

วงจรกรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

ELECTRONICALLY CONTROLLED FILTER AND OSCILLATOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-561-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรกรองความถี่และวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

ELECTRONICALLY CONTROLLED FILTER AND OSCILLATOR



จิรสุดา เกษร
JEERASUDA KESORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2542

ISBN 974-622-561-8

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 34216
วัน, เดือน, ปี 8 ต.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่มีการคืนให้ทางอื่น อีกทั้งห้ามมั่วสุมคัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRONICALLY CONTROLLED FILTER AND OSCILLATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1999

ISBN 974-622-561-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ วงจรกรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์
ELECTRONICALLY CONTROLLED FILTER AND OSCILLATOR

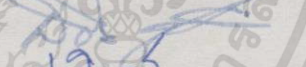
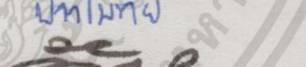
ชื่อนักศึกษา นางสาวจิรสุดา เกษร

รหัสประจำตัว 38061211

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย	วีรรุจา	
ผศ.ประภากร	สุวรรณะ	
ผศ.พิชัย	คูศิริวานิชกร	
รศ.ดร.ปราโมทย์	วาดเขียน	
รศ.ดร.วิวัฒน์	กิรานนท์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 19 กรกฎาคม 2542 เวลา 12.00 - 13.00 น.

สถานที่สอบ ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว


(รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... 3เดือน..... พ.ศ. 2542

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์
นักศึกษา	นางสาวจีรสุดา เกษร
รหัสประจำตัว	38061211
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้งานวงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสซึ่งเป็นอุปกรณ์ประเภท 3 ขั้วที่สามารถรับสัญญาณเข้าเป็นกระแสหรือแรงดันและให้สัญญาณออกเป็นกระแสหรือแรงดันได้อย่างใดอย่างหนึ่งได้ วงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสนี้ให้ผลการตอบสนองทางความถี่กว้างสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรประเภทความถี่สูงได้ วงจรประยุกต์ใช้งานที่แสดงไว้ในวิทยานิพนธ์คือ วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยกระแสและวงจรรองความถี่ที่สามารถปรับค่าได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยวงจรทั้งสองนี้มีข้อดีคือ สามารถปรับค่าตัวแปรที่สำคัญของวงจรได้โดยใช้กระแสไฟฟ้ามาควบคุม นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอยังไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อนซึ่งประกอบขึ้นจากวงจรสายพานกระแสควบคุมด้วยกระแสและตัวเก็บประจุเท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีความเหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้โดยง่ายอีกด้วย

Thesis Title	Electronically controlled filter and oscillator
Student	Ms. Jeerasuda Kesorn
Student ID.	38061211
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	1999
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wiwat Kiranon

ABSTRACT

This thesis is about the applications of current controlled conveyor circuit (CCCII). The CCCII is a 3-terminal device that input signal can be current or voltage and output signal can be either current or voltage. It has good frequency response over a wide bandwidth to a high-frequency circuit. The applications presented in this thesis are to establish a current controlled oscillator circuit and an electronically tuned filter circuit. Both circuits have the outstanding features that can be controlled by adjusting the bias currents. Furthermore, these circuits employ only CCCIIs and capacitors, hence they are expected to be suitable for monolithic implementation in IC technology.

กิตติกรรมประกาศ

ณ โอกาสนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์ ที่ได้
ประสิทธิ์ประสาทวิชา,ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนความรักและความเมตตาที่
อาจารย์มีให้กับผู้เขียนและศิษย์ทุกคนในความดูแลของอาจารย์ด้วยความจริงใจโดยไม่หวังสิ่งใด
ตอบแทน นอกเหนือจากวิชาความรู้ที่อาจารย์มีให้แก่ศิษย์แล้วนั้น อาจารย์ยังมีจิตเมตตาพรี
สอนศีลธรรมจรรยาเพื่อให้ศิษย์ทุกคนเป็นบุคคลที่มีความพร้อมทั้งกายและใจเป็นคนที่ดีแก่สังคม
พระคุณของอาจารย์ที่มีต่อผู้เขียนทั้งในอดีตและในปัจจุบันรวมทั้งที่จะมีเกิดขึ้นในอนาคตผู้เขียน
ขอน้อมรำลึกไว้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน, อ.วิภา แสงพิสิทธิ์, ดร.จริยา เลิศจรัสอ่วมดี,
คุณนพดล มณีรัตน์, คุณพูลศักดิ์ โกษิยาวรณ และ คุณสุรีย์ กิรานนท์ สำหรับความช่วยเหลือ,
ความห่วงใย, ความเมตตา และ ความอบอุ่นที่มีให้แก่ผู้เขียนตลอดเวลา

สุดท้ายผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา, มารดา สำหรับความรัก,ความห่วงใยและกำลังใจ
ที่พ่อและแม่ได้มีต่อลูกคนนี้ไม่มีวันเสื่อมคลาย

จิรสุดา เกษร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วงจรสายพานกระแสที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (first generation current conveyor : CCI).....	4
2.3 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (second generation current conveyor : CCII).....	5
2.4 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (second generation current controlled conveyor : CCCII).....	6
2.5 หลักการทรานสลิเนียร์ (transilinear principle).....	9
2.6 วงจรสะท้อนกระแส (current mirror).....	13
2.7 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII.....	16
บทที่ 3 หลักการทั่วไปของวงจรรองความถี่.....	20
3.1 กล่าวนำ.....	20
3.2 หลักการทั่วไปของวงจรรองความถี่.....	21
3.3 รูปแบบสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรรองความถี่แบบไบควอด.....	25
บทที่ 4 หลักการสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์.....	28
4.1 กล่าวนำ.....	28
4.2 องค์ประกอบของวงจรออสซิลเลเตอร์.....	29
4.3 เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณของวงจร.....	30
4.4 หลักการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์.....	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 วงจรกรองความถี่ที่สามารถควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์และผลการจำลองการทำงาน ของวงจร.....	35
5.1 กล่าวนำ.....	35
5.2 การวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่.....	35
5.2.1 การวิเคราะห์ห้วงจรกรองแบบความถี่สูงผ่าน (highpass filter).....	36
5.2.2 การวิเคราะห์ห้วงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (bandpass filter).....	37
5.2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน (lowpass filter).....	38
5.3 ผลของการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์.....	43
5.3.1 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII.....	44
5.3.2 ผลของการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII.....	46
5.3.3 ผลของการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์.....	47
บทที่ 6 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่สามารถควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์และผลการจำลอง การทำงานของวงจร.....	60
6.1 กล่าวนำ.....	60
6.2 การวิเคราะห์ห้วงจรออสซิลเลเตอร์.....	60
6.3 ผลของการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์.....	63
บทที่ 7 บทสรุป.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม สไปซ์.....	73
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างศึกษา.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

ประวัติผู้เขียน.....	หน้า 81
----------------------	---------



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร CCI.....	4
2.2 วงจรสมมูลของวงจร CCII.....	5
2.3 สัญลักษณ์ลักษณะของวงจร CCII.....	6
2.4 แสดงไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบบวก (CCCII+).....	7
2.5 แสดงไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบลบ (CCCII-).....	7
2.6 แสดงสัญลักษณ์ของวงจร CCCII.....	8
2.7 แสดงวงจรสมมูลของวงจร CCCII.....	8
2.8 แสดงวงจรทรานสลิเนียร์ที่ประกอบอยู่ภายในของวงจร CCCII.....	11
2.9 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว.....	14
2.10 แสดงองค์ประกอบของวงจร CCCII ในส่วนของขั้ว x และขั้ว y	16
3.1 ระบบของวงจรกรองความถี่.....	21
3.2 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในแบบ อุดมคติ.....	23
3.3 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านในแบบ อุดมคติ.....	23
3.4 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในแบบ อุดมคติ.....	24
3.5 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในแบบ อุดมคติ.....	25
4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของวงจรออสซิลเลเตอร์.....	29
4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่มีการป้อนกลับแบบบวก.....	30
4.3 แสดงความหมายของเกณฑ์ของบาร์คิสต์.....	32
5.1 วงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์.....	35
5.2 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์.....	36
5.3 วงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการปรับปรุงวงจรใหม่.....	40
5.4 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการปรับปรุง วงจรใหม่.....	40

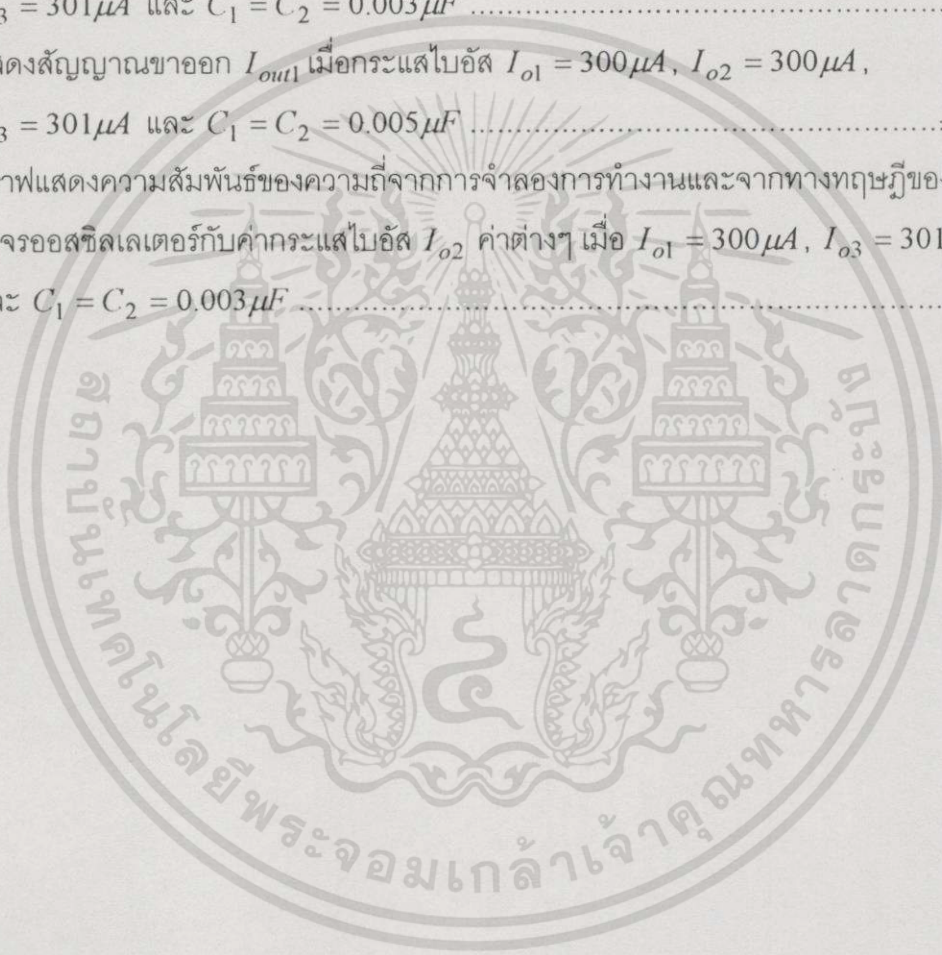
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII.....	44
5.6 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII.....	45
5.7 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจร CCCII.....	47
5.8 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์..	48
5.9 ผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1} เมื่อ $I_{o1} = I_{o2} = I_o, I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$	49
5.10 ผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out2} เมื่อ $I_{o1} = I_{o2} = I_o, I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$	50
5.11 ผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out3} เมื่อ $I_{o1} = I_{o2} = I_o, I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$	51
5.12 ผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1}, I_{out2} และ I_{out3} เมื่อ $I_o = 300\mu A$, $I_{o3} = 50\mu A, C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$	53
5.13 ผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out2} เมื่อ $C_1 = 0.001\mu F, C_2 = 0.003\mu F$, $I_o = 300\mu A, I_{o3} = 50, 100, 200, 250\mu A$	54
5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน ที่ได้จากการจำลองการทำงานต่อค่ากระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ เมื่อ $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$ เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี.....	55
5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน ที่ได้จากการจำลองการทำงานต่อค่ากระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ เมื่อ $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$ เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี.....	56
5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน ที่ได้จากการจำลองการทำงานต่อค่ากระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ เมื่อ $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$ เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี.....	56
5.17 ผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1}, I_{out2} และ I_{out3} เมื่อ $I_o = 300\mu A$, $I_{o3} = 5\mu A, C_1 = 0.005\mu F$ และ $C_2 = 0.005\mu F$	59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1	บล็อกไดโอดแอมป์ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ.....62
6.2	แสดงสัญญาณขาออก I_{out1} เมื่อกระแสไบอัส $I_{o1} = 300\mu A$, $I_{o2} = 300\mu A$, $I_{o3} = 301\mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.003\mu F$64
6.3	แสดงสัญญาณขาออก I_{out1} เมื่อกระแสไบอัส $I_{o1} = 300\mu A$, $I_{o2} = 500\mu A$, $I_{o3} = 301\mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.003\mu F$64
6.4	แสดงสัญญาณขาออก I_{out1} เมื่อกระแสไบอัส $I_{o1} = 300\mu A$, $I_{o2} = 300\mu A$, $I_{o3} = 301\mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.005\mu F$65
6.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความถี่จากการจำลองการทำงานและจากทางทฤษฎีของ วงจรรอสซิลเลเตอร์กับค่ากระแสไบอัส I_{o2} ค่าต่างๆ เมื่อ $I_{o1} = 300\mu A$, $I_{o3} = 301\mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.003\mu F$66



บทที่ 1

บทนำ

วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (first generation current conveyor : CCI) ได้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1968 โดย A.S. Sedra และ K.C. Smith [12] และต่อมาบุคคลทั้งสองก็ได้ทำการปรับปรุงพัฒนาวงจรมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นและนำเสนอวงจรมีประสิทธิภาพที่ได้รับความนิยมออกมาเป็นวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (second generation current conveyor : CCII) ในปี ค.ศ. 1970 [2] เราจะเห็นได้ว่าวงจรมีไฟฟ้าทางด้านอนาล็อกในโหมดกระแส (current mode) เป็นวงจรมีที่ได้รับความสนใจกันอย่างแพร่หลายดังที่จะพิจารณาได้จากผลงานวิจัยหลายๆผลงานที่มีการนำเสนอวงจรมีที่ทำงานในโหมดกระแสและวงจรมี CCII นี้ก็ได้ถูกใช้เป็นอุปกรณ์เบื้องต้นของผลงานวิจัยเหล่านั้น เช่น วงจรมีกำเนิดสัญญาณ (oscillator) [11,14,17,18,21], วงจรมีกรองความถี่ (filter) [6,8,13,15,19,20,22,23], หรือวงจรมีขยาย (amplifier) [7,16] เป็นต้น ซึ่งบทความในลักษณะเช่นนี้ได้รับการตีพิมพ์อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาสองทศวรรษที่ผ่านมา ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากความคล่องตัวและความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายของวงจรมี CCII วงจรมี CCII จึงเป็นวงจรมีที่ได้รับการยอมรับเป็นวงจรมีแอคทีฟ (active) รุ่นใหม่ทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติอย่างรวดเร็ว เหตุที่จุดสนใจหลักอีกประการหนึ่งที่ทำให้วงจรมีไอเลคทรอนิกส์ที่ทำงานในโหมดกระแสได้รับความนิยมก็คือ ข้อดีของวงจรมีในด้านความถูกต้องแม่นยำของค่าอัตราขยายสัญญาณ (gain) และมีย่านความถี่ในการทำงานของวงจรมีที่ใช้ได้กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรมีประเภทเดียวกันที่ทำงานในโหมดแรงดัน (voltage mode) [5]

ต่อมาเมื่อไม่นานมานี้ในปี ค.ศ. 1995 ได้มีการนำเสนอวงจรมีสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (second generation current controlled conveyor : CCCII) ขึ้นโดยกลุ่มบุคคลอื่นได้แก่ A. Fabre, O. Saaid, F. Wiest, และ C. Boucheron [1] ซึ่งเป็นวงจรมีที่ได้รับการปรับปรุงจากวงจรมี CCII เดิมโดยมีการพิจารณาถึงความสำคัญของความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจรมีเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย วงจรมี CCCII นี้มีข้อดีที่น่าสนใจอย่างหนึ่งก็คือ ความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นนั้นสามารถปรับค่าได้โดยใช้กระแสไบอัสของวงจรมีมาควบคุม ทำให้วงจรมี CCCII สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวงจรมีไอเลคทรอนิกส์ได้หลายรูปแบบโดยไม่จำเป็นต้องมีการใช้ความต้านทานจากภายนอก จากข้อดีของวงจรมีในโหมดกระแสและข้อดีของวงจรมี CCCII ที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นเหตุจุดสนใจให้ผู้เขียนคิดทำการวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานวงจรมี CCCII ขึ้นซึ่งเป็นเหตุทำให้เกิดวงจรมีที่นำเสนอเป็นเรื่องหลักในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือเป็นเรื่องเกี่ยวกับการพัฒนาวงจรมีกรองความถี่และวงจรมีออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงไอเลคทรอนิกส์ โดยวงจรมีกรองความถี่

ที่นำเสนอเป็นวงจรของความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์แบบหลายหน้าที่ คือ มีทั้งวงจรของความถี่แบบความถี่สูงผ่าน, แบบแถบความถี่ผ่านและแบบความถี่ต่ำผ่านอยู่ในวงจรเดียวกันและวงจรเดียวกันนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานปรับเป็นวงจรรอสซิลเลเตอร์ได้โดยง่ายซึ่งก็ประสบผลสำเร็จตามที่ได้กล่าวไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้อดีของวงจรที่พัฒนามาเสนอนี้นอกจากจะสามารถทำงานได้ในย่านความถี่สูงอันเนื่องมาจากข้อดีของการทำงานในโหมดกระแสแล้ววงจรที่นำเสนอนี้ยังสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ เช่น ค่าตำแหน่งความถี่ศูนย์กลาง (center frequency : f_o) และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ (quality factor : Q) ของวงจรเป็นต้นโดยการปรับค่ากระแสไบอัสซึ่งทำให้เกิดความสะดวกในการควบคุมเชิงอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอนี้ยังมีข้อดีที่ประกอบด้วยวงจร CCCII สามชุดและตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวนด์ (ground) อีกเพียงสองตัวเท่านั้น จึงนับได้ว่าเป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์น้อยซึ่งจากความไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อนของวงจรนี้ จึงทำให้วงจรที่นำเสนอนี้มีความเหมาะสมสำหรับการที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวม (integrated circuit : IC) โดยสามารถที่จะใช้ประโยชน์ของพื้นที่ในวงจรรวมอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ใช้ต่ออยู่กับกราวนด์ไม่ได้เป็นตัวเก็บประจุชนิดลอยตัว [23]

สำหรับรายละเอียดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงหลักการโดยทั่วไปของวงจร CCCII ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานสำคัญของวงจรของความถี่และวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ บทที่ 3 เกี่ยวกับหลักการทั่วไปของวงจรของความถี่แบบพื้นฐานต่างๆ ในบทที่ 4 เป็นหลักการทั่วไปในการออกแบบสร้างวงจรรอสซิลเลเตอร์ซึ่งเกี่ยวข้องอยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ บทที่ 5 จะเป็นการวิเคราะห์วงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์และแสดงผลของการจำลองการทำงานของวงจร ส่วนในบทที่ 6 นั้นจะเป็นการวิเคราะห์วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์และการแสดงผลของการจำลองการทำงานของวงจรที่ได้นำเสนอและในบทสุดท้าย คือ บทที่ 7 จะเป็นบทสรุปซึ่งใช้สรุปถึงเรื่องราวต่างๆที่ได้ทำมาในวิทยานิพนธ์นี้โดยรวม นอกจากนี้ยังมีภาคผนวกซึ่งแบ่งเป็นภาคต่างๆ โดยในภาคผนวก ก. จะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เบอร์ NX1 (NPN) และ PX1 (PNP) ที่ใช้ในการจำลองการทำงานและภาคผนวก ข. เป็นผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างการศึกษา

บทที่ 2

วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส

2.1 กล่าวนำ

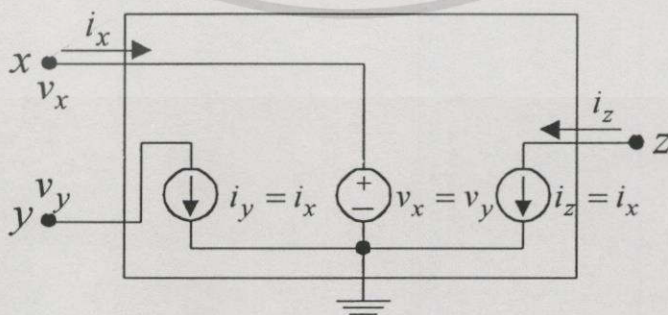
วงจรสายพานกระแส (current conveyor) เป็นวงจรปฏิบัติการเกี่ยวกับสัญญาณทางด้านอนาล็อกที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อก่อสร้างวงจรที่ประมวลผลสัญญาณแบบอนาล็อกในโหมดกระแสที่เป็นประโยชน์ได้อีกมากมาย ลักษณะของวงจรสายพานกระแสจะมีความคล้ายคลึงกับวงจรออปแอมป์ (op-amps) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไป ในด้านมุมมองที่เป็นวงจรที่ถูกสร้างขึ้นเป็นวงจรสำเร็จแบบวงจรรวม (Integrated circuits) ข้อแตกต่างระหว่างวงจรสายพานกระแสและวงจรออปแอมป์ที่มีความเด่นชัดก็คือ วงจรออปแอมป์เป็นวงจรทางด้านอนาล็อกที่ทำงานในโหมดแรงดันซึ่งเป็นโหมดการทำงานที่คุ้นเคยกันและใช้งานกันอย่างแพร่หลายอยู่โดยทั่วไป สำหรับวงจรสายพานกระแสเป็นวงจรปฏิบัติการแบบอนาล็อกที่ทำงานในโหมดกระแสซึ่งวงจรที่ทำงานในโหมดกระแสมีข้อดีก็คือ ให้ความถูกต้องและแม่นยำของค่าอัตราขยายสัญญาณของวงจรและมีย่านความถี่ในการทำงานของวงจรถูกกว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรประเภทเดียวกันที่ทำงานในโหมดแรงดัน วงจรสายพานกระแสเป็นวงจรที่ได้รับการพัฒนามาเป็นลำดับ โดยเริ่มจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (CCI), วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII), และวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCII) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวงจรรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ก็ได้ถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีพื้นฐานอยู่บนการใช้วงจร CCCII แบบบวก เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะกล่าวถึงวงจร CCCII แบบบวกเป็นประเด็นหลักโดยจะมีการกล่าวถึงที่มาของวงจร CCCII, รายละเอียดเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของวงจรวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในที่สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสของวงจร, หลักการของวงจรสะท้อนกระแสและหลักการทรานสลิเนียร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวงจรพื้นฐานที่สำคัญของวงจร CCCII เป็นลำดับและจะได้มีการกล่าวถึงในเรื่องต่างๆเหล่านี้ในบทนี้ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้ประกอบความเข้าใจในหลักการพื้นฐานการทำงานของวงจรรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป

2.2 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง (first generation current conveyor : CCI)

วงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่ง เป็นวงจรที่ได้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1968 โดย K.C. Smith และ A.S. Sedra วงจร CCI จัดเป็นวงจรประเภท 3 ขั้ว (port) คือมีขั้ว x , y เป็นขั้วของจุดสัญญาณทางด้านขาเข้าและขั้ว z เป็นขั้วของจุดสัญญาณทางด้านขาออกตามลำดับซึ่งโดยหลักการการทำงานพื้นฐานของวงจร CCI ก็คือ ถ้ามีศักดาไฟฟ้า (v) ตกคร่อมจุดสัญญาณทางด้านขาเข้าที่ขั้ว y แล้วจะปรากฏให้มีศักดาไฟฟ้าค่าเท่ากันขึ้นที่ขั้ว x และในขณะเดียวกันถ้ามีกระแสไฟฟ้า (i_x) ไหลผ่านจุดสัญญาณทางด้านขาเข้าที่ขั้ว x ก็ จะปรากฏให้มีกระแสค่าเท่ากันไหลผ่านที่ขั้ว y และกระแสค่าเดียวกันนี้จะถูกนำพา (convey) ไปเป็นกระแส ณ จุดสัญญาณขาออกที่ขั้ว z ซึ่งเป็นขั้วของอุปกรณ์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) สูงด้วย นอกจากนี้ค่าศักดาไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นที่ขั้ว x (ซึ่งถูกกำหนดโดยเกี่ยวเนื่องกับค่าศักดาไฟฟ้าทางด้านขั้ว y) นั้นจะไม่ขึ้นกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้ว x และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้ว y (ซึ่งถูกกำหนดค่าโดยกระแสไฟฟ้าทางด้านขั้ว x) นั้นก็จะไม่ขึ้นกับค่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ขั้ว y เช่นเดียวกัน จากความสัมพันธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าต่างๆดังกล่าวสามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ทางเมตริกซ์ได้ดังสมการเมตริกซ์ต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

จากคุณสมบัติตามสมการที่ (2.1) นี้สามารถที่จะนำไปเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ในรูปของบล็อกไดอะแกรมของวงจร CCI ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร CCI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

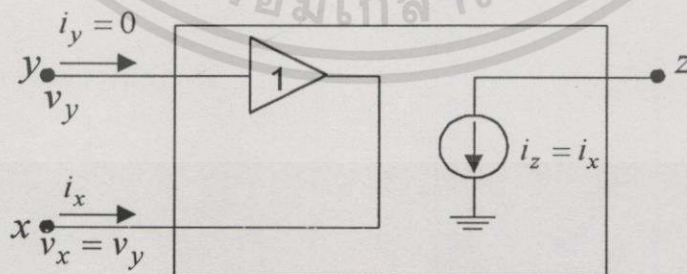
หลังจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่งนี้เกิดขึ้นได้ไม่นานนั้น บุคคลทั้งสองก็ได้มีการคิดค้นและทำการพัฒนาจากวงจรสายพานกระแสรุ่นที่หนึ่งและได้นำเสนอเป็นวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองขึ้น ซึ่งรายละเอียดจะได้มีกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.3 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (second generation current conveyor : CCII)

ในปี ค.ศ. 1970 ซึ่งเป็นระยะเวลา 2 ปีต่อมาหลังจากที่ K.C. Smith และ A.S. Sedra ได้นำเสนอแนวความคิดของวงจร CCI บุคคลทั้งสองได้ทำการปรับปรุงวงจรและได้นำเสนอแนวความคิดของหลักการวงจรสายพานกระแสรุ่นใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากกว่าแนวความคิดของวงจร CCI เดิม เรียกว่าวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองนี้ใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรแทนด้วย CCII โดยคุณสมบัติของวงจร CCII สามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ของตัวแปรไฟฟ้าต่างๆดังต่อไปนี้คือ

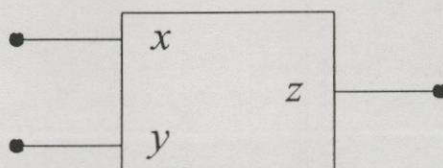
$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) สามารถนำไปเขียนวงจรสมมูลของวงจรได้ดังรูปที่ 2.2 และกำหนดใช้สัญลักษณ์เป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวงจร CCII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ลักษณะของวงจร CCII

จากแนวความคิดและหลักการของวงจร CCII นี้ ได้มีผู้นำไปคิดสร้างวงจรในทางปฏิบัติ ที่ทำงานในโหมดกระแสขึ้นหลายรูปแบบ ดังจะเห็นได้จากบทความต่าง ๆ ที่ได้รับการตีพิมพ์ขึ้น จำนวนมาก ซึ่งในการคิดพัฒนานี้ก็ได้มีการนำเสนอการสร้างวงจร CCII ในลักษณะของการใช้ วงจรทรานสลิเนียร์ (translinear) ขึ้นด้วยวิธีหนึ่งโดย A. Fabre [1] และโดยการวิเคราะห์วงจร ของ A. Fabre นี้อย่างละเอียดจึงได้เกิดพบคุณสมบัติบางประการใน CCII จนทำให้มีการบัญญัติ นิยามของคำว่า วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสขึ้นอีกนอกเหนือจาก CCII ซึ่ง ได้ใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรแทนด้วย CCCII โดยรายละเอียดของวงจร CCCII จะได้กล่าวถึงใน หัวข้อต่อไป

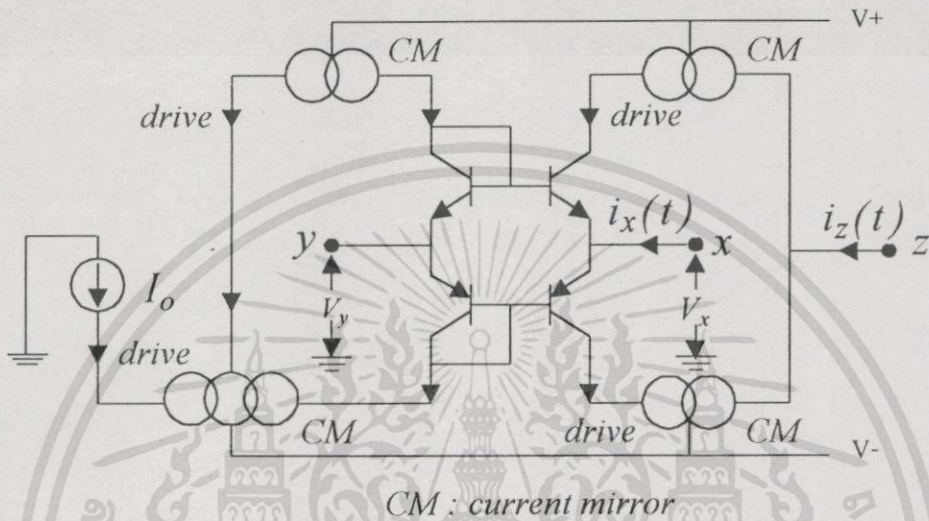
2.4 วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแส (second generation current controlled conveyor : CCCII)

วงจรสายพานกระแสรุ่นที่สองที่ควบคุมด้วยกระแสเป็นวงจรที่ได้ถูกทำกรนำเสนอขึ้นมา ในปี ค.ศ. 1995 [1] ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานโดยทั่วไปของวงจรดังกล่าวนั้นก็จะมีคล้ายคลึงกัน กับวงจรสายพานกระแสรุ่นที่สอง (CCII) ที่คุ้นเคยกัน แต่สำหรับวงจร CCCII จะมีค่าความต้านทานภายในทางด้านขั้ว x ซึ่งค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นนี้สามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัสของวงจร กล่าวคือ วงจร CCCII เป็นอุปกรณ์ประเภท 3 ขั้ว ได้แก่ x , y และ z โดยขั้ว x จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้า (input impedance) ขึ้นกับกระแสไบอัส I_o , ขั้ว y จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาเข้าสูง และ ขั้ว z จะเป็นขั้วที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านขาออกสูง (ดังรูปที่ 2.7)

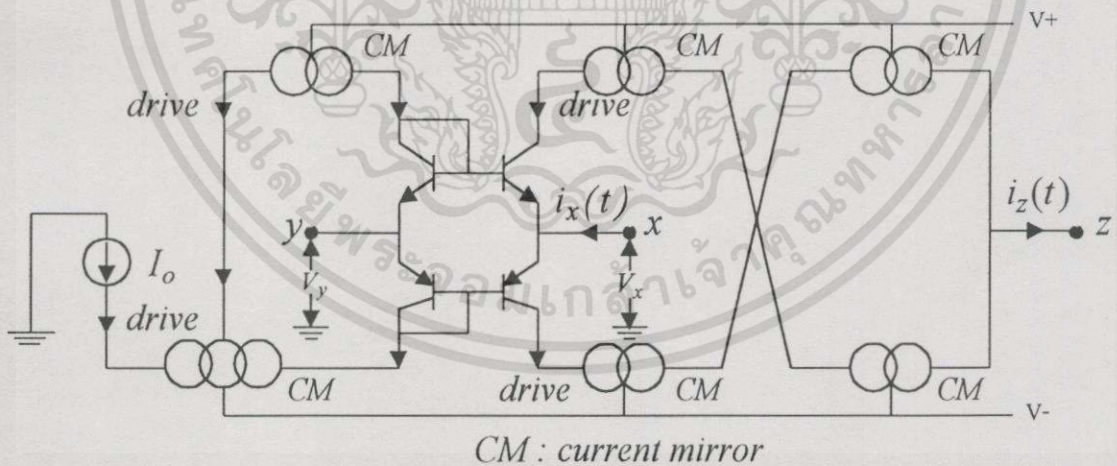
องค์ประกอบของวงจร CCCII นั้นเป็นวงจรที่สร้างขึ้นมาจากวงจรทรานสลิเนียร์ที่ประกอบ ขึ้นมาจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (bipolar transistor) ที่ต่ออยู่ในลักษณะรูปประกอบร่วมกับวงจรสะท้อนกระแส (current mirror : CM) วงจร CCCII จะมีกระแสทางด้านขั้ว z คือ i_z เท่ากับกระแสทางด้านขั้ว x ซึ่งเขียนแทนด้วย i_x ถ้าทิศทางของกระแส i_x และ i_z มีทิศทางเดียวกันนั้นคือไหลเข้าหรือไหลออกจากวงจรเหมือนกันจะจัดเป็นวงจร CCCII แบบบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(noninverting) ใช้สัญลักษณ์ตัวอักษรย่อว่า CCCII+ ส่วนในกรณีนี้ที่กระแสทั้งสองกลับทิศ
ทางกันวงจรจะถูกจัดเป็น CCCII แบบลบ (inverting) นิยมเขียนแทนด้วยอักษรย่อว่า CCCII-
ซึ่งไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบบวกและแบบลบมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตาม
ลำดับ



รูปที่ 2.4 แสดงไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบบวก (CCCII+)

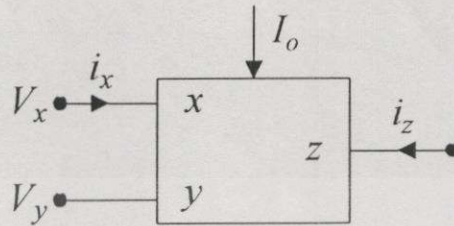


รูปที่ 2.5 แสดงไดอะแกรมของวงจร CCCII แบบลบ (CCCII-)

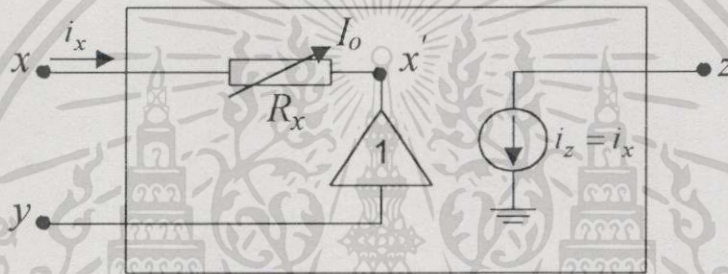
เนื่องจากวงจรรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอใน
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วงจร CCCII แบบบวก เป็นหลักในการสร้างวงจรดังกล่าวเพื่อเป็นการให้
กระชับความในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เมื่อมีการกล่าวถึงวงจร CCCII+ ก็จะใช้สัญลักษณ์ย่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนว่า CCCII เพียงเท่านั้น สัญญลักษณ์และวงจรมูลของวงจร CCCII แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 แสดงสัญญลักษณ์ของวงจร CCCII



รูปที่ 2.7 แสดงวงจรมูลของวงจร CCCII

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า คุณสมบัติที่แตกต่างระหว่างวงจร CCCII และ วงจร CCI ที่เป็นที่คุ้นเคยกันดีอย่างหนึ่งก็คือ วงจร CCCII จะคำนึงถึงค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นทางด้านขั้ว x โดยจะใช้สัญญลักษณ์แทนด้วย R_x (ดังรูปที่ 2.7) ซึ่งความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับกระแสไบอัส (I_o) ของวงจร จากรูปวงจรมูลตามรูปที่ 2.7 จะเขียนแสดงความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ของวงจร CCCII ได้ดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ซึ่งถ้าพิจารณาเพียงจุด x' ภายในของวงจร CCCII โดยหากละทิ้ง R_x ออกจากวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งในที่นี้จะได้ความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ที่สมมูลกับความสัมพันธ์ซึ่งแสดงคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจร CCII แบบปกติเท่านั้นซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในเชิงเมตริกได้ คือ

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_{x'} \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายใน (R_x) นั้น จะมีกล่าวถึงในส่วนของรายละเอียดในหัวข้อ 2.7 ต่อไป

2.5 หลักการทรานสลิเนียร์ (translinear principle)

หลักการทรานสลิเนียร์เป็นหลักการทํางานที่เป็นหัวใจสำคัญของวงจร CCCII หลักการนี้ได้ถูกค้นพบและนำเสนอโดย B. Gilbert ในปี ค.ศ. 1975 [4] จากการค้นพบคุณสมบัติของความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นกันระหว่างค่าทรานสคอนดักแตนซ์ (transconductance) กับกระแสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (translinear ย่อมาจาก transconductance linear with collector current [10]) ซึ่งจะสอดคล้องกันกับความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลระหว่างกระแสกับแรงดัน ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้ตามสมการต่อไปนี้

$$g = \frac{dI}{dV} = aI \quad (2.5)$$

เมื่อ g คือ ค่าทรานสคอนดักแตนซ์ และ a คือ ค่าคงที่

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.5) จะได้

$$\begin{aligned} \int \frac{dI}{dV} &= \int aI \\ \int \frac{1}{I} dI &= a \int dV \\ \ln I &= aV + c \\ I &= b \cdot \exp(aV) \end{aligned} \quad (2.6)$$

โดย b เป็นค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวตามสมการที่ (2.6) ได้นำไปสู่เงื่อนไขของวงจรถานสลิเนียร์ คือ วงจรถานสลิเนียร์เป็นวงจรที่มีการต่อกันในลักษณะรูปโดยรูปแบบของอุปกรณ์จะต้องมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ (2.6) ซึ่งจะเห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) กับแรงดันตกร่วมเบสอีมีเตอร์ (V_{BE}) เป็นไปตามสมการดังกล่าวเช่นกัน กล่าวคือ

$$I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (2.7)^*$$

$$\text{หรือ} \quad V_{BE} = V_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อ I_S คือ กระแสอิ่มตัว (saturation current) ซึ่งมีค่าคงที่แปรผันตามพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์

V_T คือ แรงดันอุณหภูมิ (thermal voltage) มีค่าเท่ากับ $\frac{KT}{q}$ ซึ่งจะพบว่ามีค่าประมาณ $26mV$ ที่อุณหภูมิ $27^\circ C$

K คือ ค่าคงที่โบลท์ซแมนน์ (Boltzmann) $= 1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อองศาเคลวิน (Kelvin)

T คือ ค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวิน

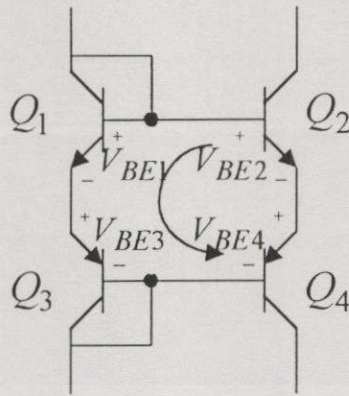
q คือ ค่าประจุไฟฟ้า $= 1.602 \times 10^{-19}$ คูลอมป์

วงจรถานสลิเนียร์ที่ประกอบขึ้นจากทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของวงจร CCCII นั้น จะมีลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเราจะวิเคราะห์พฤติกรรมความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ (parameter) ของวงจร CCCII ได้ดังต่อไปนี้คือ

* สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปได้ คือ $I_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T} - 1\right)$ ซึ่งโดยทั่วไป I_C จะมีค่ามากกว่า

I_S มากๆ จึงทำให้สามารถละทิ้งค่า 1 จากสมการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรทรานซิสลีนีร์ที่ประกอบอยู่ภายในของวงจร CCCII

จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law) จะได้ว่า

$$V_{BE1} + V_{BE3} = V_{BE2} + V_{BE4} \quad (2.9)$$

$$V_{T1} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{S1}}\right) + V_{T3} \ln\left(\frac{I_{C3}}{I_{S3}}\right) = V_{T2} \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_{S2}}\right) + V_{T4} \ln\left(\frac{I_{C4}}{I_{S4}}\right) \quad (2.10)$$

หรือแสดงในรูปความหนาแน่นของกระแส (J) จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$V_{T1} \ln\left(\frac{J_{C1}}{J_{S1}}\right) + V_{T3} \ln\left(\frac{J_{C3}}{J_{S3}}\right) = V_{T2} \ln\left(\frac{J_{C2}}{J_{S2}}\right) + V_{T4} \ln\left(\frac{J_{C4}}{J_{S4}}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อสมมติว่าให้ $Q_1 - Q_4$ ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการที่ทำในเวลาเดียวกัน และทำงานที่อุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ได้ $V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = V_{T4} = V_T$ และเมื่อกำหนดให้ J_S ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากัน คือ $J_{S1} = J_{S2} = J_{S3} = J_{S4} = J_S$ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า V_T และ J_S จากสมการจะถูกจัดออกไป ทำให้ได้ความสัมพันธ์

$$\ln J_{C2} + \ln J_{C4} = \ln J_{C1} + \ln J_{C3} \quad (2.12)$$

หรือเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้เป็น

$$J_{C2} \cdot J_{C4} = J_{C1} \cdot J_{C3} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อแสดงความสัมพันธ์ของสมการในรูปทั่วไประหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับพื้นที่ของอิมิตเตอร์ (A) จะได้ว่า

$$\frac{I_{C2}I_{C4}}{A_2A_4} = \frac{I_{C1}I_{C3}}{A_1A_3} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.14) จะเห็นได้ว่าวงจรทรานซิสลีนีร์ที่คิดการทำงานในโหมดกระแสเป็นหลักจะให้หน้าที่การทำงานของวงจรที่มีความแน่นอน โดยจะไม่ถูกกระทบกระเทือนจากอิทธิพลของอุณหภูมิ จากความสัมพันธ์ต่างๆดังกล่าวแล้วนี้เงื่อนไขของหลักการทรานซิสลีนีร์สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ คือ

1. อุปกรณ์ที่ประกอบร่วมกันในลักษณะรูปของวงจรทรานซิสลีนีร์นั้น จะต้องมีความสัมพันธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าเป็นไปตามสมการ

$$V = V_T \ln\left(\frac{J}{J_S} + 1\right) \quad (2.15)$$

หรือ $J = J_S \exp\left(\frac{V}{V_T} - 1\right)$ (2.16)

2. ความหนาแน่นกระแส J ต้องมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว J_S มากๆ จึงจะทำให้สามารถละทิ้งค่า 1 ในพจน์ของลอการิทึมได้โดยไม่เกิดความผิดพลาดที่สามารถสังเกตได้

3. ในทรานซิสลีนีร์รูป จะต้องประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีเงื่อนไขตามข้อ 1. เป็นจำนวนคู่ โดยจะมีอุปกรณ์ดังกล่าวจำนวนเท่าๆกันต่ออยู่ในรูปในทิศทางที่สวนกันภายในรูป

4. คู่ของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในทิศทางตรงข้ามกันจะต้องใช้เป็นอุปกรณ์ที่มีค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวเท่ากัน

5. อุปกรณ์ภายในรูปทุกตัวทำงานที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน

จากเงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์หลักการของทรานซิสลีนีร์นั้น ค่าพารามิเตอร์ J_S และ V_T ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิและกระบวนการในการสร้างอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) จะถูกขจัดออกไปจากความสัมพันธ์ของกระแสที่ต้องการซึ่งทำได้โดยการกำหนดให้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับอุณหภูมิของอุปกรณ์แต่ละตัวมีค่าเท่ากัน และอุปกรณ์ภายในรูปทำงานที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของ

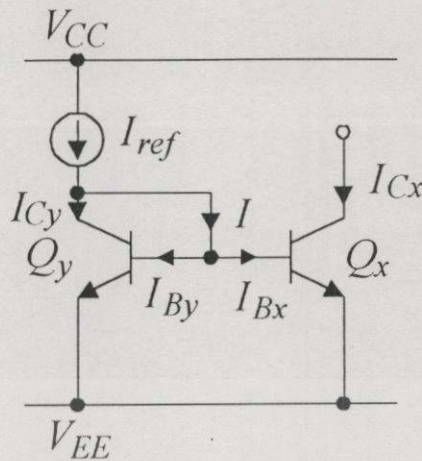
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ภายในรูปเป็นไปดังสมการที่ (2.14) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์ที่มีความแม่นยำโดยไม่ถูกกระทบกระเทือนจากอิทธิพลของอุณหภูมิ เพราะฉะนั้นหลักการทรานซิสเตอร์นี้จึงเป็นหลักการที่เหมาะสมสำหรับใช้กับเทคโนโลยีการสร้างเป็นวงจรรวมเป็นอย่างดี

2.6 วงจรสะท้อนกระแส (current mirror)

วงจรสะท้อนกระแสโดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์นั้น มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญคือจะให้ความต้านทานทางด้านขาเข้าต่ำและมีความต้านทานทางด้านขาออกสูงซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่ วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัวหรือแบบไดโอดทรานซิสเตอร์ (diode transistor current mirror) ซึ่งเป็นวงจรพื้นฐานที่มีใช้กันมากเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสหรือดึงกระแสในวงจรรวมแบบอนาล็อก (analog integrated circuit) อัตราขยายกระแสของวงจรมีค่าหนึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเล็กน้อยเนื่องจากผลของเบส-วิดท์ มอดูเลชัน (base-width modulation) ดังนั้นต่อมาได้มีการพัฒนาวงจรสะท้อนกระแสโดยใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ 3 ตัวหรือแบบวิลสัน (Wilson) เพื่อต้องการให้ผลของเบส-วิดท์ มอดูเลชันของวงจรมีค่าต่ำ ทำให้มีอัตราขยายกระแสใกล้เคียงหนึ่งมากกว่าและให้ค่าความต้านทานที่จุดสัญญาณขาออกสูงกว่าวงจรแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว วงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสันชนิดปรับปรุงเป็นวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว เพื่อลดผลของเบส-วิดท์ มอดูเลชันที่มีต่อวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัวซึ่งวงจรมีอัตราขยายกระแสเป็นหนึ่งได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามนั้น สำหรับวงจรสะท้อนกระแสที่ประกอบด้วยกับวงจรรวมชนิดนี้เนี่ยร์อยู่ในวงจร CCCII ตามแบบของ A. Fabre นั้น เป็นวงจรแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัวหรือแบบไดโอดทรานซิสเตอร์ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการลดความซับซ้อนของวงจรรวมลงเพราะใช้อุปกรณ์น้อยจึงจะขอลงกล่าวถึงแต่ในรายละเอียดของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัวเท่านั้น ซึ่งวงจรมีลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกระแสไฟตรงของวงจรในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าทรานซิสเตอร์ Q_y ถูกต่ออยู่ในลักษณะของไดโอดโดยการต่อขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์เข้าด้วยกัน ทำให้แรงดันตกคร่อมคอลเลคเตอร์เบส (V_{CB}) มีค่าเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ดีทรานซิสเตอร์ Q_y นี้ก็ยังมีการทำงานที่อยู่ในช่วงของการทำงานในย่านแอคทีฟ (active region) เพราะแรงดันตกคร่อมคอลเลคเตอร์อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ที่มีค่าเพียง V_{BE} อย่างเดียวก็เพียงพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ในย่านการทำงานแบบแอคทีฟ

โดยการกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ Q_x และ Q_y มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการแล้ว จากสมการที่ (2.8) จะได้ว่า

$$V_{BE_x} = V_{T_x} \ln \left(\frac{I_{C_x}}{I_{S_x}} \right) \quad (2.17)$$

$$\text{และ } V_{BE_y} = V_{T_y} \ln \left(\frac{I_{C_y}}{I_{S_y}} \right) \quad (2.18)$$

ซึ่งจากรูปที่ 2.9 ด้วยมีการต่อขาเบสและขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองร่วมกันจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่าแรงดันเบสอิมิตเตอร์เท่ากัน ดังนั้นโดยการเทียบสมการที่ (2.17) และสมการที่ (2.18) เราจะได้ความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสอง คือ

$$I_{C_x} = I_{C_y} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณากระแสไฟตรงที่ขาคอลเลคเตอร์ของ Q_y จะพบว่า

$$I_{ref} - I_{Cy} - I = 0 \quad (2.20)$$

ซึ่ง I ในที่นี้คือผลรวมของกระแสเบส I_{Bx} และ I_{By} และ β_F คืออัตราขยายกระแสไฟตรง $\left(\frac{I_C}{I_B}\right)$ ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นถ้าให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีค่า β_F เท่ากันแล้วจะได้

$$I_{ref} - I_{Cy} - 2 \frac{I_{Cy}}{\beta_F} = 0 \quad (2.21)$$

ดังนั้นเมื่อจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

$$I_{Cy} = \frac{I_{ref}}{1 + 2/\beta_F} = I_{Cx} \quad (2.22)$$

หรือ
$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{I_{Cx}}{I_{ref}} = \frac{1}{1 + 2/\beta_F} = 1 - \frac{2}{2 + \beta_F} \quad (2.23)$$

ถ้า β_F มีค่าสูงมาก (โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 200) จะทำให้กระแสขาออก (I_{Cx}) มีค่าโดยประมาณเท่ากับกระแสขาเข้า (I_{ref}) ได้ดังสมการที่ (2.23)

จากการวิเคราะห์วงจรสะท้อนกระแสดังกล่าวนี้ จะเห็นได้ว่ากรณีที่ทรานซิสเตอร์ Q_x และ Q_y มีคุณสมบัติเหมือนกันจะได้อัตราขยายกระแสของวงจรประมาณหนึ่ง หากทรานซิสเตอร์ Q_x และ Q_y มีคุณสมบัติต่างกันก็จะทำให้วงจรสะท้อนกระแสมีค่าอัตราขยายกระแสแตกต่างจากหนึ่งมาก โดยจากสมการที่ (2.8) ถ้าหากพื้นที่อิมิตเตอร์ของ Q_x และ Q_y แตกต่างกันซึ่งจะทำให้พจน์ของ I_S ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองต่างกัน แต่มีค่า V_{BE} เท่ากันเป็นผลให้อัตราการขยายกระแสแปรผันตามอัตราส่วนพื้นที่อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสอง นอกจากนี้แรงดันตกคร่อมคอลเลคเตอร์อิมิตเตอร์ของ Q_x และ Q_y ที่แตกต่างกัน จะทำให้ได้อัตราขยายกระแสที่คลาดเคลื่อนออกไปเนื่องจากผลของเบส-วิดท์มอดูเลชัน ทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงไปซึ่งในกรณีนี้กระแสคอลเลคเตอร์จะเกี่ยวพันอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆในรูปสมการดังต่อไปนี้ [3] คือ

$$I_C = I_S \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \right] \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ V_A คือ ค่าแรงดันเออร์ลีย์ (Early voltage) ของทรานซิสเตอร์ โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 50 – 100 โวลท์

2.7 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII



รูปที่ 2.10 แสดงองค์ประกอบของวงจร CCCII ในส่วนของขั้ว x และขั้ว y

จากการวิเคราะห์หลักการทรานสลิเนียร์ในหัวข้อ 2.5 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1, Q_2, Q_3 และ Q_4 ดังนี้ คือ

$$I_1 I_3 = I_2 I_4 \quad (2.25)$$

แต่ $I_1 = I_3 \approx I_o$ ดังนั้นจะได้

$$I_o^2 = I_2 I_4 \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจรที่ 2.10 นั้น เมื่อพิจารณาถึงผลต่างของแรงดันระหว่างจุด A และ B คือ

$$\begin{aligned}
 V_{xy} &= V_{BE1} - V_{BE2} \\
 &= V_T \ln \frac{I_1}{I_S} - V_T \ln \frac{I_2(t)}{I_S} \\
 &= V_T \ln \frac{I_o}{I_S} - V_T \ln \frac{I_2(t)}{I_S} \\
 &= V_T \ln \frac{I_o}{I_2(t)} \\
 &= -V_T \ln \frac{I_2(t)}{I_o}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

และ $I_4(t) = I_2(t) + i_x(t)$ เมื่อนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.26) จะได้

$$\begin{aligned}
 I_o^2 &= I_2(t)[I_2(t) + i_x(t)] \\
 &= I_2^2(t) + I_2(t)i_x(t) \\
 I_2^2(t) + I_2(t)i_x(t) - I_o^2 &= 0 \\
 I_2(t) &= \frac{-i_x(t) \pm (i_x^2(t) + 4I_o^2)^{1/2}}{2} \\
 I_2(t) &= \frac{1}{2} \left[(i_x^2(t) + 4I_o^2)^{1/2} - i_x(t) \right], \quad (I_2(t) > 0)
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

และในทำนองเดียวกัน เมื่อนำ $I_2(t) = I_4(t) - i_x(t)$ แทนค่าลงในสมการที่ (2.26) จะได้

$$\begin{aligned}
 I_o^2 &= I_4(t)[I_4(t) - i_x(t)] \\
 &= I_4^2(t) - I_4(t)i_x(t) \\
 I_4^2(t) - I_4(t)i_x(t) - I_o^2 &= 0
 \end{aligned}$$

$$I_4(t) = \frac{i_x(t) \pm (i_x^2(t) + 4I_o^2)^{1/2}}{2}$$

$$I_4(t) = \frac{1}{2} \left[(i_x^2(t) + 4I_o^2)^{1/2} + i_x(t) \right], (I_4(t) > 0) \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.28) เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้ขนาดของกระแส $i_x(t)$ น้อยกว่า $2I_o$ มากๆ คือ $i_x(t) \ll 2I_o$ จะได้ว่า

$$I_2(t) = \frac{1}{2}(2I_o - i_x(t)) \quad (2.30)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการที่ (2.30) ลงในสมการ (2.27) จะได้

$$\begin{aligned} V_{xy} &= -V_T \ln \left(\frac{2I_o - i_x(t)}{2I_o} \right) \\ &= -V_T \ln \left(1 - \frac{i_x(t)}{2I_o} \right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

โดยการนำอนุกรมของ $\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$ มาประยุกต์ใช้

$$\text{จะได้ } \ln \left(1 - \frac{i_x(t)}{2I_o} \right) = -\frac{i_x(t)}{2I_o} - \frac{1}{2} \left(\frac{i_x(t)}{2I_o} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{i_x(t)}{2I_o} \right)^3 - \frac{1}{4} \left(\frac{i_x(t)}{2I_o} \right)^4 + \dots$$

และเพราะสมมุติฐาน $\frac{i_x(t)}{2I_o} \ll 1$ จะทำให้สามารถละทิ้งพจน์ที่มีกำลังมากกว่า 1 ได้นั้นคือเราสามารถประมาณสมการเงื่อนไข

$$\ln \left(1 - \frac{i_x(t)}{2I_o} \right) \approx -\frac{i_x(t)}{2I_o} \quad (2.32)$$

โดยการแทนค่าสมการที่ (2.32) ลงในสมการที่ (2.31) จะได้

$$V_{xy} = V_T \frac{i_x(t)}{2I_o} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และด้วยการหารตลอดสมการที่ (2.33) ด้วย $i_x(t)$ จะเป็นผลให้ได้

$$R_x = \frac{V_{xy}}{i_x(t)} = \frac{V_T}{2I_o} \quad (2.34)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.34) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความต้านทานทางด้านขาเข้าของสัญญาณขนาดเล็ก (small signal) นั้น จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไบอัสของวงจรถึงค่าความต้านทานดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวงจรมีการปรับค่าในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบสร้างวงจรรองความถี่และวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ด้วยกระแสไฟฟ้าที่ได้นำเสนอในบทนี้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทั่วไปของวงจรกรองความถี่

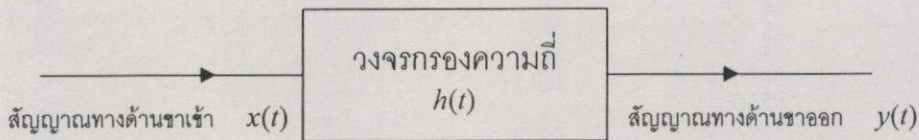
3.1 กล่าวนำ

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่มีบทบาทสำคัญวงจรหนึ่งในทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในสาขาต่างๆ มากมาย และเป็นวงจรที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสื่อสารโทรคมนาคมต่างๆ เช่น ในระบบการกระจายเสียง (broadcasting systems), ระบบดาวเทียมสื่อสาร (satellite systems) เป็นต้น วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 แบบ แบบแรกจะเป็นวงจรกรองความถี่แบบที่เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบดิจิตอล (digital filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่ถูกใช้กับสัญญาณแบบดิจิตอล (digital signals) หรือสัญญาณที่ไม่มีความต่อเนื่องทางเวลา (discrete-time signals) และวงจรกรองความถี่แบบที่สองก็คือวงจรกรองความถี่ที่เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (analog filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่ถูกใช้กับสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา (continuous-time signals) โดยวงจรกรองแบบอนาล็อกนั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อยๆ ได้อีก 2 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่ประเภทพาสซีฟ (passive filter) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ขดลวดตัวนำและตัวต้านทานหรือสร้างมาจากตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ และวงจรกรองความถี่อีกประเภทหนึ่งคือ วงจรกรองความถี่ประเภทแอคทีฟ (active filter) เป็นวงจรกรองความถี่ที่สร้างมาจากอุปกรณ์ประเภทแอคทีฟ เช่น ออปแอมป์ ฯลฯ เพิ่มขึ้นร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟ เช่น ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เป็นต้น

รายละเอียดของวงจรกรองความถี่ที่จะกล่าวถึงเพื่อเป็นพื้นฐานเบื้องต้นในบทนี้นั้น จะเป็นหลักการโดยทั่วไปของวงจรกรองความถี่และจะเป็นการกล่าวถึงรูปแบบโดยทั่วไปของสมการการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อกที่มีรูปแบบของสมการการถ่ายโอนของวงจรเป็นแบบไบควอด (biquadratic function) เป็นหลัก

3.2 หลักการทั่วไปของวงจรรองความถี่

ระบบของวงจรรองความถี่สามารถเขียนแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบของวงจรรองความถี่

เมื่อ $x(t)$ คือ สัญญาณทางด้านขาเข้า

$y(t)$ คือ สัญญาณทางด้านขาออก

และ $h(t)$ คือ สัญญาณตอบสนองต่อสัญญาณแบบอิมพัลส์ (impulse response) ของระบบ ซึ่งถ้าให้วงจรรองความถี่ภายใต้การพิจารณาเป็นระบบที่มีคุณสมบัติเป็นแบบคอซอล (causal), เป็นแบบเชิงเส้น (linear) และเป็นระบบที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time-invariant) แล้ว $y(t)$ จะสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$y(t) = \int_0^t h(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (3.1)$$

หรือเมื่อทำการแปลงลาปลาซของสมการที่ (3.1) จะได้ผลการแปลงลาปลาซ คือ

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (3.2)$$

โดย $Y(s)$, $X(s)$ และ $H(s)$ คือผลการแปลงลาปลาซของ $y(t)$, $x(t)$ และ $h(t)$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาบนแกนความถี่ $s = j\omega$ สมการที่ (3.2) สามารถเขียนแสดงอยู่ในรูปส่วนประกอบของขนาดและเฟสได้ดังนี้ คือ

$$|Y(j\omega)| = |H(j\omega)||X(j\omega)| \quad (3.3)$$

$$\text{และ } \phi_Y(j\omega) = \phi_H(j\omega) + \phi_X(j\omega) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\phi_{Y(j\omega)}$ คือค่าเฟสของ $Y(j\omega)$, $\phi_{H(j\omega)}$ คือค่าเฟสของ $H(j\omega)$ และ $\phi_{X(j\omega)}$ คือค่าเฟสของ $X(j\omega)$

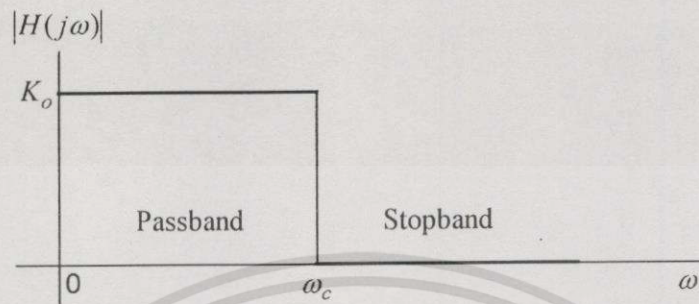
หลักการโดยทั่วไปของวงจรกรองความถี่นั้นก็คือ ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ไม่ต้องการออกจากสัญญาณที่ต้องการ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดก็เช่น ในการรับสัญญาณวิทยุซึ่งสัญญาณที่ส่งมาจากทางด้านสถานีส่งนั้นจะเป็นสัญญาณที่มาจากทุกๆสถานีที่ทำการกระจายเสียงรวมทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นขณะที่การกระจายเสียง การปรับค่าความถี่เพื่อรับฟังรายการจากสถานีใดสถานีหนึ่งนั้นจะทำได้โดยการกรองเอาสัญญาณของสถานีอื่นๆที่ไม่ต้องการรับฟังรวมทั้งสัญญาณรบกวนออกให้เหลือเพียงสัญญาณของสถานีที่ต้องการจะรับฟังเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ (3.3) จะเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณทางด้านขาออกนั้นเป็นผลคูณของค่าขนาดของสัญญาณขาเข้ากับค่าขนาดของฟังก์ชันของการตอบสนองในเชิงความถี่ (frequency response function) ของวงจรกรองความถี่ ถ้าหากค่าฟังก์ชันขนาด (magnitude function) ของ $H(j\omega)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง ω_{s1} และ ω_{s2} ก็แสดงว่าสัญญาณทางด้านขาออกจะมีค่าขนาดเท่ากับศูนย์ ไม่ว่าจะสัญญาณทางด้านขาเข้านั้นจะมีค่าเท่าไรอยู่ในช่วง $(\omega_{s1}, \omega_{s2})$ ซึ่งโดยทั่วไปช่วงความถี่ $(\omega_{s1}, \omega_{s2})$ จะเรียกว่าแถบหยุด (stopband) ของวงจร $H(j\omega)$ นั้น ในทำนองเดียวกันเมื่อค่าฟังก์ชันขนาดของ $H(j\omega)$ มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ในช่วงแถบความถี่ระหว่าง ω_{p1} และ ω_{p2} ก็จะทำให้สัญญาณทางด้านขาออกจะมีค่าขนาดเป็นไปตามสมการที่ (3.3) ในช่วงความถี่ $(\omega_{p1}, \omega_{p2})$ ซึ่งช่วงความถี่นี้มีชื่อเรียกว่าแถบผ่าน (passband) ของวงจร $H(j\omega)$ นั้น

จากธรรมชาติการตอบสนองของฟังก์ชันขนาดของ $H(j\omega)$ ในช่วงของแถบความถี่ที่แตกต่างกันของวงจร ทำให้วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งออกเป็นแบบย่อยๆได้อีก 4 แบบตามคุณลักษณะของแถบหยุดและแถบผ่านของวงจร ซึ่งเพื่อให้สะดวกในการอธิบายจึงขอสมมุติให้วงจรกรองความถี่ที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวงจรกรองความถี่ในเชิงอุดมคติ นั่นคือ การตอบสนองทางเฟสเป็นแบบเชิงเส้นและมีค่าการสูญเสียทางขนาดเป็นศูนย์ในช่วงแถบผ่านของวงจรและให้การสูญเสียในแถบหยุดของวงจรมีค่าเป็นอนันต์ ($|H(j\omega)| = 0$)

3.2.1 วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter)

วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึงความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ω_c ในขณะที่ช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟจะเป็นช่วงความถี่แถบหยุดของวงจร ในกรณีเช่นนี้ค่าแบนด์วิธ (bandwidth) ของวงจรมี

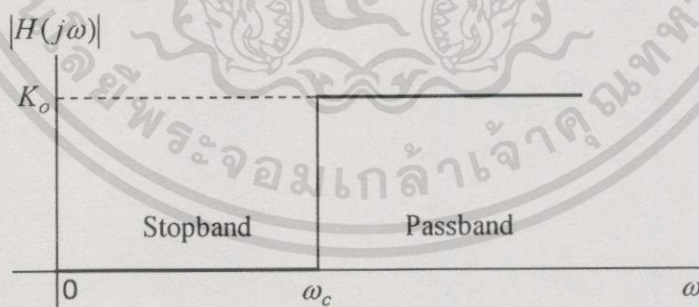
ค่าเท่ากับ ω_c เราจะพบว่า การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในแบบอุดมคติ นั้นมีแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านในแบบอุดมคติ

3.2.2 วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (high-pass filter)

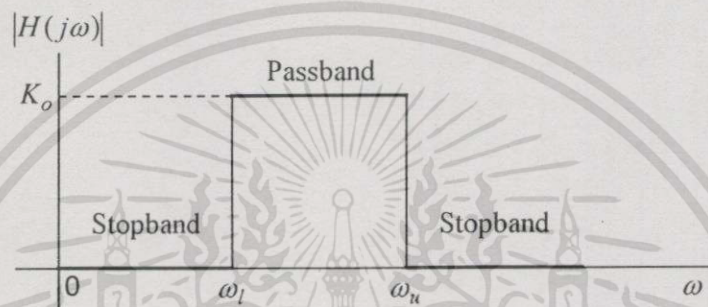
วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงความถี่ต่ำระหว่าง 0 และความถี่คัทออฟ ω_c ในขณะที่วงจรจะยอมให้ความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟผ่านวงจรไปได้ ซึ่งการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านในแบบอุดมคตินั้นจะมีดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านในแบบอุดมคติ

3.2.3 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (band-pass filter)

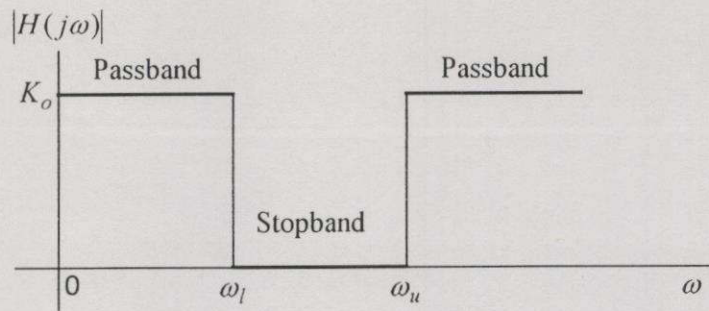
วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน เป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบความถี่ผ่านของวงจรอยู่ในช่วงระหว่างความถี่คัทออฟสองความถี่ คือ ω_l และ ω_u ($\omega_u > \omega_l$) ในขณะที่แถบหยุดของวงจรจะมีอยู่สองแถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คัทออฟ ω_l และในช่วงของความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟ ω_u ซึ่งผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในแบบอุดมคตินั้นจะมีดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านในแบบอุดมคติ

3.2.4 วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด (band-stop filter)

วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดเป็นวงจรกรองความถี่ที่มีแถบหยุดอยู่ในช่วงระหว่างความถี่คัทออฟสองความถี่ คือ ω_l และ ω_u ($\omega_u > \omega_l$) ในขณะที่แถบความถี่ผ่านของวงจรจะมีอยู่สองแถบคือ ในช่วงระหว่างความถี่ 0 ถึงความถี่คัทออฟ ω_l และในช่วงของความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัทออฟ ω_u สำหรับผลการตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุดในแบบอุดมคติแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การตอบสนองทางขนาดในเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่แบบแถบความถี่
หยุดในแบบอุดมคติ

วงจรรองความถี่ที่มีการตอบสนองเชิงความถี่ตามอุดมคตินั้นไม่สามารถสร้างขึ้นได้จริง ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นคงใช้วงจรที่มีผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ประมาณคล้ายกับผลตอบสนองในอุดมคติมาปฏิบัติการต่างๆ เท่านั้น วงจรทางปฏิบัติเบื้องต้นแบบง่าย ๆ คือ วงจรรองความถี่ชนิดที่เรียกว่า วงจรรองความถี่แบบไปควอดซึ่งคุณสมบัติของวงจรไปควอดนั้นจะมีดังที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

3.3 รูปแบบสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรรองความถี่แบบไปควอด

สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรรองความถี่แบบไปควอดนั้นจะมีรูปแบบมาตรฐานเป็นดังนี้ คือ

$$H(s) = K \frac{s^2 + \frac{\omega_z}{Q_z} s + \omega_z^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.5)$$

โดย ω_z , Q_z , ω_p และ Q_p คือ ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงค่าความถี่ของซีโร่ (zero), ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของซีโร่, ค่าความถี่ของโพลและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของโพลของฟังก์ชันการถ่ายโอน $H(s)$ นั้นตามลำดับ

เมื่อค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (3.5) เปลี่ยนไป จะทำให้ได้วงจรรองความถี่ชนิดต่างๆ คือ วงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน, แบบความถี่สูงผ่าน, แบบแถบความถี่ผ่าน และ

แบบแถบความถี่หยุดได้ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณแบบต่างๆดังกล่าวนี้มีตามลำดับดังต่อไปนี้ คือ

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน จะมีรูปแบบสมการดังนี้ คือ

$$H(s) = K \frac{\omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.6)$$

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านนั้น จะมีลักษณะต่อไปนี้ คือ

$$H(s) = K \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.7)$$

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน จะมีรูปแบบของสมการโดยเฉพาะเป็น

$$H(s) = K \frac{\frac{\omega_p}{Q_p} s}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.8)$$

สมการฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไบควอดของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่หยุด จะมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากฟังก์ชันการถ่ายโอนอื่นๆ ดังนี้คือ

$$H(s) = K \frac{s^2 + \omega_p^2}{s^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} s + \omega_p^2} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรรองความถี่ในโหมดกระแสที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่ผู้เขียนได้พัฒนาขึ้นและจะนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ นั้น เป็นวงจรรองความถี่ที่มีคุณสมบัติพิเศษดังนี้คือ สามารถทำหน้าที่ได้หลายหน้าที่ในวงจรเดียวกัน นั่นคือ สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน, แบบความถี่สูงและแบบแถบความถี่ผ่านได้ในวงจรเดียวกัน วงจรรองความถี่ดังกล่าวจะมีรูปแบบสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนเป็นแบบไบควอด ซึ่งการสร้างวงจรรองความถี่นี้มีพื้นฐานอยู่กับการใช้วงจร CCCII มาเป็นอุปกรณ์แอคทีฟซึ่งจะได้มีกล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการสร้างวงจรรอสซิลเลเตอร์

4.1 กล่าวนำ

วงจรรอสซิลเลเตอร์ (oscillator circuit) เป็นวงจรไฟฟ้าที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณได้ในตัววงจรเองโดยจะให้สัญญาณทางด้านขาออก (output signal) นั้นมีรูปแบบเป็นสัญญาณแบบรายคาบ (periodic signal) โดยไม่จำเป็นที่จะต้องมียุสัญญาณทางด้านขาเข้า (input signal) ของวงจรแต่อย่างใด วงจรรอสซิลเลเตอร์นั้นเป็นวงจรพื้นฐานอย่างหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในทางวิศวกรรมในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในระบบเครื่องมือวัด, ระบบการสื่อสารโทรคมนาคม ฯลฯ ในระบบโทรคมนาคมวงจรรอสซิลเลเตอร์สามารถจะถูกใช้เป็นวงจรรสร้างสัญญาณคลื่นพาห้ (carrier signal) เพื่อใช้ในการมอดูเลต (modulation) สัญญาณหรือเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาอ้างอิงหลัก (reference clock signal) ให้แก่ระบบ เป็นต้น

วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่เป็นที่รู้จักกันดีมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบคริสตัล (crystal oscillator) , วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบเลื่อนเฟส (phase shift oscillator) , วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบวินบริดจ์ (wien-bridge oscillator) , วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบโคลพิทซ์ (colpitts oscillator) หรือ วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบฮาร์ทเลย์ (hartley oscillator) เป็นต้น และรูปแบบของสัญญาณที่สร้างขึ้นจากวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบต่างๆก็มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น สัญญาณซายน์, สัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม, สัญญาณสามเหลี่ยม และ สัญญาณฟันเลื่อย ฯลฯ อย่างไรก็ตามในที่นี้จะกล่าวถึงหลักการเกี่ยวกับวงจรรอสซิลเลเตอร์ซึ่งกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ซึ่งเป็นเรื่องเกี่ยวเนื่องอยู่กับวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่จะนำเสนออยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เท่านั้น

ในการออกแบบสร้างวงจรรอสซิลเลเตอร์นั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบของวงจร, เงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบ และต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงานที่สำคัญในการกำเนิดรูปสัญญาณของวงจรอีกด้วย ดังนั้นในบทที่ 4 นี้จึงใช้เพื่ออธิบายเรื่องเกี่ยวกับรายละเอียดของการออกแบบวงจรรอสซิลเลเตอร์ซึ่งจะมีการกล่าวถึงเป็นหัวข้อย่อยๆเป็นลำดับๆไปดังนี้

4.2 องค์ประกอบของวงจรออสซิลเลเตอร์

องค์ประกอบหลักที่สำคัญของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่จำเป็นนั้น สามารถแยกออกได้เป็นดังนี้

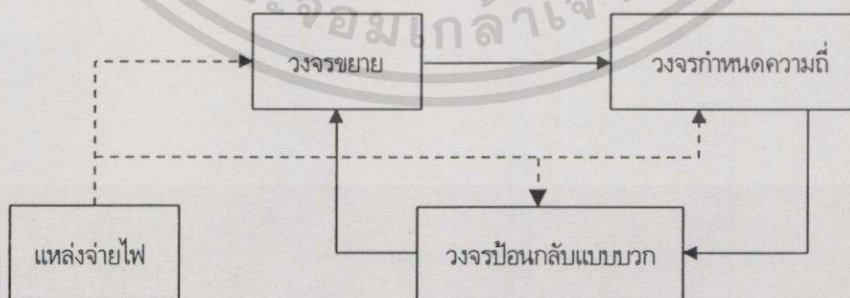
4.2.1 **ตัวกำเนิดพลังงาน (energy source)** ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟ, แบตเตอรี่ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่มีศักดาคงที่ใช้จ่ายไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ต่างๆในวงจรเป็นสำคัญ

4.2.2 **วงจรกำหนดความถี่ (frequency - determining circuit)** ในการกำเนิดสัญญาณวงจรกำหนดความถี่นี้จะป็นวงจรที่สามารถใช้เลือกความถี่ได้ ในลักษณะที่เป็นวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่านซึ่งอาจจะ ได้แก่ วงจรจูนแบบ LC, วงจรจูนแบบ RC หรือ แบบคริสตัล เช่นนี้เป็นต้น

4.2.3 **วงจรมายขยาย (amplifier circuit)** เป็นวงจรประเภทแอกคที่พืงซึ่งอาจจะเป็นวงจรมายขยายแบบทรานซิสเตอร์ (transistor), แบบเฟ็ด (FET) หรือ วงจรมายขยายที่อยู่ใรรูปของไอซีอย่างใดก็ได้ซึ่งจะทำหน้าที่ดำรงการกำเนิดของสัญญาณไว้ด้วยการชดเชยพลังงานในส่วนที่สูญเสียไปภายในวงจรของวงจรออสซิลเลเตอร์ให้มีค่าคงตัวอยู่เช่นเดิมโดยอัตโนมัติ

4.2.4 **วงจรมายกลับแบบบวก (positive feedback circuit)** เป็นวงจรที่จะนำสัญญาณจากทางด้านขาออกของวงจรออสซิลเลเตอร์กลับไปยังด้านขาเข้าของวงจร โดยสัญญาณทางด้านขาออกที่ป้อนกลับไปสู่ทางด้านขาเข้าของวงจรมายกลับนั้นจะต้องจัดให้มีเฟส (phase) ตรงกันกับเฟสของสัญญาณทางด้านขาเข้าทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดการเสริมสัญญาณกันขึ้นเพื่อที่จะทำให้สัญญาณดำรงตัวอยู่ได้

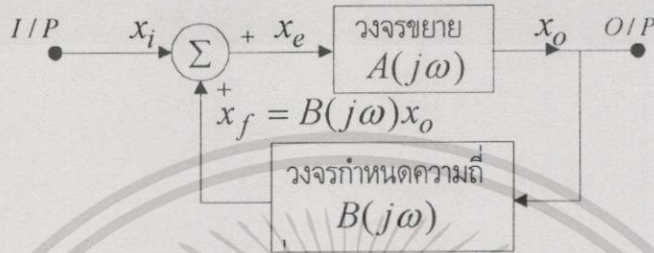
ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 4 ข้อเหล่านี้มักจะถูกจัดประกอบกันดังไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของวงจรออสซิลเลเตอร์

4.3 เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณของวงจร

วงจรออสซิลเลเตอร์นั้นจัดเป็นวงจรโครงข่ายแบบป้อนกลับ (feedback networks) แบบหนึ่งซึ่งมีการป้อนกลับแบบบวกสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบการไหลวนของสัญญาณได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่มีการป้อนกลับแบบบวก

สัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้ในวงจรในรูปที่ 4.2 เป็นดังต่อไปนี้ คือ

x_i คือ สัญญาณทางด้านขาเข้าของวงจร

x_o คือ สัญญาณทางด้านขาออกของวงจร

x_e คือ สัญญาณผลรวมระหว่าง x_i และ x_f มีค่าเท่ากับ $x_i + x_f$

x_f คือ สัญญาณป้อนกลับ

$A(j\omega)$ คือ ค่าเกนของวงจรขยาย

$B(j\omega)$ คือ ค่าเกนของวงจรถ้าหนดความถี่

จากบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.2 จะได้ว่า

$$x_e = x_i + x_f \quad (4.1)$$

$$\text{เมื่อ } x_f = B(j\omega)x_o \quad (4.2)$$

$$\text{และ } x_o = A(j\omega)x_e \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าสมการที่ (4.2) และ (4.3) ลงใน (4.1) ตามลำดับและเมื่อปรับรูปสมการใหม่ จะได้สมการเป็น

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{A(j\omega)}{1 - A(j\omega)B(j\omega)} \quad (4.4)$$

ในการกำเนิดสัญญาณนั้น วงจรจะต้องสามารถสร้างสัญญาณทางด้านขาออกได้โดยที่ไม่มีสัญญาณทางด้านขาเข้าซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวจะเป็นจริงได้ก็คือค่าเกนขยายมีค่าเป็นอนันต์ (infinity) นั่นคือ ค่าสวนของสมการที่ (4.4) จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ กล่าวคือ

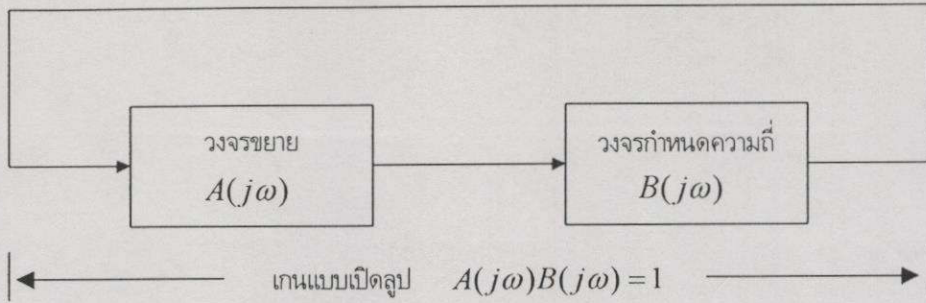
$$1 - A(j\omega)B(j\omega) = 0 \quad (4.5)$$

โดยเมื่อเงื่อนไขตามสมการที่ (4.5) เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งความถี่ค่าหนึ่ง (สมมติว่าเป็นที่ค่าความถี่ ω_o) ก็แสดงว่าจะเกิดมีการให้กำเนิดสัญญาณที่มีความถี่นั้นขึ้น เกณฑ์การตรวจสอบที่สำคัญที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ เกณฑ์ของบาร์คฮูเซน (Barkhausen criterion) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่รู้จักกันดีในการออกแบบสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ เกณฑ์ดังกล่าวมีนัยที่กล่าวได้โดยสรุป ดังนี้คือ "วงจรออสซิลเลเตอร์ที่จะสามารถกำเนิดสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องนั้นจะต้องมีเกนแบบเปิดลูป (open-loop gain) เป็นค่าจริงเท่ากับหนึ่ง" นั่นคือเราจะได้เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณแยกเป็นสองเงื่อนไขที่จะต้องเกิดพร้อมกัน คือ

$$|A(j\omega_o)B(j\omega_o)| = 1 \quad (4.6)$$

$$\text{และมึค่าเฟส } \arctan\{A(j\omega_o)B(j\omega_o)\} = 0 \text{ หรือ } 2n\pi, (n = \text{เลขจำนวนเต็ม}) \quad (4.7)$$

ซึ่งในการรักษาค่าเกนแบบเปิดลูปของวงจรให้มีค่าเท่ากับหนึ่งนั้น ก็เพื่อเป็นการรักษาการกำเนิดสัญญาณให้คงที่อยู่ตลอดไปนั่นเอง ความหมายของเงื่อนไขบาร์คฮูเซนอาจแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงความหมายของเกนของบาร์คัสเซ่น

โดยการป้อนกลับแบบบวกจะทำให้เกนแบบปิด (closed loop gain) ของวงจรมีค่ามากขึ้นและถ้าเกนแบบเปิด (opened loop gain) ของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งก็จะทำให้เกนแบบปิดของ วงจรมีค่าเป็นอนันต์ซึ่งจะเห็นได้โดยการแทนสมการที่ (4.6) ลงในสมการ (4.4) คือ

$$\frac{x_o}{x_i} = \frac{A(j\omega)}{1-1} = \infty \quad (4.8)$$

สมการที่ (4.8) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกนแบบเปิดของวงจรมีค่าเท่ากับหนึ่งแล้วจะทำให้เกนแบบปิดของวงจรมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งหมายความว่าแม้ไม่มีสัญญาณทางด้านขาเข้า ($x_i = 0$) วงจรนี้ก็อาจสามารถสร้างสัญญาณทางด้านขาออกได้ คือวงจรจะสามารถให้กำเนิดสัญญาณขึ้นมาได้นั่นเอง อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ววงจรถ้าหนดความถี่จะอาศัยสัญญาณรบกวน (noise signal) เป็นสัญญาณเริ่มต้นทางด้านขาเข้าให้กับวงจรซึ่งสัญญาณรบกวนนี้อาจจะมาจากแหล่งกำเนิดใดๆก็ได้ เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมาจากแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจรเอง เป็นต้น

อย่างไรก็ตามเพื่อพิจารณากันโดยธรรมชาติแล้วนั้น วงจรออสซิลเลเตอร์โดยทั่วไปนั้นจะเป็นวงจรประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear circuit) หากแต่การวิเคราะห์ของวงจรมันได้ใช้หลักการการวิเคราะห์แบบเป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นเงื่อนไขที่ได้จึงสามารถที่จะกำหนดได้แต่เพียงความถี่ของสัญญาณเท่านั้นแต่จะไม่สามารถกำหนดขนาดของสัญญาณที่กำเนิดขึ้นได้ดังจะเห็นได้จากเกณฑ์การตรวจสอบของบาร์คัสเซ่นที่กล่าวไว้ข้างต้นแสดงแต่เพียงว่า ความถี่ของการกำเนิดสัญญาณจะมีค่าเฟสของสัญญาณเท่ากับ $2n\pi$ (n เป็นเลขจำนวนเต็ม)

สำหรับการควบคุมขนาดของสัญญาณที่ถูกกำเนิดขึ้นมานั้นที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธีคือ

1. ทำได้โดยการเพิ่มวงจรในส่วนที่จะทำหน้าที่รักษาระดับของสัญญาณ

2. ใช้หลักการของการจำกัดขนาดด้วยตัวเอง (self-limiting) ของอุปกรณ์ภายในวงจร เช่น วงจรออสซิลเลเตอร์ที่สร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ (transistor) ในขณะเริ่มต้นเมื่อสัญญาณมีค่าต่ำ ทรานซิสเตอร์จะมีค่าเกนสูง ทำให้ค่าลูบเกนของวงจรจะมีค่ามากกว่า 1 ณ ตำแหน่งความถี่ที่มีค่าเฟสเท่ากับ $2n\pi$ (n เป็นเลขจำนวนเต็ม) แต่เมื่อขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มอิ่มตัว (saturate) ทำให้ทรานซิสเตอร์มีเกนลดลงซึ่งจะทำให้ลูบเกนของวงจรจะลดลงจนกระทั่งทำให้สัญญาณมีขนาดที่คงที่ได้ในที่สุด

4.4 หลักการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์

การทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์นั้นอาจสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สภาวะ คือ

4.4.1 สภาวะเริ่มต้นการทำงานของวงจร (first turn-on)

สภาวะเริ่มต้นการทำงานของวงจรจะเกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกำลังงานให้แก่วงจร ซึ่งการจ่ายกำลังงานจากแหล่งพลังงานภายนอกให้แก่วงจรอย่างทันทีทันใดนี้ จะทำให้เกิดสภาวะเปลี่ยนย้าย (transition) ขึ้นทำให้มีสเปกตรัมของสัญญาณเกิดกระจายขึ้นอย่างมากมาย อย่างไรก็ตามก็ดีเนื่องจากวงจรออสซิลเลเตอร์นั้นจะมีวงจรถูกกำหนดความถี่อยู่ภายใน ดังนั้นจึงมีความถี่เพียงความถี่เดียวเท่านั้นที่โดดเด่นและจะถูกเลือกให้ถูกป้อนย้อนกลับในกระบวนการป้อนกลับ ทำให้เกิดการพิกัดเป็นความถี่ของสัญญาณที่จะปรากฏเป็นสัญญาณขาออกของวงจร

4.4.2 สภาวะการสร้างสัญญาณ (signal build up)

เมื่อความถี่ของสัญญาณที่กำเนิดขึ้นถูกกำหนดความถี่โดยวงจรถูกกำหนดความถี่แล้ว สัญญาณทางด้านขาออกจะถูกนำกลับไปยังด้านขาเข้าของวงจร ซึ่งสัญญาณจะถูกจัดโดยวงจรให้มีเฟสตรงกันเพื่อเป็นการเสริมสัญญาณให้มีกำลังมากยิ่งขึ้น

4.4.3 สภาวะรักษากการสร้างสัญญาณ (sustained oscillation)

การรักษากการกำเนิดสัญญาณให้คงอยู่นั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขของบาร์คัสเซ่น คือผลคูณค่าเกนของวงจรขยายและวงจรถูกป้อนกลับจะต้องมีค่าเท่ากับหนึ่งในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัตินั้นค่าเกนรวมของระบบจะต้องมีค่ามากกว่าหนึ่งเล็กน้อยในสถานะเริ่มแรก ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการชดเชยการลดทอนสัญญาณที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในวงจรและจะใช้ลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณมีค่ามากมาเป็นตัวรักษาลูบเกนให้เท่ากับหนึ่งเพื่อเป็นตัวมาจำกัดขนาดของสัญญาณที่ได้ออกมา

โดยอาศัยหลักการที่กล่าวมาแล้วนี้ เราจะสามารถที่จะสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ขึ้นได้
ซึ่งวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็อาศัย
หลักการที่กล่าวถึงแล้วนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

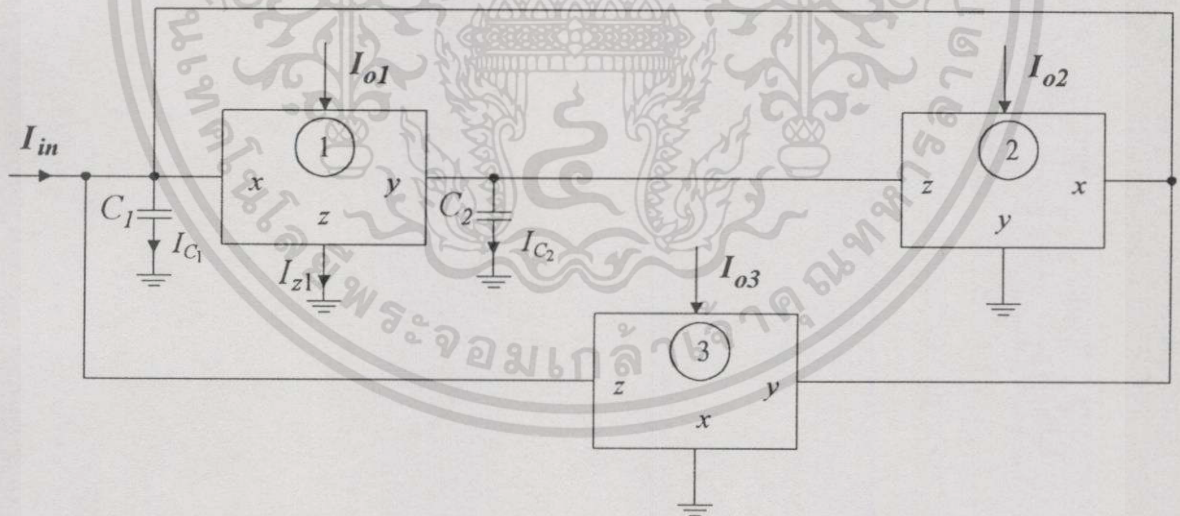
วงจรรองความถี่ที่สามารถควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ และผลการจำลองการทำงานของวงจร

5.1 กล่าวนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าวงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์มีหลักการพื้นฐานสำคัญของวงจรมุ่งเน้นการใช้วงจร CCCII ซึ่งมีรายละเอียดของวงจร CCCII ได้มีกล่าวไว้ในบทที่ 2 มาประกอบรวมกันเป็นวงจรรองความถี่ตามหลักการโดยทั่วไปของวงจรรองความถี่ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 สำหรับรายละเอียดของการวิเคราะห์วงจรในทางทฤษฎีและผลของการจำลองการทำงานของวงจรรองความถี่จะได้มีกล่าวและแสดงในบทนี้

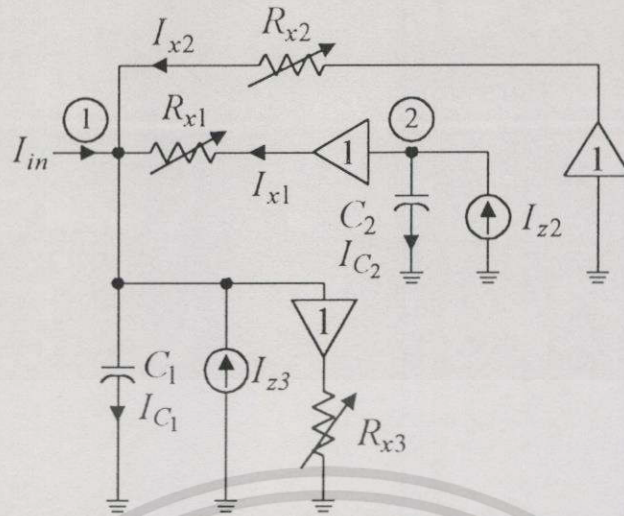
5.2 การวิเคราะห์วงจรรองความถี่

สำหรับวงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบจากอุปกรณ์แอคทีฟที่เป็นวงจร CCCII ดังแผนผังวงจรแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

โดยอาศัยวงจรสมมูลของวงจร CCCII ในรูปที่ 2.7 มาแทนในส่วนของวงจร CCCII ตามรูปที่ 5.1 ซึ่งจะได้วงจรสมมูลของรูปที่ 5.1 ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ที่ความถี่ได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

5.2.1 การวิเคราะห์วงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน (highpass filter)

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 5.2 เราสามารถวิเคราะห์ได้ว่า วงจรนี้แสดงตัวเป็นวงจรกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่านได้ เมื่อเรากำหนดให้ I_{C1} เป็นสัญญาณขาออกซึ่งจะแสดงให้เห็นได้โดยการตั้งสมการโหนดดังต่อไปนี้คือ โหนด 1 เราจะได้

$$\begin{aligned} I_{in} &= I_{C1} - I_{x1} - I_{x2} - I_{z3} \\ &= V_1 s C_1 - \frac{(V_2 - V_1)}{R_{x1}} - \frac{(0 - V_1)}{R_{x2}} - \frac{V_1}{R_{x3}} \end{aligned} \quad (5.1)$$

ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$I_{in} = \left(s C_1 + \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} - \frac{1}{R_{x3}} \right) V_1 - \frac{V_2}{R_{x1}} \quad (5.2)$$

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นว่า

$$V_2 = \frac{I_{z2}}{s C_2} = \frac{I_{x2}}{s C_2} \quad (5.3)$$

ซึ่งโดยการแทนค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{x2} = -\frac{V_1}{R_{x2}} \quad (5.4)$$

$$\text{และ } V_1 = \frac{I_{C1}}{sC_1} \quad (5.5)$$

$$\text{จะได้ว่า } V_2 = -\frac{I_{C1}}{s^2 C_1 C_2 R_{x2}} \quad (5.6)$$

โดยการแทนสมการที่ (5.5) และ (5.6) ลงในสมการที่ (5.2) จะพบว่า

$$\begin{aligned} I_{in} &= \left(sC_1 + \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} - \frac{1}{R_{x3}} \right) \frac{I_{C1}}{sC_1} + \frac{I_{C1}}{s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}} \\ &= \left(1 + \frac{1}{sC_1 R_{x1}} + \frac{1}{sC_1 R_{x2}} - \frac{1}{sC_1 R_{x3}} + \frac{1}{s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}} \right) I_{C1} \end{aligned} \quad (5.7)$$

ในที่สุดเมื่อจัดรูปสมการก็จะได้สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอน (transfer function) เป็นสมการที่อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันการถ่ายโอนของกรองความถี่แบบความถี่สูงผ่าน คือ

$$\frac{I_{C1}}{I_{in}} = \left(\frac{s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3}}{s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + sC_2 (R_{x1} R_{x3} + R_{x2} R_{x3} - R_{x1} R_{x2}) + R_{x3}} \right) \quad (5.8)$$

5.2.2 การวิเคราะห์วงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน (bandpass filter)

วงจรสมมูลในรูปที่ 5.2 สามารถแสดงตัวเป็นวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านได้ซึ่งจะแสดงการวิเคราะห์นี้ได้โดยการแทนค่าสมการต่อไปนี้ คือ

$$V_1 = -I_{x2} R_{x2} = -I_{z2} R_{x2} \quad (5.9)$$

$$\text{และ } V_2 = \frac{I_{z2}}{sC_2} \quad (5.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลงในสมการที่ (5.2) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 I_{in} &= \left(sC_1 + \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}} - \frac{1}{R_{x3}} \right) (-I_{z2} R_{x2}) - \frac{I_{z2}}{sC_2 R_{x1}} \\
 &= - \left(sC_1 R_{x2} + \frac{1}{sC_2 R_{x1}} + \frac{R_{x2}}{R_{x1}} - \frac{R_{x2}}{R_{x3}} + 1 \right) I_{z2} \quad (5.11)
 \end{aligned}$$

เนื่องจาก $I_{z2} = I_{C2}$ ดังนั้นเมื่อแทนค่าความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.11) และจัดพจน์ใหม่ จะได้สมการแสดงการถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน คือ

$$\frac{I_{C2}}{I_{in}} = \left(- \frac{sC_2 R_{x1} R_{x3}}{s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + sC_2 (R_{x1} R_{x3} + R_{x2} R_{x3} - R_{x1} R_{x2}) + R_{x3}} \right) \quad (5.12)$$

5.2.3 การวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน (lowpass filter)

โดยใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 5.2 เราสามารถวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านได้ ถ้าเราพิจารณาให้ I_{z1} เป็นสัญญาณออกของวงจรการวิเคราะห์นี้ทำได้โดยการพิจารณาสมการต่อไปนี่

$$\text{จาก } I_{z2} = V_2 sC_2 \quad (5.13)$$

$$\text{และ } I_{x2} = I_{z2} = - \frac{V_1}{R_{x2}} \quad (5.14)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_1 = -V_2 sC_2 R_{x2} \quad (5.15)$$

$$\text{นอกจากนี้ } I_{x1} = \frac{V_2 - V_1}{R_{x1}} \quad (5.16)$$

โดยการแทนค่าสมการที่ (5.15) ลงในสมการที่ (5.16) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_2 = \frac{I_{x1} R_{x1}}{(1 + sC_2 R_{x2})} \quad (5.17)$$

$$\text{ดังนั้น } V_1 = -\frac{I_{x1} sC_2 R_{x1} R_{x2}}{(1 + sC_2 R_{x2})} \quad (5.18)$$

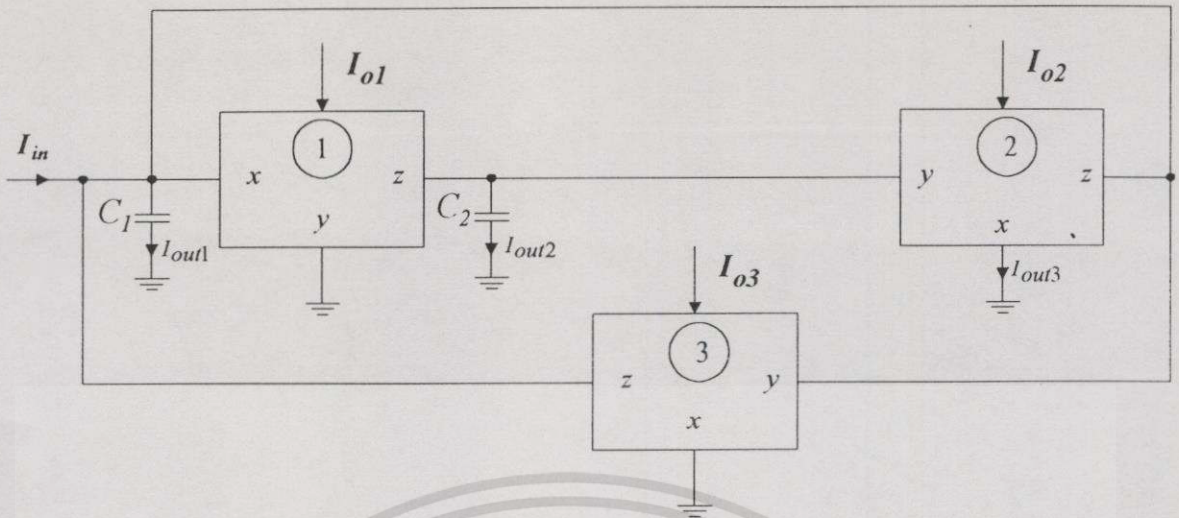
ซึ่งเมื่อแทนค่าสมการ (5.17) และ (5.18) ลงในสมการที่ (5.2) จะได้สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรรองความถี่ ดังนี้คือ

$$\frac{I_{z1}}{I_{in}} = \left(-\frac{R_{x3}(sC_2 R_{x2} + 1)}{s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + sC_2(R_{x1} R_{x3} + R_{x2} R_{x3} - R_{x1} R_{x2}) + R_{x3}} \right) \quad (5.19)$$

หากเราพิจารณาสมการที่ (5.19) จะเห็นได้ว่าสมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนนี้ไม่ใช่ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบความถี่ต่ำผ่านโดยแท้จริง แต่จะเห็นว่าเป็นสมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบความถี่ต่ำผ่านและแบบแถบความถี่ผ่านควบคู่กันไป แต่อย่างไรก็ดีเนื่องจากเมื่อพิจารณาสมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแถบความถี่ผ่านเปรียบเทียบกับสมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบความถี่ต่ำผ่านแล้วจะเห็นได้ว่าค่าอัตราขยายในส่วนของวงจรรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายของวงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านอยู่มาก ดังนั้นหากละทิ้งผลของสมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแถบความถี่ผ่านออกจากสมการที่ (5.19) ก็จะได้สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบความถี่ต่ำผ่านโดยประมาณ ดังนี้คือ

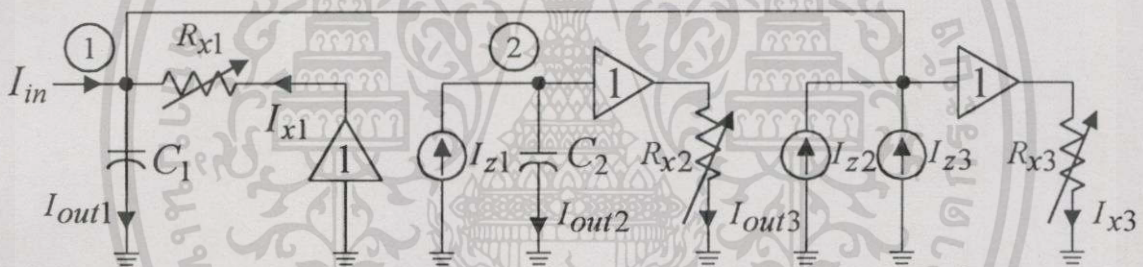
$$\frac{I_{z1}}{I_{in}} \approx \left(-\frac{R_{x3}}{s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + sC_2(R_{x1} R_{x3} + R_{x2} R_{x3} - R_{x1} R_{x2}) + R_{x3}} \right) \quad (5.20)$$

อย่างไรก็ตามวงจรรองความถี่ที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 5.1 นั้น สามารถที่จะปรับปรุงวงจรใหม่เพื่อให้วงจรสามารถทำหน้าที่ในส่วนของวงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่านอย่างแท้จริงได้โดยไม่มีการเพิ่มเติมหรือลดทอนอุปกรณ์ใดๆออกจากวงจรรองความถี่ต้นแบบดังกล่าวเลย ซึ่งการปรับปรุงวงจรใหม่นั้นจะทำได้ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 วงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการปรับปรุงวงจรใหม่

โดยวงจรสมมูลของวงจรที่ 5.3 สามารถเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลของวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่

เมื่อพิจารณาที่โหนด 1 ของวงจรในรูปที่ 5.4 จะได้ว่า

$$I_{in} = I_{out1} - I_{x1} - I_{z2} - I_{z3} \quad (5.21)$$

และจากวงจรถัดกล่าวเราจะได้ว่า

$$I_{x1} = I_{z1} = I_{out2} = -\frac{V_1}{R_{x1}} = -\frac{I_{out1}}{sC_1R_{x1}} \quad (5.22)$$

$$I_{z2} = I_{out3} = \frac{V_2}{R_{x2}} = \frac{I_{out2}}{sC_2R_{x2}} = -\frac{I_{out1}}{s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}} \quad (5.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ } I_{z3} = \frac{V_1}{R_{x3}} = \frac{I_{out1}}{sC_1R_{x3}} \quad (5.24)$$

ซึ่งเราสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_{out1} กับกระแส I_{out2} และกระแส I_{out1} กับกระแส I_{out3} ได้ดังนี้

$$I_{out1} = -sC_1R_{x1}I_{out2} \quad (5.25)$$

$$\text{และ } I_{out1} = -s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}I_{out3} \quad (5.26)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (5.22), (5.23), และ (5.24) ลงในสมการที่ (5.21) จะได้ว่า

$$I_{in} = I_{out1} + \frac{I_{out1}}{sC_1R_{x1}} + \frac{I_{out1}}{s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}} + \frac{I_{out1}}{sC_1R_{x3}} \quad (5.27)$$

ซึ่งเมื่อจัดรูปสมการใหม่ก็จะได้สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบความถี่สูงผ่านดังนี้คือ

$$\frac{I_{out1}}{I_{in}} = \frac{s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}R_{x3}}{s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}R_{x3} + sC_2R_{x2}(R_{x3} - R_{x1}) + R_{x3}} \quad (5.28)$$

และโดยการแทนค่าสมการที่ (5.25) ลงในสมการที่ (5.28) จะได้สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบแถบความถี่ผ่าน คือ

$$\frac{I_{out2}}{I_{in}} = -\frac{sC_2R_{x2}R_{x3}}{s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}R_{x3} + sC_2R_{x2}(R_{x3} - R_{x1}) + R_{x3}} \quad (5.29)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อแทนค่าสมการที่ (5.26) ลงในสมการที่ (5.28) จะได้สมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบความถี่ต่ำผ่าน คือ

$$\frac{I_{out3}}{I_{in}} = -\frac{R_{x3}}{s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}R_{x3} + sC_2R_{x2}(R_{x3} - R_{x1}) + R_{x3}} \quad (5.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII แต่ละตัวคือ R_{xn} ($n = 1, 2, 3$) มีค่าดังนี้

$$R_{xn} \approx \frac{V_T}{2I_{on}} \quad (n = 1, 2, 3) \quad (5.31)$$

ซึ่งสมการที่ (5.31) ใช้ได้ดีเมื่อ i_{xn} มีค่าน้อยกว่า $2I_{on}$

จากสมการที่ (5.28), (5.29), และ (5.30) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสมการทั้งสามมีรูปสมการที่มีส่วนเหมือนกัน กล่าวคือทุกสมการจะมีส่วนเป็นดังนี้

$$s^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + s C_2 R_{x2} (R_{x3} - R_{x1}) + R_{x3} \quad (5.32)$$

ซึ่งให้ความหมายว่าสมการทั้งสามมีค่าโพล (pole) และ Q ของโพลที่เท่ากัน รูปแบบของส่วนสมการเหล่านี้สามารถที่จะจัดใหม่ให้อยู่ในรูปมาตรฐาน คือ

$$s^2 + s \frac{\omega_o}{Q} + \omega_o^2 \quad (5.33)$$

เมื่อจัดสมการที่ (5.32) ให้อยู่ในรูปมาตรฐานและอยู่ในเทอมของอุปกรณ์ของวงจรได้ดังนี้ คือ

$$s^2 + s \frac{(R_{x3} - R_{x1})}{C_1 R_{x1} R_{x3}} + \frac{1}{C_1 C_2 R_{x1} R_{x2}} \quad (5.34)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการที่ (5.33) กับ (5.34) จะได้

$$\omega_o = (C_1 C_2 R_{x1} R_{x2})^{-1/2} \quad (5.35)$$

$$\text{และ } Q = \frac{R_{x3}}{R_{x3} - R_{x1}} \left(\frac{C_1 R_{x1}}{C_2 R_{x2}} \right)^{1/2} \quad (5.36)$$

หากแทนค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII แต่ละตัวดังแสดงในสมการที่ (5.31) ลงในสมการที่ (5.35) และ (5.36) ตามลำดับ จะได้สมการแสดงค่าความถี่ศูนย์กลางและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรในเทอมของกระแสไบอัส ดังนี้คือ

$$\omega_o = \frac{2}{V_T} \left(\frac{I_{o1} I_{o2}}{C_1 C_2} \right)^{1/2} \quad (5.37)$$

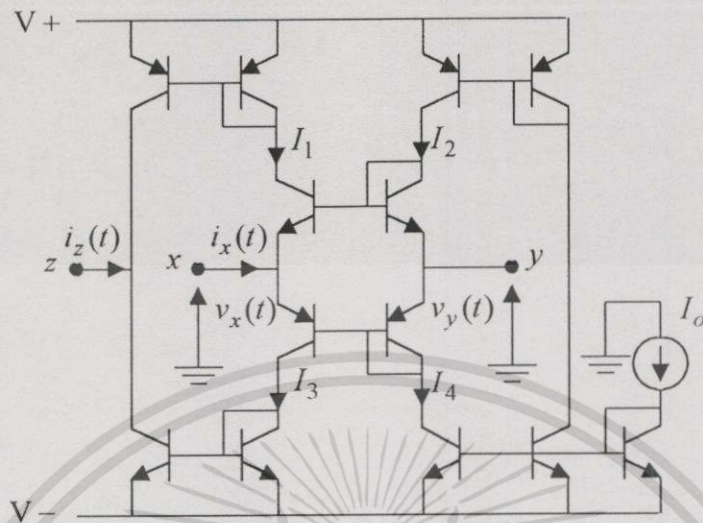
$$\text{และ } Q = \frac{I_{o1}}{I_{o1} - I_{o3}} \left(\frac{C_1 I_{o2}}{C_2 I_{o1}} \right)^{1/2} \quad (5.38)$$

สมการที่ (5.37) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรมีความถี่ควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัส I_{o1} และ/หรือ I_{o2} ในขณะเดียวกันเมื่อกำหนดให้กระแสไบอัส I_{o1} และ I_{o2} มีค่าคงที่ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรมีความถี่ควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไบอัส I_{o3} โดยไม่มีผลกระทบต่อความถี่ที่นำเสนอดังกล่าวก็ได้มีการจำลองการทำงานของวงจรมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งผลของการจำลองการทำงานจะมีแสดงในหัวข้อต่อไป

5.3 ผลของการจำลองการทำงานของวงจรมีความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

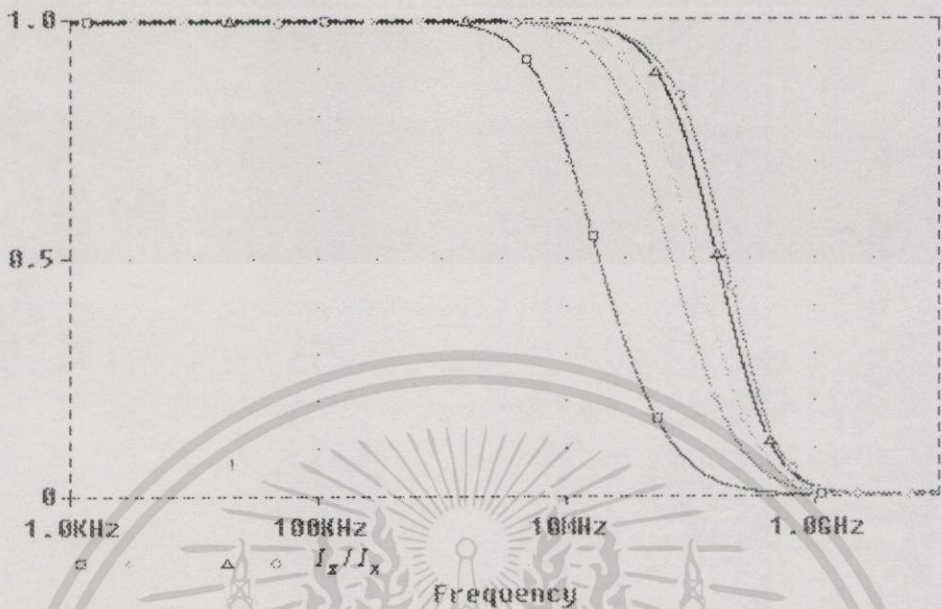
เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ตามทฤษฎีของวงจรมีความถี่ที่ได้นำเสนอดังกล่าว โดยการใช้การเลียนแบบการทำงานของวงจรมีโปรแกรมสไปซ์ (SPICE) มาช่วยตรวจสอบ ซึ่งในการตรวจสอบนี้ได้ใช้พารามิเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ NX1(NPN) และ PX1(PNP) [9] และกำหนดให้ไฟเลี้ยงของวงจรมีค่าเท่ากับ $\pm 2.5 V$ อย่างไรก็ตามก่อนที่จะได้มีการตรวจสอบการจำลองการทำงานของวงจรมีความถี่ที่ได้นำเสนอนั้น การวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ และค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจรมีความถี่ CCCII ก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจซึ่งผลจะมีแสดงในหัวข้อต่อไปและตามด้วยผลของการจำลองการทำงานของวงจรมีความถี่ตามลำดับ

5.3.1 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII

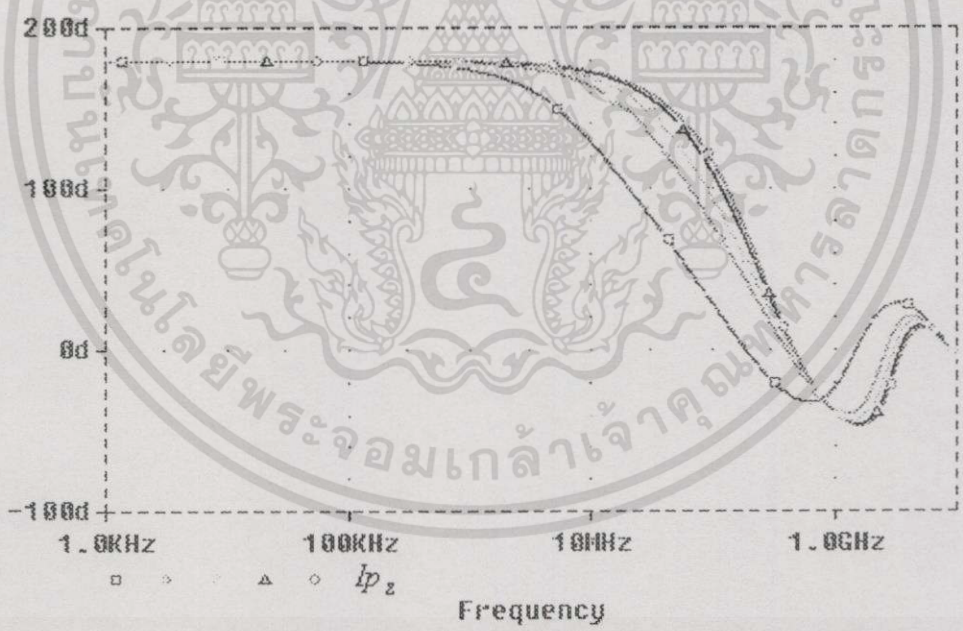


รูปที่ 5.5 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII

การตรวจสอบผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII ทำได้โดยการจัดให้กระแสขาเข้า ณ ขั้ว x ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงทางความถี่อยู่ในช่วง $1\text{kHz} - 10\text{GHz}$ และทำการตรวจสอบกระแสขาออก ณ ขั้ว z เมื่อกระแสไบอัส I_o ของวงจรมีค่า $10, 50, 100, 250, 500\mu\text{A}$ ตามลำดับ ผลการตอบสนองทางความถี่ด้านขนาดและเฟสของวงจร CCCII แสดงในรูปที่ 5.6 (ก) และ 5.6 (ข) ตามลำดับ



(ก) ผลตอบสนองทางขนาด



(ข) ผลตอบสนองทางเฟส

เมื่อ $\square : I_o = 10\mu A$ $\diamond : I_o = 50\mu A$ $\nabla : I_o = 100\mu A$ $\triangle : I_o = 250\mu A$ และ $\circ : I_o = 500\mu A$

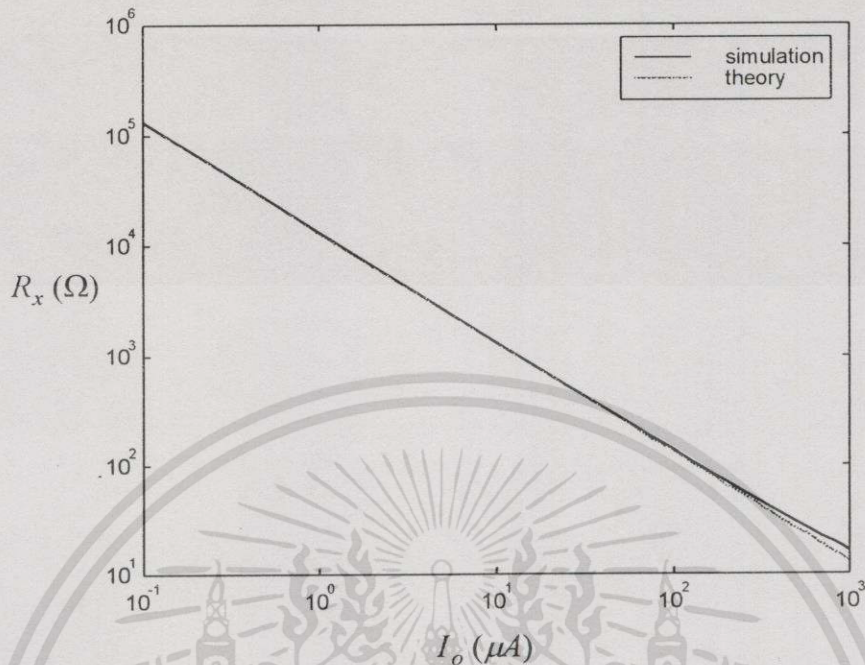
รูปที่ 5.6 ผลของการวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์การตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อกระแสไบอัสของวงจรมีค่าต่างๆกันโดยจากการตรวจสอบจะพบว่าเมื่อค่ากระแสไบอัสของวงจรมีค่ามากกว่า $500\mu A$ ขึ้นไปการเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางความถี่ของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อค่ากระแสไบอัสของวงจร CCCII มีค่าค่อนข้างสูงแล้วนั้น ค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจรมีค่าค่อนข้างน้อยซึ่งมีหน่วยอยู่ในระดับเป็นโอห์ม (ตามสมการที่ (2.34)) ซึ่งเมื่อค่ากระแสไบอัสมีค่ามากขึ้นนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานมีค่อนข้างน้อยจึงทำให้ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII เมื่อกระแสไบอัสของวงจรมีค่ามากกว่า $500\mu A$ ขึ้นไปจึงไม่แตกต่างกันมากนัก สำหรับผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII จากการจำลองการทำงานของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัสจะมีแสดงในหัวข้อย่อยต่อไป

5.3.2 ผลของการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII

การวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจร CCCII นั้น สามารถทำได้โดยจัดให้ขั้ว y ต่อกับกราวนด์ และทำการวัดค่าระดับแรงดันที่เกิดขึ้น ณ ขั้ว x ที่ค่ากระแสไบอัสของวงจรต่างๆกันตั้งแต่ $0.1\mu A - 1mA$ เมื่อสัญญาณกระแสถูกป้อนเข้าทางด้านขั้ว x โดยให้มีขนาดที่เป็นไปตามเงื่อนไขและทำให้สมการที่ (2.34) เป็นจริง ซึ่งผลของการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจรที่ได้จากการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ทางทฤษฎี มีแสดงดังรูปที่ 5.7

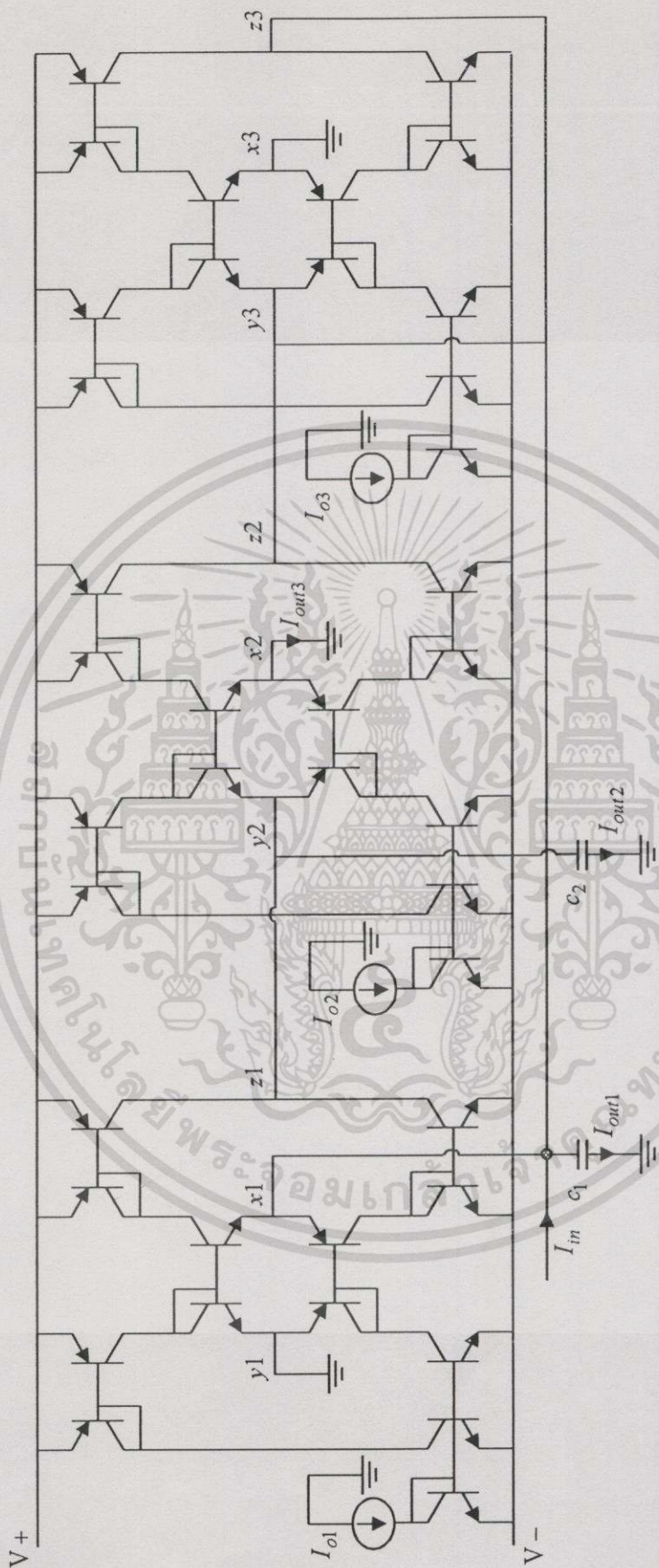


รูปที่ 5.7 ผลของการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจร CCCII

ผลจากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายใน โดยเปรียบเทียบกับระหว่างค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมสไปซ์กับค่าที่ได้ทางทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 5.7 นั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงระดับของกระแสไบอัส $0.1\mu A - 250\mu A$ ผลของค่าความต้านทานที่ได้จากทั้งสองแบบค่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกันแต่จะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้น (ค่าความต้านทานที่ได้จากการจำลองการทำงานแตกต่างจากค่าที่ได้จากทางทฤษฎีมากขึ้น) เมื่อกระแสไบอัสมีค่ามาก

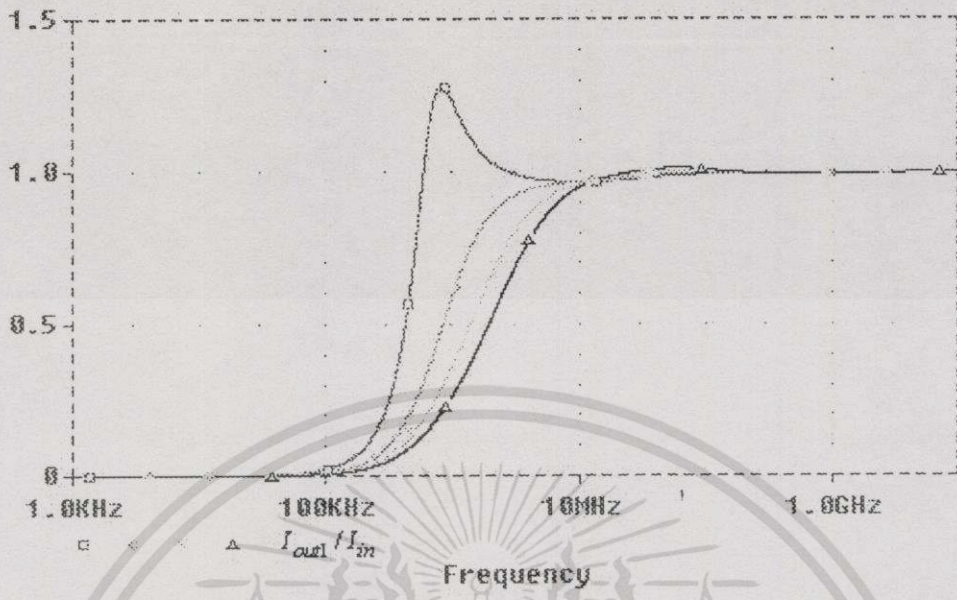
5.3.3 ผลของการจำลองการทำงานของวงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมสไปซ์ มีแสดงดังรูปที่ 5.8 ซึ่งในการตรวจสอบการจำลองการทำงานของวงจรรองความถี่ที่นำเสนอดังกล่าว กำหนดให้ $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$ กระแสไบอัส $I_{o3} = 50\mu A$ และ กระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o = 100, 200, 300$ และ $400\mu A$ และโดยการวัดสัญญาณการตอบสนองทางความถี่ของ I_{out1}, I_{out2} และ I_{out3} ผลการตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 5.9, 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ

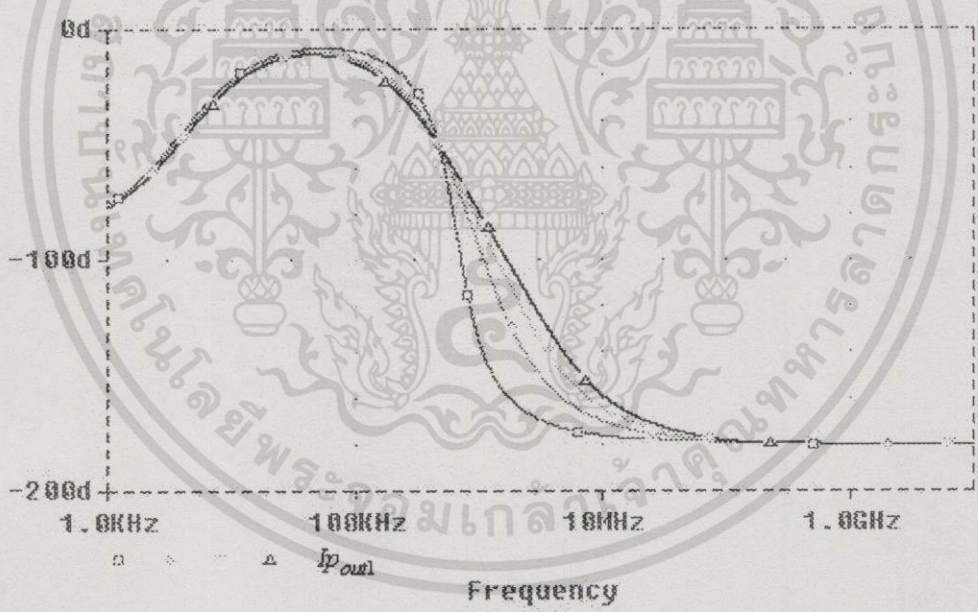


รูปที่ 5.8 วงจรที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรมุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลตอบสนองทางขนาด



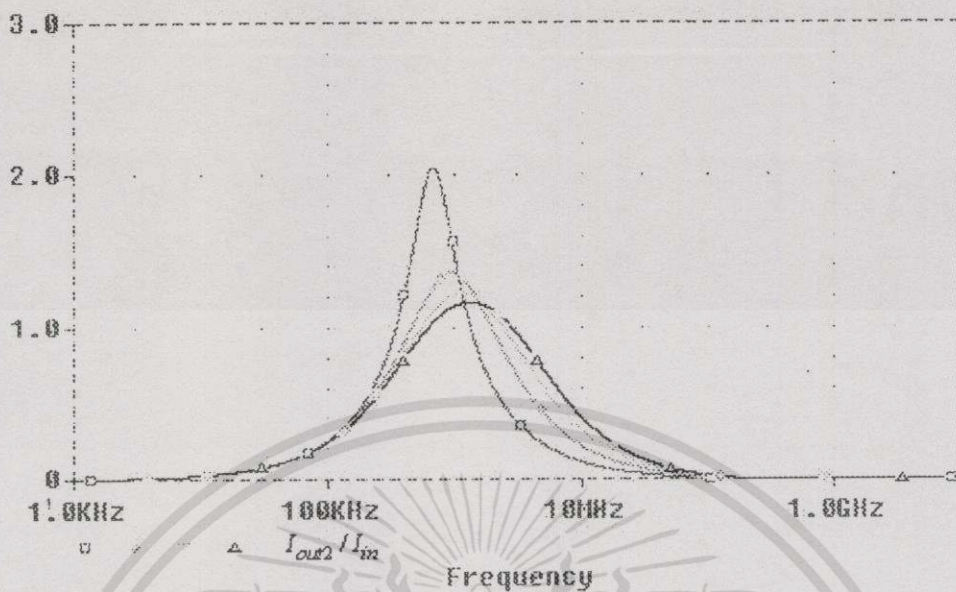
ข) ผลตอบสนองทางเฟส

เมื่อ $\square : I_o = 100\mu A$ $\diamond : I_o = 200\mu A$ $\nabla : I_o = 300\mu A$ และ $\triangle : I_o = 400\mu A$

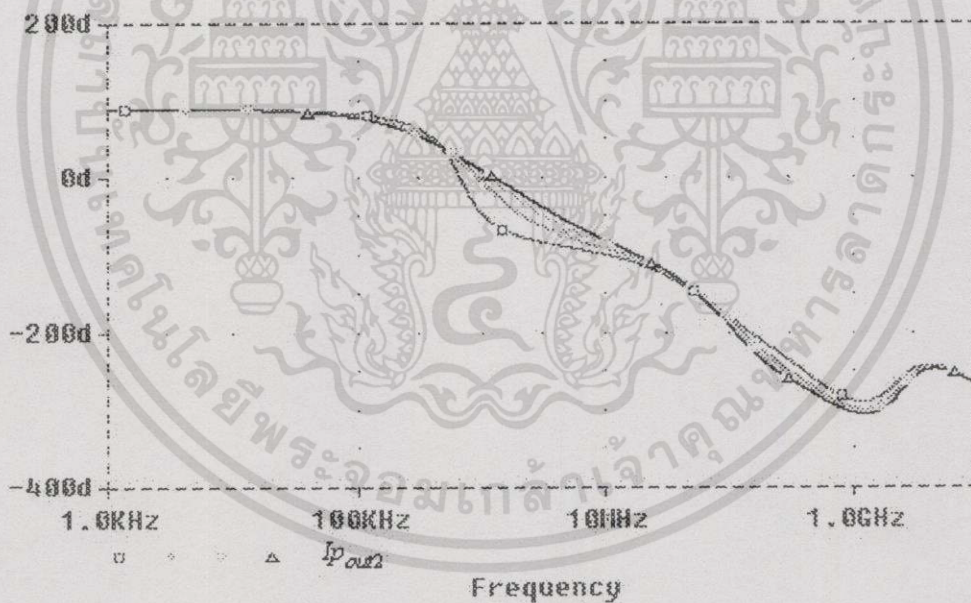
รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1}

เมื่อ $I_{o1} = I_{o2} = I_o$, $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลตอบสนองทางขนาด



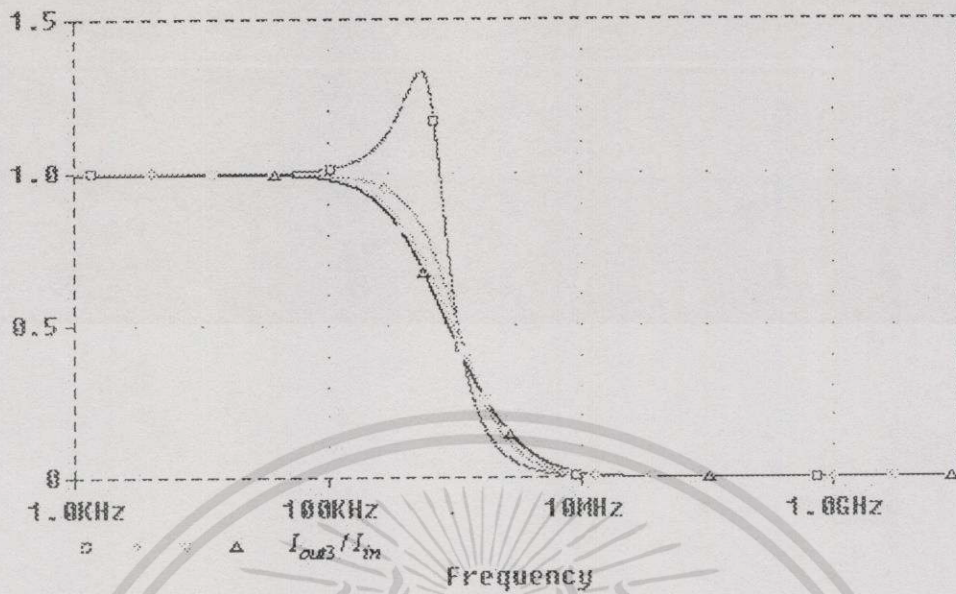
ข) ผลตอบสนองทางเฟส

เมื่อ □ : $I_o = 100\mu A$ ◇ : $I_o = 200\mu A$ ▽ : $I_o = 300\mu A$ และ △ : $I_o = 400\mu A$

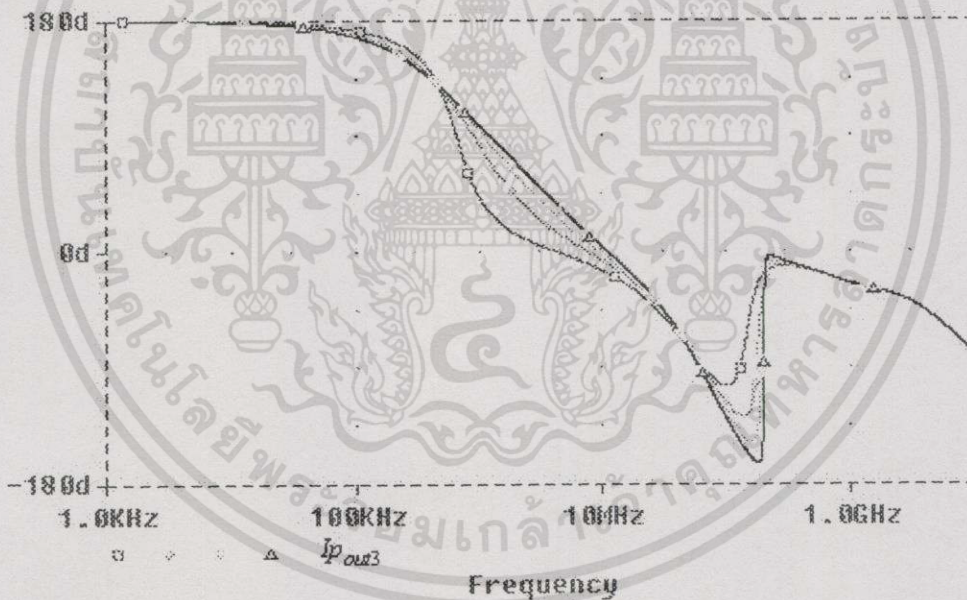
รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out2}

เมื่อ $I_{o1} = I_{o2} = I_o$, $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ผลตอบสนองทางขนาด



ข) ผลตอบสนองทางเฟส

เมื่อ $\square : I_o = 100\mu A$ $\diamond : I_o = 200\mu A$ $\nabla : I_o = 300\mu A$ และ $\triangle : I_o = 400\mu A$

รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out3}

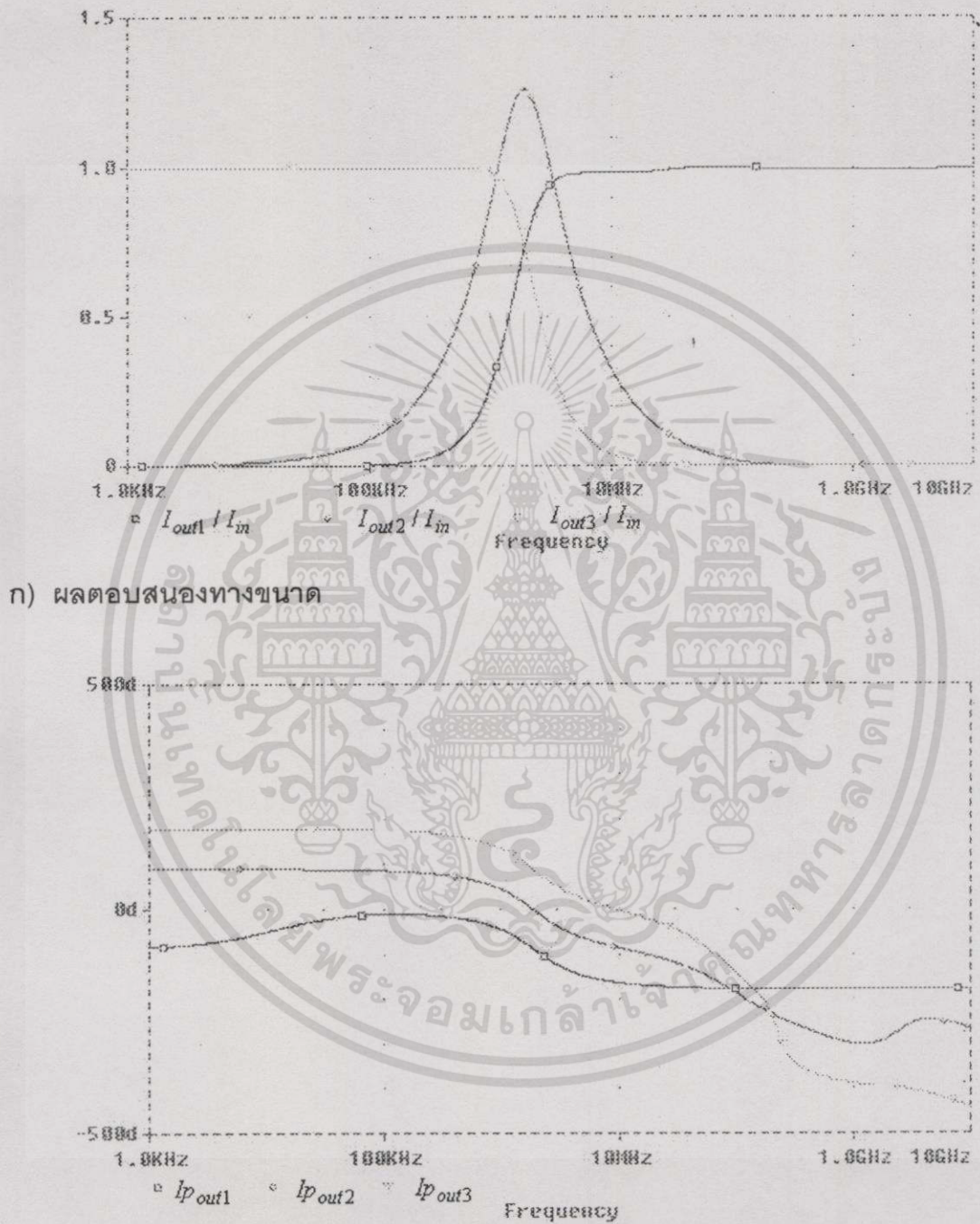
เมื่อ $I_{o1} = I_{o2} = I_o$, $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1} , I_{out2} และ I_{out3} ดังแสดงในรูปที่ 5.9, 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ แสดงให้เห็นสอดคล้องกับการวิเคราะห์วงจรของความถี่ดังกล่าวซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (5.28), (5.29) และ (5.30) ตามลำดับ นั่นคือ สัญญาณ I_{out1} มีการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณเป็นแบบความถี่สูงผ่าน สัญญาณ I_{out2} มีการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณเป็นแบบแถบความถี่ผ่าน และสัญญาณ I_{out3} มีการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณเป็นแบบความถี่ต่ำผ่าน นอกจากนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติการปรับเปลี่ยนความถี่ของวงจรของความถี่ได้ด้วยกระแสไบอัส I_{o1} และ(หรือ) I_{o2} ตามสมการที่ (5.37) โดยการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ ของวงจรของความถี่ให้มีค่าต่างๆกันนั้นคือ 100, 200, 300 และ $400\mu A$ แสดงให้เห็นว่า ความถี่คัทออฟและความถี่ศูนย์กลางของวงจรความถี่มีการเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไบอัส I_o และเมื่อกำหนดให้ $I_o = 300\mu A$ และ $I_{o3} = 50\mu A$ การตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1} , I_{out2} และ I_{out3} ในเวลาเดียวกันของวงจรมีดังรูปที่ 5.12

สำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติการปรับเปลี่ยนค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (5.38) นั้น โดยกำหนดให้ $I_{o1} = I_{o2} = I_o = 300\mu A$ และทำการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไบอัส I_{o3} ให้มีค่าต่างๆกัน คือ 50, 100, 200 และ $250\mu A$ ผลการตรวจสอบการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out2} แสดงดังรูปที่ 5.13 นอกจากนี้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ศูนย์กลางและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรของแบบแถบความถี่ผ่านต่อค่ากระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ ต่างๆกัน เมื่อ $I_{o3} = 50\mu A$ ที่ได้จากการจำลองการทำงานกับค่าคำนวณตามทฤษฎี (สมการที่ (5.37) และสมการที่ (5.38)) แสดงในรูปที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ

การทดลองแสดงผลการตอบสนองของวงจรในรูปแบบของวงจรรองสัญญาณ 3 ชนิด
พร้อมๆกันมีดังแสดงในรูปที่ 5.12



ก) ผลตอบสนองทางขนาด

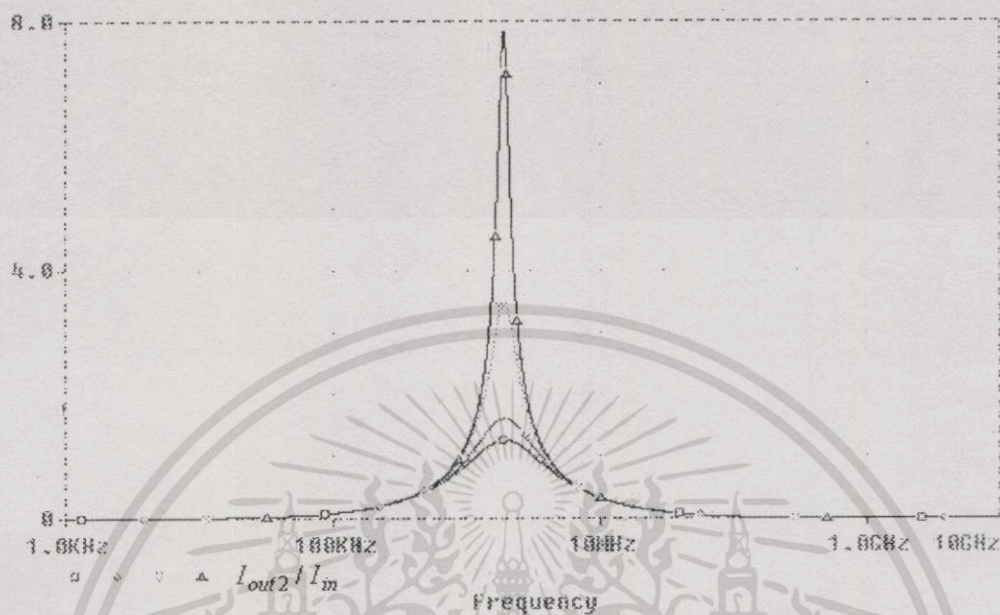
ข) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1} , I_{out2} และ I_{out3}

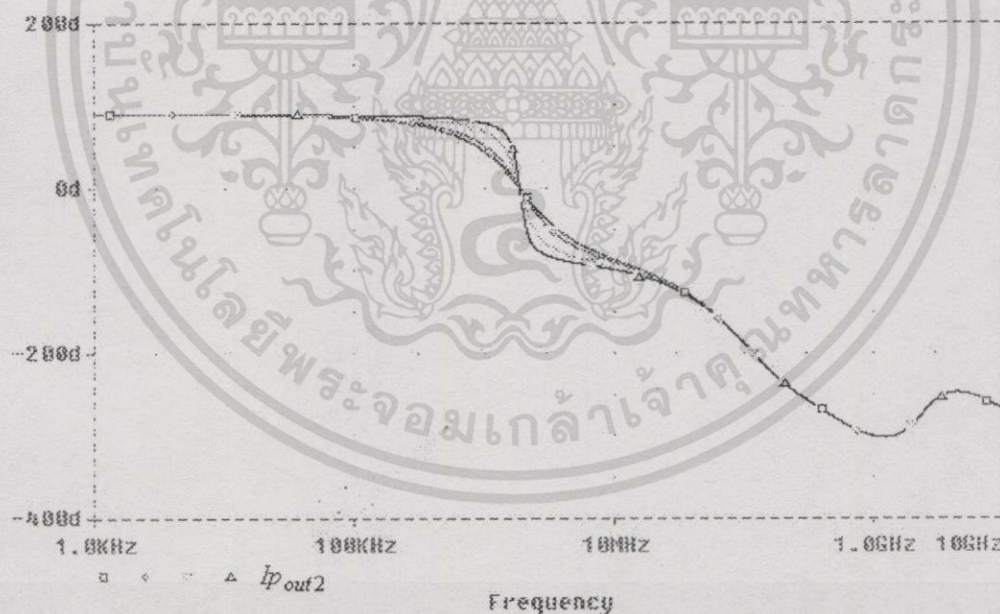
เมื่อ $I_o = 300\mu A$, $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.001\mu F$ และ $C_2 = 0.003\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เห็นคุณสมบัติเกี่ยวกับการกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านเพื่อให้เห็นคุณสมบัติเชิงความถี่ชัดเจนขึ้นมีดังแสดงในรูปที่ 5.13



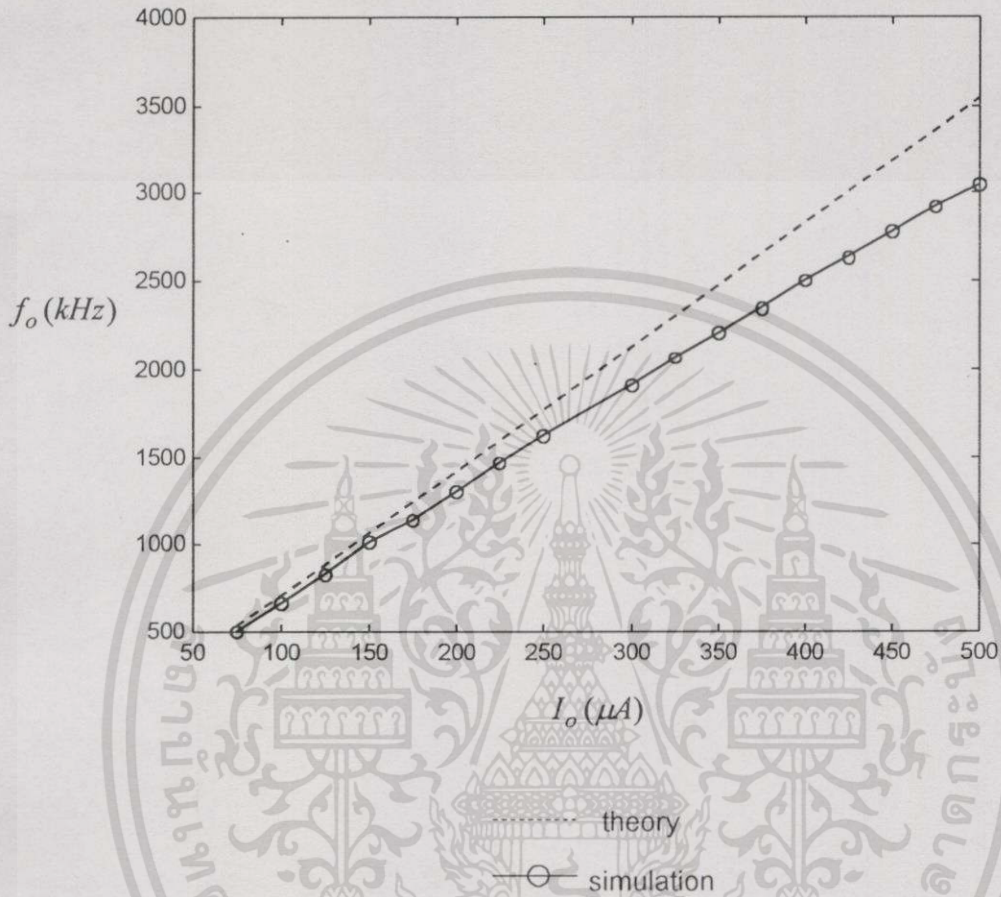
ก) ผลตอบสนองทางขนาด



ข) ผลตอบสนองทางเฟส

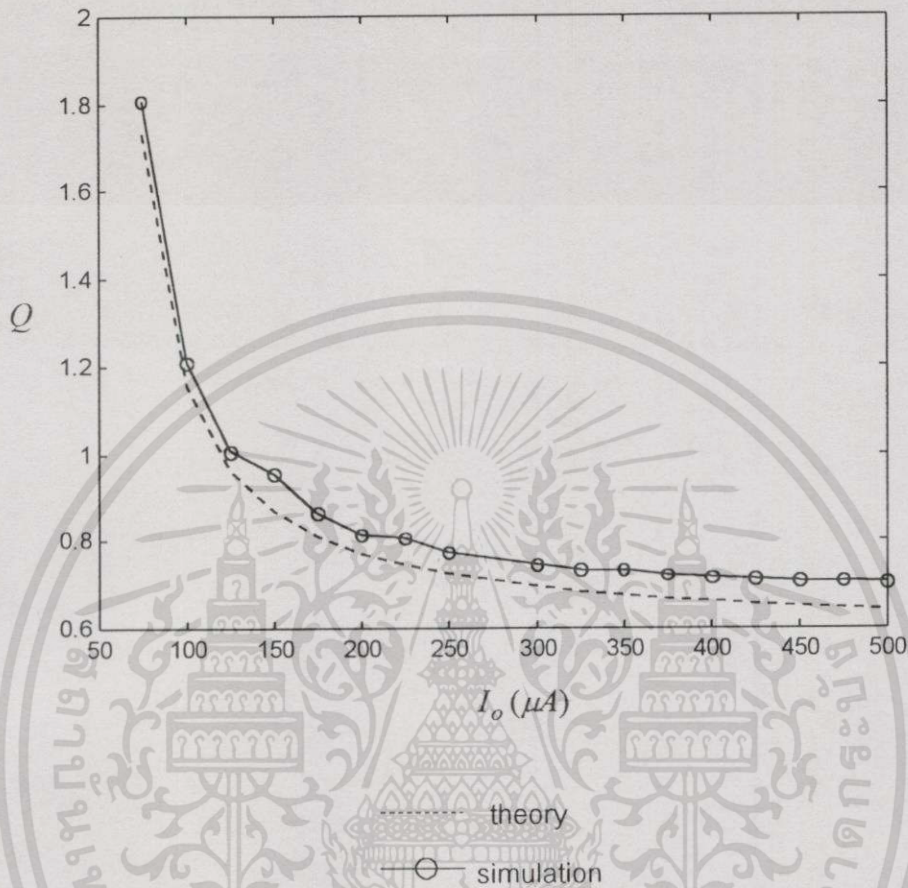
รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out2} เมื่อ $C_1 = 0.001 \mu F$, $C_2 = 0.003 \mu F$, $I_{o1} = I_{o2} = I_o = 300 \mu A$, $I_{o3} = 50, 100, 200, 250 \mu A$

กราฟในรูปที่ 5.14 นี้ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กึ่งกลางของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไบอัสต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้คือ



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่านที่ได้จากการจำลองการทำงานต่อค่ากระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ เมื่อ $I_{o3} = 50 \mu A$, $C_1 = 0.001 \mu F$ และ $C_2 = 0.003 \mu F$ เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

ส่วนการทดลองที่แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรตามกระแสไบอัสนั้น จะมีดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรแบบแถบความถี่ผ่านที่ได้จากการจำลองการทำงานต่อค่ากระแสไบอัส $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ เมื่อ $I_{o3} = 50 \mu A$, $C_1 = 0.001 \mu F$ และ $C_2 = 0.003 \mu F$ เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

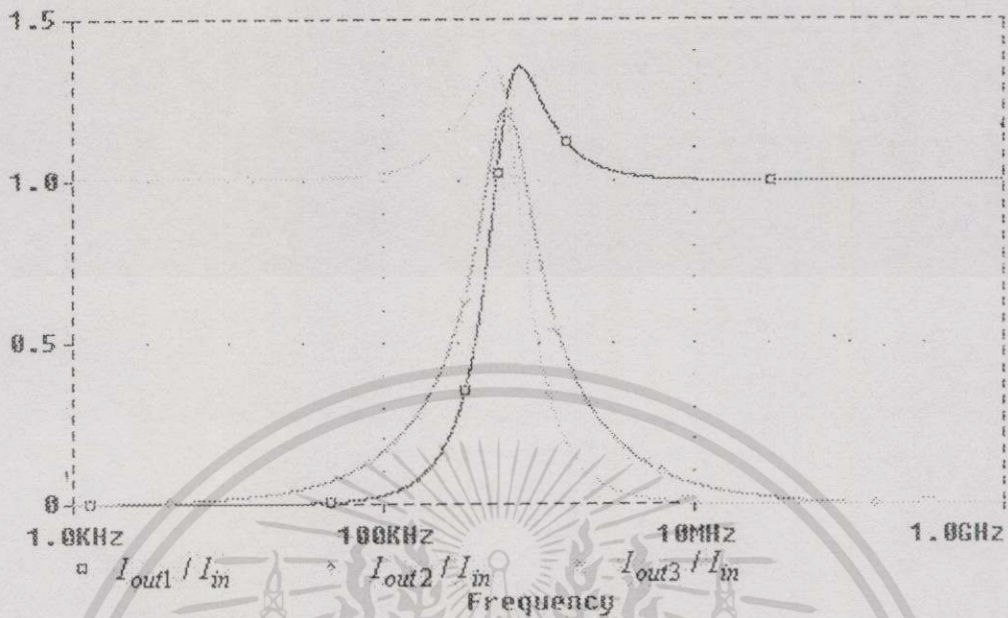
ผลการจำลองการทำงานที่แสดงในรูปที่ 5.9 - 5.15 นั้นเป็นผลที่ได้จากการกำหนดให้กระแสไบอัสของวงจรมีค่าต่างๆกันโดยกำหนดให้ $C_1 = 0.001 \mu F$ และ $C_3 = 0.003 \mu F$ ซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนค่า C_1 และ C_2 ไปเป็น $C_1 = 0.005 \mu F$ และ $C_2 = 0.005 \mu F$ โดยกระแส $I_{o1} = I_{o2} = I_o = 300 \mu A$ และ $I_{o3} = 50 \mu A$ ผลการตรวจสอบการตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1} , I_{out2} และ I_{out3} แสดงดังรูปที่ 5.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ศูนย์กลางหรือความถี่คัทออฟของวงจรความถี่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองการทำงานในรูปที่ 5.12 และในทำนองเดียวกันเมื่อทำการปรับเปลี่ยนกระแสไบอัส I_{o3} ให้มีค่าเท่ากับ

5.๔ จะเห็นได้ว่าค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองการทำงานในรูปที่ 5.16 ซึ่งผลการจำลองการทำงานนั้นมีดังแสดงในรูปที่ 5.17

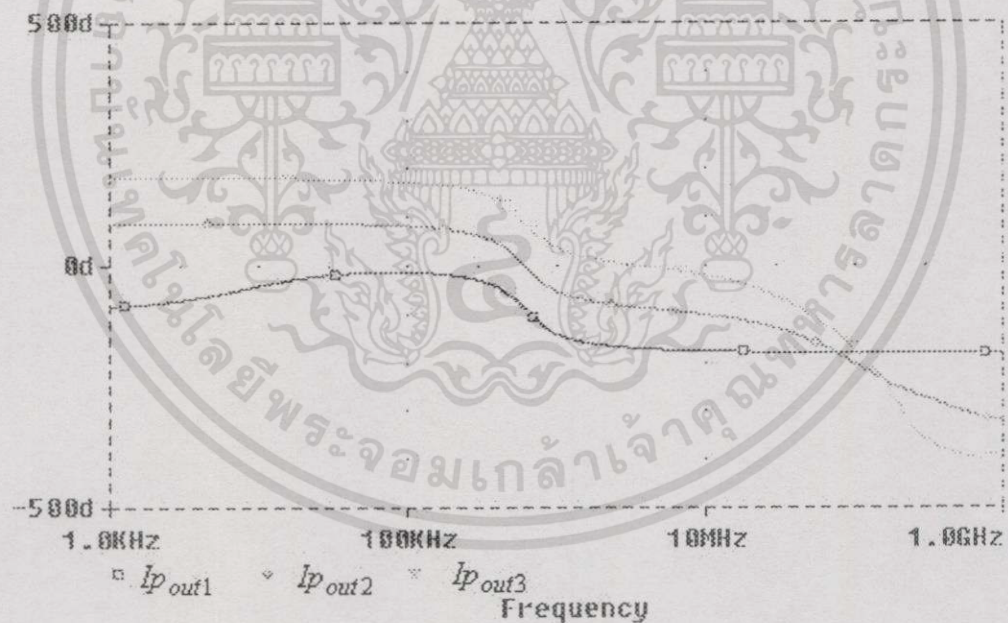
จากผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการจำลองการทำงานนั้นสอดคล้องกับการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีด้วยดี ส่วนในบทที่ 6 ที่มีกล่าวถึงต่อไปนั้นจะเป็นการเสนอวงจรประยุกต์ใช้งานจากวงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่น่าเสนอเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์วงจรจะมีกล่าวในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



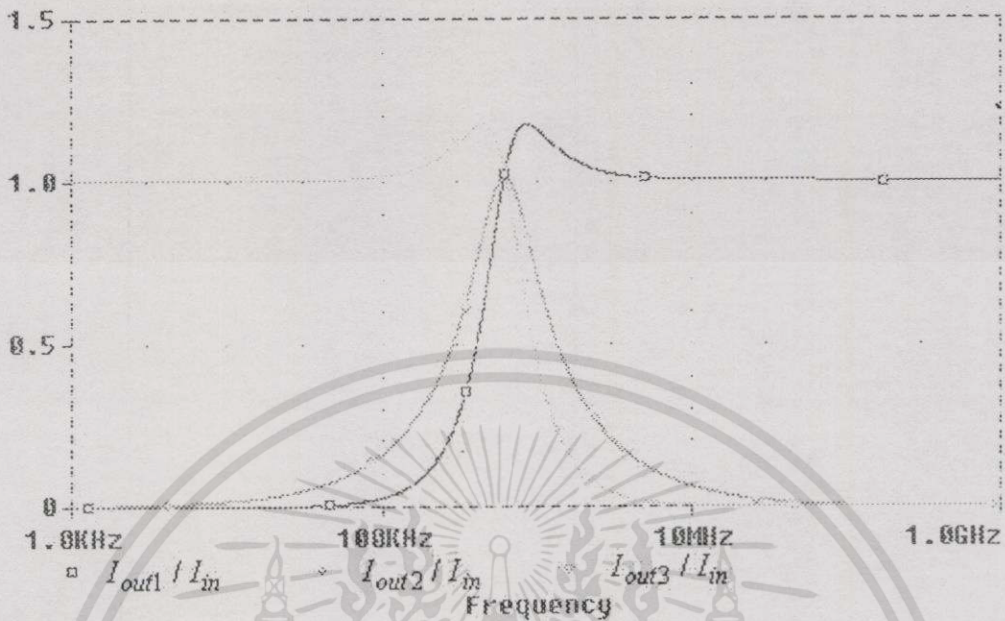
ก) ผลตอบสนองทางขนาด



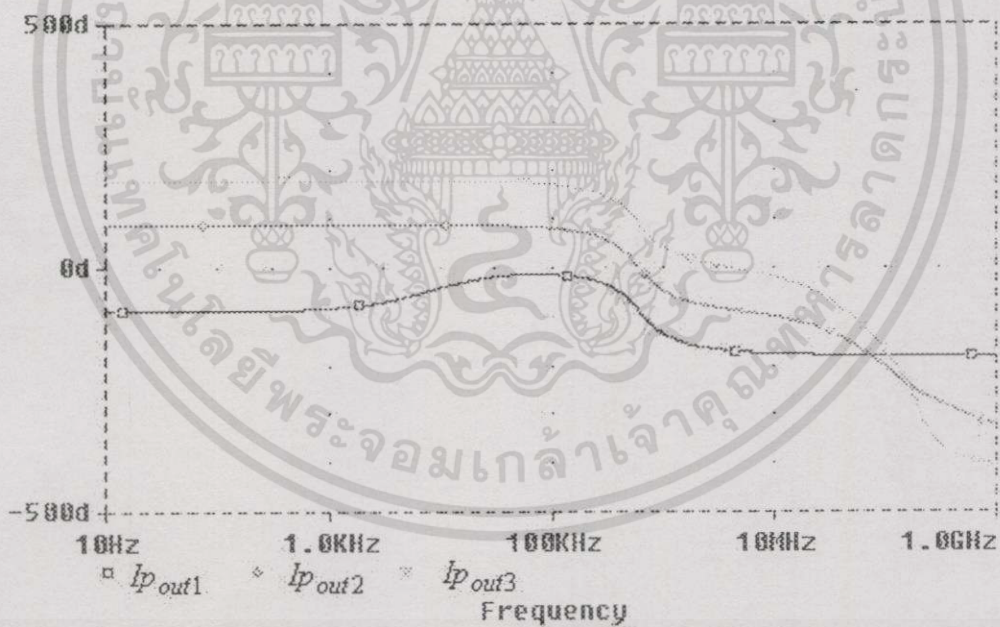
ข) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1} , I_{out2} และ I_{out3}

เมื่อ $I_o = 300\mu A$, $I_{o3} = 50\mu A$, $C_1 = 0.005\mu F$ และ $C_2 = 0.005\mu F$



ก) ผลตอบสนองทางขนาด



ข) ผลตอบสนองทางเฟส

รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ I_{out1} , I_{out2} และ I_{out3}

เมื่อ $I_o = 300\mu A$, $I_{o3} = 5\mu A$, $C_1 = 0.005\mu F$ และ $C_2 = 0.005\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ และผลการจำลองการทำงานของวงจร

6.1 กล่าวนำ

สำหรับวงจรรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้อาศัยหลักการโดยทั่วไปในการออกแบบวงจรรออสซิลเลเตอร์ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 โดยมีหลักการพื้นฐานที่สำคัญของวงจรรออยู่บนการใช้วงจร CCCII วงจรรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ นั้นได้ประยุกต์มาจากวงจรกรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 ซึ่งวิธีการในการประยุกต์วงจรและผลของการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมสไปซ์จะมีกล่าวในบทนี้ต่อไป

6.2 การวิเคราะห์ห้วงจรรออสซิลเลเตอร์

ในการสร้างวงจรรออสซิลเลเตอร์ที่จะนำเสนอต่อไปนั้นได้ประยุกต์วงจรมาจากวงจรกรองความถี่ในส่วนของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านดังที่ได้กล่าวในบทที่ 5 ซึ่งมีสมการฟังก์ชันการถ่ายโอนดังนี้

$$H_{BP}(s) = \frac{I_{out2}}{I_{in}} = \frac{sC_2R_{x2}R_{x3}}{s^2C_1C_2R_{x1}R_{x2}R_{x3} + sC_2R_{x2}(R_{x3} - R_{x1}) + R_{x3}} \quad (6.1)$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าฟังก์ชันการถ่ายโอนตามสมการที่ (6.1) เมื่อจัดอยู่ในรูปของสมการแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่านมาตรฐาน คือ

$$H_{BP}(s) = \frac{H_o s \left(\frac{\omega_o}{Q} \right)}{s^2 + s \left(\frac{\omega_o}{Q} \right) + \omega_o^2} \quad (6.2)$$

จะได้เป็น

$$H_{BP}(s) = \left(\frac{R_{x3}}{R_{x3} - R_{x1}} \right) \frac{s \frac{(R_{x3} - R_{x1})}{C_1R_{x1}R_{x3}}}{s^2 + s \frac{(R_{x3} - R_{x1})}{C_1R_{x1}R_{x3}} + \frac{1}{C_1C_2R_{x1}R_{x2}}} \quad (6.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ จะได้ว่า

$$H_o = -\frac{R_{x3}}{R_{x3} - R_{x1}} \quad (6.4)$$

$$\omega_o = (C_1 C_2 R_{x1} R_{x2})^{-1/2} \quad (6.5)$$

และ
$$Q = \frac{R_{x3}}{R_{x3} - R_{x1}} \left(\frac{C_1 R_{x1}}{C_2 R_{x2}} \right)^{1/2} \quad (6.6)$$

H_o ซึ่งเป็นค่าอัตราขยายของวงจรรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน ณ ค่าความถี่ศูนย์กลางนั้น จะเห็นได้ว่ามีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานภายในหรืออีกอย่างหนึ่งก็คือ ขึ้นอยู่กับค่ากระแสไบอัสของวงจร CCCII ตัวที่หนึ่งและตัวที่สาม วงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอขึ้นก็จะใช้วงจรรองแบบแถบความถี่ผ่านดังกล่าวทำหน้าที่เป็นวงจรกำหนดความถี่ในโหมดกระแสและจะทำหน้าที่ในส่วนของวงจรป้อนกลับซึ่งจะประกอบรวมกลับวงจรขยายกระแสซึ่งทำการขยายกระแส $I_{out2} = I_{C2}$ ดังรูปที่ 6.1 แต่เนื่องจากวงจรรองความถี่ที่นำเสนอดังกล่าวเป็นวงจรที่มีการต่อแบบครบรูปภายในวงจรอยู่แล้วจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มเติมในส่วนของวงจรขยายในการที่จะประยุกต์วงจรเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ส่วนการปรับค่าเกณฑ์ขยายของวงจรขยายนั้น สามารถทำได้โดยการปรับพื้นที่ของอิมิตเตอร์ในไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้เพื่อเป็นการกำหนดให้สัญญาณกระแสป้อนกลับมีค่าเฟสตรงกับสัญญาณทางด้านขาเข้าเพื่อเป็นการเสริมสัญญาณที่เกิดขึ้นให้ดำรงตัวอยู่ได้นั้น เมื่อพิจารณาสมการส่วนของสมการที่ (6.3) ณ ค่าความถี่ศูนย์กลาง จะได้ว่า

$$s \frac{(R_{x3} - R_{x1})}{C_1 R_{x1} R_{x3}} = j\omega_o \frac{(R_{x3} - R_{x1})}{C_1 R_{x1} R_{x3}} = 0 \quad (6.7)$$

นั่นคือ $R_{x3} = R_{x1}$ หรือ $I_{o3} = I_{o1}$ (6.8)

ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาสมการที่ (6.6) จะพบว่าค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรมันถูกควบคุมด้วยกระแสไบอัส I_{o1} และ I_{o3} ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

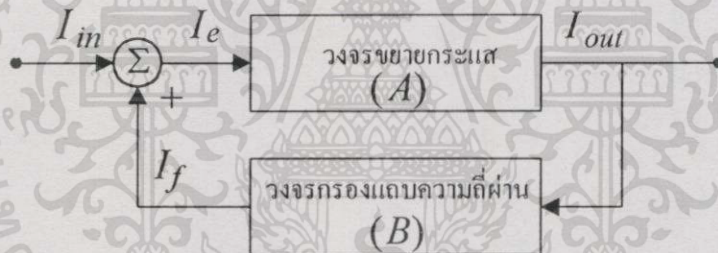
$$Q = \frac{I_{o1}}{I_{o1} - I_{o3}} \left(\frac{I_{o2} C_1}{I_{o1} C_2} \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อทำการปรับค่ากระแส I_{o1} ให้มีค่าเท่ากับกระแสไบอัส I_{o3} แล้วนั้นจะเป็นผลทำให้ค่าควอลิตีแฟกเตอร์ของวงจรรองความถี่ดังกล่าวมีค่าเป็นอนันต์ซึ่งก็เป็นเงื่อนไขที่สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานวงจรรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ได้และเมื่อพิจารณาสมการที่ (6.5) โดยการกำหนดให้ $I_{o1} = I_{o3} = I_o$ ดังนั้นค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\omega_o = \frac{2}{V_T} \left(\frac{I_o I_{o2}}{C_1 C_2} \right)^{1/2} \quad (6.10)$$

ซึ่งในที่นี้จะเห็นได้ว่าการปรับค่ากระแส I_{o1} ให้มีค่าเท่ากับกระแสไบอัส I_{o3} ตามเงื่อนไขของออสซิลเลเตอร์นั้น ไม่มีผลกระทบใดๆต่อค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรซึ่งค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรยังสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัส I_{o2} จึงนับได้ว่าเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของวงจรที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 6.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ

เมื่อ A คือ ค่าอัตราขยายกระแสของวงจรขยายกระแส (current amplifier)

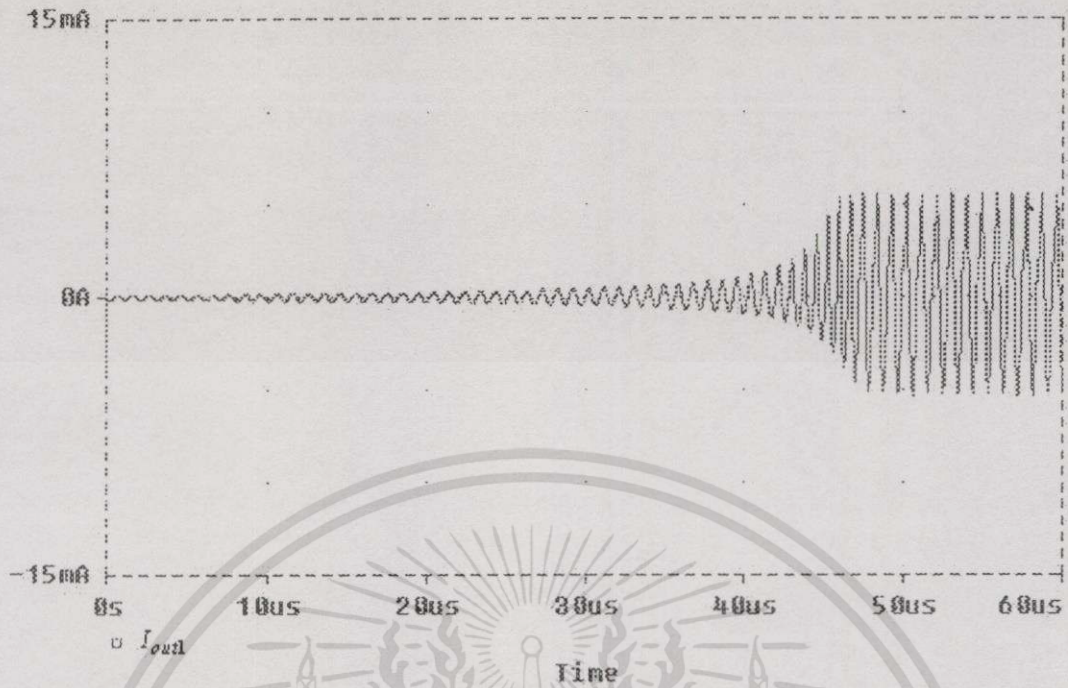
B คือ ค่าอัตราขยายของวงจรกรองความถี่แบบแถบความถี่ผ่าน

จากหลักการประยุกต์วงจรรองความถี่เป็นวงจรออสซิลเลเตอร์ดังกล่าวข้างต้นนั้นก็จะได้มีการตรวจสอบการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอด้วยโปรแกรมสไปซ์ซึ่งผลการจำลองการทำงานจะมีนำเสนอในหัวข้อต่อไป

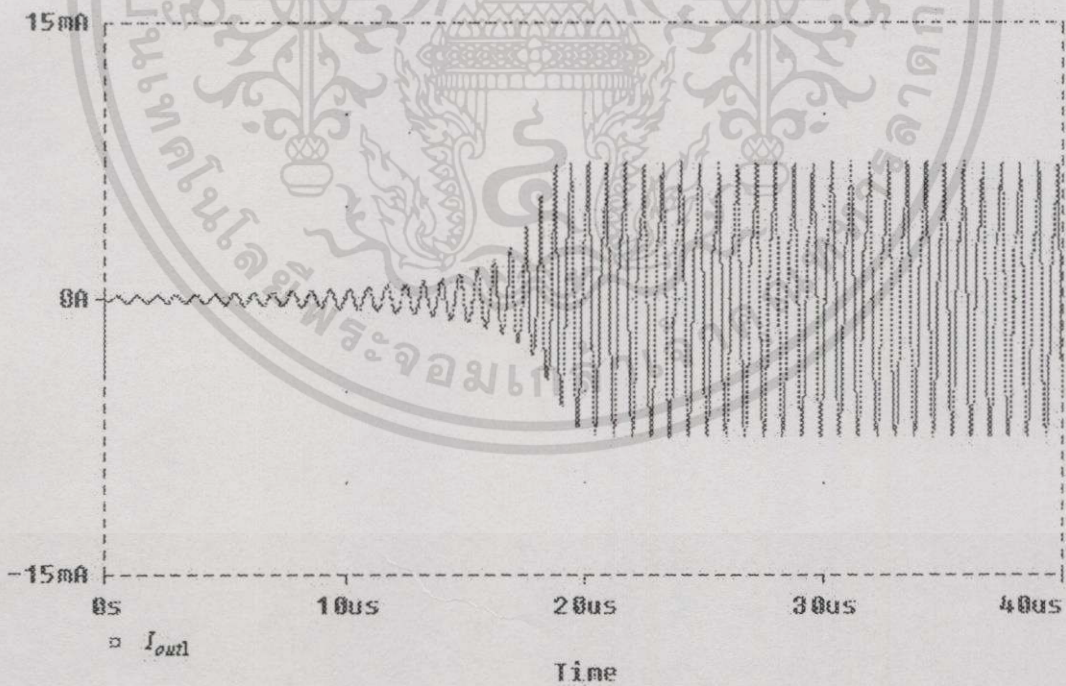
6.3 ผลของการจำลองการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์

ในการตรวจสอบผลจากทางทฤษฎีของวงจรรอสซิลเลเตอร์นั้นได้ใช้โปรแกรมสไปซ์มาช่วยตรวจสอบซึ่งใช้พารามิเตอร์ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และค่าไฟเลี้ยงของวงจรเช่นเดียวกันกับในการจำลองการทำงานของวงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ในหัวข้อ 5.3 จากผลของการจำลองการทำงานของวงจรรองความถี่ดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 5.12 เป็นการยืนยันให้เห็นแล้วว่าค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรสามารถควบคุมได้ด้วยกระแสไบอัส I_{o3} เมื่อกระแสไบอัส I_{o1} และ I_{o2} ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่และโดยการกำหนดให้ $I_{o1} = I_{o3}$ จะทำให้ค่าควอลิตี้แฟกเตอร์มีค่าเป็นอนันต์ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญประการหนึ่งของวงจรรอสซิลเลเตอร์

เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีของวงจรรอสซิลเลเตอร์ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น วงจรได้ถูกตรวจสอบโดยการกำหนดให้ $C_1 = C_2 = 0.003 \mu F$, $I_{o1} = 300 \mu A$ และ $I_{o3} = 301 \mu A$ ในที่นี้ถึงแม้ว่าในทางทฤษฎีวงจรสามารถประพฤติตัวเป็นวงจรรอสซิลเลเตอร์ได้เมื่อกระแส I_{o1} มีค่าเท่ากับกระแสไบอัส I_{o3} แต่ในทางปฏิบัตินั้นค่ากระแสไบอัส I_{o3} จะต้องมีค่าสูงกว่ากระแสไบอัส I_{o1} เล็กน้อย ทั้งนี้เพื่อเป็นการทำให้วงจรรอสซิลเลเตอร์สามารถดำรงสัญญาณให้คงตัวอยู่ได้ ซึ่งผลของการจำลองการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อกระแสไบอัส I_{o2} มีค่าเท่ากับ $300 \mu A$ และ $500 \mu A$ มีดังแสดงในรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ รูปที่ 6.4 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์เมื่อ $C_1 = C_2 = 0.005 \mu F$, $I_{o1} = 300 \mu A$, $I_{o2} = 300 \mu A$ และ $I_{o3} = 301 \mu A$ ซึ่งแสดงให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่เมื่อค่าตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองการทำงานในรูปที่ 6.2 และ รูปที่ 6.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความถี่จากการจำลองการทำงานและจากทางทฤษฎีของวงจรรอสซิลเลเตอร์กับค่ากระแสไบอัส I_{o2} ค่าต่างๆ จากผลการจำลองการทำงานนี้อธิบายได้ว่า การปรับค่าความถี่โดยการปรับค่ากระแสไบอัส I_{o2} นั้นมีแนวโน้มเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎี แม้จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นดูเหมือนมีค่ามากพอประมาณ แต่ก็พอจะคาดเดาได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้คงจะเกิดมาจากค่าพารามิเตอร์แผ่นต่างๆภายในตัวทรานซิสเตอร์ที่นำมาประกอบขึ้นเป็นวงจร CCCII ยกตัวอย่างเช่น ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวอาจจะเกิดมาจากค่าตัวเก็บประจุแฝงที่มีอยู่ภายในตัวทรานซิสเตอร์ต่างๆก็เป็นได้

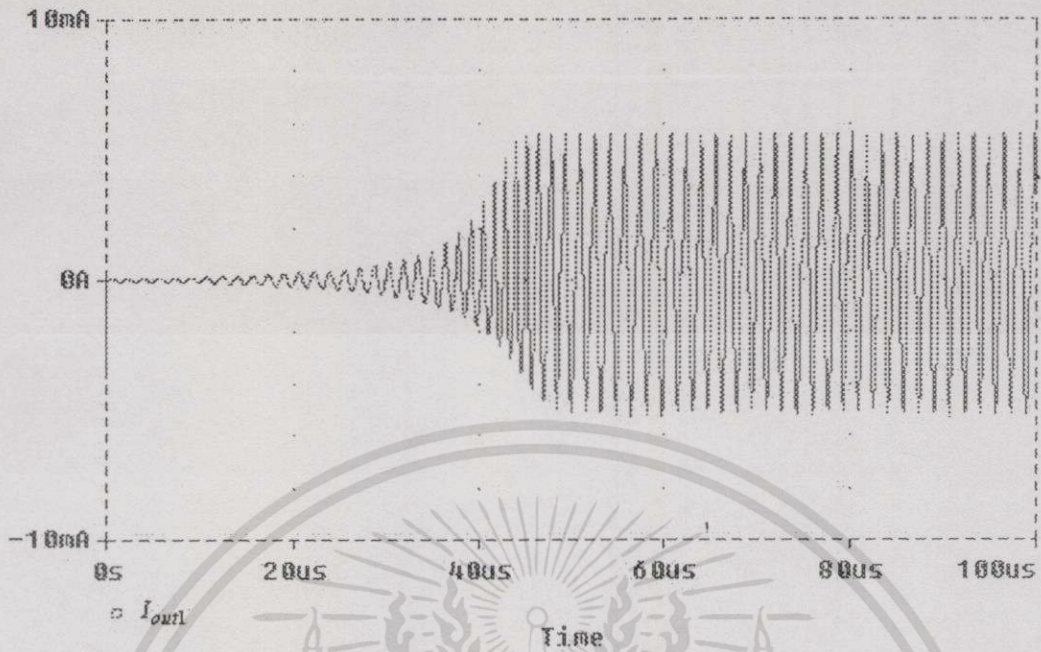


รูปที่ 6.2 แสดงสัญญาณขาออก I_{out1} เมื่อกระแสไบอัส $I_{o1} = 300\mu A$, $I_{o2} = 300\mu A$, $I_{o3} = 301\mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.003\mu F$

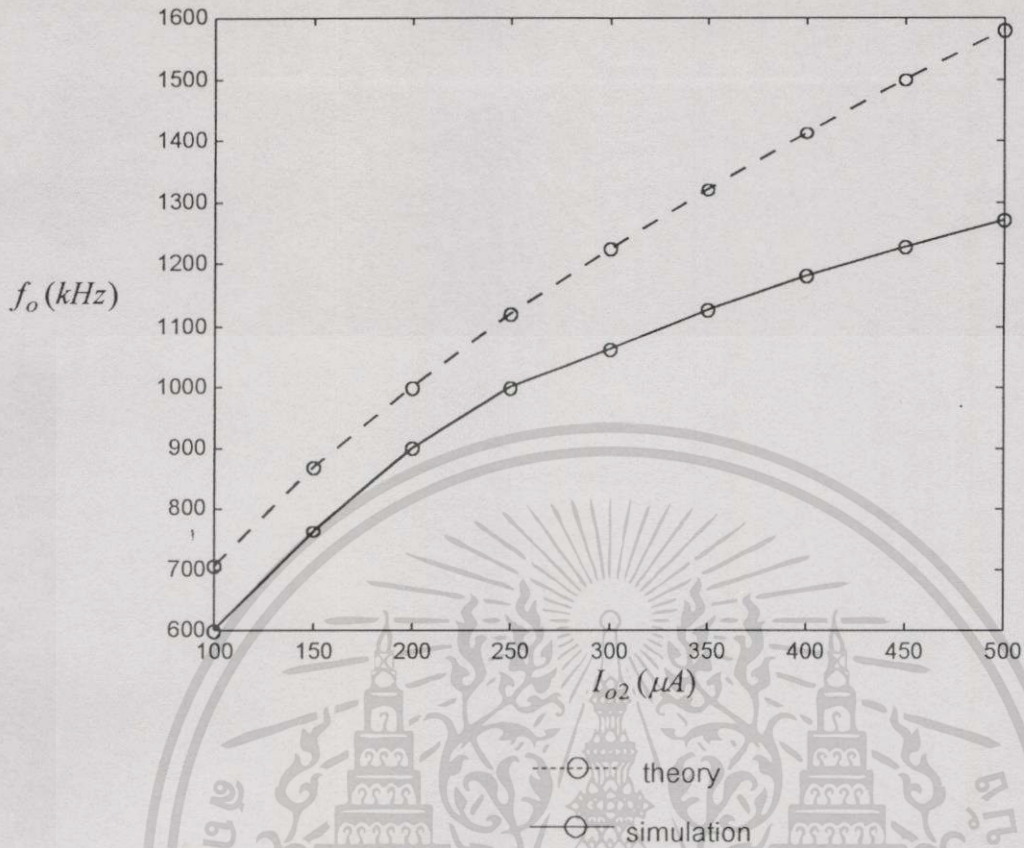


รูปที่ 6.3 แสดงสัญญาณขาออก I_{out1} เมื่อกระแสไบอัส $I_{o1} = 300\mu A$, $I_{o2} = 500\mu A$, $I_{o3} = 301\mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.003\mu F$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 แสดงสัญญาณขาออก I_{out1} เมื่อกระแสไบอัส $I_{o1} = 300 \mu A$, $I_{o2} = 300 \mu A$, $I_{o3} = 301 \mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.005 \mu F$



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความถี่จากการจำลองการทำงานและจากทางทฤษฎีของวงจรรอสซิลเลเตอร์กับค่ากระแสไบอัส I_{o2} ค่าต่างๆ เมื่อ $I_{o1} = 300 \mu A$, $I_{o3} = 301 \mu A$ และ $C_1 = C_2 = 0.003 \mu F$

บทที่ 7

บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจรสายพานกระแสสูงที่ควบคุมด้วยกระแสหรือวงจร CCCII เป็นวงจรรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยในบทที่ 1 นั้นได้กล่าวถึงวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ซึ่งมุ่งเหตุจูงใจก็เนื่องมาจากข้อดีของค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจร CCCII ที่สามารถปรับค่าได้ด้วยกระแสไบอัสของวงจรและอีกประการหนึ่งก็คือข้อดีของการทำงานในโหมดกระแสของวงจร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานวงจร CCCII เป็นวงจรรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่มีการทำงานอยู่ในโหมดกระแสโดยมีคุณสมบัติเด่น คือ สามารถควบคุมพารามิเตอร์ของวงจร เช่น ค่าความถี่ศูนย์กลางและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังนำเสนอการนำเสนอเป็นวงจรรองความถี่แบบหลายหน้าที่ คือ สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน, แบบความถี่สูงผ่าน, และแบบแถบความถี่ผ่านได้ในเวลาเดียวกัน วงจรที่นำเสนอนั้นจะประกอบจากวงจร CCCII จำนวนสามชุดและตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์อีกสองตัวเท่านั้นโดยไม่จำเป็นต้องมีการใช้ความต้านทานจากภายนอกด้วยความไม่ซับซ้อนของวงจรนี้วงจรที่นำเสนอดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการสร้างเป็นวงจรรวม

สำหรับบทที่ 2 จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดของวงจรสายพานกระแสสูงที่ควบคุมด้วยกระแสซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญของวงจรที่นำเสนอนี้ซึ่งสาระสำคัญที่กล่าวถึงได้แก่ประวัติความเป็นมาของวงจร CCCII, องค์ประกอบที่สำคัญของวงจร ได้แก่ วงจรทรานสลิเนียร์และวงจรสะท้อนกระแส นอกจากนี้ก็ยังได้มีการวิเคราะห์ถึงค่าความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นของวงจร CCCII โดยจากการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีดังแสดงในสมการที่ (2.34) ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII นั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสไบอัสของวงจรซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ทำให้วงจรที่นำเสนอนั้นสามารถควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ จากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานภายในของวงจร CCCII นั้นจะเห็นได้ว่าการที่จะทำให้สมการที่ (2.34) เป็นจริงได้นั้น กระแสขาเข้าของวงจร CCCII จะต้องมีความน้อยกว่าสองเท่าของค่ากระแสไบอัสของวงจรมากกว่าซึ่งถ้ากระแสขาเข้าของวงจร CCCII นั้นมีค่าน้อยกว่าสองเท่าของค่ากระแสไบอัสของวงจรไม่มากแล้วนั้น จะเป็นผลให้ได้ค่าความต้านทานภายในของวงจรที่สามารถควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์แต่เป็นการควบคุมที่เป็นไปในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั่นเอง

ในส่วนของบทที่ 3 และ บทที่ 4 นั้นได้อธิบายถึงหลักการทั่วไปของวงจรรองความถี่และหลักการในการออกแบบสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ ต่อมาในบทที่ 5 และบทที่ 6 จะเป็นการแสดงการวิเคราะห์ห้วงจรรองความถี่และวงจรออสซิลเลเตอร์ที่มีพื้นฐานอยู่บนการใช้วงจร CCCII ตามลำดับ

จากผลการตรวจสอบวงจร CCCII จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานภายในของวงจรมีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสและสอดคล้องตามการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีตามสมการที่ (2.34) แต่จะพบว่าค่าความต้านทานภายในที่ได้จากการจำลองการทำงานและจากทางทฤษฎีจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงกระแสไบอัส $0.1\mu A - 250\mu A$ และจะมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อกระแสไบอัสมีค่ามากขึ้นซึ่งเมื่อกระแสไบอัสของวงจรมีค่ามากแล้วนั้น ค่าความต้านทานภายในของวงจรมีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัสของวงจรในระดับค่ากระแสสูงๆ ค่าความต้านทานภายในของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยมากจนเกือบจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงใดๆ ซึ่งด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร CCCII จึงไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อกระแสไบอัสของวงจรมีค่ามากกว่า $500\mu A$ ขึ้นไป สำหรับผลของการจำลองการทำงานของวงจรรองความถี่ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอนั้นก็จะเป็นไปตามการวิเคราะห์ในทางทฤษฎีด้วยซึ่งในรูปที่ 5.9, 5.10 และ 5.11 แสดงให้เห็นว่าวงจรสามารถทำหน้าที่เป็นวงจรรองความถี่แบบความถี่ต่ำผ่าน, แบบแถบความถี่ผ่านและแบบความถี่สูงผ่านได้ในวงจรเดียวกันและสามารถควบคุมความถี่คัทออฟหรือความถี่ศูนย์กลางของวงจรมีได้เป็นไปตามสมการที่ (5.37) นอกจากนี้รูปที่ 5.12 ได้แสดงผลของการปรับเปลี่ยนค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรด้วยกระแสไบอัสซึ่งก็เป็นไปตามสมการที่ (5.38) ในส่วนของวงจรออสซิลเลเตอร์ซึ่งประยุกต์การใช้งานมาจากวงจรรองความถี่ที่นำเสนอ นั้น เมื่อทำการจำลองการทำงานตามหลักการวิเคราะห์ห้วงจรออสซิลเลเตอร์แล้วนั้นผลซึ่งมีแสดงในรูปที่ 6.2 และ 6.3 สามารถแสดงให้เห็นว่าวงจรรองดังกล่าวสามารถผลิตสัญญาณรูปไซน์ได้เมื่อเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณถูกทำให้เกิดขึ้นและสามารถควบคุมความถี่ของสัญญาณได้โดยการปรับค่ากระแสไบอัส ถึงแม้สัญญาณรูปไซน์ที่วงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอได้กำเนิดขึ้นนั้นจะยังมีความผิดเพี้ยนในรูปสัญญาณอยู่บ้างก็ตามแต่ก็อาจจะมีการเพิ่มวงจรรองสัญญาณเพื่อช่วยลดความผิดเพี้ยนของสัญญาณรูปไซน์ที่กำเนิดขึ้นนั้นน้อยลงได้ ในส่วนของผลซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของวงจรรองความถี่ (หรือวงจรออสซิลเลเตอร์) กับค่ากระแสไบอัสต่างๆที่ได้จากการจำลองการทำงานนั้นยังมีค่าผิดพลาดจากทางทฤษฎี ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลเนื่องจากค่าความไม่เป็นไปตามอุดมคติของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ซึ่งจะต้องมีค่าความต้านทานแฝงและค่าตัวเก็บประจุแฝงต่างๆรวมอยู่ด้วย ทำให้ค่าความต้านทานแฝงหรืออิมพีแดนซ์แฝงที่ขั้วต่างๆของวงจร CCCII มีค่าเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ดีจะพบว่าแนวโน้มของความผิดพลาดนี้อธิบายได้ด้วยเหตุผลทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามจากผลการตรวจสอบและการจำลองการทำงานของวงจรมักกล่าวสามารถสรุปได้ว่า วงจรรองความถี่และวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมได้ในเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่นำเสนอมีข้อเด่นที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของวงจร เช่น ค่าความถี่ศูนย์กลางและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยกระแสไบอัส อีกทั้งวงจรมักนำเสนออย่างไม่ซับซ้อนซึ่งมีเพียง CCCII จำนวนสามชุดและตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับกราวด์อีกสองตัวเท่านั้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวมอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Fabre, O. Saaid, F. Wiest and C. Boucheron. "Current controlled bandpass filter based on translinear conveyors." *Electron. Letts.*, vol. 31, Sept. 1995. pp. 1727-1728.
- [2] A.S. Sedra and K.C. Smith. "A second-generation current conveyor and its applications." *IEEE Trans.*, vol. CT-17, 1970. pp. 132-134.
- [3] A.S. Sedra and K.C. Smith. *Microelectronic Circuits*. 4th ed. New York : Oxford University Press. 1998.
- [4] B. Gilbert. "Translinear circuits : a proposed classification." *Electron. Letts.*, vol: 11, Jan. 1975. pp. 14-16.
- [5] B. Wilson. "Recent developments in current conveyors and current-mode circuits." *IEE Proc.*, vol. 137, April 1990. pp. 63-77.
- [6] C. Acar and H. Kuntman. "Limitations on input signal level in current-mode active-RC filters using CCII's." *Electron. Letts.*, vol. 32, Aug. 1996. pp. 1461-1462.
- [7] C. Acar and S. Ozoguz. "High-order voltage transfer function synthesis using CCII+ based unity gain current amplifiers." *Electron. Letts.*, vol. 32, Oct. 1996. , pp. 2030-2031.
- [8] C.A. Karybakas and C.A. Papazoglou. " Current-mode CCII-based biquadratic filters offering electronic frequency shifting." *Proceeding of the Third IEEE International conference on Electronics, Circuits and Systems*, vol. 1, 1996. pp. 128-131.
- [9] D.R. Frey. "Log-domain filtering : an approach to current-mode filtering." *IEE Proc.*, vol. 140, Dec. 1993. pp. 406-416.
- [10] E. Seevinck and R.J. Wiegerink. "Generalized translinear circuit principle." *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 26., Aug. 1991. pp. 1098-1102.
- [11] J.V. Vosper and M. Heima. "Comparison of single- and dual-element frequency control in a CCII-based sinusoid oscillator." *Electron. Letts.*, vol. 32, Dec. 1996. pp. 2293-2294.
- [12] K.C. Smith and A.S. Sedra. "The current conveyor – a new circuit building block." *IEEE Proc.*, vol. 56, 1968. pp. 1368-1369.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] M. Alami and A. Fabre. "Insensitive current-mode bandpass filter implemented from two current conveyors." *Electron. Letts.*, vol. 27, May 1991. pp. 897-898.
- [14] M.T. Abuelma'atti, S. Celma, Martinez P. and A. Carlosena. "Minimal realisation for single resistor controlled sinusoidal oscillator using single CCII." *Electron. Letts.*, vol 28., June 1992. pp. 1264-1265.
- [15] O.Cicekoglu and H.H. Kuntman. "CCII+ based first order allpass filters with all grounded passive elements." *Mediterranean Electrotechnical Coference*, vol. 1, 1998. pp. 608-612.
- [16] O. Saaid and A. Fabre. "Class AB current-controlled resistor for high performance current-mode applications." *Electron. Letts.*, vol. 32, Jan. 1996. pp. 4-5.
- [17] S. Celma, P.A. Martinez and A. Carlosena. "Minimal realisation for single resistor controlled sinusoidal oscillator using single CCII." *Electron. Letts.*, vol. 28, Feb. 1992. , pp. 443-444.
- [18] S. Celma, P.A. Martinez and A. Carlosena. "Approach to the synthesis of canonic RC-active oscillators using CCII." *IEE Proc.*, vol. 141, Dec. 1994. pp. 493-497.
- [19] S.I. Liu, H.W. Tsao and J. Wu. "Cascadable current-mode single CCII biquads." *Electron. Letts.*, vol. 26, Nov. 1990. pp. 2005-2006.
- [20] S.I. Liu, H.W. Tsao, J. Wu and J.H. Tsay. "Realizations of the single CCII biquads with high input impedance." *IEEE International Symposium on Circuits and Sstems*, vol. 3, 1991. pp. 1428-1431.
- [21] S. Pookaiyudom and K. Samootrut. "Current-mirror phase-shifter oscillator." *Electron. Letts.*, vol. 23, Jan. 1987. pp. 21-23.
- [22] Y. Sun and J.K. Fidler. "Some design methods of OTA-C and CCII-RC filters." *IEE Colloquium on Digital and Analogue Filters and Filtering Systems*, 1993. pp. 7/1-7/8.
- [23] Y. Sun and J.K. Fidler. "Synthesis and performance analysis of universal minimum component integrator-based IFLF OTA grounded capacitor filter." *IEE Proc.Circuits Devices Syst.*, vol. 143, 1996. pp. 107-114.
- [24] Z. Shujiang and Gu Liping. "A novel approach for designing continuous-time filters:based on CCII." *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 5, 1994. pp. 553-556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์

ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจรมัลติโปรแกรมเมอร์

BJT MODEL PARAMETERS

MODEL NX1 NPN (RB=524.6 IRB=0 RBM=25 RC=50 RE=1 IS=121E-18
 EG=1.206 XTI=2 XTB=1.538 BF=137.5 IKF=6.974E-3 NF=1 VAF=159.4
 ISE=36E-16 NE=1.713 BR=0.7258 IKR=2.198E-3 NR=1 VAR=10.73 ISC=0
 NC=2 TF=0.425E-9 TR=0.425E-8 CJE=0.214E-12 VJE=0.5 MJE=0.28
 CJC=0.983E-13 VJC=0.5 MJC=0.3 XCJC=0.034 CJS=0.913E-12 VJS=0.64
 MJS=0.4 FC=0.5)

MODEL PX1 PNP (RB=327 IRB=0 RBM=24.55 RC=50 RE=3 IS=73.5E-18
 EG=1.206 XTI=1.7 XTB=1.866 BF=110 IKF=2.359E-3 NF=1 VAF=51.8
 ISE=25.1E-16 NE=1.650 BR=0.4745 IKR=6.478E-3 NR=1 VAR=9.96 ISC=0
 NC=2 TF=0.610E-9 TR=0.610E-8 CJE=0.18E-12 VJE=0.5 MJE=0.28
 CJC=0.164E-12 VJC=0.8 MJC=0.4 XCJC=0.037 CJS=1.03E-12 VJS=0.55
 MJS=0.35 FC=0.5)

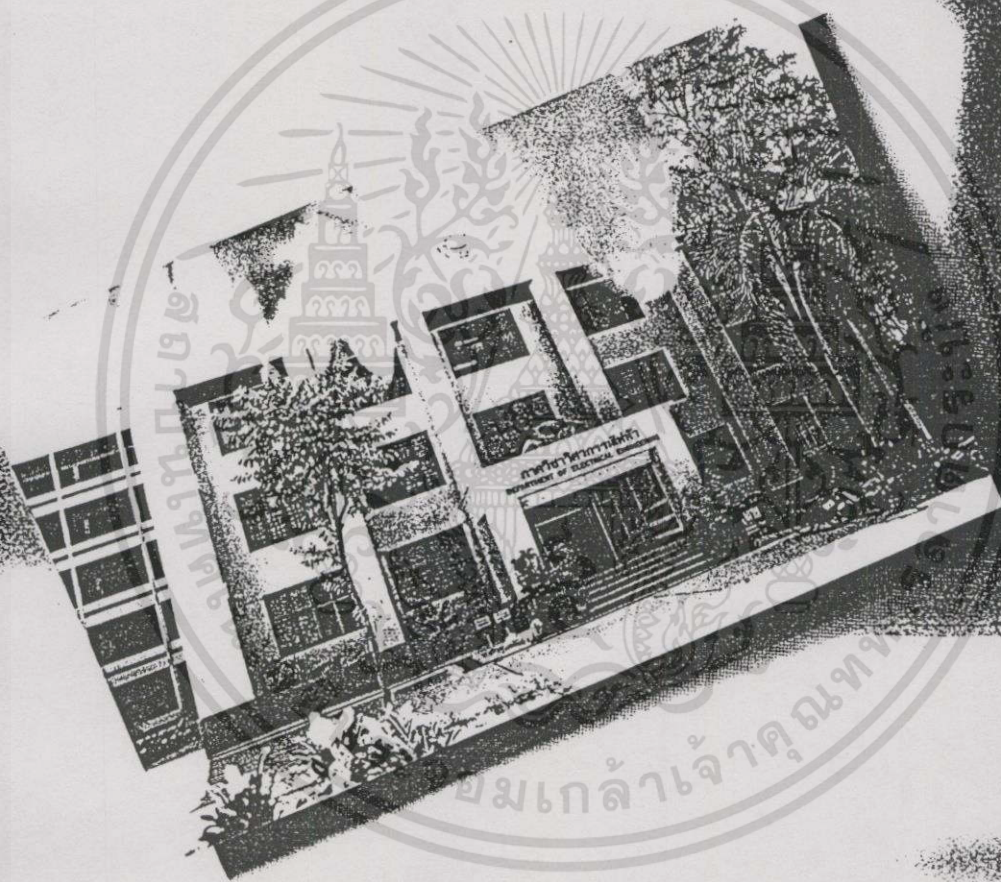
ภาคผนวก ข.
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ระหว่างศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19



ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

7-8 พฤศจิกายน 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองความถี่เปลี่ยนค่าได้ทางไฟฟ้า (Electronically tunable multifunctional translinear conveyor-C filter)

จิรสุดา เกษร* ปราโมทย์ วาดเขียน** วิภา แสงพิลิตี** วิวัฒน์ กิรานนท์**

* นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

** อาจารย์ประจำภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรรองความถี่ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) แบบไบควอด (Biquad) ในโหมดกระแส (current mode) โดยให้ค่าสมการความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการถ่ายโอนเป็นตัวกรองความถี่ได้ 3 รูปแบบในเวลาเดียวกันและสามารถปรับคุณสมบัติประจำของวงจรรองความถี่ได้โดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าคือกระแสเป็นตัวควบคุม นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอยังไม่ยุ่งยากและซับซ้อนประกอบไปด้วยวงจรรายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCI+) กับตัวเก็บประจุภายนอกเท่านั้น ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมสไปซ์ (SPICE) ให้ผลการวิเคราะห์เป็นไปตามหลักการของทฤษฎีด้วยดี

Abstract

A current-mode tunable using only trans-linear conveyors and capacitors is introduced. The proposed circuit can realise three different transfer functions simultaneously. This circuit enables the circuit characteristics to be electronically tuned. Simulation results made with SPICE confirm the theoretical analysis are given.

บทนำ

วงจรรองความถี่เป็นวงจรไฟฟ้าที่มีความสำคัญในงานไฟฟ้าสาขาต่างๆมาก ดังเป็นที่ทราบกันคืออยู่ทั่วไปและจะเห็นได้จากในช่วงเวลาที่ผ่านมามีการเสนอบทความเกี่ยวกับวงจรรองความถี่เป็นจำนวนมาก [5-11] และเมื่อไม่นานมานี้บทความ [1] ได้เสนอวงจรรองผ่านแถบความถี่ (Bandpass Filter) ควบคุมได้ด้วยกระแสที่มีพื้นฐานอยู่บนวงจรรายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCI) ซึ่งวงจรมีข้อดี คือ สามารถใช้งานในย่านความถี่เมก

กะเฮิรตซ์และสามารถปรับค่าความถี่ศูนย์กลาง (f_0) ได้ด้วยการใช้กระแสไฟฟ้ามาควบคุม แต่อย่างไรก็ดีวงจรมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเรื่องแบนวิดท์ของวงจรเนื่องจากยังไม่สามารถปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ (Q) ของวงจรได้

จากเหตุผลดังกล่าวบทความนี้ได้เสนอวงจรรองความถี่ที่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญทางไฟฟ้าคือ f_0 และ Q โดยมีพื้นฐานอยู่บน CCCII+ เช่นเดียวกันซึ่งโดยวงจรสามารถแสดงตัวทำให้เกิดฟังก์ชันการถ่ายโอนทั้ง 3 แบบได้พร้อมกัน คือ ฟังก์ชันกรองความถี่สูงผ่าน (Highpass Function), ฟังก์ชันกรองผ่านแถบความถี่ (Bandpass Function) และ ฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Function) ตามลำดับ ทั้งนี้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบใดๆของวงจรและนอกจากนี้ในการควบคุม f_0 และ Q ของวงจรมันยังสามารถที่จะควบคุมค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้โดยไม่ต้องกับการปรับค่าความถี่ศูนย์กลางของวงจรรออีกด้วย

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 หลักการโดยทั่วไปของ CCCII

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าวงจรที่นำเสนอมีพื้นฐานอยู่บนวงจรรายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแส (CCCI) จึงจะขอกกล่าวถึงหลักการของ CCCII โดยสังเขปก่อนกล่าวคือ CCCII จะมีคุณสมบัติคล้ายกับวงจรรายพานกระแส (CCII) ที่คุ้นเคยกันอยู่ [4] แต่ CCCII จะมีค่าความต้านทานทางขั้ว (terminal) x, R_x โดยความต้านทานนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับกระแสไบอัสของวงจรรวมสมการ

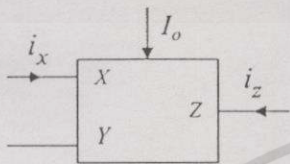
$$R_x = \frac{V_T}{2I_0} \tag{1}$$

โดยในที่นี้ V_T คือ ค่าศักดาไฟฟ้าที่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิสัมบูรณ์และวงจรรวมมูลของ CCCII มีดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

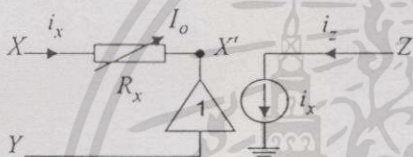
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CM-74

โดย I_o คือค่ากระแสไบอัสของ CCCII, i_x คือกระแสทางด้านขั้ว x และ i_z คือกระแสทางด้านขั้ว z ตามลำดับ



รูปที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ของ CCCII



รูปที่ 2 แสดงวงจรสมมูลของ CCCII

จากรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาวงจร CCCII เพียงถึงแค่จุด X' ความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ของวงจร CCCII นี้ จะสมมูลกับความสัมพันธ์ซึ่งแสดงคุณสมบัติของ CCII แบบปรกติ คือ

$$\begin{bmatrix} i_Y \\ V_{X'} \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ i_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

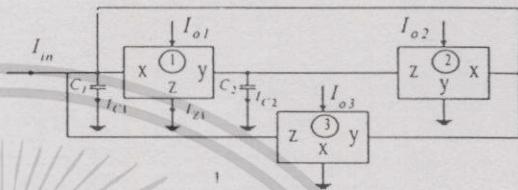
แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าความต้านทานภายใน R_x ด้วยแล้วจะสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ในรูปทั่วไปของ CCCII ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{bmatrix} i_Y \\ V_X \\ i_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ i_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

ค่าความสัมพันธ์เชิงเมตริกซ์ของ CCCII นี้ จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ห้วงจร ในหัวข้อต่อไป

2.2 วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอในบทความนี้ มีแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของหลักการที่นำเสนอซึ่งมีพื้นฐานอยู่บน CCCII

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3 เมื่อทำการวิเคราะห์บล็อกไดอะแกรมของวงจร จะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนที่ต่าง ๆ กันดังนี้ คือ

$$\frac{I_{C1}}{I_{in}} = \frac{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3}}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + SC_2 (R_{x1} R_{x3} + R_{x2} R_{x3} - R_{x1} R_{x2}) + R_{x3}} \quad (4)$$

$$\frac{I_{C2}}{I_{in}} = \frac{-SC_2 R_{x1} R_{x3}}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + SC_2 (R_{x1} R_{x3} + R_{x2} R_{x3} - R_{x1} R_{x2}) + R_{x3}} \quad (5)$$

$$\frac{I_{Z1}}{I_{in}} = \frac{-R_{x3} (SC_2 R_{x2} + 1)}{S^2 C_1 C_2 R_{x1} R_{x2} R_{x3} + SC_2 (R_{x1} R_{x3} + R_{x2} R_{x3} - R_{x1} R_{x2}) + R_{x3}} \quad (6)$$

$$\text{โดย } R_{xn} \approx \frac{V_T}{2I_{on}} \quad (n=1,2,3) \quad (7)$$

R_{xn} เป็นค่าความต้านทานภายในของวงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสตัวที่ n (สมการ (7) ใช้ได้เมื่อ i_{xn} มีค่าน้อยกว่า $2I_o$ [2])

จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันการถ่ายโอนตามสมการ (4) ถึง (6) คือ ฟังก์ชันกรองความถี่สูงผ่าน, ฟังก์ชันกรองแถบความถี่ผ่านและฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ และ $I_{o1} = I_{o2} = I_o$ จะทำให้ CCCII ตัวที่หนึ่ง และ ตัวที่สอง มีค่าความต้านทานภายในเท่ากันคือ $R_{x1} = R_{x2} = R_x$ และจะเห็นได้ว่าสมการทั้งสามมีรูปสมการที่มีส่วนเหมือนกัน กล่าวคือทุกสมการจะมีส่วนเป็นดังนี้

$$S^2 C^2 R_x^2 R_{x3} + SC(2R_x R_{x3} - R_x^2) + R_{x3} \quad (8)$$

แสดงว่าสมการทั้งสามมีค่าโพล และ Q ของโพลที่เท่ากัน รูปแบบของส่วนของสมการเหล่านี้สามารถที่จะจัดใหม่ให้อยู่ในรูปมาตรฐาน คือ

$$S^2 + \frac{\omega_o}{Q} S + \omega_o^2 \quad (9)$$

ได้ซึ่งจะมีรูปแบบในเทอมของอุปกรณ์ของวงจรเป็น

$$S^2 + \frac{S(2R_{x3} - R_x)}{C(R_x R_{x3})} + \left(\frac{1}{CR_x}\right)^2 \quad (10)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับ (9) กับ (10) จะได้

$$\omega_o = \frac{1}{CR_x} \quad (11)$$

โดยในที่นี้ $\omega_o = 2\pi f_o$

$$\text{และ } Q = \frac{R_{x3}}{2R_{x3} - R_x} \quad (12)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า สมการ (7) ลงในสมการ (11) และ (12) จะได้

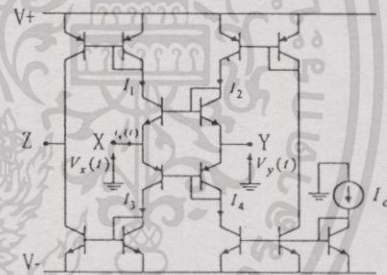
$$\omega_o = \frac{2I_o}{V_T C} \quad (13)$$

$$\text{และ } Q = \frac{I_o}{2I_o - I_{o3}} \quad (14)$$

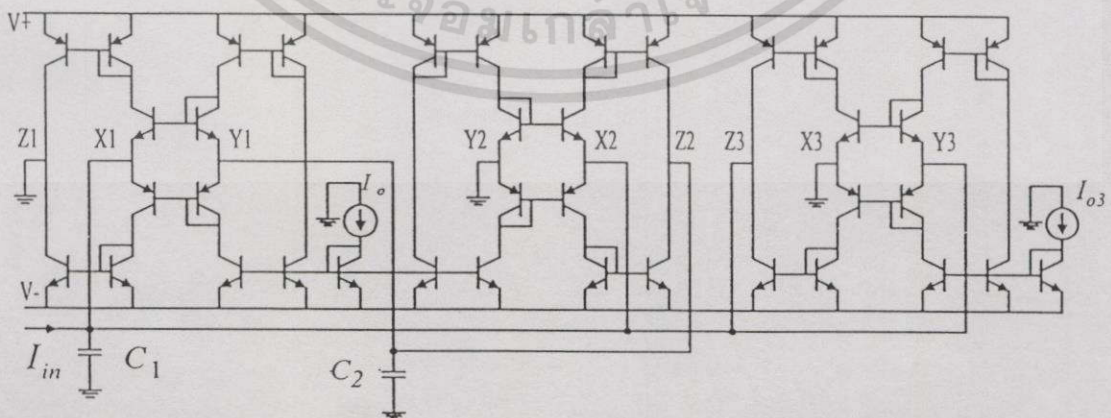
จากสมการ (13) จะเห็นว่า ω_o สามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไบอัส I_o และ เราสามารถปรับค่า Q ของวงจรได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแส I_{o3} โดยไม่มีผลกระทบต่อค่า ω_o ตามสมการ (13) ในทางปฏิบัตินั้นกระแสไบอัสของวงจร CCCII ตัวที่หนึ่ง และตัวที่สอง สามารถทำให้เท่ากันได้โดยง่ายโดยการใช่วงจรสะท้อนกระแสมาทำการสะท้อนกระแสร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5

3. ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์

เพื่อยืนยันการวิเคราะห์ตามทฤษฎีได้ใช้การจำลองการทำงานของวงจรด้วยคอมพิวเตอร์มาช่วยตรวจสอบโดยใช้วงจร CCCII ที่ประกอบขึ้นจากวงจรทรานซิสลีนีร์ และวงจรสะท้อนกระแสดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงวงจร CCCII ที่ประกอบขึ้นจากวงจรทรานซิสลีนีร์และวงจรสะท้อนกระแส



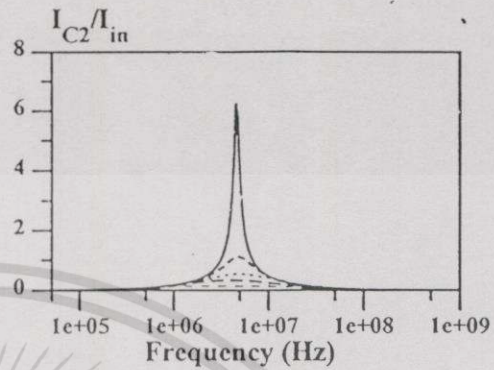
รูปที่ 5 แสดงวงจรรองความถี่ที่ใช้ในการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

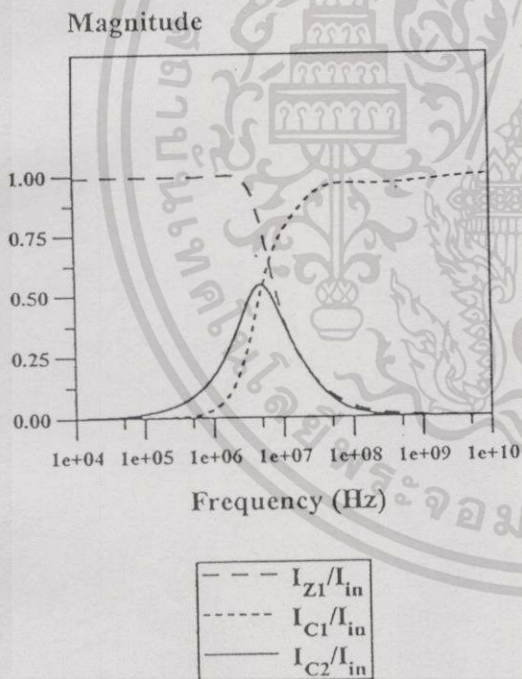
CM-76

ซึ่งเมื่อนำมาประกอบเป็นวงจรตามรูปที่ 3 แล้ว จะได้วงจรในการจำลองการทำงานเป็นดังแสดงในรูปที่ 5 โดยใช้พารามิเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เบอร์ PR100N (PNP) และ NR100N (NPN) [3] ที่อุณหภูมิ 27° และไฟเลี้ยง ± 2.5 V จะทำให้ได้ผลของการจำลองเป็นดังต่อไปนี้คือ

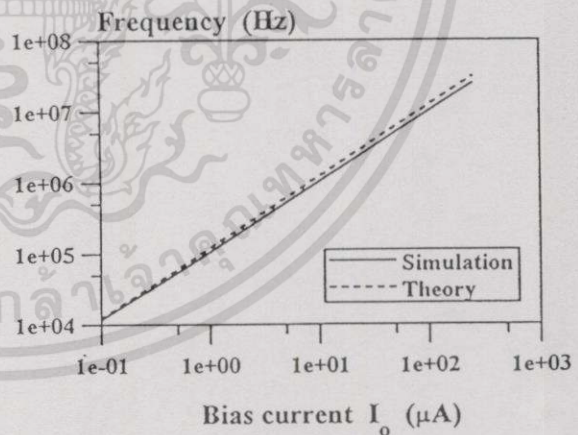
จากวงจรในรูปที่ 5 เมื่อนำมาจำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของฟังก์ชันการถ่ายโอนทั้ง 3 แบบของวงจรกรองความถี่ตามที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2 โดยกำหนดให้ $C_1 = C_2 = C = 100$ pF, $I_o = 50$ μ A และ $I_{o3} = 10$ μ A ได้ผลแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อนำการปรับค่ากระแสไบอัสของวงจรต่าง ๆ กัน จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความถี่ที่ได้จากการจำลองการทำงานและผลที่คำนวณจากทางทฤษฎีในกรณีนี้ที่ $I_{o3} = 10$ μ A, $C_1 = C_2 = C = 100$ pF และ กระแสไบอัส I_o มีค่าต่างๆกัน มีดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรเมื่อ $I_o = 50$ μ A และทำการปรับค่ากระแสไบอัส I_{o3} ของวงจรต่างๆกัน



รูปที่ 6 แสดงแอมพลิจูดของวงจรฟิวด์เตอร์ทั้งสามแบบ เมื่อ $C_1 = C_2 = C = 100$ pF, $I_o = 50$ μ A และ $I_{o3} = 10$ μ A



รูปที่ 8 แสดงเปรียบเทียบความถี่จากการจำลองการทำงานกับทางทฤษฎีของวงจร เมื่อ $C_1 = C_2 = C = 100$ pF, $I_{o3} = 10$ μ A ในกรณีนี้ I_o มีค่าต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่ในโหมดกระแสที่มีพื้นฐานอยู่บนการใช้วงจรสายพานกระแสที่ควบคุมด้วยกระแสซึ่งฟังก์ชันที่ได้นำเสนอ สามารถแสดงฟังก์ชันการถ่ายโอนของวงจร 3 แบบ คือ ฟังก์ชันกรองความถี่สูงผ่าน, ฟังก์ชันกรองแถบความถี่ผ่าน และฟังก์ชันกรองความถี่ต่ำผ่านได้ในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ยังสามารถปรับค่าความถี่ศูนย์กลางและค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรได้ด้วยกระแสไฟฟ้าจุดหนึ่งที่ทำให้ความสนใจก็คือ เนื่องจากวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอทำงานในโหมดกระแส ดังนั้นจึงมีศักยภาพของการทำงานในย่านความถี่สูงและจากข้อดีที่เราสามารถควบคุมค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ได้ด้วยกระแส เราจึงสามารถสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ได้อย่างง่ายโดยการปรับค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ของวงจรให้มีค่าสูงมากพอ ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมสไปซ์ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องตามหลักการทางทฤษฎีด้วยดี

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fabre, A., Saaid, O., Weist, F., and Boucheron, C. : "Current controlled bandpass filter based on translinear conveyors.", *Electron. Lett.*, 1995, 31, 20, pp.1727-1728.
- [2] Fabre, A., Saaid, O., Weist, F., and Boucheron, C. : "High frequency applications based on a new current controlled conveyor.", *IEEE Trans. Circuits & Sys.*, 1996, 43, 2, pp. 82-91.
- [3] Frey, D.R. : "Log-domain filtering : an approach to current-mode filtering.", *IEE Proc.- G.*, 1993, 140, 6, pp. 406-416.
- [4] Sedra, A.S. and Smith, K.C. : "A second generation current conveyor and its applications.", *IEEE Trans. Circuit Theory*, 1970, CT-17, pp. 132-134.
- [5] Shah, N. A. and Ahmad, S. N. : "Electronically tunable OTA-based on allpass circuit.", *INT.J.Electronics*, 1990, 68, 6, pp. 963-966.
- [6] Malvar, H. S. : "Electronically tunable active filters with operational transconductance amplifiers.", *IEEE Trans. Circuits & Sys.*, 1982, CAS-29, 5, pp. 333-336.
- [7] Sparkes, R. G. and Sedra, A. S. : "Programmable active filters.", *IEEE J.Solid State Circuits*, 1973, pp.93-95.
- [8] Abuelmatti, M.T. and Khan M.H. : "Low component current-mode universal filter.", *Electron. Lett.*, 1995, 31, 25, pp. 2160-2161.
- [9] Liu, S.-I. : "Universal filter using two current feedback amplifier.", *Electron. Lett.*, 1995, 31, 8, pp. 629-630.
- [10] Abuelmatti, M.T. : "New current-mode active filters employing first generation current conveyor.", *Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits & Sys.*, 1992, 1, pp. 310-313.
- [11] Lui, S.-I. and Wu, D.-S. : "New current feedback amplifier-based universal biquadratic filter", *IEEE Trans. Instrumentation & Measurement*, 1995, 44, 4, pp. 915-917.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวจีรสุดา เกษร
เกิด วันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2515
สถานที่เกิด โรงพยาบาลพุทธชินราช จังหวัดพิษณุโลก
การศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2537, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีมหานคร พ.ศ. 2540, ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจาก Vanderbilt University
ประเทศสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2542 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและระดับปริญญา
ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ Vanderbilt University ประเทศสหรัฐอเมริกา
ประสบการณ์ทำงาน ผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พ.ศ.2537-2538, อาจารย์ประจำภาควิชาโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พ.ศ.
2538-2540, อาจารย์ภาควิชาโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด
กระบัง พ.ศ.2540 - ปัจจุบัน
ผลงานทางวิชาการ - " กรุปดีมอดูเลเตอร์โดยเซิร์ปทรานสฟอร์ม", การประชุมวิชาการทาง
วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 จัดโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- " วงจรทรานสลิเนียร์ฟิลเตอร์หลายหน้าที่ที่สามารถปรับค่าได้ทาง
ไฟฟ้า การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 จัดโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น
- " Current controlled oscillator based on translinear conveyor",
Electronics Letters, vol. 32, no. 15, July 1996. pp.1330-1331.
- " Electronically tunable multifunctional translinear-C filter and
oscillator", Electronics Letters, vol. 33, no. 7, March 1997. pp.573-574.