชดเชยไป

จากสมการที่ (3.29) สามารถเขียนช่วงปฏิบัติงานได้ดังนี้

$$I_o = \frac{I_{B2}}{2V_T + I_{B1}R_x} V_{in} \tag{3.36}$$

ถ้ากำหนดให้กระแส I_o เท่ากับกระแส I_{B2} ดังนั้นจากสมการที่ (3.36) จะได้

$$V_{in} = 2V_T + I_{B1}R_x \tag{3.37}$$

จากสมการที่ (3.37) จะได้ว่าช่วงปฏิบัติงานของสัญญาณจุดเข้า V_{in} เป็นตามสมการที่ (3.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-2V_T - I_{B1} R_x \le V_{in} \le 2V_T + I_{B1} R_x \tag{3.38}$$

จากรูปที่ 3.16 พิจารณาแรงดันด้านอินพุท กรณีสัญญาณอินพุทเป็นบวกจะได้ว่า

$$V_{CC} = V_{EB8A} + V_{EB7A} - V_{BE2A} + V_{CE2A(sat)} + V_{in} \tag{3.39}$$

กำหนดให้ $|V_{BE8}| = |V_{BE7}| = V_{BE2} = V_{BE}$ แทนค่าในสมการที่ (3.39) จะได้

$$V_{in} = V_{CC} - V_{BE} - V_{CE2A(sat)} \tag{3.40}$$

กรณีสัญญาณอินพุทเป็นลบจะได้ว่า

$$V_{EE} = V_{BE2A} + V_{sat} - V_{in} \tag{3.41}$$

กำหนดให้ $V_{BE2} = V_{BE}$ จะได้

$$V_{in} = -(V_{EE} - V_{BE} - V_{sat}) \tag{3.42}$$

จากสมการที่ (3.40) และสมการที่ (3.42) จะได้ช่วงปฏิบัติงานของสัญญาณจุดเข้า V_{in} เป็นตามสมการที่ (3.43)

$$-(V_{EE} - V_{BE} - V_{sat}) \le V_{in} \le V_{CC} - V_{BE} - V_{CE2A(sat)} \tag{3.43}$$

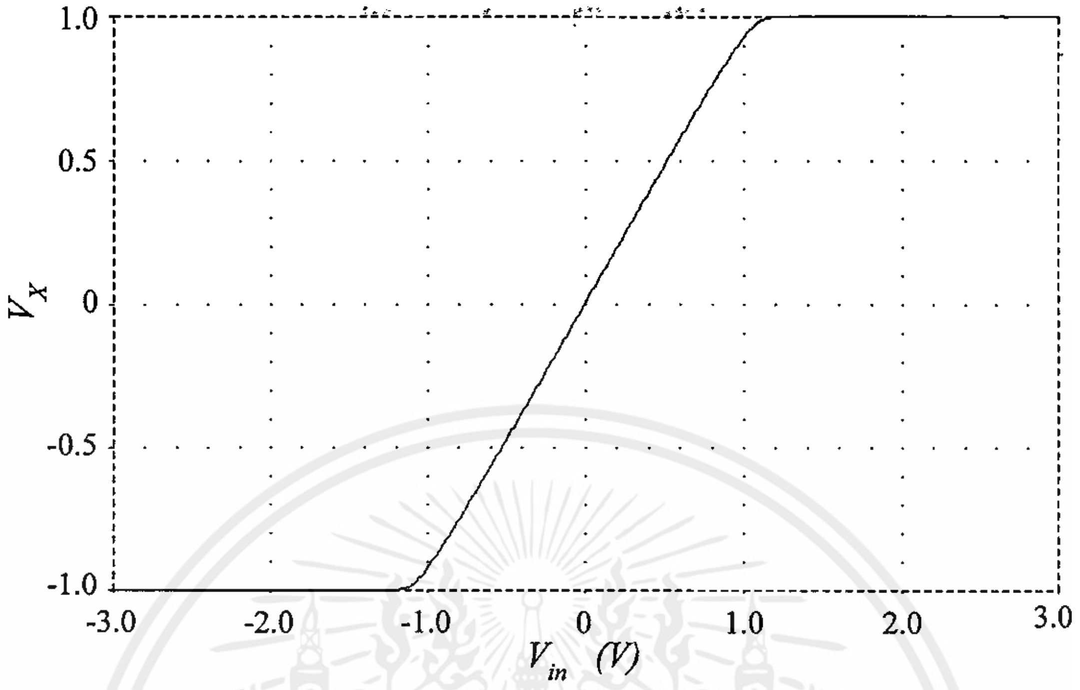
$V_{CE(sat)}$ คือ แรงดันที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานช่วงอิ่มตัว

V_{sat} คือ แรงดันอิ่มตัวของแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (I_B)

จากสมการที่ (3.38) และสมการที่ (3.43) สามารถกำหนดช่วงปฏิบัติงานได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{in} \le 2V_T + I_{B1} R_x$$



รูปที่ 3.18 ช่วงปฏิบัติงานของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

ดังนั้น ถ้ากำหนดให้กระแส I_{B1} และความต้านทาน R_X มีค่าเท่ากับ 100μA, $R = 10\text{K}\Omega$ ตามลำดับ จะได้ช่วงปฏิบัติงานของสัญญาณแรงดันจุดเข้าสูงสุดที่วงจรสามารถทำงานได้มีค่าประมาณ 1V ตามรูปที่ 3.18

3.4.4 ช่วงปฏิบัติงานแรงดันด้านเอาท์พุทของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

จากรูปที่ 3.16 สามารถหาแรงดันด้านเอาท์พุทของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสได้ดังนี้ กรณีสัญญาณอินพุทเป็นบวกจะได้ว่า

$$V_{CC} = V_{EC9B} + V_{EC10B(sat)} + V_Z \quad (3.44)$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$V_{EC9B} = V_{EB9B} + V_{EB7B} - V_{EB10B} \quad (3.45)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดั... ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $|V_{BE9}| = |V_{BE7}| = |V_{BE10}| = V_{BE}$ แทนค่าในสมการที่ (3.45) จะได้

$$V_{CE9B} = V_{BE} \tag{3.46}$$

แทนค่าสมการที่ (3.46) ลงในสมการที่ (3.44)

$$V_Z = V_{CC} - V_{BE} - V_{EC10B(sat)} \tag{3.47}$$

กรณีสัญญาณอินพุทเป็นลบจะได้ว่า

$$V_{EE} = V_{CE13B(sat)} + V_{CE14B} - V_Z \tag{3.48}$$

โดยที่

$$V_{CE14B} = V_{BE14B} + V_{BE11B} - V_{BE13B} \tag{3.49}$$

กำหนดให้ $V_{BE14} = V_{BE11} = V_{BE13} = V_{BE}$ แทนค่าลงในสมการที่ (3.49) จะได้

$$V_{CE14B} = V_{BE} \tag{3.50}$$

แทนค่าสมการที่ (3.50) ลงในสมการที่ (3.48) จะได้

$$V_Z = -(V_{EE} - V_{BE} - V_{CE13B(sat)}) \tag{3.51}$$

จากสมการที่ (3.47) และสมการที่ (3.51) จะได้ช่วงปฏิบัติงานของสัญญาณจุดออก V_Z เป็นตามสมการที่ (3.52)

$$-(V_{EE} - V_{BE} - V_{CE13B(sat)}) \le V_Z \le V_{CC} - V_{BE} - V_{EC10B(sat)} \tag{3.52}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ประโยชน์ทางการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 ผลของอุณหภูมิของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

ในการวิเคราะห์ค่าความไว (Sensitivity) ของวงจรที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นการจัดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติบางอย่างที่จะมีผลต่อส่วนประกอบส่วนใดส่วนหนึ่งหรือหลายๆ ส่วนในวงจรนั้นๆ ซึ่งวงจรที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิควรจะให้มีความไวต่ำที่สุดเพื่อรักษาเสถียรภาพของวงจรโดยสมการความไวของวงจรสามารถเขียนได้ดังนี้

$$S_X^Y = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln X} = \frac{\partial Y/Y}{\partial X/X} \tag{3.53}$$

จากสมการที่ (3.53) เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยของ Y ต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยของ X ซึ่งโดยทั่วๆ ไปแล้วค่า Y จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ X ที่เปลี่ยนแปลงไป

การวิเคราะห์หาค่าความไว ซึ่งเป็นตัวบอกประสิทธิภาพของวงจรได้ คือ ความไวของกระแสเอาท์พุทเทียบกับอุณหภูมิ จะมีสมการ คือ

$$S_T^{I_O} = \frac{T}{I_Z}\frac{\partial I_O}{\partial T} \tag{3.54}$$

จากสมการที่ (3.36) สามารถหาค่าความไวของกระแส I_o เทียบกับอุณหภูมิ T ได้เป็น

$$S_T^{I_O} = -\frac{2V_T}{2V_T + I_{B1}R_x} \tag{3.55}$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปของค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกระแสเอาท์พุทได้

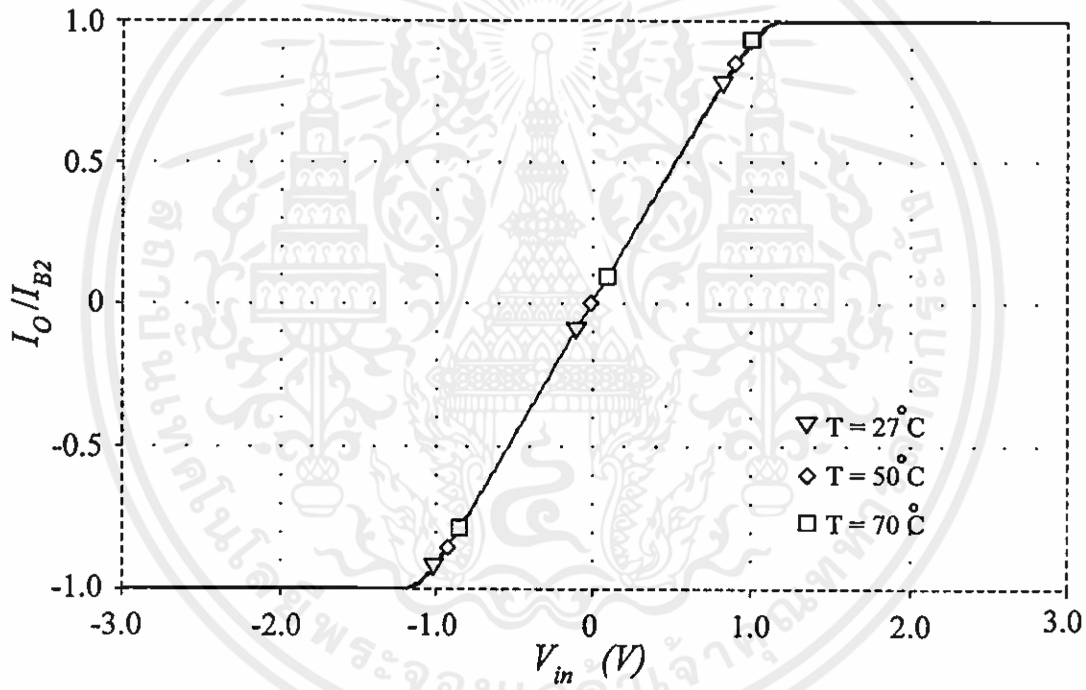
$$\frac{\delta I_O}{I_O} \geq -\frac{2V_T}{2V_T + I_{B1}R_x}\ \frac{\Delta T}{T} \times 100\% \tag{3.56}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ T คืออุณหภูมิรอบข้าง และ ΔT คือ อุณหภูมิรอบข้างที่เปลี่ยนไป ถ้า V_T = 26 mV., I_{B1} = 100μA, R = 10KΩ และ ΔT = 10°C ค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของกระแสเอาท์พุท I_O มีค่าประมาณ 0.2 %

ซึ่งจากสมการที่ (3.55) ค่าความไวของกระแสเอาท์พุทเทียบกับอุณหภูมิจะลดลง ถ้าเพิ่มค่า $g_{m1}R_X$ เพราะค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) จะมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นกับกระแส I_B

จากรูปที่ 3.19 แสดงผลของกระแส I_O/I_B เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 27°C, 50°C และ 70°C ตามลำดับจะเห็นได้ว่าผลของกราฟที่แสดงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแส I_O/I_B เมื่อเทียบผลกับรูปที่ 3.12

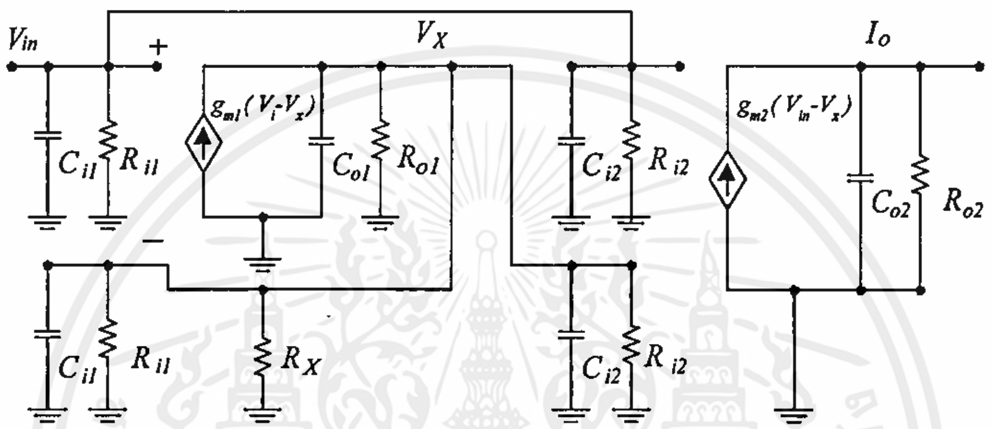


รูปที่ 3.19 ผลของอุณหภูมิของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

การวิเคราะห์ผลผลตอบสนองทางความถี่ของโอทีเอที่ต่อเป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันกระแส ดังรูปที่ 3.15 จะประกอบไปด้วยสองส่วน โดยส่วนแรกนั้นพิจารณาที่ OTA_1 กับความต้านทาน โดยกระแสเอาท์พุท I_{O1} ของโอทีเอจะถูกป้อนกลับ (Feedback) มาต่อกับขาแรงดันกลับเฟสของโอทีเอ (Inverting) ที่จุด X ซึ่งจะเรียกว่าลูปปิด (Close Loop) จะมีผลทำให้ค่าความถี่คัทออฟของโอทีเอมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.20 แสดงวงจรสมมูลย์ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

จากรูปที่ 3.20 โดยที่ค่าความต้านทานภายในตัวโอทีเอมีค่าสูงมากๆ จะวิเคราะห์ได้ดังนี้

พิจารณาที่ Node V_X จะได้

$$\frac{V_X}{R_X}+\frac{V_X}{R_{i1}}+\frac{V_X}{R_{i2}}+\frac{V_X}{R_{o1}}+sC_{i1}V_X+sC_{i2}V_X+sC_{o1}V_X=g_{m1}(V_{in}-V_X)$$

$$\left(g_{m1}+\frac{1}{R_X}+\frac{1}{R_{i1}}+\frac{1}{R_{i2}}+\frac{1}{R_{o1}}+sC_{i1}+sC_{i2}+sC_{o1}\right)V_X=g_{m1}V_{in} \tag{3.57}$$

จากสมการที่ (3.57) $\frac{1}{R_X}\gg\frac{1}{R_{i1}},\frac{1}{R_{i2}}$ และ $\frac{1}{R_{o1}}$ จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ ... เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(g_{m1}+\frac{1}{R_X}+sC_{i1}+sC_{i2}+sC_{o1}\right)V_X=g_{m1}V_{in} \tag{3.58}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{V_X}{V_{in}} = \frac{g_{m1}}{g_{m1} + \frac{1}{R_X} + sC_{i1} + sC_{i2} + sC_{o1}}$$

$$= \frac{g_{m1} R_X}{1 + g_{m1} R_X + R_X s(C_{i1} + C_{i2} + C_{o1})} \qquad (3.59)$$

กำหนดให้

$$g_{m1} = g_m(S) = \frac{g_m}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \qquad (3.60)$$

แทนค่า g_{m1} จากสมการที่ (3.60) ลงในสมการที่ (3.59) จะได้

$$\frac{V_X}{V_{in}} = \frac{g_m R_X}{1 + g_m R_X + \frac{s}{\omega_c} + R_X s(C_{i1} + C_{i2} + C_{o1}) + \frac{s^2 (C_{i1} + C_{i2} + C_{o1}) R_X}{\omega_c}}$$

$$= \frac{g_m R_X}{1 + g_m R_X} \left[\frac{1}{1 + \frac{\left(\frac{1}{\omega_c} + R_X (C_{i1} + C_{i2} + C_{o1}\right) s}{(1 + g_m R_X)} + \frac{\frac{s^2 (C_{i1} + C_{i2} + C_{o1}) R_X}{\omega_c}}{(1 + g_m R_X)}} \right] \qquad (3.61)$$

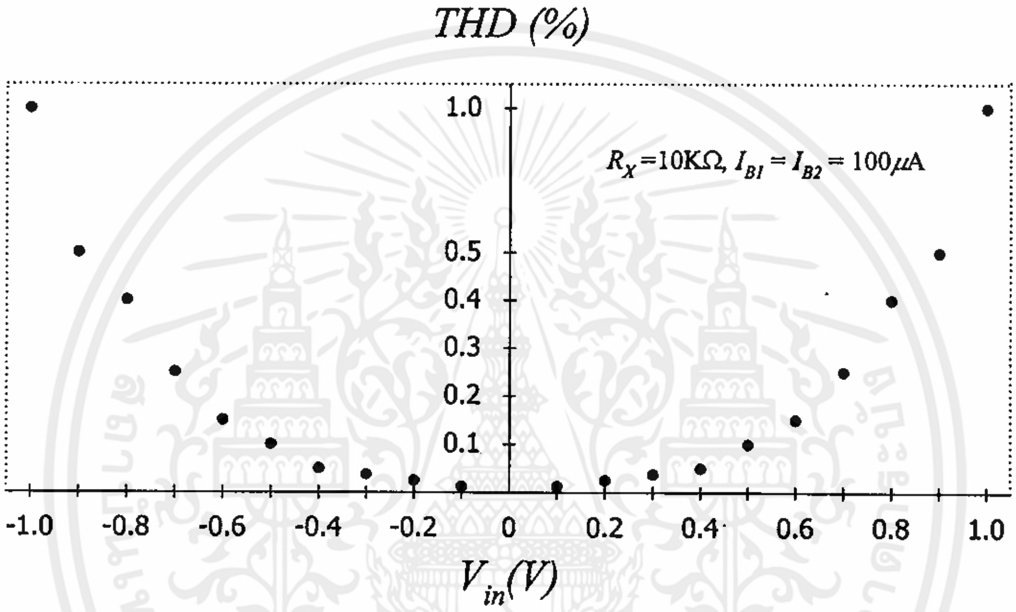
โดยที่ค่าความถี่คัทออฟที่ –3dB มีค่าเท่ากับ

$$\omega'_c = \left(\frac{\omega_c (1 + g_m R_X)}{(C_{i1} + C_{i2} + C_{o1}) R_X} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

ในการวิเคราะห์ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion : THD) ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสดังรูปที่ 3.16 โดยการป้อนสัญญาณอินพุทให้กับวงจรแล้วทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาท์พุทที่ได้ของวงจร โดยจะดูว่าสัญญาณเอาท์พุทนั้นเกิดความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณอินพุทเดิมหรือไม่ จะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ THD ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสได้ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงค่า THD ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

3.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส วงจรขยายความแตกต่างวงจรขยายโอทีเอแบบเอาท์พุทเดียว วงจรขยายโอทีเอแบบสองเอาท์พุท วงจรขยายโอทีเอแบบหลายเอาท์พุท ช่วงปฏิบัติงานของวงจรขยายโอทีเอ ค่าอุณหภูมิในโอทีเอ ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายโอทีเอ ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายโอทีเอ ซึ่งหลักการของวงจรดังกล่าวข้างต้นจะได้นำไปใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิให้มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบวงจรสายพานเอนกประสงค์

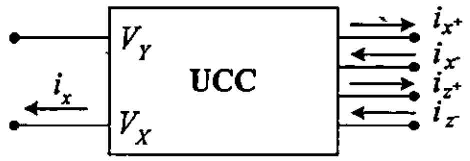
4.1 บทนำ

จากที่เราได้กล่าวถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกะแสยุคที่สองและวงจรสายพานกระแสยุคที่สามมาในบททที่แล้วนั้น ทำให้เราทราบได้ว่าวงจรสายพานกระแสในแต่ละยุคนั้น จะมีการทำงานที่แตกต่างกันอยู่ตรงที่กระแส i_y ที่พอร์ท Y ดังนั้นถ้าเรามีการนำเอาวงจรสายพานกระแสทั้งสามยุคมารวมกันไว้เป็นหนึ่งเดียว แล้วก็นิยามวงจรสายพานกระแสชนิดนี้ขึ้นเสียใหม่ว่า วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ (Universal Current Conveyor : UCC) ซึ่งจะมีข้อดีก็คือวงจรสายพานกระแสชนิดนี้สามารถนำไปใช้งานเป็นวงจรสายพานกระแสยุคใด ๆ ก็ได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ออกแบบโดยใช้หลักการของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยใช้โอทีเอที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิรอบข้างมาทำการออกแบบและทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ว่าเป็นไปตามทฤษฎีที่ได้นำเสนอ

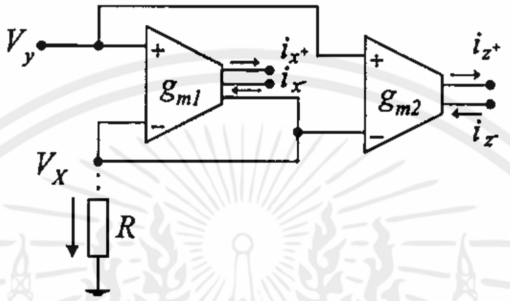
4.2 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

ในการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ (Temperature Insensitive Universal Current Conveyor) ที่นำเสนอนี้ได้ใช้หลักการของวงจรขยายโอทีเอสามารถปรับเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง และวงจรสายพานกระแสยุคที่สามได้ เมื่อพิจารณาความต้องการของวงจรเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่พอร์ท X, Y, Z^+ และ Z^- ตามความสัมพันธ์ $i_y = 1, 0, -1$, $v_y = v_x$ และ $i_Z = \pm i_x$ ซึ่งเป็นสมการอุดมคติของวงจรสายพานกระแสทั้งสามยุค โดยสัญลักษณ์ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์จะแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ซึ่งเราสามารถที่จะออกแบบได้โดยใช้โอทีเอแบบหลายเอาท์พุทก่อนแสดงดังรูปที่ 4.2 ต่อจากนั้นจึงค่อยแทนวงจรภายในของโอทีเอแบบหลายเอาท์พุทด้วยวงจรรวมจึงได้เป็นวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นจากรูปจะเห็นได้ว่าวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์จะประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่างกับวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดและต่ออยู่กับความต้านทานภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 สัญลักษณ์สายพานกระแสเอนกประสงค์



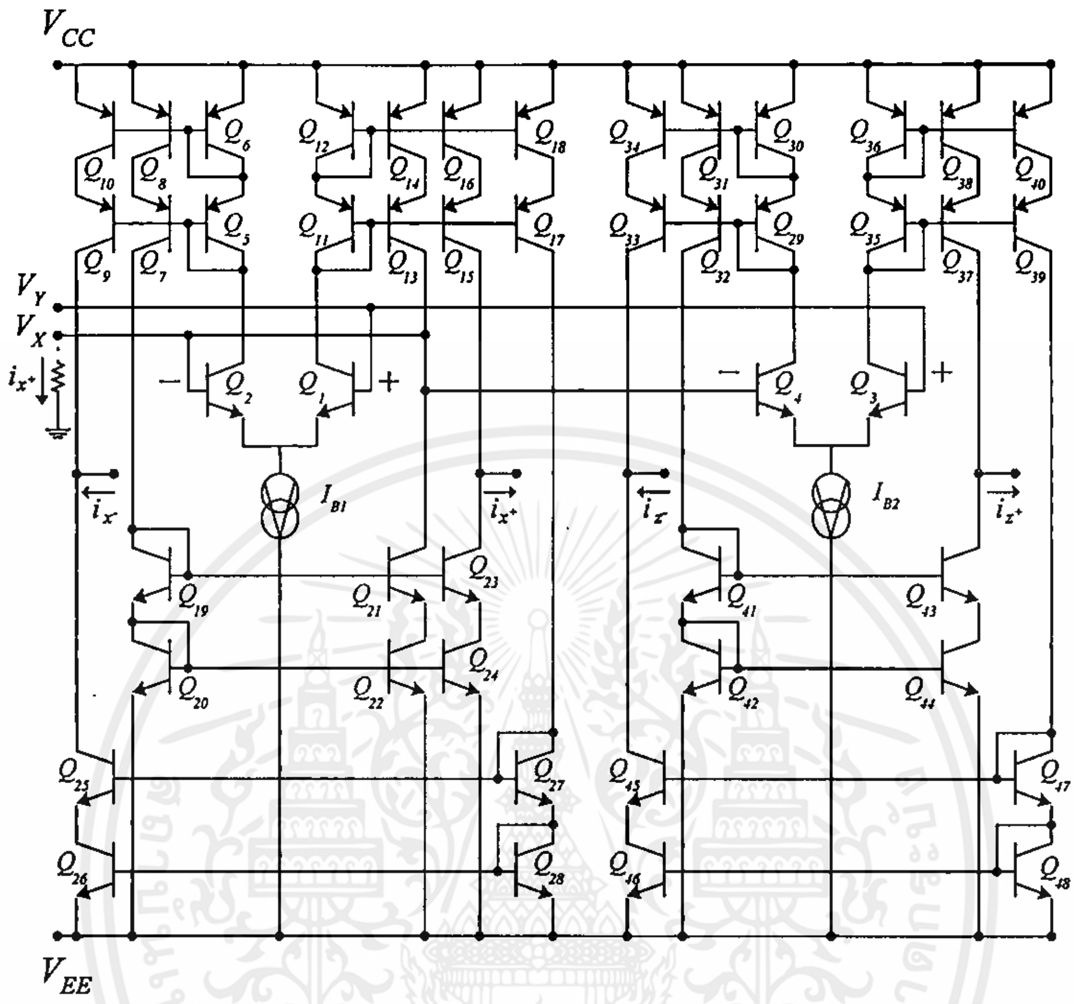
รูปที่ 4.2 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่สร้างจากโอทีเอ

4.2.1 หลักการทำงาน

จากรูปที่ 4.2 เป็นวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่สร้างจากโอทีเอ จะประกอบไปด้วยโอทีเอ 2 ตัว คือ OTA_1 กับ OTA_2 จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายกระแสและวงจรตามแรงดันโดยมีขั้วต่อ v_x และ v_y ร่วมกัน และกำหนดให้ I_{B1} และ I_{B2} เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ซึ่งจะได้กระแสเอาท์พุทเป็น i_x+, i_x-, i_Z+ และ i_Z- โดยที่กระแสเอาท์พุท i_x+ และ i_x- จะนำมาป้อนกลับที่พอร์ท Y เพื่อเลือกความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสให้เป็นไปตามสมการอุดมคติของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งและวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม เมื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสจะสามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ (Hybrid Parameter) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่พอร์ทต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ g_{m1}Z_x/(1+g_{m1}Z_x) & 0 & 0 \\ 0 & g_{m2}/g_{m1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



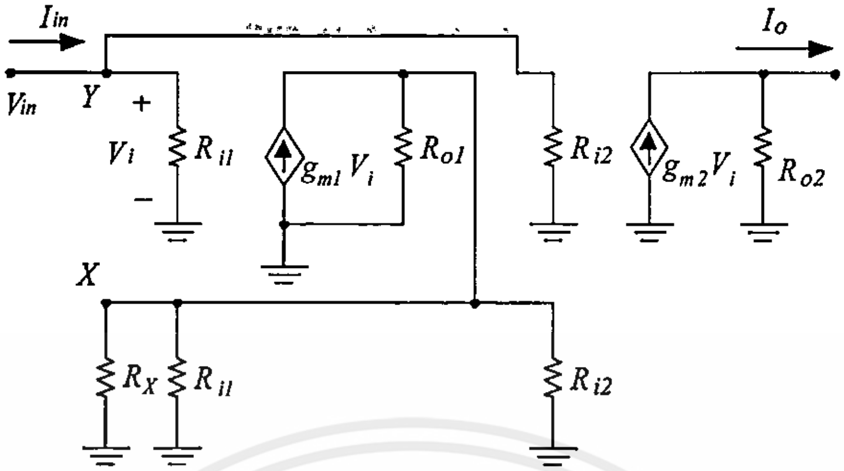
รูปที่ 4.3 วงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

ซึ่งค่ากระแส i_Z จะขึ้นอยู่กับกระแส I_{B1} และ I_{B2} โดยไม่ขึ้นอยู่กับผลของอุณหภูมิเนื่องจากค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ g_{m1} และ g_{m2} ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิได้ถูกชดเชยออกไปและอัตราขยายของกระแสไบอัส A_i สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์

4.2.2 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท *Y*

การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท *Y* จากรูปที่ 4.2 จะประกอบไปด้วยโอทีเอ 2 ชุด ที่มีขั้วต่อ v_x และ v_y ร่วมกัน และกระแสเอาท์พุทจะเป็น i_x+, i_x-, i_Z+ และ i_Z- โดยกำหนดให้ I_{B1} และ I_{B2} เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ จะหาค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท *Y* ได้โดยการแทนวงจรสมมูลย์ของสัญญาณขนาดใหญ่ลงในรูปที่ 4.2 จะได้ดังรูปที่ 4.4

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลย์สัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส

ที่จุด X จะได้ว่า

$$\left(\frac{1}{R_X}+\frac{1}{R_{i1}}+\frac{1}{R_{i2}}+\frac{1}{R_{o1}}\right)V_X = g_{m1}V_i \tag{4.2}$$

จาก

$$V_i = V_{in} - V_X \tag{4.3}$$

แทนค่าสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (4.2) และจัดสมการใหม่จะได้ว่า

$$\left(g_{m1}+\frac{1}{R_X}+\frac{1}{R_{i1}}+\frac{1}{R_{i2}}\frac{1}{R_{o1}}\right)V_X = g_{m1}V_{in} \tag{4.4}$$

จากสมการที่ (4.4) ค่า $\frac{1}{R_X} \gg \frac{1}{R_{i1}},\frac{1}{R_{i2}}$ และ $\frac{1}{R_{o1}}$ จะได้ว่า

$$V_X = \frac{g_{m1}R_X}{1+g_{m1}R_X}V_{in} \tag{4.5}$$

ที่จุด Y จะได้ว่า

$$I_{in} = \left(\frac{1}{R_{i1}}+\frac{1}{R_{i2}}\right)V_i \tag{4.6}$$

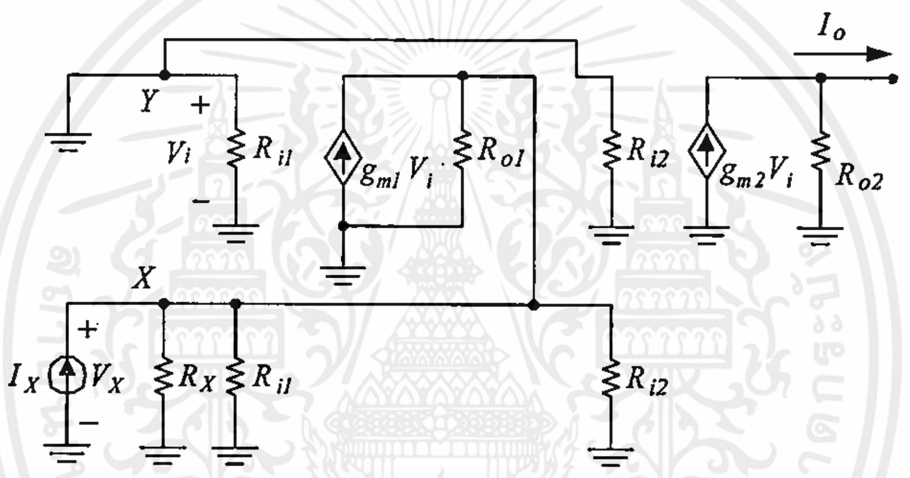
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.3) สมการที่ (4.5) และสมการที่ (4.6) จะได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Y มีค่าเท่ากับ

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = (R_{i1} // R_{i2})(1 + g_{m1} R_X) \tag{4.7}$$

4.2.3 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท X

ส่วนในการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท X นั้นจากวงจรสมมูลย์ของรูปที่ 4.4 จะทำการต่อพอร์ท Y ลงกราวด์ แล้วป้อนแหล่งจ่ายกระแส I_x เข้าไปที่พอร์ท X จะได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลย์สัญญาณขนาดใหญ่ของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสหาค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท X

จากรูปที่ 4.5 พิจารณาที่จุด X จะได้ว่า

$$I_X + g_{m1} V_i = \frac{V_X}{R_X} + \frac{V_X}{R_{i1}} + \frac{V_X}{R_{i2}} + \frac{V_X}{R_{o1}} \tag{4.8}$$

จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่จุด X มีค่า

$$V_X = -V_i \tag{4.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (4.9) ลงในสมการที่ (4.8) จะได้ว่า

$$I_X = \left(g_{m1} + \frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{1}{R_{o1}}\right) V_X \tag{4.10}$$

จากสมการที่ (4.10) ค่า $\frac{1}{R_{i1}}, \frac{1}{R_{i2}}$ และ $\frac{1}{R_{o1}}$ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{1}{R_X}$

จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท X มีค่าเท่ากับ

$$R_i = R_X \,//\, \frac{1}{g_{m1}} \tag{4.11}$$

4.2.4 การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Z^+, Z^-

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Z^+ และพอร์ท Z^- ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ ดังรูปที่ 4.3 จะประมาณได้เท่ากับอิมพีแดนซ์ที่จุดออกของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด ซึ่งประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ Q_{37} และ Q_{43} [ดูการวิเคราะห์ได้ในภาคผนวก ข] ต่อขนานอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดออกของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดที่ทรานซิสเตอร์ Q_{33} และ Q_{45} ดังนั้นจึงได้ว่า

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Z^+ มีค่าดังสมการที่ (4.12)

$$r_{Z^+} = \frac{\beta_P r_{O37}}{2} \,//\, \frac{\beta_N r_{O43}}{2} \tag{4.12}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท Z^- มีค่าดังสมการที่ (4.13)

$$r_{Z^-} = \frac{\beta_N r_{O45}}{2} \,//\, \frac{\beta_P r_{O33}}{2} \tag{4.13}$$

โดยที่ r_o คือ ค่าความต้านทานที่จุดสัญญาณออกของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การวิเคราะห์ค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$

การหาค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 จะสามารถหาค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ เหมือนกับสมการที่ (3.27) มีค่าเท่ากับ

$$\frac{v_x}{v_y} = \frac{g_{m1}R_x}{1+g_{m1}R_x} \tag{4.14}$$

4.2.6 การวิเคราะห์ค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$

การหาค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ทำหน้าที่กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสสัญญาณ i_x ที่พอร์ท X กับกระแสสัญญาณ i_z+, i_z- ที่พอร์ท Z^+ และ Z^- จะมีกระแสสัญญาณออกเหมือนกับสมการที่ (3.32)

$$i_{z^+} = \frac{I_{B2}}{I_{B1}} i_x \tag{4.15}$$

$$i_{z^-} = \frac{I_{B2}}{I_{B1}} i_x \tag{4.16}$$

4.2.7 ช่วงปฏิบัติงานของแรงดัน

การหาช่วงปฏิบัติงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 จะหาได้จากการวิเคราะห์ช่วงปฏิบัติงานของวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส ดังแสดงในรูปที่ 3.15 จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสจุดออก i_z และแรงดันจุดเข้า v_y ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และให้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_z = \frac{g_{m2}}{1+g_{m1}R_x} v_y \tag{4.17}$$

$$=\frac{I_{B2}}{2V_T+I_{B1}R_x}v_y$$

ถ้ากำหนดให้ $i_z=I_{B2}$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.17) จะได้

$$v_y=2V_T+I_{B1}\,R_x \tag{4.18}$$

จากสมการที่ (4.18) จะได้ว่าช่วงปฏิบัติงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์เป็นดังนี้

$$-2V_T-I_{B1}\,R_x\le v_y\le 2V_T+I_{B1}\,R_x$$

4.2.8 ผลตอบสนองทางความถี่

การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.2 จะได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่ได้จะมีค่าเท่ากับในหัวข้อที่ 3.3.9 และในหัวข้อที่ 3.4.6 ซึ่งได้มีการกล่าวไปก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร

จากรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณหาค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.20 ได้ดังนี้

$$\frac{i_z}{i_x}=\frac{A_i}{R_X}\left(\frac{1}{1+\frac{s}{\omega_c}}\right) \tag{4.19}$$

จากรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณหาค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (g_m) โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.20 ได้ดังนี้

$$\frac{i_x}{v_y}=\frac{g_m}{1+g_mR_X}\left[\frac{1}{1+\frac{\left(\frac{1}{\omega_c}+R_X(C_{i1}+C_{i2}+C_{o1})\right)s}{(1+g_mR_X)}+\frac{\frac{s^2(C_{i1}+C_{i2}+C_{o1})R_X}{\omega_c}}{(1+g_mR_X)}}\right] \qquad 4.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณหาค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.20 ได้ดังนี้

$$\frac{v_x}{V_y}=\frac{g_m R_X}{1+g_m R_X}\left[\frac{1}{1+\frac{\left(\frac{1}{\omega_c}+R_X(C_{i1}+C_{i2}+C_{o1}\right)s}{(1+g_m R_X)}+\frac{\frac{s^2(C_{i1}+C_{i2}+C_{o1})R_X}{\omega_c}}{(1+g_m R_X)}}\right] \tag{4.21}$$

4.3 ผลจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice

จากการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ตามหลักการที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรที่ได้ทำการออกแบบขึ้นดังกล่าวสามารถทำงานได้ตามหลักการที่ได้เสนอไว้ และมีคุณสมบัติของวงจรเป็นไปตามที่คาดหมายเอาไว้ โดยการนำวงจรที่ได้ออกแบบมาทำการวิเคราะห์เลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป “PSpice” [16] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เลียนแบบการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปที่มีความสามารถแม่นยำสูง โดยกำหนดรายละเอียดลักษณะการต่อกัน และค่าอนุกลในวงจรตลอดจนสภาวะการทำงานของวงจรให้กับโปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าว ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรและแสดงผลตามคำสั่งที่กำหนดให้

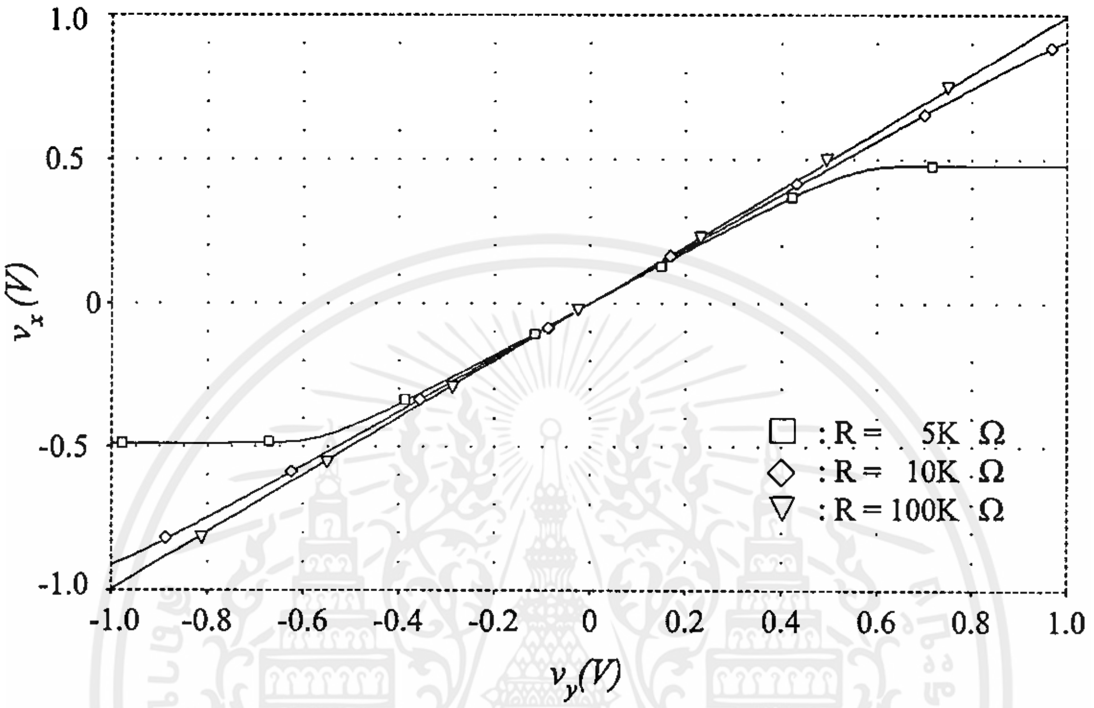
4.3.1 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X = 5KΩ, 10KΩ และ 100KΩ กระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} = 100μA แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. เพื่อหาค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X และค่าแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y

ผลการเลียนแบบดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยจะเห็นว่าค่าความต้านทานที่ใช่ควรจะมีค่า ≥ 10KΩ เมื่อใช้กระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} = 100μA จะทำให้มีค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X เท่ากับแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y หรือมีค่าอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ เท่ากับ 1 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ในทางการค้า
ไม่ว่า...อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 ถ้าใช้ตัวต้านทาน R_X= 5KΩ จะเห็นว่าช่วงปฏิบัติแรงดันอินพุทจะมีค่าต่ำประมาณ ±0.5V. ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทาน R_X= 10KΩ ซึ่งมีช่วงปฏิบัติแรงดันอินพุท ±1V.



รูปที่ 4.6 แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice

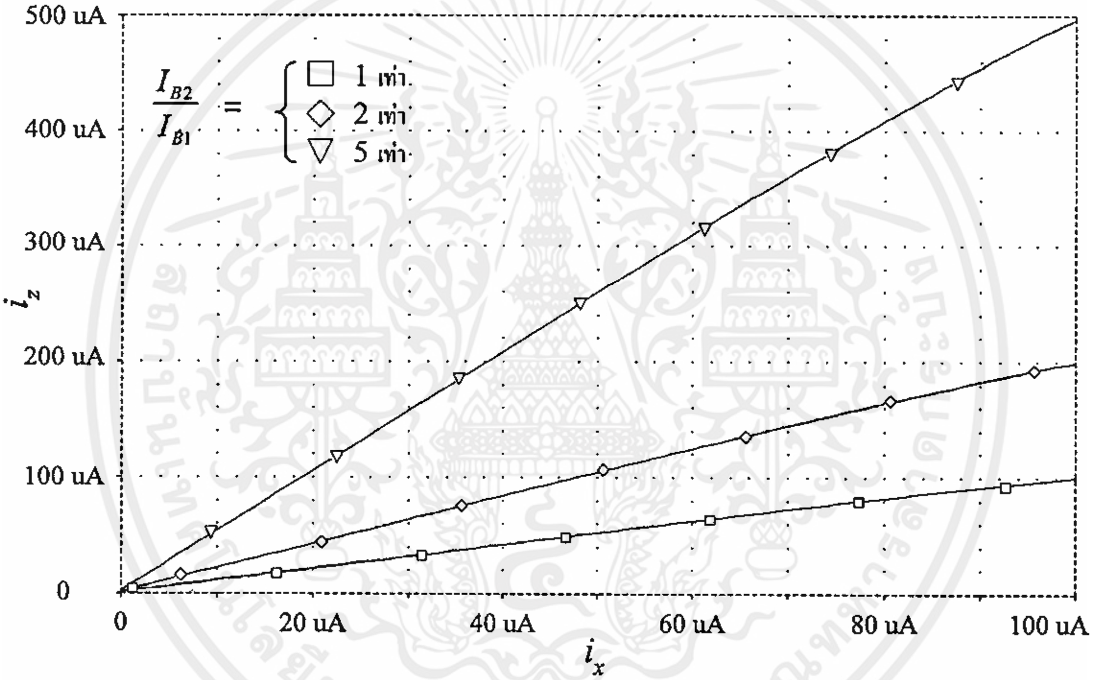
4.3.2 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X = 10KΩ แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. โดยกำหนดค่ากระแสไบอัส I_{B1} = 100μA และ I_{B2} = 100μA, 200μA และ 500μA ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจร เพื่อหาค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X และกระแส i_Z ที่พอร์ท Z สามารถแสดงค่า $\frac{i_Z}{i_X}$ และผลการเลียนแบบดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยจะเห็นว่าเมื่อใช้ค่ากระแสไบอัส $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu A$ จะทำให้มีค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X เท่ากับกระแส i_Z ที่พอร์ท Z หรือมีค่าอัตราส่วนกระแส $\frac{i_Z}{i_X}$ เท่ากับ 1 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าเมื่อใช้ค่ากระแสไบอัส $I_{B1} = 100\mu A$ และ $I_{B2} = 100\mu A$, $200\mu A$ และ $500\mu A$ จะมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (4.15)



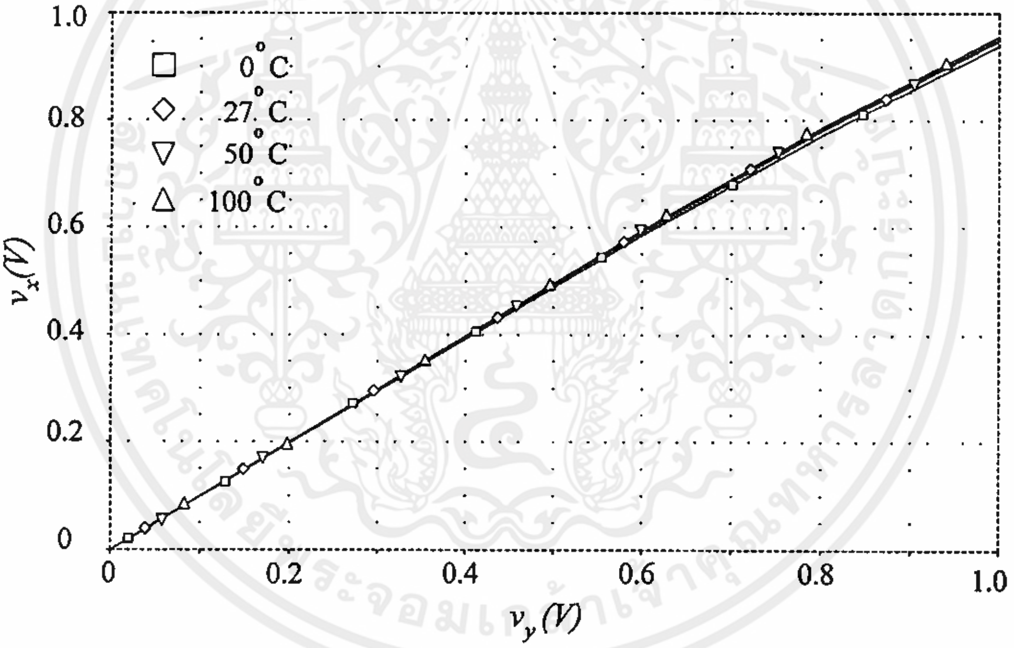
รูปที่ 4.7 แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_Z}{i_X}$ ด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

การเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน $R_X = 10K\Omega$ แหล่งจ่ายแรงดัน $V_{CC} = 12V.$, $V_{EE} = -12V.$ กระแสไบอัส $I_{B1} = I_{B2} = 100\mu A$ โดยกำหนดค่าอุณหภูมิที่ $0^{\circ}C$, $27^{\circ}C$, $50^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$

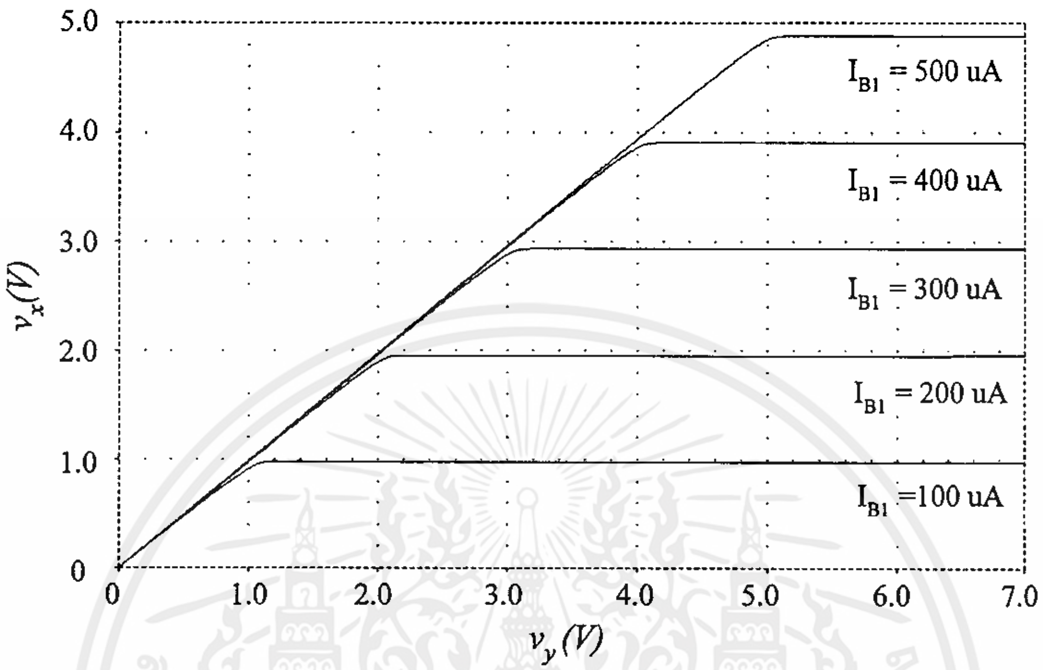
ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เพื่อดูค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงโดยค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X และแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y เทียบกับค่าของอุณหภูมิ และมีการชดเชยผลของอุณหภูมิเป็นไปตามสมการที่ (4.14) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้



รูปที่ 4.8 แสดงการเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ ด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 การเลียนแบบช่วงแรงดันปฏิบัติงานวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์



รูปที่ 4.9 แสดงการเลียนแบบช่วงแรงดันปฏิบัติงานด้วยโปรแกรม PSpice

การเลียนแบบช่วงแรงดันปฏิบัติงานวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X = 10KΩ แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. กระแสไบอัส $I_{B1} = I_{B2}$ = 100μA, 200μA, 300μA, 400μA และ 500μA

ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพื่อดูค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X เปรียบเทียบกับค่าแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y โดยจะเห็นว่าแรงดันปฏิบัติงานจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่ากระแสไบอัส I_{B1} และค่าอัตราส่วนแรงดันมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

จากรูปที่ 4.9 สามารถเลือกค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X โดยการปรับค่ากระแสไบอัส I_{B1} หรือจะปรับค่าความต้านทาน R_X ก็ได้ดังสมการที่ (4.18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$V_{in} = 2V_T + I_{B1} R_x$$

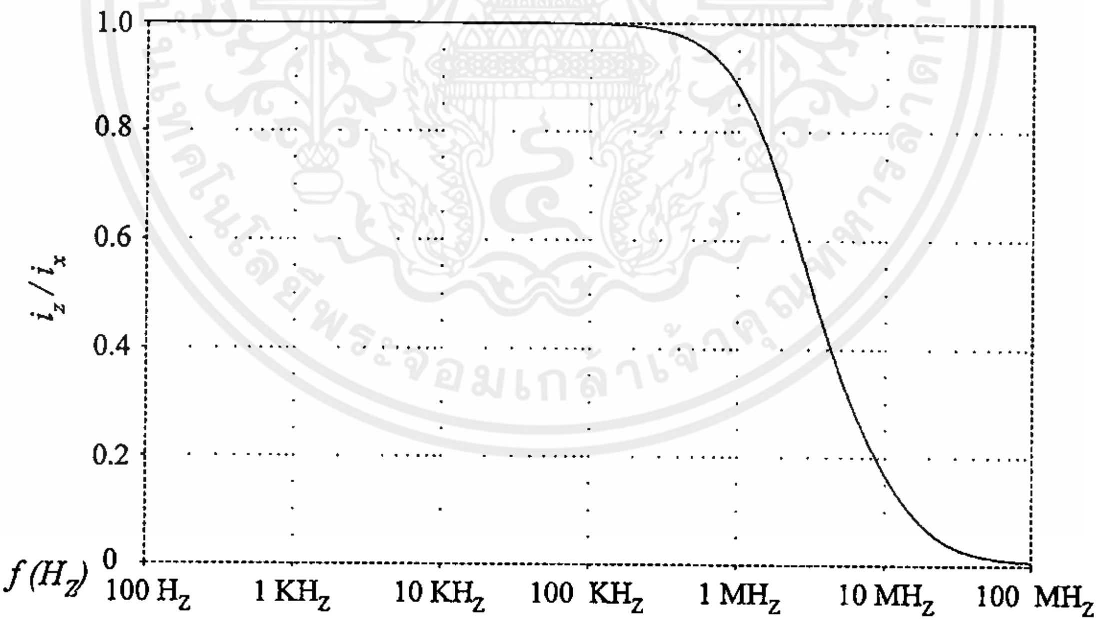
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 การเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

การเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 4.3 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X = 10KΩ แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. กระแสไบอัส $I_{B1} = I_{B2}$ = 100μA

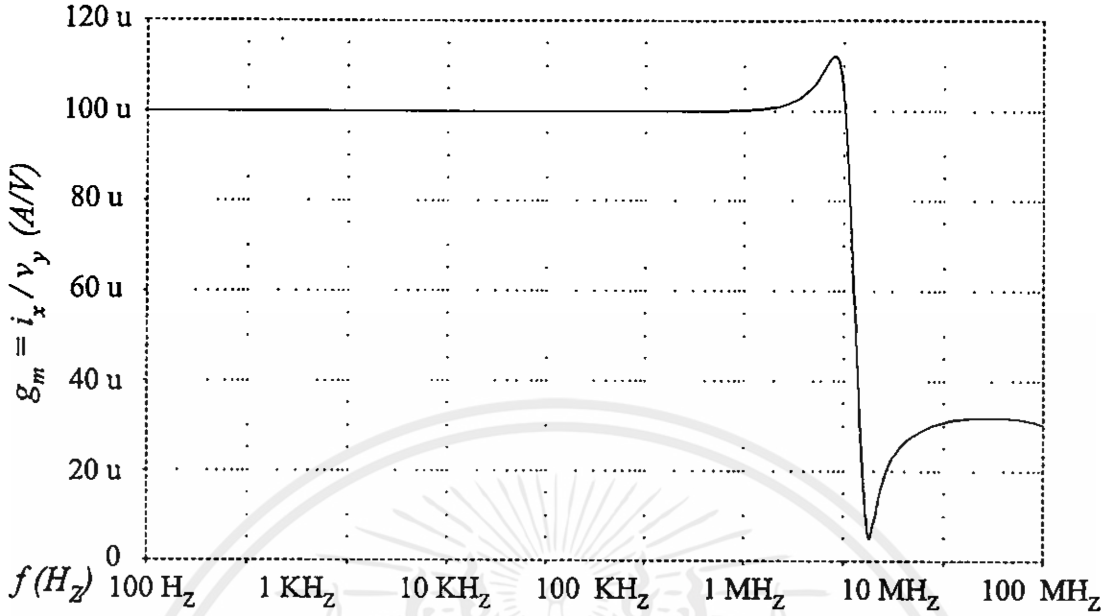
การเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่เพื่อดูค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X เปรียบเทียบกับกระแส i_z ที่พอร์ท Z โดยเปลี่ยนค่าความถี่ตั้งแต่ 100H$_Z$ ถึง 100MH$_Z$ จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าผลตอบสนองทางความถี่ที่ค่าความถี่คัทออฟที่ –3dB (Cutoff Frequency) มีค่าประมาณ 2MH$_Z$ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

การเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่เพื่อดูค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X เปรียบเทียบกับแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y หรือค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (g_m) โดยเปลี่ยนค่าความถี่ตั้งแต่ 100H$_Z$ ถึง 100MH$_Z$ จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าผลตอบสนองทางความถี่ที่ค่าความถี่คัทออฟที่ –3dB (Cutoff Frequency) มีค่าประมาณ 12MH$_Z$ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

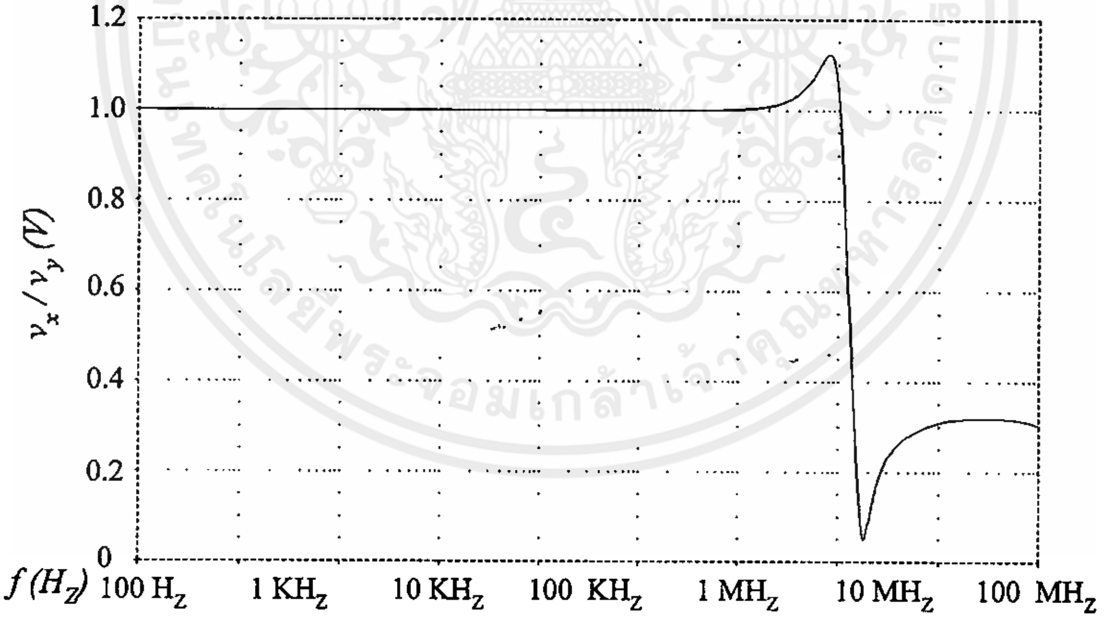


รูปที่ 4.10 แสดงการเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่ $\frac{i_z}{i_x}$ ด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงการเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่ $\frac{i_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice



รูปที่ 4.12 แสดงการเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่ $\frac{v_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลียนแบบผลตอบสนองทางความถี่เพื่อดูค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X เปรียบเทียบกับแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y โดยเปลี่ยนค่าความถี่ตั้งแต่ 100H_Z ถึง 100MH_Z จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าผลตอบสนองทางความถี่ที่ค่าความถี่คัทออฟที่ –3dB (Cutoff Frequency) มีค่าประมาณ 12MH_Z ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

4.4 ผลจากการทดลองการทำงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

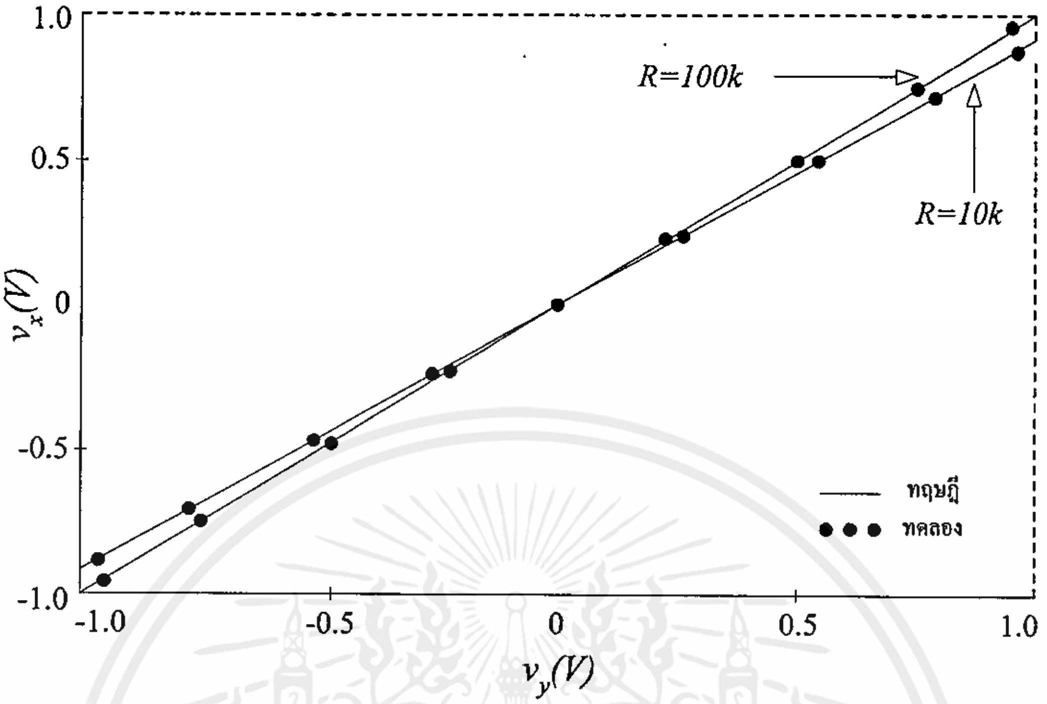
ในการทดสอบการทำงานหรือคุณสมบัติบางอย่างของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ออกแบบขึ้น จำเป็นที่อาจจะเลือกใช้การทดลองวงจรโดยการต่อวงจรลงบนโพรโตบอร์ดป้อนแรงดันให้กับวงจรและป้อนสัญญาณหรือกระแสสัญญาณให้กับวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดันและกระแสสัญญาณที่ส่วนต่าง ๆ ของวงจรและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสที่ส่วนต่างๆของวงจร เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์สามารถทำงานได้ตามหลักการที่ได้นำเสนอขึ้นมา

4.4.1 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์โดยที่วงจรดังกล่าวประกอบด้วยวงจรสายพานกระแสที่ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดNPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ กระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} = 100μA แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V และมีความต้านทานต่อร่วมอยู่ด้วย 2 ตัว คือ R_X และ R_Z กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10KΩ โดยที่ความต้านทาน R_X มีหน้าที่เป็นตัวจำกัดค่ากระแส i_x ให้เกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนแรงดัน V_{in} เข้ามายังที่พอร์ท Y

ในการทดลองวงจรตามรูปที่ 4.3 เพื่อศึกษาถึงการวัดค่าของแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ โดยทำการป้อนแรงดัน V_{in} เข้าที่พอร์ท Y มีค่า 1 โวลท์ แล้วทำการทดลองวัดค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X พบว่าความสัมพันธ์ของแรงดันทั้งสองดังกล่าวมีค่าเป็น $v_x \cong v_y$ ซึ่งเป็นไปตามที่ได้คาดหมายเอาไว้ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



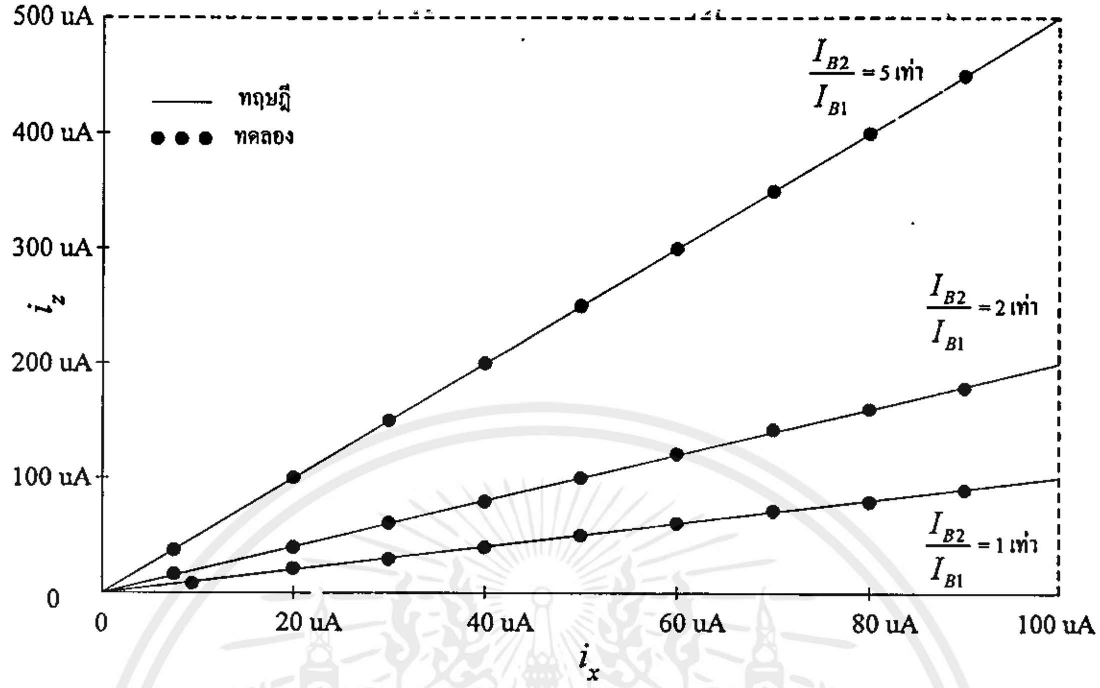
รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$

4.4.2 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

จากรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์โดยที่วงจรดังกล่าวประกอบด้วย วงจรสายพานกระแสที่ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ กระแสไบอัส I_{B1} = 100μA แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC}= 12V., V_{EE}= -12V และมีความต้านทานต่อร่วมอยู่ด้วย 2 ตัว คือ R_X และ R_Z กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10KΩ โดยที่ความต้านทาน R_X มีหน้าที่เป็นตัวจำกัดค่ากระแส i_x ให้เกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนแรงดัน V_{in} เข้ามายังที่พอร์ท Y

ในการทดลองวงจรตามรูปที่ 4.3 เพื่อศึกษาถึงการวัดค่าของกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ โดยทำการป้อนกระแสไบอัส I_{B2} มีค่าตั้งแต่ 100μA, 200μA และ 500μA แล้วทำการทดลองวัดค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X และกระแส i_z ที่พอร์ท Z พบว่าได้ความสัมพันธ์ของกระแสทั้งสองดังกล่าวมีค่าเป็น $i_x \cong A_i i_z$ ซึ่งเป็นไปตามที่ได้คาดหมายเอาไว้ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$

4.5 บทสรุป

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่ออกแบบ โดยใช้หลักการของวงจรขยายโอทีเอ วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส สามารถปรับขนาดของกระแสถ่ายโอนได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งยังมีช่วงปฏิบัติงานกว้างขึ้น และไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยได้ทำการทดสอบสมรรถนะและผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรสามารถให้ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่พอร์ท X, Y, Z^+ และ Z^- ตามความสัมพันธ์ $i_y = 0$, $v_y = v_x$ และ $i_z = \pm\frac{I_{B1}}{I_{B2}} i_x$ ซึ่งเป็นสมการอุดมคติของวงจรสายพานกระแสทั้งสามยุค และค่าตามคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้เช่น ค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{V_y}$ ค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ค่าของอุณหภูมิ ผลตอบสนองทางความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

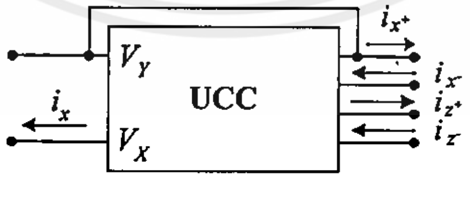
บทที่ 5
การประยุกต์ใช้งานวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

5.1 บทนำ

วงจรสายพานกระแส ได้มีการนำไปเป็นอนุกลแอคทีฟในการออกแบบวงจรรวมต่างๆ มากมาย เช่น วงจรไจเรเตอร์ (Gyrator) [1] , วงจรแปลงค่าอิมพีแดนซ์ทั่วไป (Generalized Impedance Conveyor) หรือ GIC [2] , วงจรฟิลเตอร์ (Filter) [3] และวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) [4] เป็นต้น จะเห็นว่าวงจรสายพานกระแสสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้มากมายหลายแบบ และเพื่อเป็นการทดสอบว่าในการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ดังนั้นในบทนี้จะแสดงตัวอย่างการนำวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ได้ออกแบบขึ้นไปใช้งาน เช่น วงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง และวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม ตามลำดับ

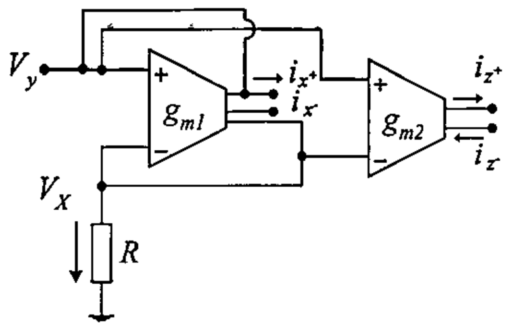
5.2 การใช้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง

ในการออกแบบหรือใช้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งนั้น สามารถทำได้โดยการต่อกระแส i_x+ ที่พอร์ท X^+ ไปยังพอร์ท Y ซึ่งไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์ใด ๆ ให้กับวงจรและจะให้ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่พอร์ท X, Y และ Z คือ $i_y = i_x$, $v_x = v_y$ และ $i_Z = \pm i_x$ สามารถแสดงเป็นสัญลักษณ์ดังรูปที่ 5.1 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งที่สร้างจากโอทีเอ ดังรูปที่ 5.2 และวงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ดังรูปที่ 5.3

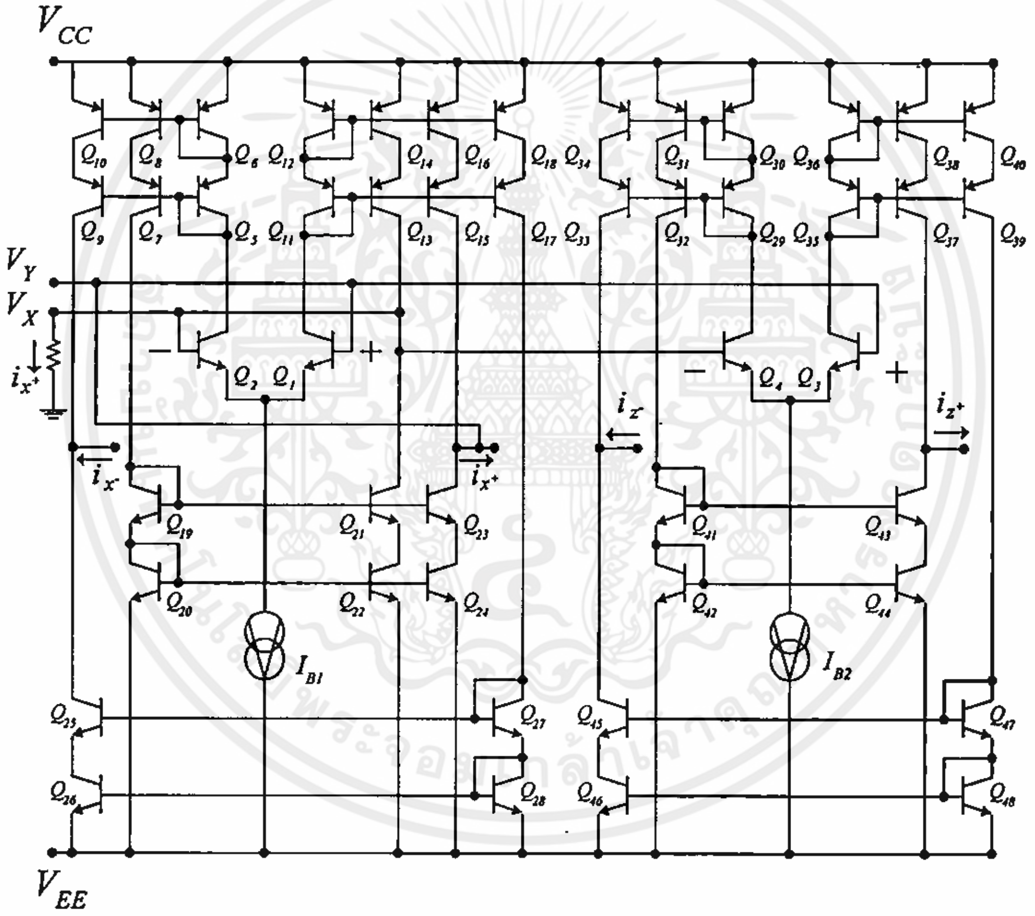


รูปที่ 5.1 สัญลักษณ์วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งที่สร้างจากโอทีเอ



รูปที่ 5.3 วงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง

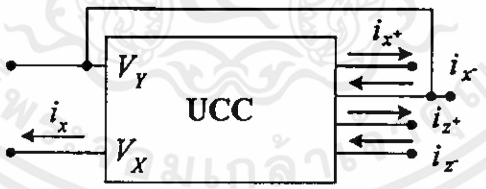
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสจะสามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ (Hybrid Parameter) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่พอร์ทต่าง ๆ ดังสมการที่ (5.1)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & g_{m2}/g_{m1} & 0 \\ g_{m1}Z_x/(1+g_{m1}Z_x) & 0 & 0 \\ 0 & g_{m2}/g_{m1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

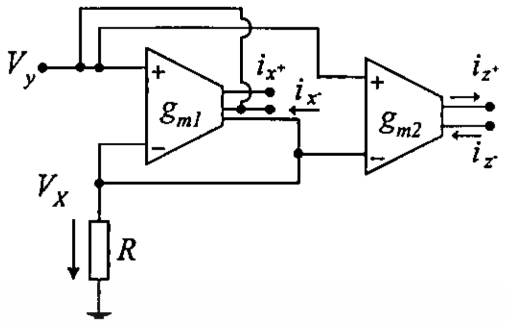
5.3 การใช้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม

ในการออกแบบหรือใช้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สามนั้น สามารถทำได้โดยการต่อกระแส i_{x}- ที่พอร์ท X ไปยังพอร์ท Y ซึ่งไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์ใด ๆ ให้กับวงจรและจะให้ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่พอร์ท X, Y และ Z คือ $i_y = -i_x$, $v_x = v_y$ และ $i_Z = \pm i_x$ สามารถแสดงเป็นสัญลักษณ์ดังรูปที่ 5.4 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สามที่สร้างจากโอทีเอ ดังรูปที่ 5.5 และวงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม ดังรูปที่ 5.6

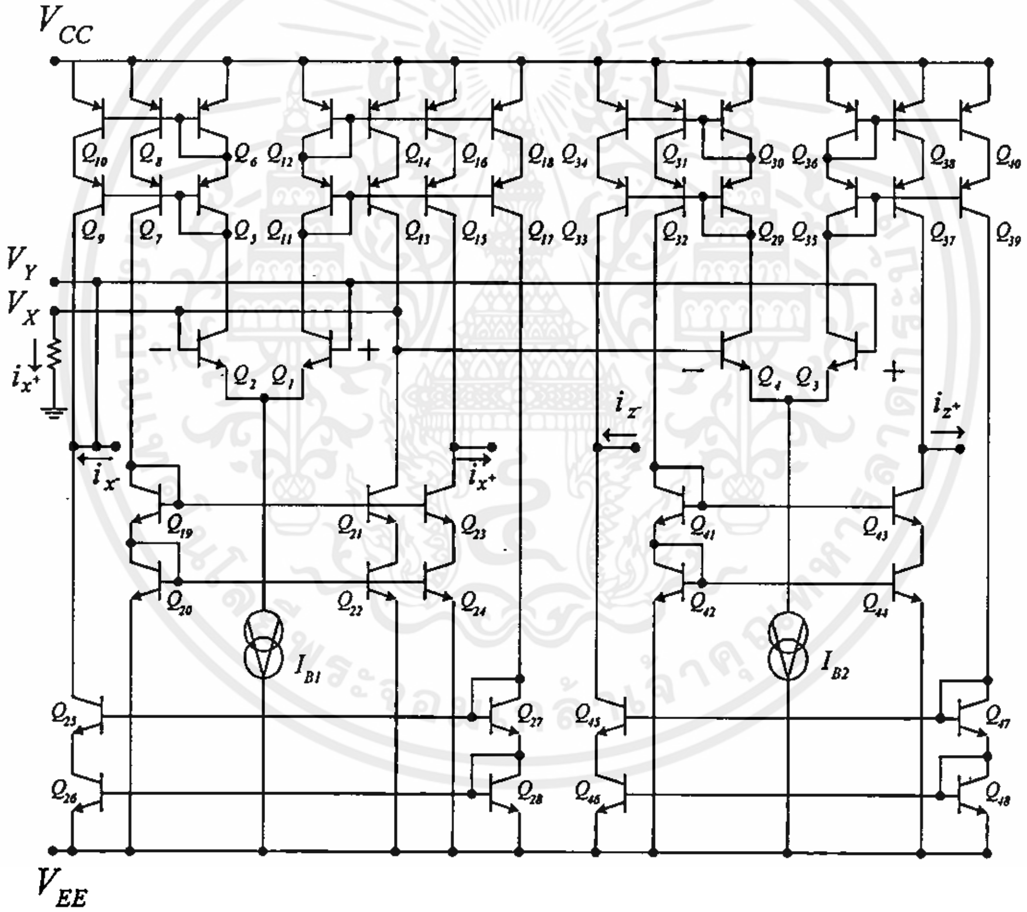


รูปที่ 5.4 สัญลักษณ์วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สามที่สร้างจากโอทีเอ



รูปที่ 5.6 วงจรภายในของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแส จะสามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริด พารามิเตอร์ (Hybrid Parameter) ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสที่พอร์ทต่าง ๆ ดังสมการที่ (5.2)

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -g_{m2}/g_{m1} & 0 \\ g_{m1}Z_x/(1+g_{m1}Z_x) & 0 & 0 \\ 0 & g_{m2}/g_{m1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

จากสมการข้างต้นที่กล่าวมาสามารถที่จะสรุปความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแส ตามคุณสมบัติตามวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สามได้ โดยที่วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์สามารถให้ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสได้ดังนี้

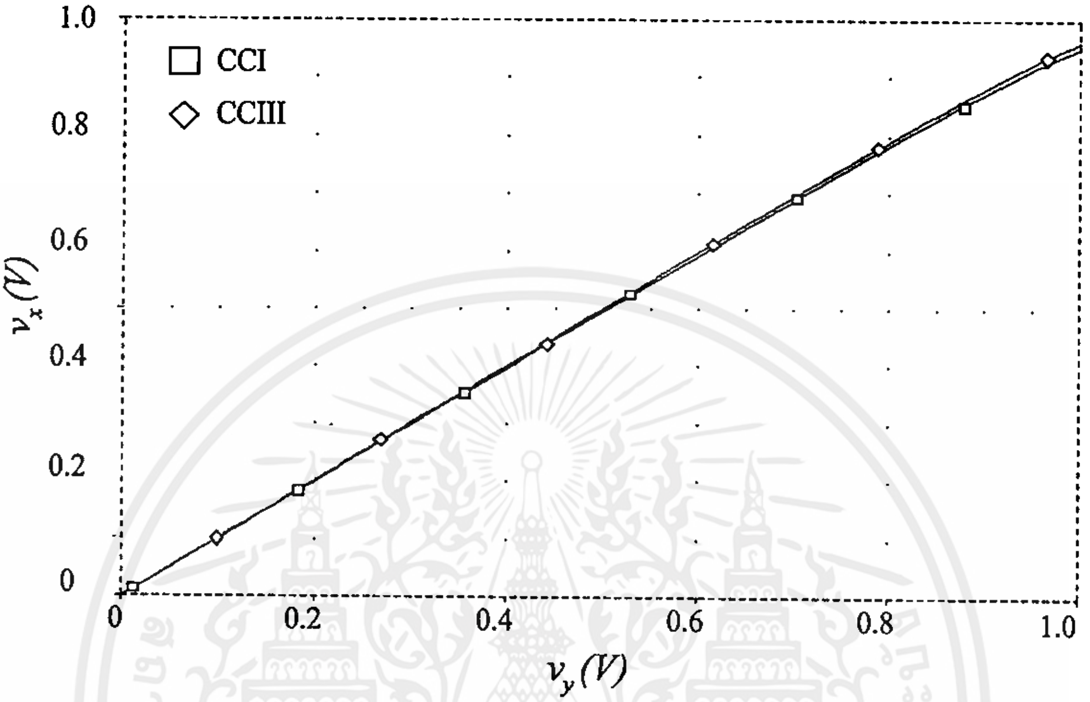
สายพานกระแส	CC I	CC II	CC III
กระแส i_y	i_x	0	$-i_x$
แรงดัน v_x	v_y	v_y	v_y
กระแส i_z	$\frac{I_{B2}}{I_{B1}}i_x$	$\frac{I_{B2}}{I_{B1}}i_x$	$\frac{I_{B2}}{I_{B1}}i_x$

5.4 ผลจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice

จากการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ตามหลักการที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าวงจรที่ได้ทำการออกแบบขึ้นดังกล่าวสามารถทำงานได้ตามหลักการที่ได้เสนอไว้ และมีคุณสมบัติของวงจรเป็นไปตามที่คาดหมายเอาไว้ โดยการนำวงจรที่ได้ออกแบบมาทำการวิเคราะห์เลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรมนำสำเร็จรูป "PSpice" [16] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เลียนแบบการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปที่มีความสามารถแม่นยำสูง โดยการกำหนดรายละเอียดลักษณะการต่อกัน และค่าอุปกรณ์ในวงจรตลอดจนสภาวะการทำงานของวงจรให้กับโปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าว ทำการวิเคราะห์การทำงานของวงจรและแสดงผลตามคำสั่งที่กำหนดให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์



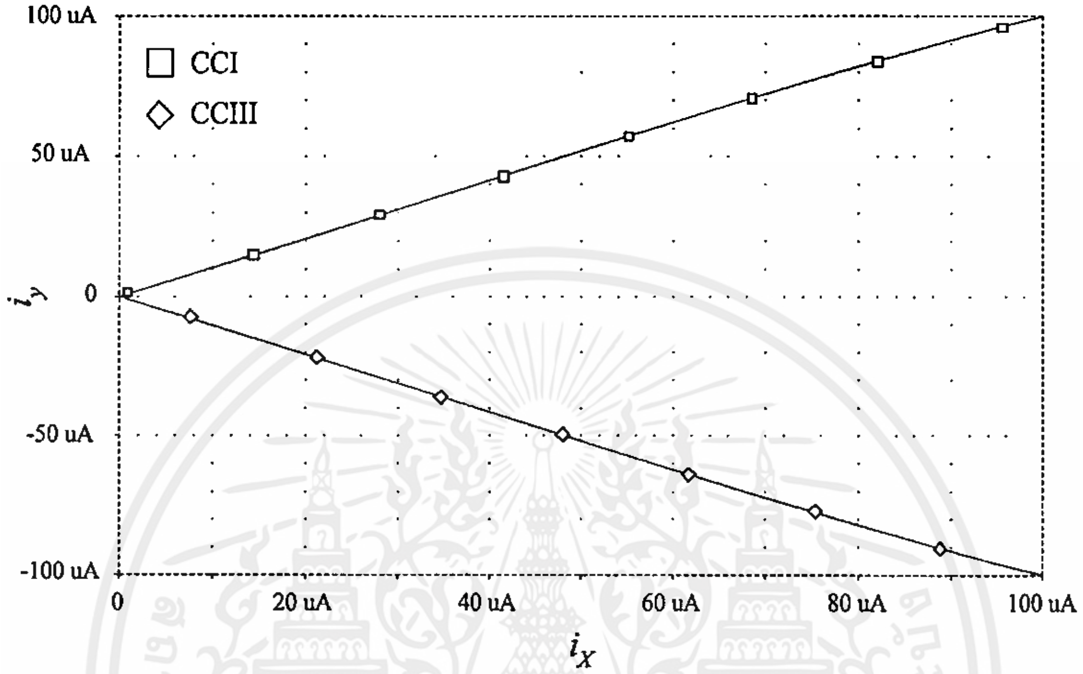
รูปที่ 5.7 แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ ด้วยโปรแกรม PSpice

การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง (CCI) และยุคที่สาม (CCIII) ด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X= 10KΩ กระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} = 100μA แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC}=12V., V_{EE} = -12V. เพื่อหาค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X และค่าแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y

ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรสามารถแสดงค่า $\frac{v_x}{v_y}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยจะเห็นว่าค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X เท่ากับแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y หรือมีค่าอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ เท่ากับ 1 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_y}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์



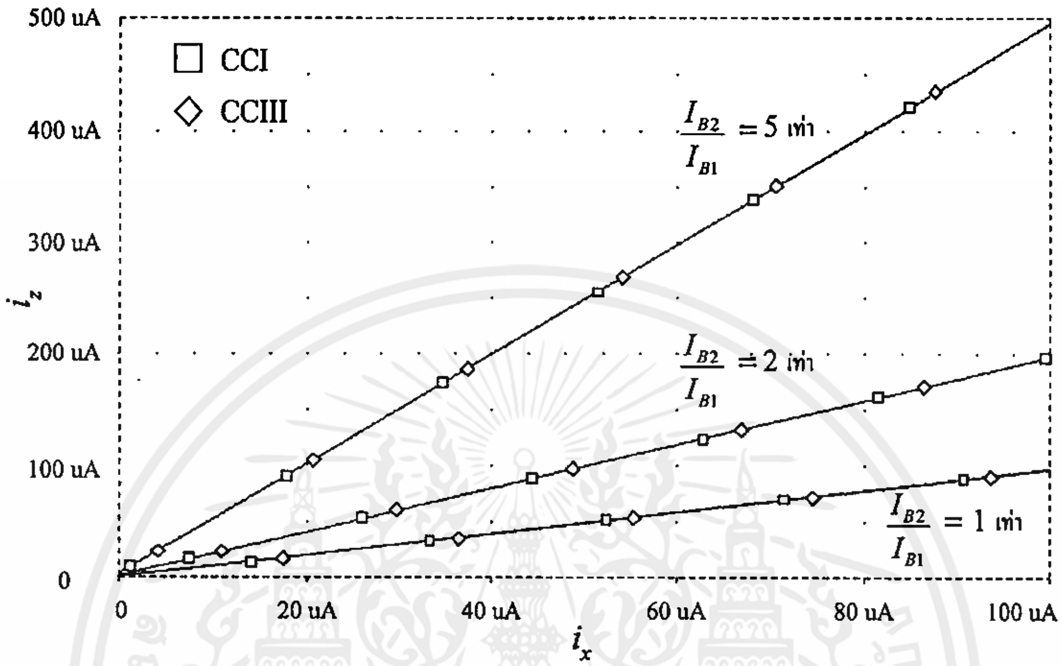
รูปที่ 5.8 แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_y}{i_x}$ ด้วยโปรแกรม PSpice

การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_y}{i_x}$ ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง (CCI) และยุคที่สาม (CCIII) ด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X = 10KΩ แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. โดยกำหนดค่ากระแสไบอัส $I_{B2} = I_{B1} = 100\mu A$

ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรสามารถแสดงค่า $\frac{i_y}{i_x}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยจะเห็นว่าค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X เท่ากับกระแส i_y ที่พอร์ท Y หรือมีค่าอัตราส่วนกระแส $\frac{i_y}{i_x}$ เท่ากับ ±1 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

เอกส... ...นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์



รูปที่ 5.9 แสดงการเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ด้วยโปรแกรม PSpice

การเลียนแบบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ ของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง (CCI) และยุคที่สาม (CCIII) ด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X = 10KΩ แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. โดยกำหนดค่ากระแสไบอัส I_{B1} = 100μA และ I_{B2}=100μA, 200μA และ 500μA ตามลำดับ

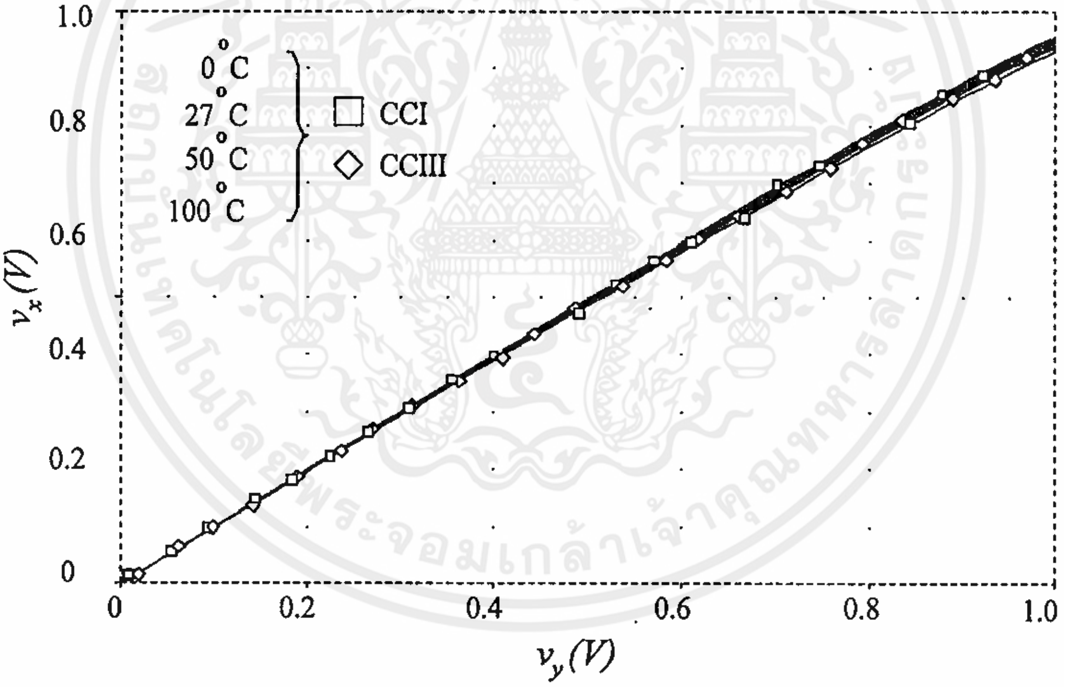
ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรสามารถแสดงค่า $\frac{i_z}{i_x}$ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 โดยจะเห็นว่าค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X เท่ากับกระแส i_z ที่พอร์ท Z หรือมีค่าอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ เท่ากับ A_I ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.4 การเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

การเลียนแบบค่าของอุณหภูมิวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 ได้ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจรที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งและยุคที่สาม ด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ตัวต้านทาน R_X = 10KΩ แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. กระแสไบอัส $I_{B1} = I_{B2}$ = 100μA โดยกำหนดค่าอุณหภูมิที่ 0°C, 27°C, 50°C และ 100°C

ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรสามารถแสดงค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X และค่าแรงดัน v_y ที่พอร์ท Y เทียบกับค่าของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และมีการชดเชยผลของอุณหภูมิตามสมการที่ (3.31) และสมการที่ (3.32) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้



รูปที่ 5.10 แสดงการเลียนแบบค่าของอุณหภูมิด้วยโปรแกรม PSpice

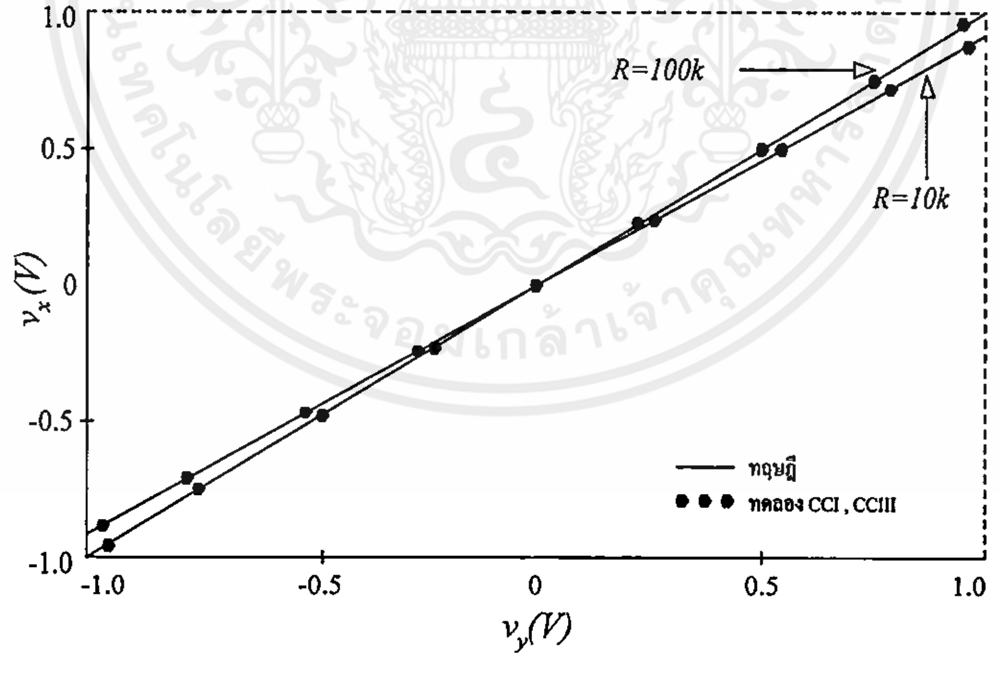
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ผลจากการทดลองการทำงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

ในการทดสอบการทำงานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งและวงจรสายพานกระแสยุคที่สาม จะเลือกใช้การทดลองวงจรโดยการต่อวงจรลงบนโพรโตบอร์ดป้อนแรงดันและกระแสให้กับวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดันและกระแสที่ส่วนต่างๆของวงจรและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อเป็นการแสดงให้เห็นว่าวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ได้ออกแบบสามารถทำงานได้ตามหลักการที่ได้นำเสนอขึ้นมา

5.5.1 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

จากรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งและยุคที่สาม โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ กระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} = 100μA แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. และมีความต้านทานต่อร่วมอยู่ด้วย 2 ตัว คือ R_X และ R_Z กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10KΩ โดยที่ความต้านทาน R_X มีหน้าที่เป็นตัวจำกัดค่ากระแส i_x ให้เกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนแรงดัน V_{in} เข้ามายังที่พอร์ท Y



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

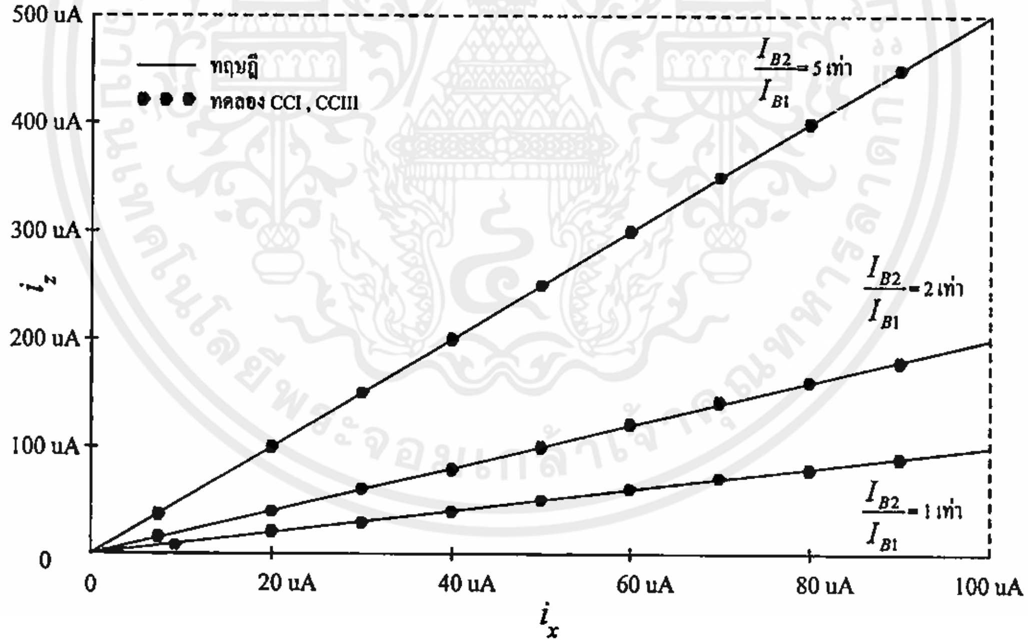
รูปที่ 5.11 แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ... ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองวงจรตามรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 เพื่อเปรียบเทียบค่าของอัตราส่วนแรงดัน $\frac{v_x}{v_y}$ โดยทำการป้อนแรงดัน V_{in} เข้าที่พอร์ท Y มีค่า 1 โวลท์ แล้วทำการทดลองวัดค่าแรงดัน v_x ที่พอร์ท X พบว่าได้ความสัมพันธ์ของแรงดันทั้งสองดังกล่าวมีค่าเป็น $v_x \cong v_y$ ซึ่งเป็นไปตามที่ได้คาดหมายเอาไว้ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 5.11

5.5.2 การทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์

จากรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ทำเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งและยุคที่สาม โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP เบอร์ 2N 3904 และ 2N3906 ตามลำดับ กระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} = 100μA แหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} = 12V., V_{EE} = -12V. และมีความต้านทานต่อร่วมอยู่ด้วย 2 ตัว คือ R_X และ R_Z กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10KΩ โดยที่ความต้านทาน R_X มีหน้าที่เป็นตัวจำกัดค่ากระแส i_x ให้เกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนแรงดัน V_{in} เข้ามายังที่พอร์ท Y



รูปที่ 5.12 แสดงผลการทดลองวัดค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองวงจรตามรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.6 เพื่อเปรียบเทียบค่าของอัตราส่วนกระแส $\frac{i_z}{i_x}$ โดยทำการป้อนกระแสไบอัส I_{B2} มีค่าตั้งแต่ 100μA, 200μA และ 500μA แล้วทำการทดลองวัดค่ากระแส i_x ที่พอร์ท X และกระแส i_z ที่พอร์ท Z พบว่าได้ความสัมพันธ์ของกระแสทั้งสองดังกล่าวมีค่าเป็น $i_x \cong A_i i_Z$ ซึ่งเป็นไปตามที่ได้คาดหมายเอาไว้ ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 5.12

5.6 บทสรุป

ในการประยุกต์ใช้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ โดยประยุกต์เป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งและยุคที่สามนั้น สามารถให้ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสตามสมการอุดมคติ โดยในยุคที่หนึ่ง จะได้ค่าความสัมพันธ์ที่พอร์ท X, Y และ Z คือ $i_y = i_x$, $v_x = v_y$ และ $i_Z = \pm\frac{I_{B1}}{I_{B2}} i_x$ และในยุคที่สาม จะได้ค่าความสัมพันธ์ที่พอร์ท X, Y และ Z คือ $i_y = -i_x$, $v_x = v_y$ และ $i_Z = \pm\frac{I_{B1}}{I_{B2}} i_x$ ซึ่งผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรสอดคล้องกับคุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎีที่ได้คาดหมายเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
บทสรุปและวิจารณ์

6.1 บทสรุปและวิจารณ์

ในการนำเสนอการออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ และวิธีการชดเชยผลของอุณหภูมิ ที่ได้เสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้ทำการวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยการออกแบบวงจรจะอาศัยหลักการของวงจรรวมและการทำงานของวงจรจะอยู่ในรูปของกระแสและใช้หลักการของวงจรขยายโอทีเอ วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแสโดยวงจรที่ออกแบบจะมีการชดเชยค่าของอุณหภูมิและสามารถปรับค่ากระแสได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถเลือกปรับค่าได้จากกระแสไบอัส I_{B1} หรือปรับค่าความต้านทาน R_X ทำให้มีช่วงปฏิบัติงานได้กว้างขึ้น ซึ่งในที่นี้วงจรได้พัฒนาขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทั้งหมดในการออกแบบ ผลของอุณหภูมิต่อวงจรสามารถยืนยันได้ด้วย ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรในทางทฤษฎี ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice และผลการทดลองต่อวงจรจริงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นเหตุจูงใจที่จะได้พัฒนาวงจรให้เหมาะสมเพื่อจะนำไปทำเป็นวงจรรวมเพื่อประยุกต์ใช้งานได้สะดวก ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวงจรที่ได้นำเสนอ

6.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยและพัฒนาต่อ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านมอสทรานซิสเตอร์ ได้พัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว แนวทางในการวิจัยและพัฒนาวงจรจึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงรูปแบบของวงจร ซึ่งจากเดิมที่ใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์มาใช้มอสทรานซิสเตอร์ จึงเป็นแนวทางที่จะต้องทำการศึกษาค้นคว้าและวิจัยต่อไป และวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบไปด้วยวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด ที่ทำการสำเนา (Copy) กระแสหลายชุดด้วยกันเพื่อให้ได้ค่ากระแสเอาท์พุททีพอร์ทต่างๆ ทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจึงจะต้องทำการปรับปรุงและแก้ไข ในส่วนนี้จึงเป็นอีกแนวทางที่จะต้องทำการวิจัยและพัฒนาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] A.M. Soliman, " New Active-Gyrator Circuit Using a Single Current Conveyor, " IEEE Proc., 66, pp.1580-1581, 1978.

[2] C. ToumaZou and F.J. Lidgey, " Floating-Impedance Converters Using Current Conveyors, " Electron Letter., vol. 21, NO. 15, pp.640-642, 1985.

[3] S.I. Liu and H.W. Tsao, " New Configuration for Single CCII biquads, " Int. J. Electronic., vol. 70, NO.3, pp.609-622, 1991.

[4] C.P. Chong and K.C. Smith, " Sinusoidal Oscillator Employing Current Conveyors, " Int. J. Electronic., vol. 62, NO.4, pp.515-520, 1987.

[5] K.C. Smith and A.Sedra, " The Current Conveyor : A New Circuit Building Block, " Proc. IEEE, 56, pp. 1368-1369, 1968.

[6] K.C. Smith and A. Sedra, " A Second Generation Current Conveyor and Its Applications," IEEE Trans, CT-17, pp.132-134, 1970.

[7] Fabre A. " Dual Translinear Voltage/Current Convertor. " Electron. Lett., vol. 19, Nov. 1985. pp. 1030-1031.

[8] Fabre A. " Translinear Current Conveyors Implementtation. " Int. J. Electron., vol. 59, Nov. 1985. pp.619-623.

[9] Fabre A., Saaid O., Wiest F. and Boucheron C. " High Frequency Applications Based on a New Current Controlled Converor. " IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 43, no. 2, Feb. 1996. pp. 82-91.

[10] Fabre A., " Third-generation current conveyor: a new helpful active element " Electronics letters , vol. 31, no. 5, March 1995. pp. 338-339.

[11] Geiger R. L., Sanchez-Sinencio E. " Active Filter Design using Operational Transconductance Amplifier : A tutorial. " IEEE Circuits Devices Mag., Mar. 1985. pp.22-32.

[12] Malvar H.S. " Electronically Tunable Active Filter with Operational Transconductance Amplifier. " IEEE Tran. CAS-29, 1982. pp. 333-336.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] Surakampontorn W., Jutaviriya S. and Riewruja V. " OTA-Base Electronically Tunable Voltage-Controlled Resistance Converter. " Int. J. Electron., vol. 67, no. 1, 1989 pp. 81-85.

[14] Surakampontorn W., Riewruja V., Surawatpunya C. and Yodladda S. " Instrumentation Amplifiers using Operational Transconductance Amplifiers. " Int. J. Electron., vol. 71, no. 3, 1991. pp. 511-515.

[15] E. W. Greeneich, " Analog Integrated Circnits, " Chapman & Hall, 1997.

[16] PSpice, Microsim Corp., Laguna Hills, CA 92653, U.S.A., May, 1980.

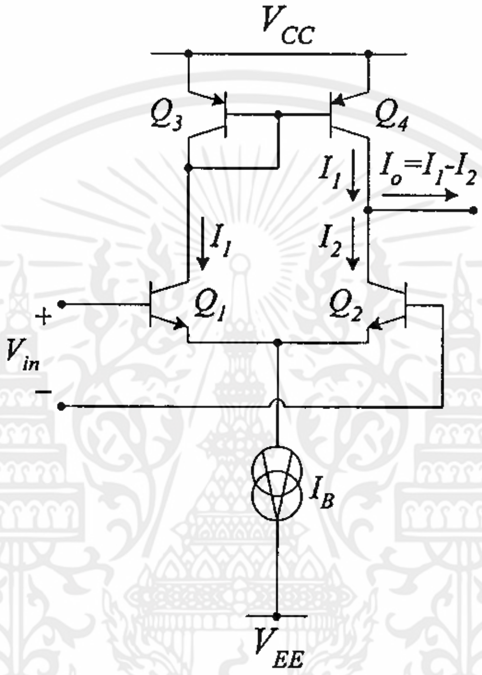
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I_o กับแรงดัน V_{in} และค่าทรานส์คอนดัคแตนซ์ (g_m) ของวงจรขยายแบบดิฟเฟอร์เรนเชียล



รูปที่ ก.1 วงจรขยายความแตกต่าง

จาก

$$I_C = I_S \exp(V_{BE} / V_T) \tag{ก.1}$$

ความสัมพันธ์ของกระแส I_1 และ I_2 จะได้

$$I_1 = I_S \exp(V_{BE1} / V_T) \tag{ก.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$I_2 = I_S \exp(V_{BE2} / V_T) \qquad (ก.3)$$

เนื่องจาก

$$I_B = (I_1 + I_2) \qquad (ก.4)$$

แทนสมการที่ (ก.2) และสมการที่ (ก.3) ลงในสมการที่ (ก.4)

$$I_B = I_S \left[\exp(V_{BE1} / V_T) + \exp(V_{BE2} / V_T)\right] \qquad (ก.5)$$

หรือ

$$I_S = \frac{I_B}{\exp(V_{BE1} / V_T) + \exp(V_{BE2} / V_T)} \qquad (ก.6)$$

แทนสมการที่ (ก.6) ลงในสมการที่ (ก.2)

$$I_1 = \frac{I_B \exp(V_{BE1} / V_T)}{\exp(V_{BE1} / V_T) + \exp(V_{BE2} / V_T)} \qquad (ก.7)$$

แทนสมการที่ (ก.6) ลงในสมการที่ (ก.3)

$$I_2 = \frac{I_B \exp(V_{BE2} / V_T)}{\exp(V_{BE1} / V_T) + \exp(V_{BE2} / V_T)} \qquad (ก.8)$$

เนื่องจาก

$$I_O = I_1 - I_2 \qquad (ก.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (ก.7) และสมการที่ (ก.8) ลงในสมการที่ (ก.9)

$$I_O = I_B \frac{\exp(V_{BE1}/V_T) - \exp(V_{BE2}/V_T)}{\exp(V_{BE1}/V_T) + \exp(V_{BE2}+V_T)} \qquad (ก.10)$$

คูณเศษและส่วนด้วยนิพจน์ $\exp\left[-\left(\frac{V_{BE1}+V_{BE2}}{2V_T}\right)\right]$ ลงในสมการที่ (ก.10)

$$I_O = I_B \frac{\exp\left(\frac{V_{BE1}-V_{BE2}}{2V_T}\right) - \exp\left(-\left[\frac{V_{BE1}-V_{BE2}}{2V_T}\right]\right)}{\exp\left(\frac{V_{BE1}-V_{BE2}}{2V_T}\right) + \exp\left(-\left[\frac{V_{BE1}-V_{BE2}}{2V_T}\right]\right)} \qquad (ก.11)$$

จาก

$$\tanh x = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)} \qquad (ก.12)$$

ดังนั้น

$$I_O = I_B \tanh\left(\frac{V_{BE1}-V_{BE2}}{2V_T}\right) \qquad (ก.13)$$

ให้ $V_{in} = V_{BE1} - V_{BE2}$

จะได้

$$I_O = I_B \tanh\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \qquad (ก.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก

$$g_m = \frac{dI_O}{dV_{in}}\bigg|_{V_{in}=0} = \frac{I_B}{2V_T}\sec^2 h\left(\frac{V_{in}}{2V_T}\right) \qquad (ก.15)$$

จากนั้นแทน $V_{in} = 0$ ตามนิยามลงในสมการที่ (ก.15) จะได้

$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \qquad (ก.16)$$

ดังนั้นจะได้

$$I_O = g_m V_{in} \qquad (ก.17)$$

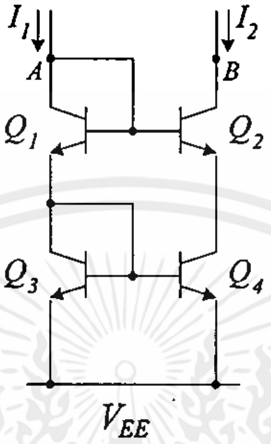
หรือ

$$I_O = \frac{I_B}{2V_T} V_{in} \qquad (ก.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

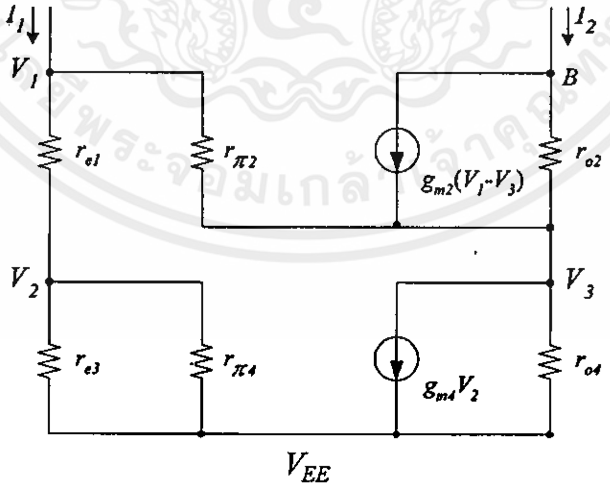
ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานทางอินพุทของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด



รูปที่ ข.1 วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด

วงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคดแสดงในรูปที่ ข.1 กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรมีความสัมพันธ์กันทุกประการจะสามารถเขียนวงจรสมมูลของสัญญาณขนาดเล็กได้ดังแสดงในรูปที่ ข.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข.2 วงจรสมมูลย์ของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความต้านทานจุดเข้าจะหาได้ในการกำหนดให้จุด B ระต่อลงดิน (Ground) ซึ่งจะหาความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของวงจรสมมูลในแต่ละจุดได้ดังนี้

ที่จุด V_2

$$\frac{1}{r_{e1}}(V_2 - V_1) + (\frac{1}{r_{e3}} + \frac{1}{r_{\pi 4}})V_2 = 0 \qquad (ข.1)$$

เนื่องจาก $\frac{1}{r_{e3}} >> \frac{1}{r_{\pi 4}}$ ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ (ข.1) ได้ดังนี้

$$V_2 = \frac{r_{e3}}{r_{e1} + r_{e3}} V_1 \qquad (ข.2)$$

ที่จุด V_1

$$\frac{(V_1 - V_2)}{r_{e1}} + \frac{(V_1 - V_3)}{r_{\pi 2}} = I_1 \qquad (ข.3)$$

แทนค่า $r_e = \frac{\alpha}{g_m}$ และสมการที่ (ข.2) ลงในสมการที่ (ข.3) จะได้

$$I_1 = \frac{g_{m1} g_{m3}}{g_{m1} + g_{m3}} V_1 - \frac{1}{r_{\pi 2}} V_3 \qquad (ข.4)$$

ที่จุด V_3

$$\frac{1}{r_{o4}} V_3 + g_{m4} V_2 + \frac{1}{r_{o2}} V_3 + \frac{1}{r_{\pi 2}}(V_3 - V_1) = g_{m2}(V_1 - V_3) \qquad (ข.5)$$

เนื่องจาก r_{o2} และ r_{o4} มีค่าสูงสุดมาก ๆและ $\frac{1}{r_{\pi 2}} << g_{m2}$

ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ (ข.5) ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_3 = V_1 - \frac{g_{m4}}{g_{m2}} V_2 \qquad (ข.6)$$

เนื่องจากทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรมีความสมพงษ์กันนั่นคือ $g_{m4} = g_{m2}$ แทนค่าสมการที่ (ข.2) ลงในสมการที่ (ข.6)

$$V_3 = \frac{g_{m3}}{g_{m1} + g_{m3}} V_1 \qquad \text{(ข.7)}$$

แทนค่าสมการที่ (ข.7) ในสมการที่ (ข.4) ดังนั้น

$$I_1 = \frac{g_{m1} g_{m3}}{g_{m1} + g_{m3}} \left[1 - \frac{1}{g_{m1} r_{\pi 2}} \right] V_1 \qquad \text{(ข.8)}$$

จากสมการที่ (ข.8) เทอม $\frac{1}{g_{m1} r_{\pi 2}} << 1$ กรณี $g_{m1} = g_{m3} = I_1/V_T$

ดังนั้นความต้านทานจุดเข้าจะมีค่าเท่ากับ $R_{in} = \frac{2v_T}{I_1}$

การวิเคราะห์หาค่าความต้านทานทางจุดออกของวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด

จากรูปที่ ข.1 และรูปที่ ข.2 จะสามารถหาความต้านทางจุดออกของวงจรได้ โดยการกำหนดให้กระแสจุดเข้า $I_1 = 0$ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสในแต่ละจุดจะหาได้ดังนี้

ที่จุด V_2

$$\left(\frac{1}{r_{e1}} + \frac{1}{r_{e3}} + \frac{1}{r_{\pi 4}}\right) V_2 - \frac{1}{r_{e1}} V_1 = 0 \qquad \text{(ข.9)}$$

เนื่องจากทรานซิสเตอร์ทุกตัวในวงจรมีความสมพงษ์กันนั่นคือ $r_{e1} = r_{r3}$ และ $\frac{1}{r_e} >> \frac{1}{r_{\pi 4}}$
ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ (ข.9) ได้ดังนี้

$$V_2 = \frac{V_1}{2} \qquad \text{(ข.10)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุด V_1

$$\left(\frac{1}{r_{e1}}+\frac{1}{r_{\pi 2}}\right)V_1=\frac{1}{r_{e1}}V_2+\frac{1}{r_{\pi 2}}V_3 \qquad (ข.11)$$

เนื่องจาก $\frac{1}{r_{e1}}$ มีค่ามากเมื่อเทียบกับ $\frac{1}{r_{\pi 2}}$ และแทนค่าสมการที่ (ข.10) ลงในสมการที่ (ข.11) จะได้

$$V_1=\frac{2}{\beta}V_3 \qquad (ข.12)$$

ที่จุด V_3

$$\left(\frac{1}{r_{o2}}+\frac{1}{r_{o4}}+\frac{1}{r_{\pi 2}}+g_{m2}\right)V_3+g_{m4}V_2-\left(\frac{1}{r\pi 2}+g_{m2}\right)V_1=\frac{V_B}{r_{o2}} \qquad (ข.13)$$

เนื่องจาก $g_{m2} >> r_{o2}, r_{o4}, \frac{1}{r\pi 2}$ และ $g_{m2}=g_{m4}=g_m$ ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการที่ (ข.13) ได้ดังนี้

$$g_mV_3+g_mV_2-g_mV_1=\frac{V_B}{r_{o2}} \qquad (ข.14)$$

แทนค่าสมการที่ (ข.10) และสมการที่ (ข.12) ลงในสมการที่ (ข.14) จะได้

$$V_3=\frac{V_B}{g_m r_{o2}} \qquad (ข.15)$$

ที่จุด V_B

$$I_2=g_{m2}V_1-\left(g_{m2}+\frac{1}{r_{o2}}\right)V_3+\frac{V_B}{r_{o2}} \qquad (ข.16)$$

แทนค่าสมการที่ (ข.12) และสมการที่ (ข.15) ลงในสมการที่ (ข.16)
ดังนั้นจะหาความต้านทานที่จุดออกได้ดังนี้

เอกสาร ... เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_o=\frac{V_B}{I_2}=\frac{\beta}{2}r_{o2} \qquad (ข.17)$$

ภาคผนวก ค.

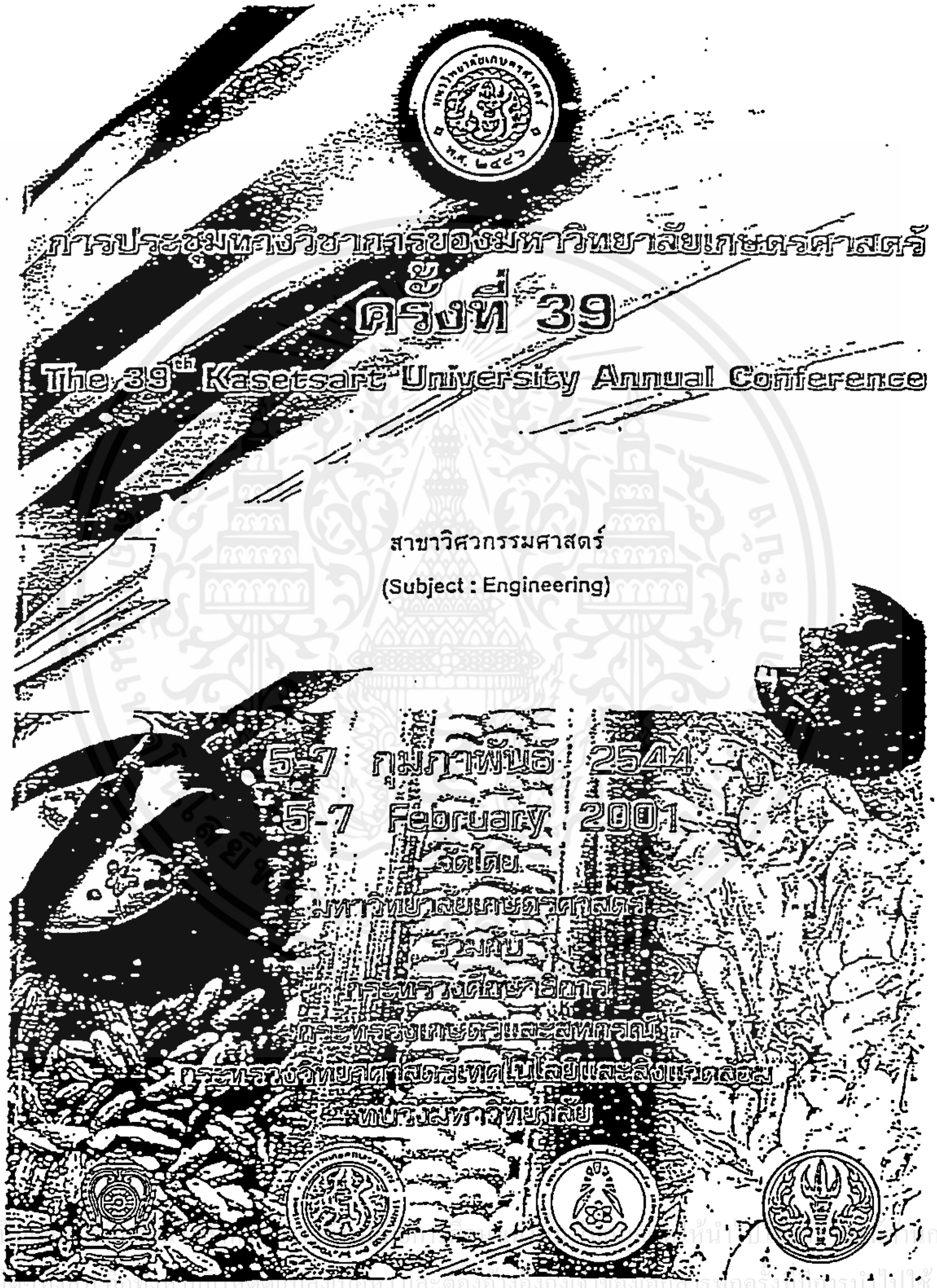
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสาร ในวิทยานิพนธ์นี้มี 3 บทความ ดังต่อไปนี้

[1] สุชาต สงวนไว้, พัชราภรณ์ นิปัทธหัตถพงศ์, เอกชัย ม่วงรอดภัย, และ เกียรติศักดิ์ คมวัชระ "วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ" การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39, 2544, หน้า 258-263

[2] เอกชัย ม่วงรอดภัย, สุชาต สงวนไว้, และ เกียรติศักดิ์ คมวัชระ "วงจรแปลงความถี่รูปคลื่นใดๆเป็นค่าแรงดัน" การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39, 2544, หน้า 68-75

[3] สุชาต สงวนไว้, เอกชัย ม่วงรอดภัย, และ เกียรติศักดิ์ คมวัชระ "วงจรสะท้อนกระแสแบบใหม่ชนิดควอเตทและการประยุกต์ใช้งาน" การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39, 2544, หน้า 520-527

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เ… ห้ามนำไป… การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น … และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

258 การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39
สาขาวิศวกรรมศาสตร์

วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ที่มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ

Temperature-Insensitive Universal Current Conveyor

สุชาติ สงวนไว้ พัชราภรณ์ นิบัทธหัตถพงศ์ เอกชัย ม่วงรอดภัย และ เกียรติศักดิ์ คมวัชระ
Suchat Sa-nguanwai , Patcharaporn Nibathanathapong,
Ekkachai Muangrodpa, and Kiattisak Kumwachara

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ ที่สามารถปรับเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง และวงจรสายพานกระแสยุคที่สามได้ โดยไม่ต้องเพิ่มหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ให้กับวงจร วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์นี้ยังสามารถปรับขนาดกระแสถ่ายโอน(I_c)ได้ โดยจะใช้วิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้ความถูกต้องแม่นยำสูง การออกแบบวงจรได้นำหลักการของโอทีเอ(OTA) มาปรับปรุง เพื่อให้วงจรมีคุณสมบัติแรงดันและกระแสของสายพานกระแสแต่ละยุค นอกจากนั้นวงจรยังได้รับการปรับปรุงในด้านการทำงานอีกนั่นคือ วงจรมีช่วงปฏิบัติงานที่กว้างขึ้น และวงจรมีเสถียรภาพโดยไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ABSTRACT

This paper presents Universal current conveyor which can be adapted to first, second, and third generation current conveyor without adding or modifying its elements. This Universal current conveyor can be electronically tuned transfer current magnitude, which give higher accurate result. In designing circuit, OTA concept was applied in order to give voltage and current property to each generation. Moreover, it has been improved to be insensitive to temperature change and to have wide dynamic range.

คำนำ

วงจรสายพานกระแสได้ถูกนำเสนอขึ้น และได้รับการพัฒนาจากวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง[1] เป็นยุคที่สอง[2] และยุคที่สาม[3] ซึ่งโดยทั่วไปวงจรสายพานกระแสสามารถนิยามในแผนภาพบล็อค (Block-diagram) ที่มี 3 ขั้วต่อ ที่อธิบายความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของวงจรสายพานกระแส ในการออกแบบวงจรสายพานกระแสได้มีการนำเสนอหลักการต่าง ๆ มากมาย แต่สามารถสร้างขึ้นได้เป็นวงจรสายพานกระแสเฉพาะยุคเท่านั้น ดังนั้นบทความนี้จึงได้ออกแบบวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ (Universal Current Conveyor : UCC) ที่สามารถแทนวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สาม ที่มีอยู่เหล่านั้นได้ และวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์นี้ยังสามารถปรับขนาดของกระแสถ่ายโอนได้โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า ให้ค่าที่แม่นยำสูงกว่าปรับค่าโดยวิธีทางกล การออกแบบวงจรได้นำหลักการของ OTA มาสร้าง แต่ OTA มีข้อเสียคือมีช่วงปฏิบัติงานที่แคบ(ประมาณ52mV) และไม่เสถียรเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปนั้นจึงได้มีการปรับปรุงวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์นี้ให้มีช่วงปฏิบัติงานที่กว้างขึ้นและวงจรมีเสถียรภาพโดยไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Faculty Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ ... ใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สาม ที่ได้นำเสนอ

แผนภาพบล็อคสายพานกระแสเอนกประสงค์

แผนภาพบล็อคสายพานกระแสเอนกประสงค์ ประกอบด้วยแรงดันขาเข้า 1 ขั้วต่อที่ V_Y กระแสขาเข้า 1 ขั้วต่อที่ V_X และกระแสขาออก 4 ขั้วต่อ ที่ Ix^+ , Ix^- และ Iz^+ ,Iz^- โดยที่กระแสขาออก Ix^- Iz^- จะมีทิศตรงข้ามกับIx^+ Iz^+ตามลำดับ

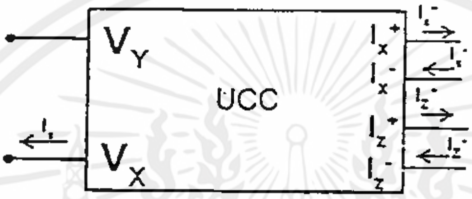


Figure 1 Block-diagram representation of Universal current conveyor

จากแผนภาพบล็อคสายพานกระแสเอนกประสงค์นี้สามารถปรับเป็นสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง สายพานกระแสยุคที่สอง และสายพานกระแสยุคที่สามได้โดยต่อขั้วระหว่างขั้วต่อของสายพานกระแสเอนกประสงค์ดังนี้

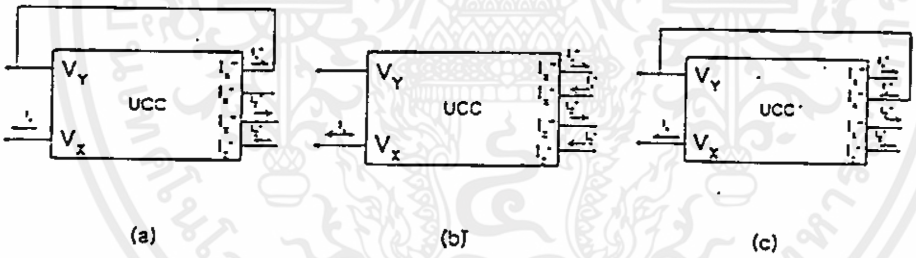


Figure 2 Realisation of current conveyor

(a) First-generation current conveyor

(b) Second-generation current conveyor

(c) Third-generation current conveyor

วงจรที่ใช้งานจริง

ในการออกแบบวงจรได้นำหลักการของ OTA มาสร้าง ซึ่งวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์นี้สร้างขึ้นจากวงจรOTA 2ชุด ที่มีขั้วต่อ V_X และ V_Yร่วมกัน และให้กระแสขาออก I_X^- I_X^- I_Z^- I_Z^- การทำงานของวงจรจะกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวสมพงษ์กัน I_{B1} และ I_{B2} เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ วงจรประกอบด้วยวงจรขยายความแตกต่าง 2 ชุด (Q_1และQ_2 Q_3และQ_4) และวงจรสะท้อนกระแสแบบคาดโคสที่มีอัตราการส่งผ่านกระแสเท่ากับหนึ่ง (Q_5-Q_{14}) จากวงจรสามารถอธิบายความสัมพันธ์กระแสและแรงดันดังนี้

จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของOTAที่มีโครงสร้างเป็นวงจรขยายความแตกต่างที่ได้มีการวิเคราะห์ไว้แล้ว[4] ดังนั้นวงจรดังรูปที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์แรงดันและกระแสคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_x = \frac{g_{m1}R_x}{1+g_{m1}R_x}V_y \qquad (1)$$

$$I_z = g_{m2}(V_y - V_x) \qquad (2)$$

โดยที่ $g_{m1} = I_{B1}/2V_T$ และ $g_{m2} = I_{B2}/2V_T$

$$I_z = \frac{g_{m2}}{1+g_{m1}R_x}V_y \qquad (3)$$

เนื่องจาก $g_{m1}R_x >> 1$ ดังนั้นสมการที่ 3 ได้

$$I_z \approx \frac{g_{m2}}{g_{m1}}\frac{V_y}{R_x} \approx \frac{I_{B2}}{I_{B1}} \cdot I_x \qquad (4)$$

และจากสมการที่ 1 พบว่า

$$V_x \approx V_y \qquad (5)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า g_{m1} และ g_{m2} ที่เคยขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่อประกอบเป็นวงจรดังรูปที่ 3 อุณหภูมิจะถูกชดเชยไปและสามารถกำหนดช่วงปฏิบัติงานวงจรได้เป็น $V_m \leq |2V_T + I_{B1}R_x|$ จะเห็นได้ว่า ช่วงปฏิบัติงานเพิ่มขึ้นจากเดิม $2V_T$ เป็น $|2V_T + I_{B1}R_x|$ ดังนั้นในการเพิ่มช่วงปฏิบัติงานให้กว้างขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่ม I_{B1} หรือความต้านทาน R_x และจากสมการที่ 4 I_z เป็นกระแสถ่ายโอนที่สามารถปรับขนาดกระแสได้โดยการปรับกระแส I_{B1} หรือ I_{B2} แต่ในที่นี้จะสังเกตได้ว่า การปรับกระแส I_{B1} นั้นจะส่งผลกระทบถึงช่วงปฏิบัติงาน ดังนั้นการปรับกระแส I_{B2} จึงเหมาะสมกว่า

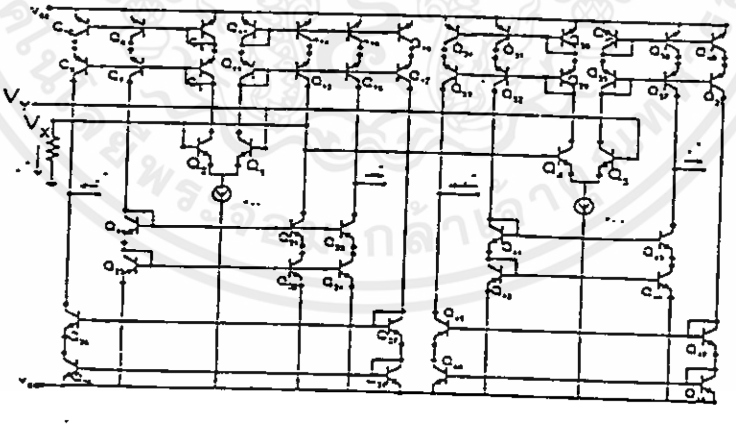


Figure 3 Proposed Universal current conveyor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นสามารถสรุปความสัมพันธ์แรงดันและกระแสตามคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สาม โดยให้วงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์ได้ดังนี้

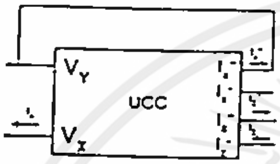
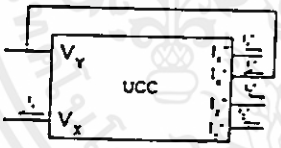
สายพานกระแสยุคที่ 1  	ความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของสายพานกระแสยุคที่1 $I_Y = I_X$ $V_X \cong V_Y$ $I_Z \cong \frac{I_{B2}}{I_{B1}} I_X$
สายพานกระแสยุคที่ 2 	ความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของสายพานกระแสยุคที่ 2 $I_Y = 0$ $V_X \cong V_Y$ $I_Z \cong \frac{I_{B2}}{I_{B1}} I_X$
สายพานกระแสยุคที่ 3  	ความสัมพันธ์แรงดันและกระแสของสายพานกระแสยุคที่ 3 $I_Y = -I_X$ $V_X \cong V_Y$ $I_Z \cong \frac{I_{B2}}{I_{B1}} I_X$

Figure 4 Block-diagram and relationship of current conveyor

ผลการเลียนแบบการทำงานและสมรรถนะของวงจร

จากวงจรดังรูปที่ 3 ใช้การเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยกำหนดค่า R_X=10k ซึ่งผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรจะแสดงความคุณสมบัติแรงดันและกระแสของวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง ยุคที่สอง และยุคที่สาม โดยรูปที่ 5 แสดงแรงดันถ่ายโอนระหว่าง V_X และ V_Y เมื่อให้แรงดันขาเข้าที่ขั้วต่อ V_Y ขนาด 1 โวลต์ รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_X และ I_Y จะเห็นว่าสำหรับวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่งกระแส I_X และ I_Y จะมีทิศทางเดียวกัน และวงจรสายพานกระแสจะมีทิศตรงกันข้าม รูปที่ 7 แสดงกระแสถ่ายโอน ซึ่งจะมีขนาดเปลี่ยนไปเมื่อมีการปรับแหล่งจ่ายกระแส I_{B2} และเพื่อเป็นการทดสอบว่าวงจรสายพานกระแสเอนกประสงค์นี้มีเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การทดสอบได้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยกำหนดที่ T=0°c ,T= 27°c,T=50°c and T=100°c) ผลการทดสอบดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้แรงดันขาเข้าที่ขั้วต่อ V_Y เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปแรงดัน V_x ยังมีขนาดเช่นเดิมแต่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิบ้างเพียงเล็กน้อย รูปที่ 9 แสดง การกำหนดให้วงจรมีช่วงปฏิบัติงานต่าง ๆ โดยการปรับเปลี่ยนค่า I_{B1} นั่นคือถ้าต้องการให้ช่วงปฏิบัติงานกว้างขึ้นสามารถทำโดยการเพิ่มแหล่งจ่ายกระแส I_{B1} ให้กับวงจร

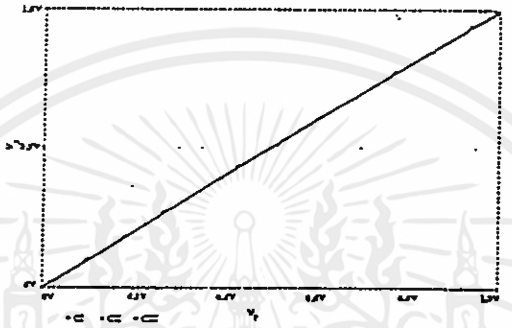


Figure 5 Voltage transfer (V_y and V_x) characteristic with $I_{B1}=I_{B2}=100uA$

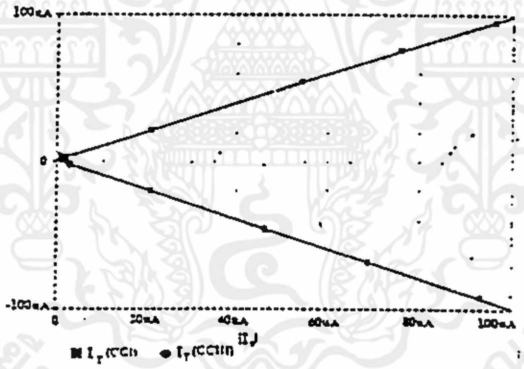


Figure 6 I_y againt I_x characteristic with $I_{B1}=I_{B2}=100uA$

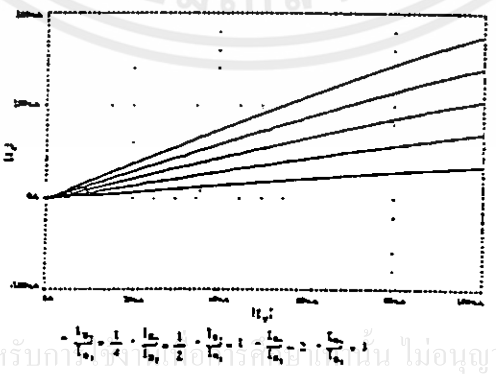


Figure 7 Current transfer ($I_z$and I_x) charateristic with variation of I_{B2}/I_{B1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

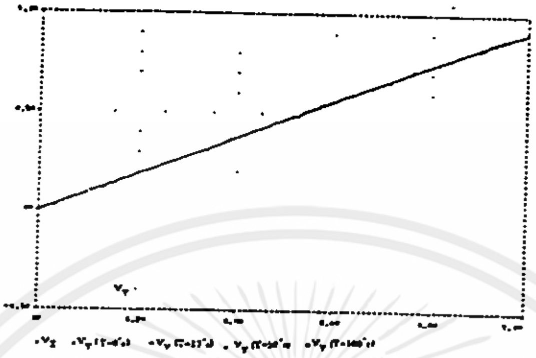


Figure 8 Voltage transfer (V_Y and V_X) characteristic with variation of temperature (T=0°c ,T= 27°c,T=50°c and T=100°c)

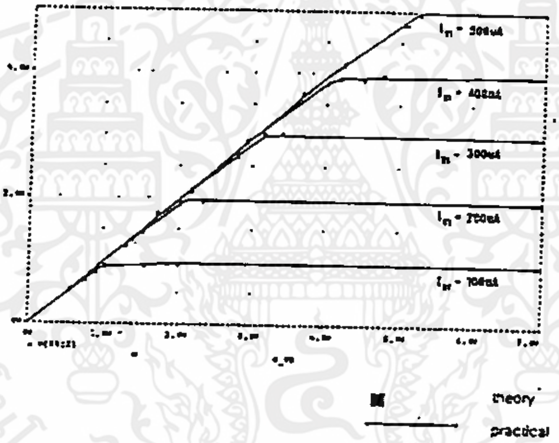


Figure 9 Dynamic range with variation of I_{B1}

สรุป

จากผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรนี้แสดงให้เห็นว่า วงจรสายพานกระแสอเนกประสงค์ที่ได้ออกแบบนี้สามารถปรับเป็นวงจรสายพานกระแสยุคที่หนึ่ง วงจรสายพานกระแสยุคที่สอง และวงจรสายพานกระแสยุคที่สามได้ โดยสามารถปรับขนาดกระแสถ่ายโอนได้ตามต้องโดยปรับเปลี่ยนค่า I_{B1} วงจรที่ได้นี้ยังมีเสถียรภาพเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และวงจรมีช่วงปฏิบัติงานที่กว้างโดยสามารถปรับเปลี่ยนด้วยค่า I_{B1} และ R_x

เอกสารอ้างอิง

Sedra, A.and Smith,K.C., "The current conveyor:A new circuit building block."Proc. IEEE, Vol.56, pp.1368-1369, Aug. 1968

Sedra, A.and Smith,K.C., "A second generation current conveyor and its application," IEEE Trans., 1970, CT-17, pp.132-134

Fabre,A." Third-generation current conveyor:A new helpful active element", Elec. Letters, Vol.31, No.5, pp.338-339, Mar.1995

Edwin W.Greeneich, "Analog Integrated Circuits" ,Chapman & Hall, London England, 1997, Chap.3

สาขาวิศวกรรมศาสตร์

วงจรแปลงความถี่รูปคลื่นใด ๆเป็นค่าแรงดัน

An analog numerous waveform frequency-to-voltage converter

เอกชัย ม่วงรอดภัย สุชาติ สงวนไว้ และ เกียรติศักดิ์ คุมวัชระ

Ekkachai Muangrodpai, Suchat Sa-nguanwai, and Kiattisak Kumwachara

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรแปลงความถี่สำหรับสัญญาณรูปคลื่นใด ๆให้เป็นค่าแรงดัน โดยการทำงานจะประกอบไปด้วยวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรหาค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย และวงจรหาร ที่ถูกออกแบบภายใต้หลักการของวงจรรวมของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ทุกส่วนวงจรทำงานในโหมดกระแส ทำให้มีช่วงความถี่ปฏิบัติงานกว้าง ใช้แรงดันไฟต่ำ และให้ความเที่ยงตรงในการแปลงค่าสูง

ABSTRACT

This research presents an analog numerous waveform frequency-to-voltage converter , that can convert serveral waveform. The realization is consist of a voltage-to-current, an integrator, a Root-Mean-Square (RMS) and translinear divider circuit, the method can also be implemented in bipolar technology monolithic integrated form. Every path operate in current-mode, so the convertion of F/V circuit has wide operational frequency range, low supply voltage and high accurately converter.

คำนำ

จากการพัฒนาอย่างรวดเร็วของวงการอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการนำเอาวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ในการวัดและควบคุมความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ หรืออย่างเช่นในวงจร VCO (voltage controlled oscilator) ก็จะมีวงจร แปลงความถี่เป็นค่าแรงดันหรือ F/V เป็นส่วนประกอบในส่วนป้อนกลับ ดังนั้นเราจะพบว่าวงจร F/V มีการใช้งานแพร่หลายกันอยู่มาก แต่วงจร F/V ที่พบจากเอกสารอ้างอิง [1-4] พบว่ามีการออกแบบวงจรโดยใช้การทำงานร่วมกับออปแอมป์ (operational amplifier) ซึ่งเรารู้ดีว่าออปแอมป์นั้นมีการทำงานในรูปแรงดันโหมด(voltage-mode) ทำให้ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ที่ความถี่สูงและวงจรยังมีหลายออปแอมป์และมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม นอกจากนี้ไอซี F/V ที่พบในท้องตลาดเบอร์ LM331 หรือเบอร์ LM2907 [5] สามารถแปลงค่าได้เฉพาะสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น อินพุตที่ป้อนเข้ามาจะต้องมีแอมปลิจูดขนาดใหญ่ และแรงดันเอาท์พุตยังมีผลของ V_{cc} เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย (ถ้า V_{cc} ไม่คงที่จะเกิดการผิดพลาดได้) จากข้อจำกัดเหล่านี้ งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้นำเสนอวงจร F/V ที่สามารถใช้งานกับสัญญาณอินพุตที่หลายหลากรูปคลื่นสัญญาณได้และเพื่อไม่ให้มีขีดจำกัดเพียงสัญญาณเดียวเท่านั้น ในการแปลงค่าความถี่เป็นแรงดันที่ได้ไม่ขึ้นตรงกับแอมปลิจูดของสัญญาณอินพุทแต่อย่างใดทำ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

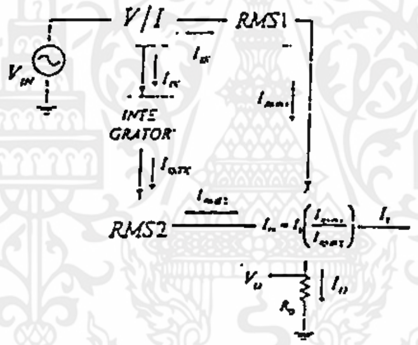
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีความเที่ยงตรงกับค่าสัญญาณนั้นๆที่แปลงได้ วงจรยังมีการทำงานภายใต้กระแสโหมด [6-7] จึงมีช่วงความถี่ปฏิบัติงานที่กว้างตั้งแต่ 0.1 Hz – 1 MHz และการออกแบบภายใต้เทคโนโลยีวงจรรวมไบโพลาร์ในรูปการนำเอารูปแบบของวงจร ทรานส์ลิเนียร์ (translinear circuit) มาประยุกต์ใช้งานทำให้วงจรไม่ขึ้นตรงต่อผลของอุณหภูมิจากภายนอกและภายในวงจร ผ่านการทดสอบสมรรถนะโดยใช้โปรแกรม PSPICE ในการเลียนแบบผลการทำงานของวงจรปรากฏผลให้ค่าสอดคล้องกับทฤษฎี

การออกแบบวงจรแปลงความถี่รูปคลื่นใดๆเป็นค่าแรงดัน

หลักการเบื้องต้นของวงจร

จากหลักการรูปที่ 1 ในขั้นแรกเราจะทำการเปลี่ยนสัญญาณจากรูปแรงดัน V_{IN} ให้เป็นกระแสเพื่อให้วงจรมีการทำงานในโหมดกระแส โดยจะมีค่าเป็น I_{IN} ตามสมการที่ (1) จากนั้นจะนำ I_{IN} ไปผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์ได้เป็นค่า I_{INTE} [5] ตามสมการที่(2) เพื่อนำค่าความถี่ของวงจรให้ปรากฏออกมาเป็นค่าแอมปลิจูดของสัญญาณ ซึ่งกระแส



รูปที่ 1 หลักการเบื้องต้นของวงจร

I_{IN} และ I_{INTE} ที่ได้ จะนำไปผ่านวงจร RMS [8] เพื่อเปลี่ยนเป็นกระแสตรงที่สามารถทราบคุณลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณต่างๆที่เราจะทำการแปลงได้จากค่าของ creat factor หรือ CF ดังแสดงเป็นค่ากระแส I_{RMS1} และ I_{RMS2} ตามสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ และค่ากระแส I_{RMS1} และ I_{RMS2} นี้จะมีความเป็นกระแสตรงราบเรียบมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับการเลือกค่า C_{AV1} และ C_{AV2} ในวงจรดังแสดงตามสมการที่ (5) และ (6) ในขั้นสุดท้ายจะนำ I_{RMS1} และ I_{RMS2} มาหารกันเพื่อลดผลของแอมปลิจูดสัญญาณอินพุต (V_{in}) ทั้งนี้เพื่อไม่ให้มีผลต่อแรงดันที่เอ้าต์พุตที่แปลงได้ ดังนั้นค่าแรงดันที่เอ้าต์พุตจะมีค่าแปรตามความถี่อินพุตเท่านั้น และไม่ขึ้นกับค่าแรงดันริพพลายร์ใดๆทั้งสิ้น ดังสมการที่ (7) และ (8) นอกจากนี้ยังใช้แรงดันริพพลายซ์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และสามารถทราบคุณลักษณะของรูปคลื่นที่เป็นอินพุทของวงจรจากอัตราส่วนของ CF_2 / CF_1 ซึ่งจะมีการบรรยายต่อไป

จากวงจร V/ I จะได้

$$I_{IN} = \frac{V_{IN}}{R_1} \qquad (1)$$

$$I_{INTE} = \frac{1}{C_{INTE} R_2} \int I_{IN} dt \qquad (2)$$

ที่วงจร RMS1 และ RMS2 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{RMS1} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (I_{IN})^2\, dt} \quad (3)$$

$$I_{RMS2} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (I_{INTE})^2\, dt} \quad (4)$$

ในการเลือกค่า C_{AV1} และ C_{AV2} สามารถเลือกได้ดังนี้

$$C_{AV1} \geq \frac{|I_{IN}|}{8\pi V_T f_i} \quad (5)$$

$$C_{AV2} \geq \frac{|I_{INTE}|}{8\pi V_T f_i} \quad (6)$$

ดังนั้นกระแสเอาต์พุตจะได้

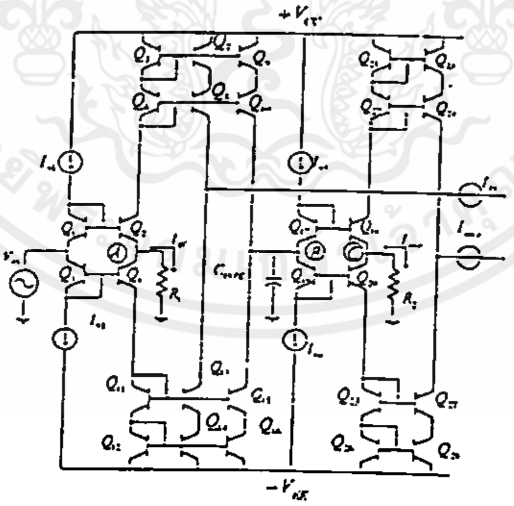
$$I_O = I_1\left[\frac{I_{RMS1}}{I_{RMS2}}\right] = (I_1)\frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (I_{IN})^2\, dt}}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (I_{INTE})^2\, dt}} \quad (7)$$

หรือ

$$V_O = I_O R_O \quad (8)$$

การออกแบบวงจรตามหลักการรูปที่ 1

1. วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (voltage-to-current) และวงจรอินทิเกรเตอร์ (integrator)



รูปที่ 2 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส และ วงจรอินทิเกรเตอร์

จากรูปที่ 2 เป็นรูปแบบวงจรสายพานกระแสแบบบวก (positive current conveyor) ยุคสอง ที่สร้างจากหลักการของวงจรคลาส AB ซึ่งทำงานในรูปแบบของกระแสโหมด พิจารณาที่ Q_1- Q_4 และแหล่งจ่ายกระแส I_{b}, กับ I_{b2} เมื่อสัญญาณอินพุต V_{in} ป้อนเข้ามาแรงดันที่ V_A จะเท่ากับแรงดัน V_{in} ทำให้เกิดกระแสขึ้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_1 มีค่าเป็น I_{IN} ตามสมการที่ (1) จากนั้นค่ากระแส I_{IN} จะถูกสะท้อนด้วยวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด (cascode current mirrors) ซึ่งประกอบด้วยส่วน Q_5- Q_{10} และ Q_{11}-Q_{16} ออกไปเป็นค่ากระแส I_{IN} 2 ชุด เพื่อนำไปป้อนเข้าสู่วงจรอินทิเกรเตอร์และวงจรหาค่า RMS ต่อไป ดังนั้นเมื่อพิจารณาสัญญาณอินพุตเป็นการประกอบขึ้นของสัญญาณซายน์หลาย ๆ ฮาโมนิคเข้าด้วยกันโดยมีค่าเป็น $V_{IN} = V_m \sum_{n=1}^{\infty} \sin n\omega_i t$ จากสมการที่ (1) จะได้

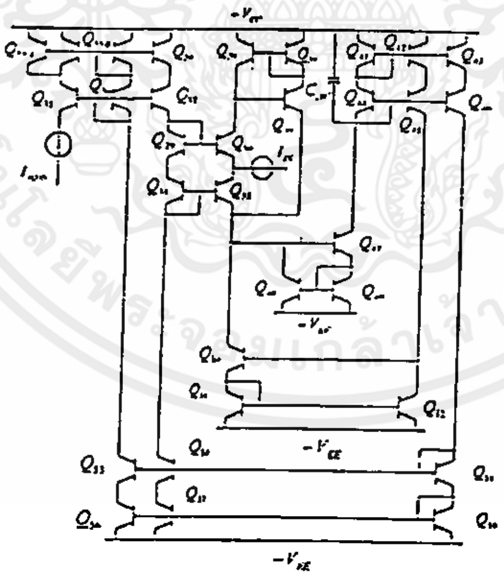
$$I_{IN} = \frac{V_m}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \sin n\omega_i t \qquad (9)$$

จากนั้นค่ากระแส I_{IN} อีกชุดจะถูกป้อนผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์ ซึ่งประกอบด้วย Q_{17}- Q_{20} และมี I_{b3} กับ I_{b4} เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ให้วงจร และมี C_{INTE} ต่ออยู่ที่โนด B เมื่อมีกระแส I_{IN} เข้ามาที่โนด B จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม C_{INTE} เป็น V_B ซึ่งทำให้เกิดแรงดัน V_C ตกคร่อม R_2 จึงเกิดกระแสขึ้นที่ R_2 มีค่าเป็น I_{INTE} ตามสมการที่ (2) แล้วค่ากระแส I_{INTE} ก็จะถูกสะท้อนผ่าน Q_{21}- Q_{24} และ Q_{25}- Q_{27} ซึ่งต่อเป็นวงจรสะท้อนกระแสคาสโคดออกไปสู่การทำงานภาคต่อไป ดังนั้นเมื่อแทนค่าจากสมการ (9) ในสมการ (2) จะได้

$$I_{INTE} = \frac{1}{C_{INTE} R_2} \int \frac{V_m}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \sin n\omega_i t dt$$

$$= \frac{V_m}{2\pi f_i C_{INTE} R_1 R_2 n} \sum_{n=1}^{\infty} \sin n\omega_i t \qquad (10)$$

2. วงจรหาค่า RMS



รูปที่ 3 วงจรหาค่า RMS

จากรูปที่ 3 วงจรประกอบไปด้วย วงจรกระแสยกกำลังสอง และวงจรสะท้อนกระแสอีก 6 ชุด ซึ่งประกอบกันทั้งหมดเป็นวงจร RMS โดยมีกระแสอินพุตของวงจรเป็น I_{IN} ส่วนอินพุตอีกส่วนหนึ่งคือกระแส I_{INTE} จะต้องใช้วงจรดังรูป 3 อีก 1 ชุด และเมื่อวิเคราะห์สัญญาณ I_{IN} และ I_{INTE} และหาค่า RMS ตามสมการที่ (3) และ (4) ออกมาแล้วจะได้ค่า I_{RMS1} และ I_{RMS2} ดังนี้

เอกสารนี้เป็นของ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{RMS\,1} = \frac{I_{IN}}{CF_1} = \frac{V_{in}}{R_1(CF_1)} \quad (11)$$

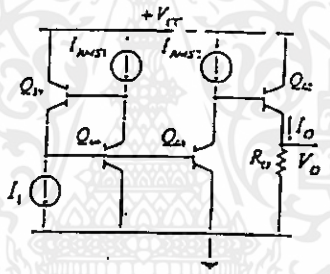
$$I_{RMS\,2} = \frac{I_{INTE}}{CF_2} = \frac{V_{in}}{2\pi f_i C_{INTE} R_1 R_2 n(CF_2)} \quad (12)$$

เมื่อ CF หรือ crest factor คือค่าคุณลักษณะเฉพาะของสัญญาณรูปคลื่นต่าง ๆ ที่ผ่านวงจร RMS ดังแสดงในตารางที่ 1 และการเลือกค่า C_{AV1} และ C_{AV2} เพื่อลดค่าแรงดันริปเปิ้ลเมื่อกำหนด V_T = 25 mV ที่อุณหภูมิห้อง จากสมการที่ (5) และ (6) จะได้

$$C_{AV1} \geq \frac{1.53|I_{IN}|}{f_i} \quad (13)$$

$$C_{AV2} \geq \frac{1.53|I_{INTE}|}{f_i} \quad (14)$$

3. วงจรหารกระแสแบบทรานส์ลิเนียร์ชนิด 1-ควอดแดรนซ์ (1-Quadrant Translinear Current Divider)



รูปที่ 4 วงจรหารกระแสแบบทรานส์ลิเนียร์ชนิด 1-ควอนดรันท์

ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่ากระแส I_O กับ I_{RMS1}, I_{RMS2} และ I_1 สามารถหาได้จาก

$$V_{BE\,59} + V_{BE\,60} = V_{BE\,61} + V_{BE\,62} \quad (15)$$

$$V_T \ln \frac{I_{C59} I_{C60}}{I_{S59} I_{S60}} = V_T \ln \frac{I_{C61} I_{C62}}{I_{S61} I_{S62}} \quad (16)$$

พบว่าสมการที่ (16) มี $I_{S59} = I_{S60} = I_{S61} = I_{S62} = I_S$ และ $I_{C59} = I_1$, $I_{C60} = I_{RMS1}$, $I_{C61} = I_{RMS2}$ และ $I_{C62} = I_O$ ดังนั้น

$$V_T \ln \frac{I_1 I_{RMS\,1}}{I_S^2} = V_T \ln \frac{I_{RMS\,2} I_O}{I_S^2} \quad (17)$$

$$I_O = \frac{I_1 I_{RMS\,1}}{I_{RMS\,2}} \quad (18)$$

แทนค่าสมการที่ (11) และ (12) ลงในสมการที่ (18) ได้

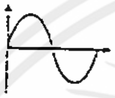
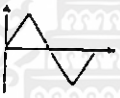
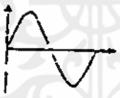
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_O = I_O R_O = \left(2\pi C_{INTE} R_2 R_O n I_1\right)\left(\frac{CF_2}{CF_1}\right) f_i = k_f f_i \quad (19)$$

เมื่อ

$$k_f = 2\pi C_{INTE} R_2 R_O n I_1 \left(\frac{CF_2}{CF_1}\right) \quad (20)$$

ตารางที่ 1

Wave form	Peak	RMS	C.F.
Sinwave or full wave 	V_m	$\frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m$	$\sqrt{2} = 1.414$
Square wave	V_m	V_m	1
Triangular 	V_m	$\frac{V_m}{\sqrt{3}} = 0.577V_m$	$\sqrt{3} = 1.732$
Parabola 	V_m	$\frac{V_m}{1.25} = 0.8V_m$	1.25

ผลการเลียนแบบการทำงานและสมรรถนะของวงจรที่ได้นำเสนอ

ประกอบวงจรรูปที่ 2 ถึงวงจรรูปที่ 4 เข้าด้วยกัน โดยทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP ที่จะใช้ในการเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE จะเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 และ2N3906 ตามลำดับ เลือกใช้ $+V_{CC}$ = +10 V, $-V_{EE}$ = -10V และ $I_{b1} = I_{b2} = I_{b3} = I_{b4}$ = 100 μ A โดยจะทดสอบกับสัญญาณ 3 รูปแบบดังนี้

สัญญาณรูปคลื่นซายน์ CF = 1.414

สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม CF = 1

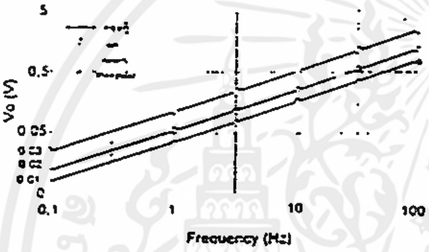
สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม CF = 1.732

(a) เลือกการแปลงความถี่เป็นค่าแรงดันหรือ k_f จากสมการที่ (20) ในช่วงความถี่ย่านต่ำโดยกำหนดให้ $I_1 = 160\mu$ A, R_1 = 10 k Ω, R_2 = 10 k Ω, R_O = 1 k Ω และ $C_{INTE} = \mu 2$ F จะได้ $k_f = (2 \cdot 10^{-2})(CF_2/CF_1)$ V/Hz จากนั้นให้อินพุต V_{in} มีขนาด 1V_p ความถี่จาก 0.1Hz ถึง 100Hz ผลการเลียนแบบการทำงานดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5 เมื่อการเลือกใช้ C_{AV1} และ C_{AV2} เพื่อลดค่าแรงดันริปเปิ้ลเลือกใช้จากสมการ (13) และ (14) ตามลำดับ ผลที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีแต่จะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นในช่วงความถี่ 0.1Hz – 1Hz เพราะเป็นผลเนื่องจากการวัดและค่าเฉลี่ยของแรงดันริปเปิ้ลเกิดขึ้นมากในช่วงความถี่ต่ำ ๆ

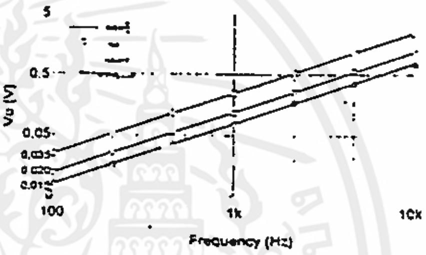
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(b) เลือกการแปลงค่าความถี่เป็นแรงดัน (k_f) ในช่วงความถี่ย่านปานกลางเป็น $k_f = (2{*}10^{-4})(CF_2/CF_1)$ V/Hz กำหนดให้ $I_1 = 160\,\mu$ A ,R_1= 10 kΩ , R_2= 10 kΩ , R_o=1 kΩ และ C_{INTE} = 20nF จากนั้นให้อินพุต V_{in} มีขนาด 1V_p ความถี่จาก 100Hz – 10kHz ผลการเลียนแบบการทำงานดังกล่าวแสดงในรูปที่ 6 ผลที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีและเกิดความผิดพลาดต่ำ

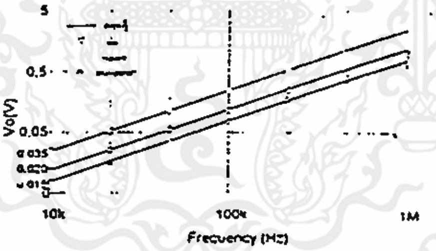
(c) เลือกการแปลงค่าความถี่เป็นแรงดัน (k_f) ในช่วงความถี่ย่านสูงเป็น $k_f = (2{*}10^{-6})(CF_2 / CF_1)$ V/Hz โดยกำหนดให้ I_1=160 μ A,R_1= 10 kΩ , R_2 = 10 kΩ , R_o = 1 kΩ และ C_{INTE} = 0.2 nF จากนั้นให้อินพุต V_{in} มีขนาด 1V_p ความถี่จาก 10kHz – 1MHz ผลการเลียนแบบการทำงานดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7 ผลที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีแต่จะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นในช่วงความถี่ 1MHz ขึ้นไป เพราะเป็นผลเนื่องจากค่าความถี่อินพุทมีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ปฏิบัติงานสูงสุดของวงจร



รูปที่ 5 ผลการเลียนแบบวงจรด้วยค่า $k_f = (2{*}10^{-2})(CF_2/CF_1)$ V/Hz



รูปที่ 6 ผลการเลียนแบบวงจรด้วยค่า $k_f = (2{*}10^{-4})(CF_2/CF_1)$ V/Hz



รูปที่ 7 ผลการเลียนแบบวงจรด้วยค่า $k_f = (20{*}10^{-6})(CF_2/CF_1)$ V/Hz

สรุป

จากผลการเลียนแบบการทำงานของวงจร F/V ดังแสดงในรูปที่ 5-7 โดยใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงานเมื่อเปรียบเทียบกับหลักการที่ได้นำเสนอมาดังสมการที่ (19) พบว่าวงจรสามารถทำงานได้ตามความคาดหมาย สามารถปฏิบัติงานได้ตั้งแต่ย่านความถี่ 0.1 Hz จนถึงย่านความถี่ 1MHz โดยที่ให้ค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นต่ำ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถลดลงได้โดยการเลือกใช้ C_{AV1} และ C_{AV2} ให้มากขึ้น เพื่อลดค่าแรงดันริปเปิ้ลลง แต่ผลเสียคือถ้าเลือกค่า C_{AV1} และ C_{AV2} มากเกินไป จะทำให้ผลตอบสนองในการแปลงค่าความถี่เป็นแรงดันช้าลงไปด้วย วงจรได้แสดงการแปลงความถี่เป็นแรงดันที่ไม่จำกัดเพียงคลื่นเดียวเท่านั้น ซึ่งในการนำเสนอเห็นแสดงการทดสอบกับ 3 รูปคลื่นคือสัญญาณรูปซายน์ รูปสี่เหลี่ยม และรูปสามเหลี่ยม ตามลำดับและให้ผลสอดคล้องกับสมการ (19) จากหลักการดังกล่าววงจรทั้งหมดถูกออกแบบด้วยไบโพลาร์เทคโนโลยีจึงมีความเหมาะสมมากในการนำไปทำเป็นวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

M.A.S.Jaafar and et. Al., "A dual slope based digital frequency meter," Int.J.Electron.,vol.57,no.4 pp.557-562, 1984

J.S.Reynolds, "Frequency/voltage converter with Low Output Ripple," Electron. Lett., vol.22, pp.783-784, 1986

D.H.Shin and G.H.Cho, " A simple high performance analog frequency-to-voltage converter," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.IE-34, pp.295 -298, 1987

W. Surakampontorn, Y. Chonbodeechalermroong, S. Bunjongjit, "An analog sinusoidal frequency-to- Voltage converter," IEEE, Trans. Instrum. Meas., Vol.40, no.6, pp.925-929, 1991

Natinoal Semiconductor, "Semiconductor Master Selection Guide," 1989

C.Toumazou, F. J. Lidgey and D. G. Haigh, Analog IC Design: The Current Mode Approach, London, U.K. : Peter Peregrinus, 1990

B. Wilson, "Recent development in current conveyors and Current-mode circuits," Proc. Inst. Elect. Eng. G., vol.137, pp.63-77, 1990

W. Surakampontorn, K. Kumwachara , "A Dual Translinear-Based True RMS-to-DC Converter," IEEE, Trans. Instrum. Meas., vol.47, no.2, pp.459-464, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

520 การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39

สาขาวิศวกรรมศาสตร์

วงจรสะท้อนกระแสแบบใหม่ชนิดควอเดทและการประยุกต์ใช้งาน

A novel quartet current mirrors and its application

สุชาติ สงวนไว้ เอกชัย ม่วงรอดภัย และ เกียรติศักดิ์ คมวัชระ

Suchart Sa-guanwai, Ekkachai Muangrodpai, and Kiatisak Kumwachara

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอรูปแบบใหม่ของวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดท วงจรดังกล่าว ออกแบบขึ้นมาเพื่อความสะดวกในการใช้งานสะท้อนกระแสค่าต่าง ๆ ได้โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของความต้านทานจากภายนอกแทนอัตราส่วนพื้นที่อิมิตเตอร์ และค่าอัตราส่วนการสะท้อนกระแสยังมีความเป็นเชิงเส้นกับค่าอัตราส่วนความต้านทานอีกด้วย เพื่อเป็นการทดสอบในการนำเอาวงจรไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น จึงได้นำเอาวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดทเป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแสให้กับวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ทำงานในรูปกระแส ทำให้วงจรสามารถปรับเปลี่ยนค่าความถี่คัทออฟได้โดยอัตราส่วนความต้านทานอีกทีหนึ่ง ในการทดสอบถึงสมรรถนะของวงจรได้ใช้โปรแกรม PSPICE ทำการเลียนแบบเพื่อนำผลดังกล่าวไปเปรียบเทียบและยืนยันกับทฤษฎีที่ได้นำเสนอ ซึ่งผลที่ได้มีความใกล้เคียงและเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ

ABSTRACT

In this paper, A novel current mirrors which based on a quartet circuit is introduced and analyzed. A circuit technique for realizing the novel current mirror circuit, where its current transfer ratio is directly proportional to the external resistance and can be accurately controlled by the ratio of the external resistance. As an application, the circuit is applied to a first order current-mode low-pass filter which can be varied the cutoff frequency by adjusting the ratio of the external resistance. The PSPICE simulation results show that the properties of the circuit is in close agreement with the theoretical analysis.

คำนำ

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี การออกแบบวงจรรวมในการประมวลผลสัญญาณแบบอนาลอกได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก วงจรที่ออกแบบขึ้นมักจัดให้มีการทำงานอยู่ในรูปของกระแส (Current mode) กันมากขึ้นตามลำดับ [1-2] อันเนื่องมาจากว่าการทำงานในรูปของกระแสมีข้อได้เปรียบมากกว่าการทำงานในรูปของแรงดัน (Voltage mode) กล่าวคือใช้กำลังงานต่ำ (Low-power consumption) แหล่งจ่ายไฟที่ให้กับวงจรใช้แรงดันต่ำประมาณ 1 ถึง 2 โวลท์เท่านั้น และวงจรสามารถทำงานในย่านความถี่สูง (High-frequency response) ดังเหตุผลข้างต้นจะเห็นว่ารูปแบบการทำงานของวงจรในรูปของกระแสได้รับความนิยมขึ้นมากในปัจจุบัน ดังนั้นวงจรพื้นฐานที่เป็นส่วนประกอบใช้งานแบบกระแส ก็คือ วงจรสะท้อนกระแส (current mirror, CM) ซึ่งปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายแบบ อาทิเช่นวงจรสะท้อนกระแสแบบพื้นฐาน (simple CM) วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน (Wilson CM) และวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสโคด (cascode CM) [3 – 5] เป็นต้น ล้วนแล้วแต่มีข้อดีและข้อเสีย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

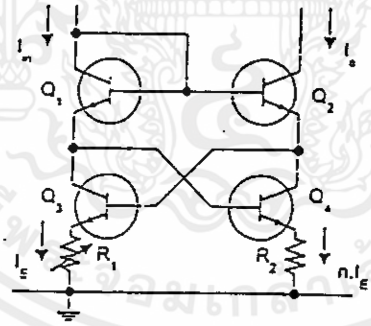
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบจะเลือกนำมาใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามวงจรสะท้อนกระแสที่กล่าวมาข้างต้นนั้น หากมีความจำเป็นจะปรับเปลี่ยนอัตราส่วนในการสะท้อนกระแสจะทำได้ไม่สะดวกมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าจะไปปรับเปลี่ยนพื้นที่อิมิตเตอร์ (emitter area) ของทรานซิสเตอร์คงจะเป็นไปไม่ได้แต่อาจจะสามารถปรับเปลี่ยนอัตราส่วนในการสะท้อนกระแสได้โดยใช้วงจรไวด์ล่าร์ (Widlar CM) [3 – 4] ซึ่งก็ไม่สะดวกนักในการคำนวณหาค่าความต้านทานไปใส่ในวงจรเพราะสมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนในการสะท้อนกระแสมีความไม่เป็นเชิงเส้นกับค่าความต้านทาน ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวบทความนี้จึงได้นำเสนอวงจรสะท้อนกระแสแบบใหม่ ที่เรียกว่าวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเตท (quartet CM) วงจรที่นำเสนอนี้ออกแบบขึ้นเพื่อให้มีความง่ายต่อการนำไปใช้งานในการปรับแต่งอัตราส่วนในการสะท้อนกระแส โดยเลือกจากอัตราส่วนของความต้านทาน R_1/R_2 จากภายนอก และยังได้นำเสนอวงจรสะท้อนกระแสที่ต้องการหลายเอาท์พุท (multi-output CM) อีกด้วย นอกจากนี้ได้แสดงการวิเคราะห์หาค่าความต้านทาน อินพุท-เอาท์พุท ค่าความผิดพลาดการปรับปรุงวงจรให้มีค่าความผิดพลาดต่ำในการสะท้อนกระแส และ สุดท้ายได้แสดงการประยุกต์ใช้งานของวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเทตโดยใช้เป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแสในวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ทำงานในรูปกระแส ผลคือทำให้ค่าความถี่คัทออฟของวงจรที่สามารถปรับเปลี่ยนโดยใช้กระแสเพียงอย่างเดียวนั้นสามารถขึ้นตรงกับอัตราส่วนของความต้านทานในวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเตทได้อีกทีหนึ่ง

วงจรสะท้อนกระแสแบบควอเตท (Quartet CM, QCM)

1. การวิเคราะห์อัตราส่วนของกระแสเอาท์พุตและอินพุตของวงจร QCM

วงจรดังกล่าวประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัว และความต้านทานอีก 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ (base-emitter voltage) ความต้านทาน R_1, R_2 และกระแสอินพุต-เอาท์พุต ดังนี้



รูปที่ 1 วงจรสะท้อนกระแสแบบควอเตท

$$V_{BE1} + V_{BE4} + I_O R_2 = V_{BE2} + V_{BE3} + I_{in} R_1 \quad (1)$$

แต่

$$V_{BEi} = V_T \ln \frac{I_{Ei}}{I_{Si}} \quad (2)$$

แทนค่าสมการที่ (2) ลงใน (1) :

$$V_T \ln \left[\frac{\left(I_{E1} I_{E4}\right)\left(I_{S2} I_{S3}\right)}{\left(I_{E2} I_{E3}\right)\left(I_{S1} I_{S4}\right)} \right] = I_{in} R_1 - I_o R_2 \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือจะได้

$$V_T \ln \left[\frac{(I_{E1} I_{E4})(A_{E2} A_{E3})}{(I_{E2} I_{E3})(A_{E1} A_{E4})} \right] = I_m R_1 - I_o R_2 \qquad (4)$$

จากสมการที่ (4) ถ้าทรานซิสเตอร์ Q_1 ถึง Q_4 ทุกตัวมีพื้นที่อิมิตเตอร์ $A_{E1} = A_{E2} = A_{E3} = A_{E4}$ และจากรูปที่ 1 $I_m = I_{E1} = I_{E3}$ และ $I_O = I_{E2} = I_{E4}$ ดังนั้นจะได้

$$I_m R_1 = I_O R_2 \qquad (5)$$

หรือ

$$\frac{I_O}{I_m} = \frac{R_1}{R_2} = n \qquad (6)$$

2. การวิเคราะห์ความต้านทานอินพุทและเอาท์พุทของวงจร QCM

ในการพิจารณาหาค่าความต้านทานอินพุท (R_{in}) และเอาท์พุท (R_O) ของวงจรรูปที่ 1 เมื่อกำหนดให้ $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta$ ดังนั้น

$$R_{in} \cong 2r_e + R_1 \qquad (7)$$

และ

$$R_O \cong \frac{\beta (r_{o2})^2}{r_{\pi 3}} \qquad (8)$$

ตัวอย่างเช่นถ้าตั้งค่ากระแสไบอัสเท่ากับ 1 mA แล้วจะทำให้ได้ $r_{e1} = r_{e2} = r_{e3} = r_{e4} = r_e \cong 25\ \Omega$, $r_{o2} \cong 80\ k\Omega$, $r_{\pi 3} \cong 4\ k\Omega$ เมื่อ $\beta_i \cong 160$ และเลือกใช้ $R_1 = 100\ \Omega$ ดังนั้นจากสมการที่ (7) และ (8) จะได้ $R_{in} = 200\ \Omega$ และ $R_O = 256\ M\Omega$ ตามลำดับ

3. การวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของอัตราการสะท้อน I_O/I_{in}

โดยให้ $R_1/R_2 = n$ และ $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta$ ดังนั้น

$$\frac{I_O}{I_{in}} = \frac{n}{1 + \left(\frac{2n}{\beta}\right)} \qquad (9)$$

และค่าความผิดพลาดในการสะท้อนกระแส ($\mathcal{E}_1$) หาได้จาก

$$\mathcal{E}_1 = \frac{2n}{\beta} \times 100\ \% \qquad (10)$$

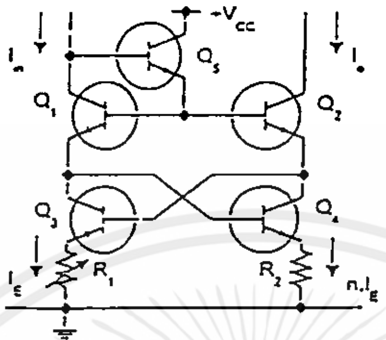
ตัวอย่างเช่น สมมติว่า $\beta = 100$ และเลือกการสะท้อนกระแส $I_O/I_{in} = n = 1$ ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 2 % จากสมการที่ (9) จะพบว่าถ้าเลือกการสะท้อนกระแส $n > 1$ ความผิดพลาดจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเลือกการสะท้อนกระแสให้ $n < 1$ ความผิดพลาดจะมีค่าลดลง ซึ่งค่าผิดพลาดดังกล่าวสามารถลดลงได้โดยเลือกใช้ $\beta >> 1$ ก็ได้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถแก้ไขวงจรดังรูปที่ 1 ใหม่เป็นวงจรดังรูปที่ 2 (ดีกว่าเลือกใช้ $\beta >> 1$) เพื่อลดค่าความผิดพลาดในการสะท้อนกระแสให้ลดลงได้โดยการเพิ่ม Q_5 เข้าไป อีกตัว ดังนั้นค่าความผิดพลาดในวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดท รูปที่ 2 มีค่าใหม่เป็น $\mathcal{E}_2$ ดังนี้

$$\frac{I_O}{I_{in}} = \frac{n}{1 + \left[\frac{n+1}{\beta(\beta+1)}\right]} \cong \frac{n}{1 + \frac{(n+1)}{\beta^2}} \qquad (11)$$

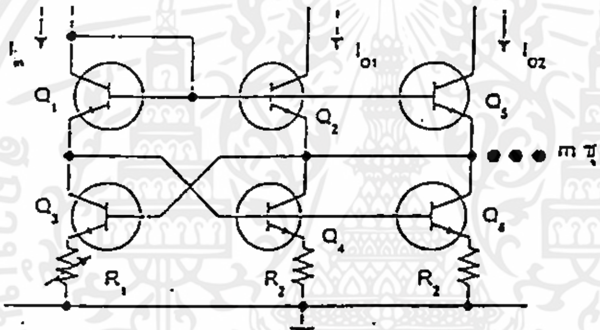
และค่าความผิดพลาดในการสะท้อนกระแส ($\mathcal{E}_2$) หาได้จาก

$$\mathcal{E}_2 = \frac{(n+1)}{\beta^2} \times 100\ \% \qquad (12)$$

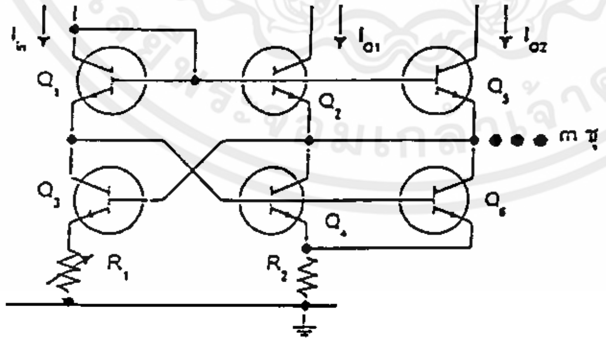
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 วงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดทที่ปรับปรุงให้วงจรมีค่าความผิดพลาดในการสะท้อนกระแสต่ำ



<u>แบบ 1</u> : $\frac{I_{o1}}{I_{in}} = \frac{I_{o2}}{I_{in}} = \ldots = \frac{I_{om}}{I_{in}} = \frac{R_1}{R_2}$



<u>แบบ 2</u> : $\frac{I_{o1}}{I_{in}} = \frac{I_{o2}}{I_{in}} = \ldots = \frac{I_{om}}{I_{in}} = \left(\frac{1}{m}\right)\frac{R_1}{R_2}$

รูปที่ 3 วงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดทหลายเอาท์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น สมมติว่า β = 100 และเลือกการสะท้อนกระแส I_o/I_{in} = n = 1 ดังนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.02 % ซึ่งมีค่าต่ำกว่าวงจรรูปที่ 1 มาก ส่วนอัตราส่วนการสะท้อนกระแส I_o/I_{in} ในวงจรรูปที่ 2 ยังสามารถใช้เลือกการสะท้อนกระแสจากอัตราส่วนความต้านทาน R_1/R_2 ได้เช่นเดิมและเป็นไปตามสมการที่ (6) นั่นคือ $I_o/I_{in} = R_1/R_2 = n$ ส่วนในกรณีที่จะเลือกวงจรไปใช้งานว่าจะเป็นวงจรรูปที่ 1 หรือ รูปที่ 2 ก็ขึ้นอยู่กับผู้นำไปใช้ว่ามีการเลือกอัตราการสะท้อนกระแส n เป็นอย่างไร ซึ่งถ้าเลือก $n > 1$ ควรนำวงจรรูปที่ 2 ไปใช้งานจะดีกว่า เพราะให้ค่าความผิดพลาดที่ต่ำ แต่ถ้าเลือกใช้ $n \leq 1$ ก็สามารถนำวงจรรูปที่ 1 ไปใช้ก็เพียงพอ

4. วงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดทที่ต้องการหลายเอาท์พุต

ในการนำเอาวงจรสะท้อนกระแสไปใช้งานบางอย่างจำเป็นต้องมีหลายเอาท์พุต ฉะนั้นจึงได้นำเสนอรูปแบบวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3

5. การประยุกต์ใช้งานสะท้อนกระแสแบบควอเดทกับวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ทำงานในรูปของกระแส

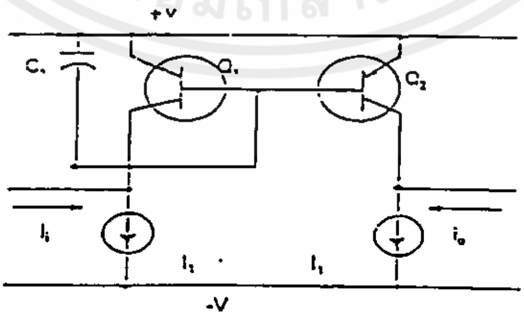
พื้นฐานของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบทำงานในรูปกระแส [5] ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อค่าความถี่คัทออฟ (cut-off frequency, f_{-3dB}) ของวงจรมีค่าเป็น

$$f_{-3dB} = \frac{I_1}{2\pi V_T C_1} \qquad (13)$$

ดังนั้นถ้าแทนวงจรแหล่งจ่ายกระแสในรูปที่ 3 แบบที่ 1 ที่เลือกให้มีสองเอาท์พุทแล้วทำการแทนลงไปในค่าของ I_1 ในวงจรรูปที่ 4 ดังนั้นค่าของความถี่คัทออฟสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (14) และแสดงวงจรใช้งานจริงในรูปที่ 5 ตามลำดับ

$$f_{-3dB} = \frac{I_1\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{2\pi V_T C_1} \qquad (14)$$

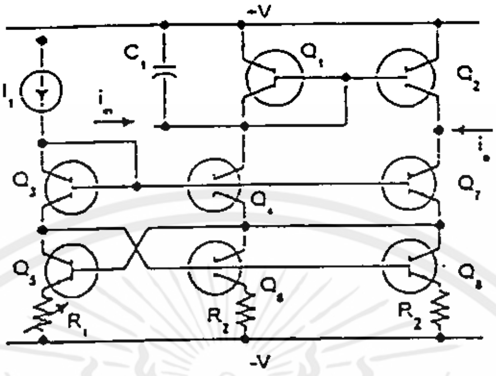
จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าแทนที่เราจะปรับค่าความถี่คัทออฟได้จากค่ากระแส I_1 เพียงอย่างเดียว เรายังสามารถปรับเปลี่ยนความถี่คัทออฟได้จากค่าความต้านทาน R_1 หรือ R_2 ที่อยู่ภายในวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดทอีกด้วย ซึ่งสมการที่ (14) พบว่า f_{-3dB} แปรผันตาม R_1 และ I_1 ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ R_1 หรือ I_1 ปรับเปลี่ยนความถี่คัทออฟก็ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบทำงานรูปกระแส

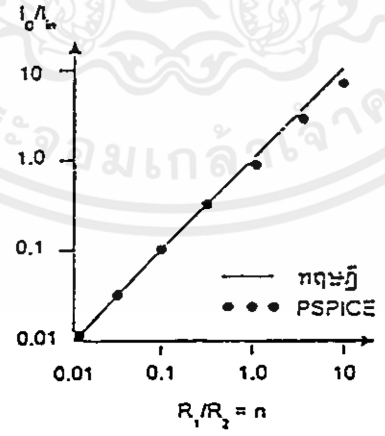
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบกระแสที่เลือกใช้วงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดท

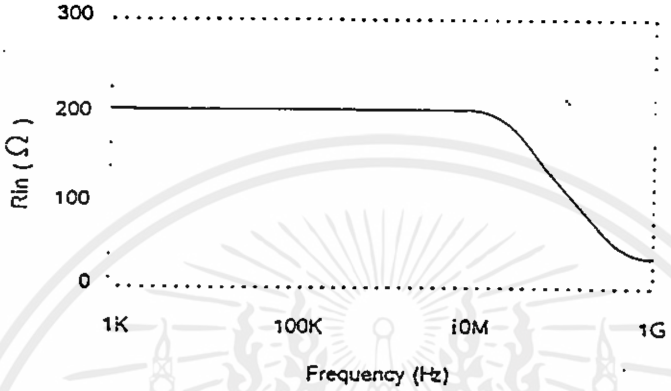
ผลการเลียนแบบการทำงานและสมรรถนะของวงจรที่ได้นำเสนอ

ในที่นี้ได้ใช้โปรแกรม PSPICE [7] ทำการเลียนแบบการทำงานของวงจร โดยที่กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP ได้ใช้โมเดลที่มีอยู่ในไฟล์ QNOM.LIB เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ตามลำดับ ส่วนแหล่งจ่ายไฟเลือกใช้ $+V = -V = 3V$ และค่าความต้านทาน R_1, R_2 ที่อยู่ในวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดทนั้น กำหนดให้ $R_2 = 100\ \Omega$ และเปลี่ยนแปลงค่า R_1 เพื่อต้องการให้อัตราส่วนในการสะท้อนกระแสเปลี่ยนแปลงดังผลของ I_o/I_{in} กับค่า R_1/R_2 ของวงจรรูปที่ 1 ในรูปที่ 6 ส่วนกรณีการพิจารณาค่าความต้านทานอินพุต R_{in} และเอาท์พุต R_o ของวงจรเมื่อกำหนดให้กระแสไบอัสเท่ากับ 1 mA , $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 150\ \Omega$ และ $V_T = 26$ mv ณ $25^{\circ}C$ ซึ่งจากทฤษฎีจะให้ค่าของ R_{in} และ R_o เท่ากับ 202 Ω และ 256 $M\Omega$ ตามลำดับ ซึ่งจากผลการใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงานของวงจรดังแสดงในรูปที่ 7 และ รูปที่ 8 ตามลำดับ.



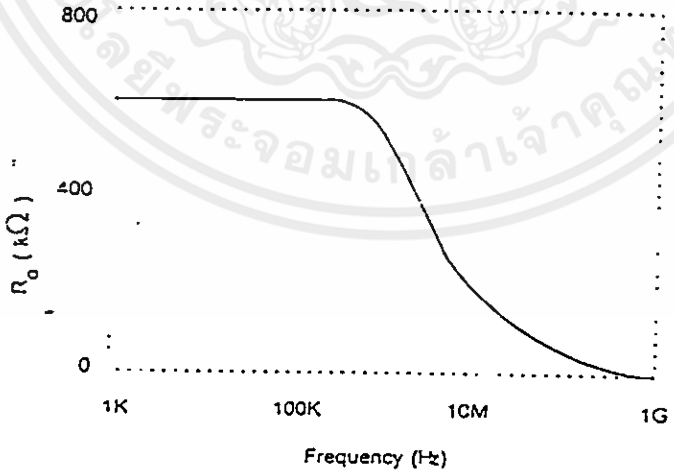
รูปที่ 6 ผลการเลียนแบบโดยใช้ PSPICE วงจรรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



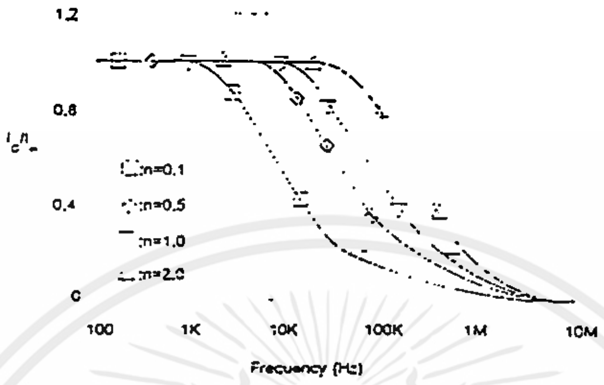
รูปที่ 7 ผลการเลียนแบบหา R_{in} ของวงจรรูปที่ 1

ในการเลียนแบบการทำงานการนำเอาวงจรสะท้อนกระแสแบบคาสเคดไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ทำงานในรูปของกระแสดังวงจรรูปที่ 5 นั้น ได้เลือกใช้ R_2 = 100 Ω , C_1 = 0.01 μF และ I_1 = 100 μA โดยทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่า R_1 เท่ากับ 10 Ω, 50 Ω, 100 Ω และ 200 Ω ซึ่งจากทฤษฎีให้ค่า f_{3dB} ของวงจรมีค่าเป็น 6.12 kHz,30.6 kHz, 61.2 kHz และ 122.4 kHz ตามลำดับ ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE แสดงได้ดังรูปที่ 9 โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องตามสมการที่ (14) ซึ่งเป็นไปตามหลักการที่นำเสนอ



รูปที่ 8 ผลการเลียนแบบหา R_o ของวงจรรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ค่าความถี่คัทออฟของวงจรรูปที่ 5 เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า n = R1/R2

สรุป

วงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดททที่ได้นำเสนอนี้ วงจรสามารถกำหนดอัตราการสะท้อนกระแสของ I_o/I_{in} ได้โดยง่ายจากการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของความต้านทาน $R_1/R2$ ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นกับค่าของ I_o/I_{in} ทำให้มีความสะดวกในการนำไปใช้งานหรือมีไว้สำหรับไว้ปรับแต่งให้อัตราส่วนการสะท้อนกระแสเป็นไปตามค่าที่ต้องการได้แม่นยำกรณีของความไม่สมพงษ์กัน (mismatch) ของทรานซิสเตอร์ในวงจรที่นำมาใช้มีความไม่เท่าเทียมกัน เพราะโดยทั่วไปวงจรสะท้อนกระแสแบบต่าง ๆ ที่นำมาใช้ย่อมมีความผิดพลาดขึ้น ในกรณีความไม่สมพงษ์กันของโครงสร้างภายในทรานซิสเตอร์อยู่แล้ว และในส่วนสุดท้ายได้แสดงให้เห็นถึงการนำเอาวงจรสะท้อนกระแสแบบควอเดทไปใช้แทนวงจรสะท้อนกระแสแบบเดิมจะเห็นได้ว่ามีค่าของ R_1 และ R2 เข้าไปเกี่ยวข้องเพิ่มเติมซึ่งเดิมวงจรไม่มี ทำให้มีค่าพารามิเตอร์ใหม่เกิดขึ้นในวงจรนั้น ๆ ส่งผลดีต่อการนำไปใช้ปรับเปลี่ยนค่าเกณฑ์กระแสตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

C.Toumazou, F.J.Lidgey and D.G.Haigh, "Analog IC Design : The Current-Mode Approach", Peter Peregrinus Ltd., 1990

B.Wilson, "Recent Development in Current Conveyors and Current Mode Circuits," IEE Proc. G. Circuit Devices Syst., vol.137, no.2, pp.63-77, 1990

A.S.Sedra and K.C.Smith, "Microelectronic Circuits 3rd edition", Oxford University Press., pp.428-437, 1991

P.R.Gray and R.G.Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits 3rd edition", John Wiley & Sons, Inc., pp.269-286 1993

T.M.Frederiksen, "Constant Current Source", U.S. Patent 3,659,121, 1972

J.C.Ahn and N.Fujii, "Current Mode Continuous-Time Filters Using Complementary Current Mirror Pairs," Trans. IEICE. vol.E79-A, no.2, pp.168-175, 1996

Microsim Corp., "PSPICE", Laguna Hills, CA92653, USA., 1994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสุชาต สงวนไว้ เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2505 จังหวัดกรุงเทพมหานคร และได้สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี คอบ. (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปีการศึกษา 2540 และในปีการศึกษา 2542 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงาน เริ่มทำงานที่องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2528 จนถึงปัจจุบัน

ปัจจุบันทำหน้าที่หัวหน้าแผนกวางแผนและวิเคราะห์ที่ 4.2 ตำแหน่ง วิศวกร 7 สังกัดฝ่ายโทรศัพท์นครหลวงที่ 4 องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้