สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดและวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์

CURRENT MODE ALL-PASS VARIABLE PHASE SHIFTER AND OSCILLATOR

T028915

นายศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์
MR. SIRIWAT LIMPAIBOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2540

ISBN 974-621-890-5

เลขหมู่.................................
เลขทะเบียน 28915
วัน, เดือน, ปี 11 พ.ย. 2540

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็น... ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CURRENT MODE ALL-PASS VARIABLE PHASE SHIFTER AND OSCILLATOR

SIRIWAT LIMPAIBOON

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

1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ISBN 974-621-890-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดและวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์
นักศึกษา	นายศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ภาควิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2540

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอวิธีการออกแบบวงจรเลื่อนเฟสของสัญญาณโดยใช้ลักษณะของกระแส ซึ่งจะอาศัยโอทีเอเป็นส่วนประกอบหลักของวงจร ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) จะเป็นตัวกำหนดมุมของการเลื่อนเฟส และวงจรยังสามารถเลื่อนเฟสได้จาก 0° ถึง -180° และ 180° ถึง 0° อินพุทและเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าสูง รวมทั้งอัตราขยายของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งตลอดย่านความถี่อีกด้วย และอีกส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์จะเป็นการเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ในลักษณะของกระแส โดยวงจรจะอาศัยวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว และวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าเป็นอุปกรณ์หลักของวงจรในส่วนของเน็ทเวิร์ค ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) เป็นตัวกำหนดความถี่ในการกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ ซึ่งสามารถให้กำเนิดสัญญาณได้สูงกว่าแบบเก่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Current Mode All-Pass Variable Phase Shifter and Oscillator
Student	Mr. Siriwat Limpaiboon
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Kobchai Dejhan
Level of Study	Master of Engineering (Electrical Engineering)
Department	Telecommunications Faculty Of Engineering' King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1997

ABSTRACT

This thesis proposes a design of current mode variable phase-shifter that using OTA for main components in the circuit, resistor (R) capacitor (C) are the parameters for definition of phase-shifter angle. The circuit can be shifted the phase form 0° to -180° and 180° to 0°. The input impedance and output impedance of the circuit are high values and the amplifier of circuit is unity through out the frequency range. The other part of thesis is the current mode oscillator circuit the Wilson current mirror circuit, differential current mirror circuit for main component in the circuit and in the part of network are resistors (R) and capacitors (C). They are the parameters to carry out the oscillating frequency. The proposed circuit produces the frequency higher than the old type circuit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีอุปสรรคต่างๆเกิดขึ้นมากบ้างน้อยบ้าง ซึ่งอุปสรรคเหล่านั้นก็สามารถถูกแก้ไขให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยกำลังใจ และคำแนะนำที่ดี ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้เลยถ้าไม่มีบุคคลต่อไปนี้

ขอขอบคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้โอกาสและสนับสนุนทุกๆอย่างในการเรียน

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ รศ. ดร. กอบชัย เดชหาญ ที่ช่วยให้คำแนะนำให้ข้อมูลและช่วยเหลือทุกอย่างในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกๆท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาทั้งหมดให้แก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณ คุณบุษณีย์ ลิ้มไพบูลย์ ที่ได้ให้กำลังใจในยามเกิดอุปสรรคต่างๆ และช่วยเหลือในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ ตลอดจนเพื่อนๆร่วมรุ่นที่ได้ช่วยเหลือผู้เขียนอย่างใกล้ชิดตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..........I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..........II
กิตติกรรมประกาศ..........III
สารบัญ..........IV
สารบัญภาพ..........VII
บทที่
1. บทนำ..........1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์..........1
แนวความคิดใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์..........2
รายละเอียดในวิทยานิพนธ์..........2
2. คุณสมบัติและบทวิเคราะห์วงจรแบบเก่า
บทนำ..........4
บทวิเคราะห์วงจรความถี่ผ่านตลอด..........4
การวิเคราะห์วงจรความถี่ผ่านตลอดที่เลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180°..........6
ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติจากวิธีวิเคราะห์โหนดถึงวิธีสร้างเลียนแบบ (Simulation) ด้วย PSpice..........7
การวิเคราะห์วงจรความถี่ผ่านตลอดที่เลื่อนเฟสจาก 180° ถึง 0°..........9
ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติจากวิธีวิเคราะห์โหนดกับวิธีสร้างเลียนแบบ (Simulation) ด้วย Pspice..........10
บทวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส..........11
บทวิเคราะห์เน็ทเวิร์ค *[B(S)]*..........13
ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติจากวิธีวิเคราะห์โหนดกับวิธีสร้างเลียนแบบ (Simulation) ด้วย Pspice..........14
บทสรุป..........15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3. คุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแส

บทนำ....16

วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว หรือแบบ Wilson....16

คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง....17

คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ....17

วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว....18

คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง....19

คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ....19

วงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว (Differential Current Mirror)....21

คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง....21

คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ....22

บทสรุป....24

4. วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด

บทนำ....25

บทวิเคราะห์วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด....25

การทดลองและผลการทดลอง....31

บทสรุป....33

5. วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบใหม่

บทนำ....34

บทวิเคราะห์วงจรเน็ทเวิร์ค....34

บทวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์....41

การทำงานของวงจรและผลการทดลอง....43

บทสรุป....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
6.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
	บทสรุปผลการวิจัย	46
	ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ	47
	บรรณานุกรม	48
	ภาคผนวก	50
	ภาคผนวก ก	51
	ภาคผนวก ข	55
	ภาคผนวก ค	61
	ภาคผนวก ง	67
	ภาคผนวก จ	70
	ภาคผนวก ฉ	75
	ประวัติผู้เขียน	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

1. แสดงวงจรเลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180° 5
2. แสดงวงจรเลื่อนเฟสจาก 180° ถึง 0° 5
3. แสดงวงจรที่แยกออกมาพิจารณา 6
4. แสดงขนาดของอัตราขยายแรงดัน 8
5. แสดงเฟสของสัญญาณด้านขาออกของวงจร 8
6. แสดงวงจรที่แยกออกมาพิจารณา 9
7. แสดงขนาดของอัตราขยายแรงดัน 10
8. แสดงเฟสของสัญญาณด้านขาออกของวงจร 11
9. แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ 12
10. แสดงบล็อกไดอะแกรมของลูปของวงจรกำเนิดสัญญาณ 12
11. แสดงความแตกต่างของเฟสของสัญญาณด้านขาเข้าและขาออกของ [B(S)] 14
12. แสดงผลการกำเนิดความถี่เทียบกับผลของทฤษฎี 15
13. แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว 16
14. แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสแบบ Wilson 17
15. แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว 18
16. แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว 19
17. แสดงวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว 21
18. แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบ
ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว 22
19. แสดงวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดจาก 0° ถึง -180° 25
20. แสดงวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดจาก 180° ถึง 0° 29
21. แสดงผลการทดลองของวงจรเลื่อนเฟสจาก จาก 0° ถึง -180° 32
22. แสดงผลการทดลองของวงจรเลื่อนเฟสจาก 180° ถึง 0° 32
23. แสดงผลการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณทางด้านเอาท์พุทต่อด้านอินพุท 33
24. แสดงวงจรพาสซีฟเน็ทเวิร์ค [B(S)] 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

25. แสดงอัตราส่วนของกระแส $\frac{i_y}{i_x}$ 40
26. แสดงความแตกต่างของสัญญาณด้านขาเข้าและขาออก ณ $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$ 40
27. แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบใหม่..41
28. แสดงผลการทดลอง..43
29. แสดงปรากฏการณ์ Overdamp Oscillation ของวงจรกำเนิดสัญญาณ..44
30. แสดงปรากฏการณ์ Underdamp Oscillation ของวงจรกำเนิดสัญญาณ..45
31. แสดงเน็ทเวิร์คของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีเลื่อนเฟสในลักษณะของแรงดัน.......51
32. แสดงเน็ทเวิร์คของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีเลื่อนเฟสในลักษณะของกระแส.......70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอิเลคทรอนิคส์และโทรคมนาคม ได้วิวัฒนาการไปอย่างรวดเร็วมาก ทำให้เทคโนโลยีที่จำเป็นคือ เทคโนโลยีการออกแบบวงจรอิเลคทรอนิคส์ พัฒนาตามไปอย่างรวดเร็วทั้งในระบบดิจิตอล (Digital) และเชิงอนาลอก (Analog) สำหรับในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงส่วนที่เป็นอนาลอกเท่านั้น โดยวงจรจะทำงานในลักษณะของกระแส ซึ่งในวงจรอนาลอกจะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นแอคทีฟและพาสซีฟ และอีกส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ได้นำเอาวงจรรวม (IC : Integrated Circuit) ที่เรียกว่า Operational Transconductance Amplifier หรือเรียกสั้นๆว่า OTA มาใช้งาน

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์เรื่องวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดและวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์นั้นจะมีเนื้อหาหลักๆ รวมทั้งสิ้นสองเรื่องดังนี้ เรื่องแรกคือ วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด เรื่องที่สองคือวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ ซึ่งออกแบบวงจรโดยใช้โอทีเอเป็นวงจรรวม และไบโพล่าทรานซิสเตอร์ ตามลำดับ

จุดประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์ได้กำหนดไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาค้นคว้าวิจัยออกแบบวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดโดยใช้โอทีเอเป็นส่วนประกอบหลักของวงจร และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์โดยใช้ไบโพล่าทรานซิสเตอร์ต่อเป็นวงจรสะท้อนกระแสเป็นส่วนประกอบหลักของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สามารถนำวงจรดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานได้
3. ใช้อุปกรณ์ให้น้อยที่สุด เพื่อที่จะทำให้วงจรมีขนาดเล็ก
4. สามารถนำไปทำเป็นวงจรรวมได้

แนวคิดใหม่ในวิทยานิพนธ์

ในแต่ละเรื่องของวิทยานิพนธ์จะมีหลักการซึ่งแตกต่างไปจากงานวิจัยก่อนๆ ที่เคยนำเสนอไว้ในอดีต โดยสามารถแยกเป็นเรื่องๆ ได้คือ

วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด ซึ่งวงจรจะทำงานในลักษณะของกระแสโดยอาศัยโอทีเอเป็นอุปกรณ์หลักของวงจร ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ เป็นส่วนประกอบของวงจรที่ใช้กำหนดเฟสของสัญญาณที่ถูกเลื่อน

วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ จะทำงานในลักษณะของกระแส โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสเป็นส่วนประกอบหลักของวงจร ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเป็นตัวกำหนดความถี่ในการกำเนิดสัญญาณและใช้เป็นส่วนเลื่อนเฟสของสัญญาณด้วย

รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นบทได้ทั้งหมด 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 จะเป็นการกล่าวนำวัตถุประสงค์ หลักการใหม่ในวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาโดยย่อของแต่ละบท

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎี คุณสมบัติและบทวิเคราะห์วงจรแบบเก่า ของวงจรความถี่ผ่านตลอดและวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ รวมทั้งกล่าวถึงข้อดีข้อเสียของวงจรและข้อจำกัดของส่วนความถี่ขยายกำลังของออปแอมป์ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและคุณสมบัติต่างๆ ของวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งจะมีทั้งแบบใช้ทรานซิสเตอร์ 3 ตัว ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว และวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณ

บทที่ 4 กล่าวถึงวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด การวิเคราะห์วงจรแสดงถึงหลักการใหม่ที่แตกต่างจากของเก่า ยืนยันผลในทางทฤษฎีด้วย การใช้โปรแกรมเลียนแบบการทำงาน PSpice ในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

บทที่ 5 กล่าวถึงวงจรออสซิเลเตอร์แบบใหม่ การวิเคราะห์วงจรทางส่วนเน็ทเวิร์ค และส่วนของแอคทีฟซึ่งเป็นวงจรสะท้อนกระแส ยืนยันผลในทางทฤษฎีด้วย การใช้โปรแกรมเลียนแบบการทำงาน PSpice ในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

บทที่ 6 เป็นการสรุปรายละเอียดที่สำคัญต่างๆของวิทยานิพนธ์ทั้งหมด ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

ภาคผนวก กล่าวถึงที่มาของสมการต่างๆ บทวิเคราะห์วงจรเน็ทเวิร์คโดยละเอียด และผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

คุณสมบัติและบทวิเคราะห์วงจรแบบเก่า

บทนำ

วงจรความถี่ผ่านตลอดที่มีการนำเสนอมานั้น ได้มีการนำเอาโอเปอร์เรชั่นแนลแอมปลิไฟเออร์ (OP-AMP) ประกอบกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ มาทำเป็นวงจรดังกล่าว ต่อมาได้มีการนำเอาวงจรสะท้อนกระแสมาประกอบกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุมาใช้เป็นวงจรเลื่อนเฟส ซึ่งที่กล่าวมาแล้วมีข้อจำกัดทางด้านความถี่ ความสามารถเลื่อนเฟสมีจำกัด จาก (0-π) ตามลำดับ

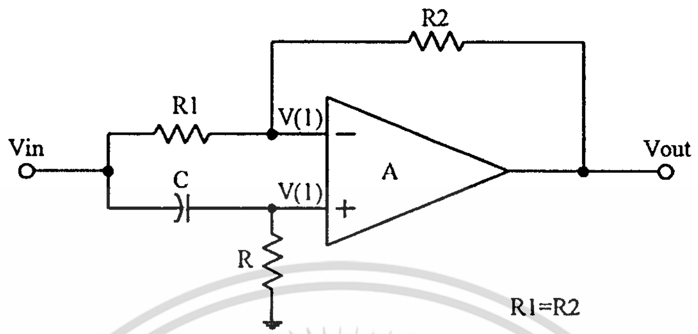
บทวิเคราะห์วงจรความถี่ผ่านตลอด

วงจรความถี่ผ่านตลอดที่จะนำมาวิเคราะห์นั้นจะทำการวิเคราะห์จากวงจรความถี่ผ่านตลอด ที่ใช้โอเปอร์เรชั่นแนลแอมปลิไฟเออร์ เนื่องจากวงจรความถี่ผ่านตลอดที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะใช้โอเปอร์เรชั่นแนลทรานคอนดัคแตนซ์ แอมปลิไฟเออร์ เป็นอุปกรณ์หลัก

เนื่องจากวงจรความถี่ผ่านตลอดแบบเก่านั้น จะทำงานในลักษณะแรงดัน ซึ่งมีข้อจำกัดทางด้านความถี่ขยายกำลัง

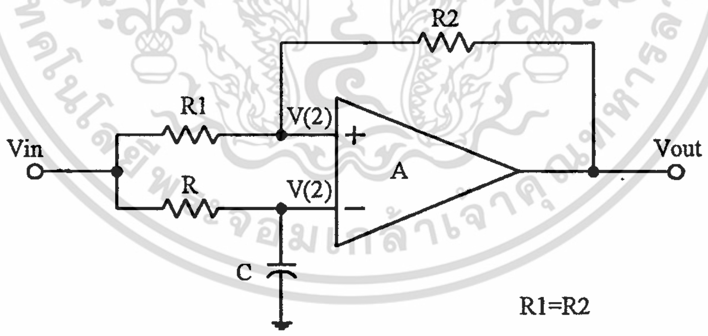
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 1



แสดงวงจรความถี่ผ่านตลอดที่เลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180°

ภาพที่ 2



แสดงวงจรความถี่ผ่านตลอดที่เลื่อนเฟสจาก 180° ถึง 0°

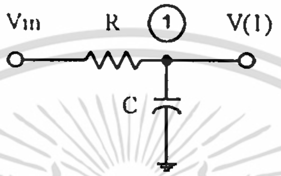
จากวงจรภาพที่ 1 และ 2 ประกอบด้วยความต้านทาน R_1, R_2 เป็นตัวกำหนดอัตราขยายของวงจรตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C จะเป็นตัวกำหนดเฟสที่ต้องการเลื่อน A คือโอเปอร์เรชั่นแนลแอมปลิไฟเออร์ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>การวิเคราะห์วงจรความถี่ผ่านตลอดที่เลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180°</u>

จากภาพที่ 1 สามารถนำมาเขียนแยกเป็นส่วนเพื่อให้พิจารณาง่าย

ภาพที่ 3



แสดงวงจรที่แยกออกมาพิจารณา

ที่ node ❶ : ใช้ทฤษฎีของเคอร์ชอฟ

$$V_1 = \frac{1}{RCs+1} V_{in} \quad (2.1)$$

และส่วนที่เหลือของวงจรสามารถหาสมการได้เป็น

$$\frac{V_{out}-V_{(1)}}{R_2} = \frac{V_{(1)}-V_{in}}{R_1} \quad (2.2)$$

กำหนดให้ $R_1 = R2$ และนำสมการที่ (2.1) แทนค่าลงในสมการที่ (2.2) จะได้ว่า

$$\frac{(RCs+1)V_{out}-V_{in}}{(RCs+1)} = \frac{V_{in}-(RCs+1)V_{in}}{(RCs+1)}$$

$$(1+RCs)V_{out} = (1-RCs)V_{in}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแก้สมการ จะสามารถหาฟังก์ชั่นถ่ายโอน (Transfer function) ได้เป็น

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1 - RCs}{1 + RCs} \tag{2.3}$$

จากสมการที่ (2.3) กำหนดให้ $T = RC, S = j\omega$ จะสามารถหาสมการเลื่อนเฟส [4] ได้เป็น

$$\theta = -2tan^{-1}(\omega T) \tag{2.4}$$

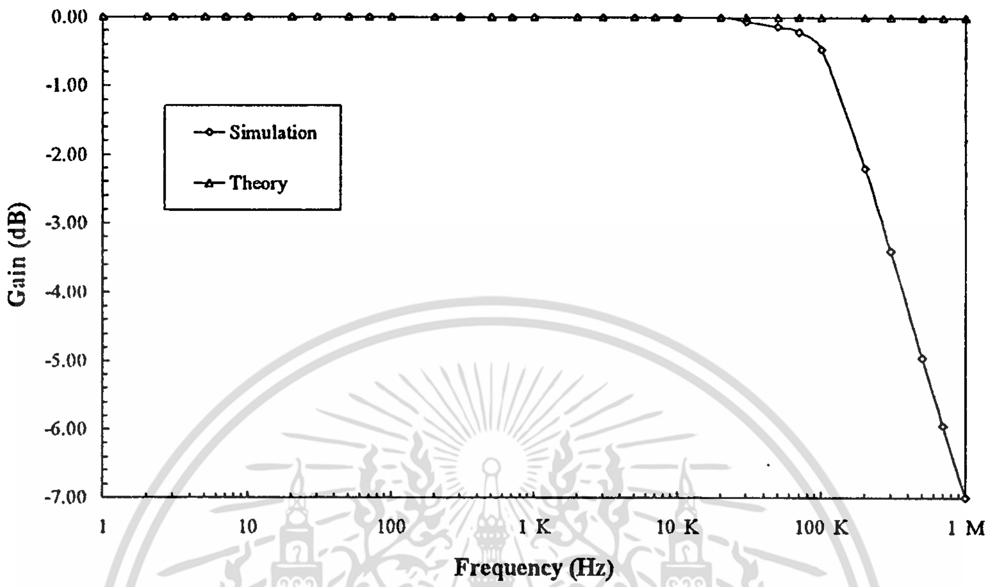
โดยที่ $\theta =$ เฟสที่เลื่อน เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.4) จะพบว่าสามารถเลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180° และอัตราขยายของวงจรจะมีค่าเป็นหนึ่งตลอดย่านความถี่ ตามสมการที่ (2.3)

ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติจากวิธีวิเคราะห์โหนดกับวิธีสร้างเลียนแบบ (Simulation) ด้วย PSpice

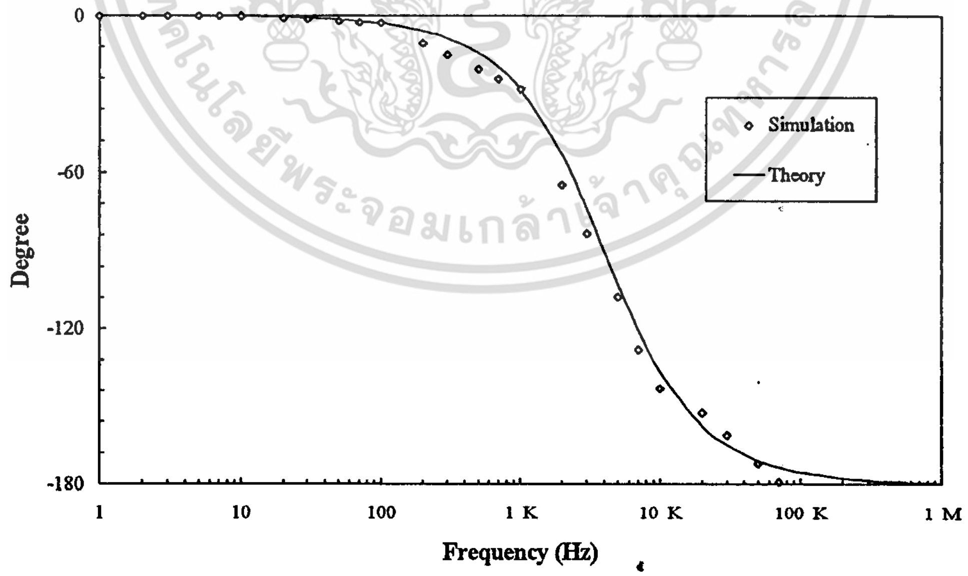
ใช้ PSpice [5] วิเคราะห์ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรความถี่ผ่านตลอด โดยนำมาเขียนกราฟการตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยายแรงดันจากสมการที่ (2.3) เปรียบเทียบกับผลของ PSpice ได้ดังภาพที่ 4ก ซึ่งจะพบว่ามีการลดทอนอัตราการขยายของวงจรที่ความถี่สูง และเขียนกราฟแสดงการเลื่อนเฟสจากสมการที่ (2.4) เปรียบเทียบผลของ PSpice ได้ดังภาพที่ 4ข จะพบว่าการเลื่อนเฟสของวงจรที่ความถี่สูงจะมีค่าผิดพลาดค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4ก



ภาพที่ 4ข



แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยายแรงดันของวงจรความถี่ผ่านตลอด จากผลที่ได้โดยวิธีวิเคราะห์โหนดกับผลของ PSpice

(ก) ขนาดของอัตราขยายแรงดัน

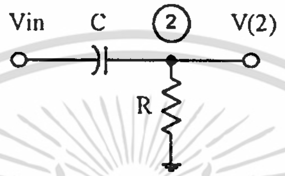
(ข) เฟสของสัญญาณด้านขาออกของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>การวิเคราะห์วงจรความถี่ผ่านตลอดที่เลื่อนเฟสจาก 180° ถึง 0°</u>

จากภาพที่ 2 สามารถนำมาเขียนแยกส่วนเพื่อให้พิจารณาง่ายขึ้น

ภาพที่ 5



แสดงวงจรที่แยกออกมา

ที่ node ❷ : ใช้ทฤษฎีของเคอร์ชอฟ

$$V_{(2)} = \frac{RCs}{RCs+1} V_{in} \tag{2.5}$$

และส่วนที่เหลือของสมการ สามารถหาสมการได้เป็น

$$\frac{V_{out} - V_{(2)}}{R_2} = \frac{V_{(2)} - V_{in}}{R_1} \tag{2.6}$$

กำหนดให้ $R_1 = R2$ และนำสมการที่ (2.5) แทนค่าลงในสมการที่ (2.6) ได้เป็น

$$V_{out} - \left(\frac{RCs}{RCs+1}\right)V_{in} = \left(\frac{RCs}{RCs+1}\right)V_{in} - V_{in}$$

$$(1+RCs)V_{out} = (RCs-1)V_{in}$$

ทำการแก้สมการ จะสามารถหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนได้เป็น

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{RCs-1}{RCs+1} \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

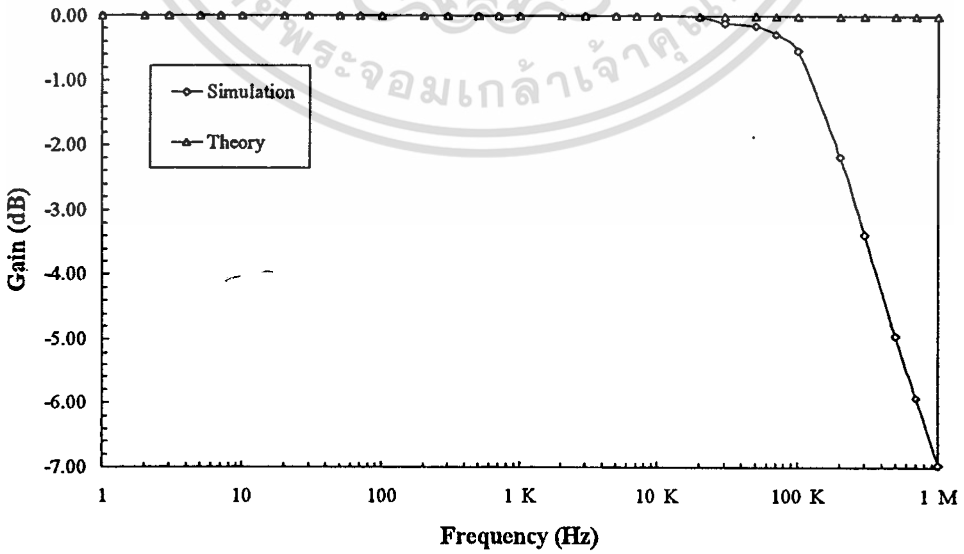
สมการที่ (2.6) กำหนดให้ $T=RC$, $S=j\omega$ จะสามารถหาสมการเลื่อนได้เป็น

$$\theta = \pi - 2\tan^{-1}(\omega T) \tag{2.8}$$

<u>ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติจากวิธีวิเคราะห์โหนดกับวิธีสร้างเลียนแบบด้วย PSpice</u>

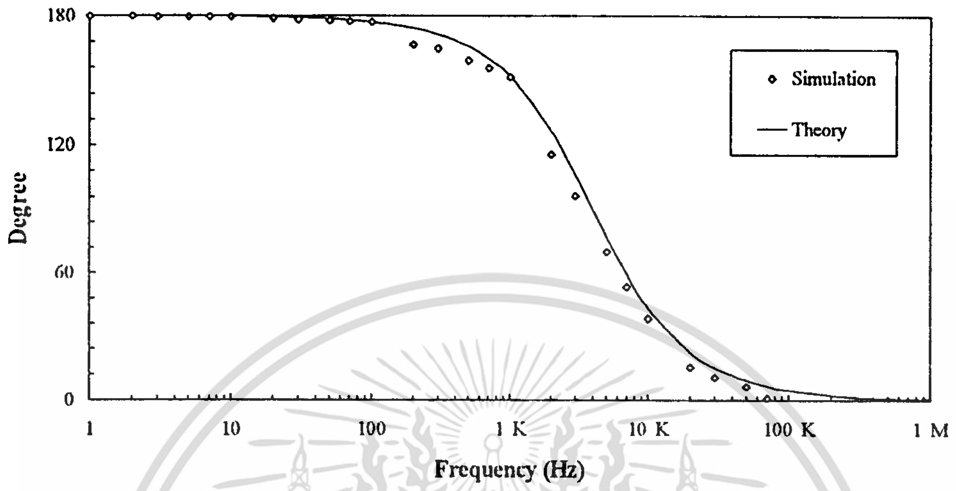
จากภาพที่ 2 สามารถใช้โปรแกรม PSpice จำลองการทำงานของวงจรได้โดยจะวิเคราะห์ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรความถี่ผ่านตลอดซึ่งสามารถนำมาเขียนกราฟการตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยายแรงดันจากสมการที่ (2.7) เปรียบเทียบผลของ PSpice ได้ดังภาพที่ 6ก ซึ่งจะพบว่ามีการลดทอนอัตราการขยายของวงจรที่ความถี่สูง และเขียนกราฟแสดงการเลื่อนเฟสจากสมการที่ (2.8) เปรียบเทียบผลของ PSpice ได้ดังภาพที่ 6ข จะพบว่าการเลื่อนเฟสของวงจรที่ความถี่สูงจะมีค่าผิดพลาดค่อนข้างสูง

ภาพที่ 6ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 6ข



แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ของอัตราขยายแรงดันของวงจรความถี่ผ่านตลอด จากผลที่ได้จากวิธีวิเคราะห์โหนดกับผลของ PSpice

(ก) ขนาดของอัตราขยายแรงดัน

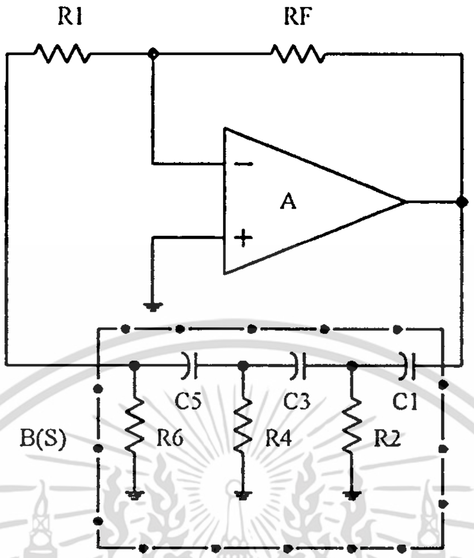
(ข) เฟสของสัญญาณด้านขาออกของวงจร

<u>บทวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีการเลื่อนเฟส</u>

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีการเลื่อนเฟสจะประกอบด้วยเน็ทเวิร์คซึ่งมีตัวต้านทาน 3 ตัว ตัวเก็บประจุ 3 ตัว [*B(s)*] อัตราขยายของวงจรจะประกอบด้วยออป-แอมป์ [*A*] และตัวต้านทานอีก 2 ตัว ดังภาพที่ 7ก

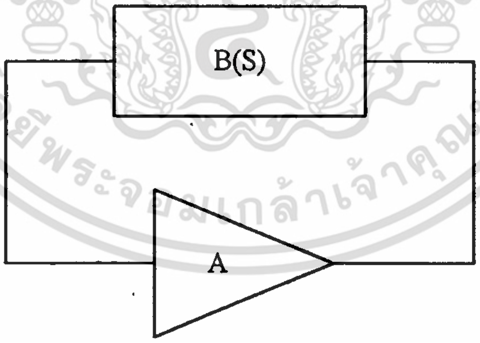
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 7ก



แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์

ภาพที่ 7ข



แสดงบล็อกไดอะแกรมของลูปของวงจรกำเนิดสัญญาณ

จากภาพที่ 7ข วงจรสามารถจะกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ออกมาได้ โดยลูปเกนการขยายรวมกันต้องมีค่าเป็นหนึ่ง ในส่วนของเน็ทเวิร์คของ *B(s)* จะเลื่อนเฟสไป 180° และในส่วนวงจรขยายจะเลื่อนเฟสอีก 180° จะครบ 2π เรเดียน ทำให้วงจรเกิดการแค้มปิ้งของสัญญาณและเกิดเป็นสัญญาณรูปซายน์ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>บทวิเคราะห์เน็ทเวิร์ค [B(s)]</u>

เน็ทเวิร์คที่เราจะพิจารณาคือ *B(s)* ในภาพที่ 7ก ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน 3ตัว และตัวเก็บประจุ 3ตัว และจะสามารถหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนได้ [ภาคผนวก ก]

$$B(s) = \frac{R^3 C^3 s^3}{\left(R^3 C^3 s^3 + 6R^2 C^2 s^2 + 5RCs + 1\right)} \tag{2.9}$$

จากภาพที่ 7ข จะเห็นได้ว่า [1]

$$AB(s) = 1 \tag{2.10}$$

นำเอาสมการที่ (2.9) แทนค่าไว้ในสมการที่ (2.10) เป็น

$$\frac{A\ R^3 C^3 s^3}{\left(R^3 C^3 s^3 + 6R^2 C^2 s^2 + 5RCs + 1\right)} = 1 \tag{2.11}$$

จากสมการที่ (2.11) สามารถหาค่าของความถี่ในการออสซิเลทและเงื่อนไขในการออสซิเลทได้เป็น [ภาคผนวก ก]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \tag{2.12}$$

$$A = -29 \tag{2.13}$$

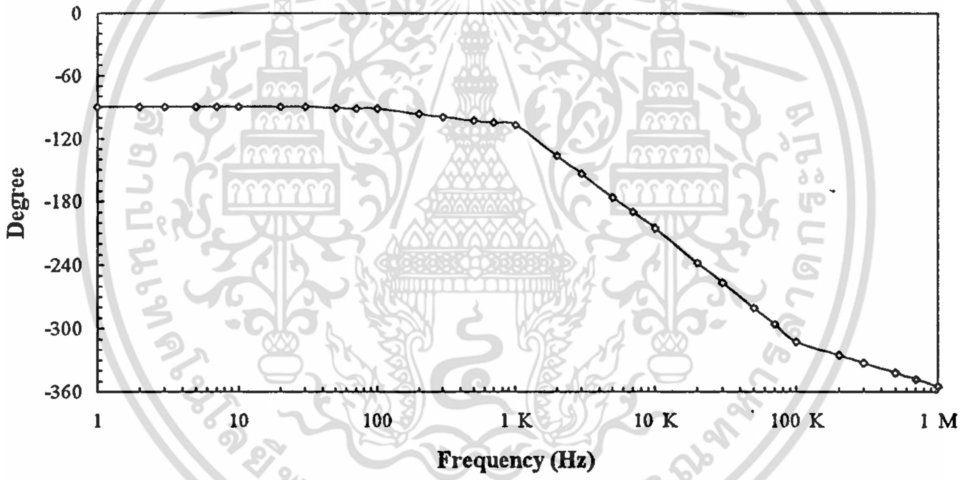
โดยที่ *A* คืออัตราขยายของวงจร
และ *f* คือค่าความถี่ในการออสซิเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติจากวิธีการวิเคราะห์โหนดกับวิธีสร้างเลียนแบบด้วย PSpice</u>

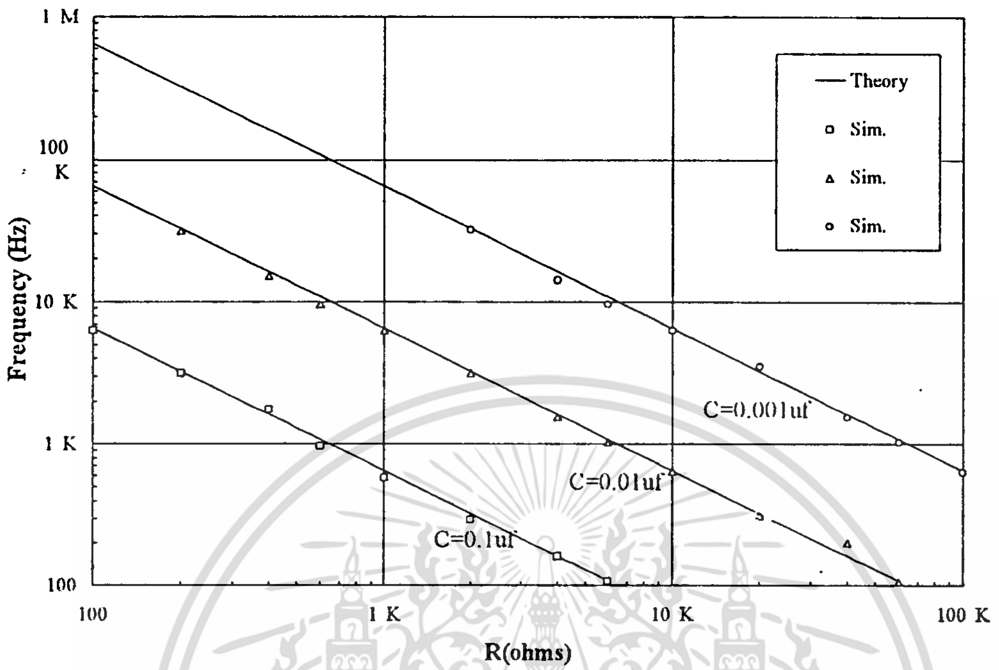
จากภาพที่ 7ก สามารถใช้โปรแกรม PSpice จำลองการทำงานของวงจรได้โดยจะวิเคราะห์คุณสมบัติการเลื่อนเฟสของเน็ทเวิร์คและผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณ ดังภาพที่ 8ก และ 8ข ซึ่งจะพบว่าวงจรจะไม่สามารถให้กำเนิดสัญญาณซายน์ได้ที่ความถี่สูง

ภาพที่ 8ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 8ข



แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณ

(ก) ความแตกต่างของเฟสของสัญญาณด้านขาเข้าและขาออกของ *B(s)*

(ข) แสดงผลการกำเนิดความถี่เทียบกับผลของทฤษฎี

<u>บทสรุป</u>

จากสมการที่หาได้โดยวิธีวิเคราะห์โหนดกับผลที่ได้จากการสร้างเลียนแบบด้วยโปรแกรม PSpice สามารถสรุปคุณสมบัติของวงจรได้ว่า วงจรเลื่อนเฟส (ภาพที่ 1 และ 2) สามารถเลื่อนเฟสได้จาก 0° ถึง -180° และ 180° ถึง 0° ซึ่งจะพบว่าย่านของการทำงานทางด้านความถี่ของวงจรค่อนข้างแคบ และการทำงานที่ความถี่สูง จะพบว่า มีการลดทอนของอัตราขยายทางแรงดันเกิดการผิดพลาดมากของเฟสที่เลื่อน รวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาท์พุทของวงจรมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากคุณสมบัติของออปแอมป์ ต่อมาเมื่อพิจารณาวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ โดยที่เน็ทเวิร์ค*B(s)* จะทำหน้าที่เลื่อนเฟสไป π และวงจรขยาย จะทำหน้าที่เลื่อนเฟสไปอีก π ทำให้ลูปเกนของวงจรมีค่าเป็นหนึ่งพอดีจึงเกิดการ ให้กำเนิดสัญญาณจะพบว่าวงจรกำเนิดสัญญาณได้ความถี่ไม่สูงนัก

ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้เกิดความคิดในการพัฒนาวงจรเลื่อนเฟส และวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ในบทต่อๆไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

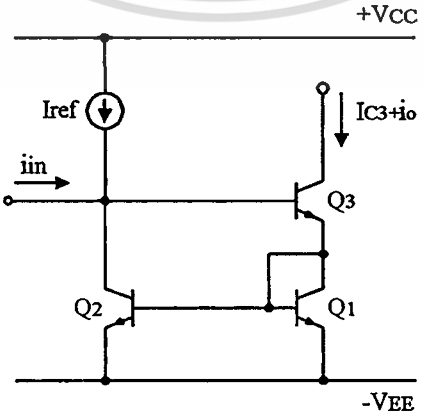
คุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแส

บทนำ

วงจรสะท้อนกระแสมีหลายแบบ แต่ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวงจรสะท้อนกระแสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เท่านั้น ประกอบด้วยวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว หรือที่นิยมเรียกว่าแบบ Wilson (Wilson Current Mirror) วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว วงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้า (Differential Current Mirror) คุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแสที่จะพิจารณาคือ อัตราขยายกระแส (Current Gain) โดยจะทำการพิจารณาเฉพาะวงจรสะท้อนกระแสที่มีอัตราขยายกระแสเป็นหนึ่งเท่านั้น

วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว หรือแบบ Wilson

ภาพที่ 9



แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง</u>

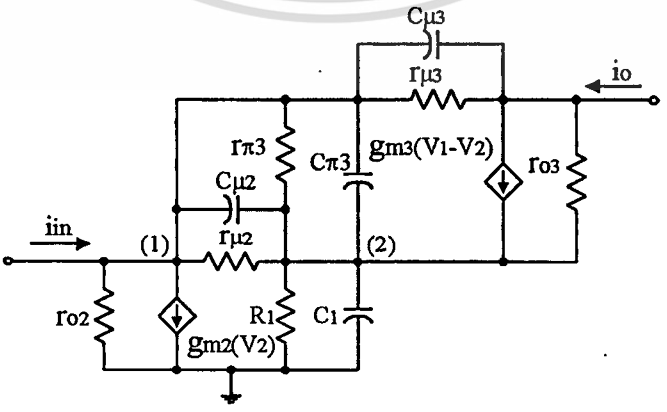
ทรานซิสเตอร์ Q_1 ถูกต่อในลักษณะของไดโอด โดยการต่อขาเบสกับขาคอลเลคเตอร์เข้าด้วยกันทำให้แรงดันตกคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับเบส (V_{CB}) มีค่าเป็นศูนย์ ในลักษณะนี้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ยังอยู่ในช่วงการทำงานปกติ (Forward Active Region) ทั้งนี้เพราะแรงดันตกคร่อมขาคอลเลคเตอร์อีมิตเตอร์ (V_{CE}) มีค่าเพียง V_{BE} เดียว จากแรงดันตกคร่อมเบสอิมิตเตอร์ (V_{BE}) ก็เพียงพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้แล้ว เมื่อให้ทรานซิสเตอร์ Q_1, Q_2 และ Q_3 มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น [ภาคผนวก ข]

$$I_{C3} = I_{ref}\left[1-\frac{2}{\beta_F^2+2\beta_F+2}\right] \tag{3.1}$$

<u>คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ</u>

เมื่อพิจารณาวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว ในลักษณะของสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal) ซึ่งจากภาพที่ 9 สามารถเขียนเป็นลักษณะของสัญญาณขนาดเล็กได้ดังภาพที่ 10

ภาพที่ 10



แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสแบบ Wilson

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28915

จากภาพที่ 10 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการอัตราขยายกระแสได้เป็น [ภาคผนวก ข]

$$A_i = \frac{I_o}{I_{in}} = \left\{ 1 + \frac{2}{g_m + \frac{2}{r_\pi}}\left(c_\pi - c_{\mu 3}\right)s - \frac{c_{\mu 3}}{g_m\left(g_m + \frac{2}{r_\pi}\right)}\left(3c_\pi + 2_{\mu 2}\right)s^2 \right\} /$$

$$\left\{ 1 + \frac{2}{g_m + \frac{2}{r_\pi}}\left(c_\pi c_{\mu 2} c_{\mu 3}\right)s + \frac{1}{g_m\left(g_m + \frac{2}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(2c_\pi + 2c_{\mu 2} + 3c_{\mu 3}\right) + c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2 \right\} \quad (3.2)$$

โดยที่

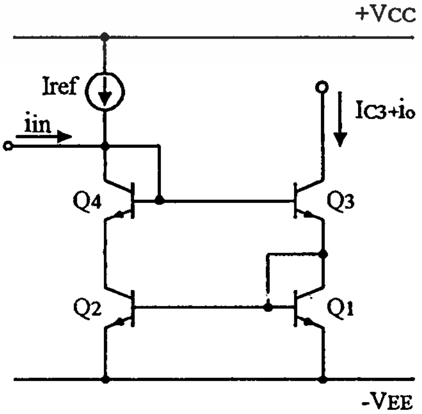
$$R_1 = r_{\pi 1} \,//\, \frac{1}{g_{m1}} \,//\, r_{o1} \,//\, r_{\pi 2}$$

$$C_1 = c_{\pi 1} + c_{\pi 2}$$

<u>วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว</u>

จากภาพที่ 11 วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ได้ทำการปรับปรุงจากวงจรสะท้อนกระแสแบบ Wilson เพื่อช่วยลดผลของ base width modulation ที่มีผลต่อวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว โดยการเพิ่ม Q_4 เข้าไปในวงจร

ภาพที่ 11



แสดงวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

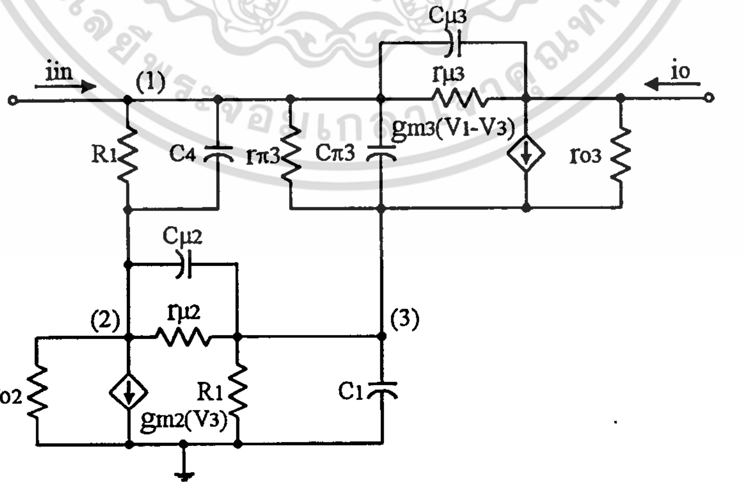
<u>คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง</u>

วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว สร้างได้โดยการเพิ่มทรานซิสเตอร์ Q_4 เข้าไประหว่างขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_3 ในวงจรสะท้อนกระแสแบบ Wilson ซึ่งยังผลให้แรงดันตกคร่อมขาคอลเลคเตอร์กับเบส (V_{CB}) ของทรานซิสเตอร์ Q_1 กับทรานซิสเตอร์ Q_2 มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น และทรานซิสเตอร์ที่เพิ่มเข้ามายังไม่มีผลต่อสมการของกระแสตรงอีกด้วย ซึ่งจะได้สมการของการขยายกระแสเป็น [ภาคผนวก ค]

$$I_{c3} = I_{ref}\left[1-\frac{2}{\beta_F^2+2\beta_F+2}\right] \tag{3.3}$$

<u>คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ</u>

ภาพที่ 12



แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายกระแสไฟสลับของวงจรสัญญาณขนาดเล็ก เป็นดังนี้ [ภาคผนวก ค]

$$A_i = \frac{i_o}{i_{in}} = \left\{ 1 + \frac{1}{g_m\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(2c_{\mu 2} + 2c_\pi - 5c_{\mu 3}\right) - 4c_{\mu 3}c_{\mu 2}\right]s^2 + \frac{1}{g_m 3r_\pi}\right.$$

$$\left.\left(2c_{\mu 2} - 2c_{\mu 3} + 3c_\pi\right)s + c_\pi\frac{c_{\mu 3}}{g_m^2\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left(4c_{\mu 2} + 3c_\pi\right)s^3\right\} /$$

$$\left\{ 1 + \frac{1}{g_m\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(4c_\pi + 6c_{\mu 2} + 5c_{\mu 3}\right)s^2 + 4c_{\mu 3}c_{\mu 2}\right] + \frac{1}{\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left(3c_\pi + \right.\right.$$

$$\left.\left. 2c_{\mu 3} + 2c_{\mu 2}\right)s + \frac{c_\pi}{g_m^2\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(2c_\pi + 3c_{\mu 3} + 4c_{\mu 2}\right) + 4c_{\mu 3}c_{\mu 2}\right]s^3\right\} \quad (3.4)$$

โดยที่

$$R_1 = r_{\pi 1} \;//\; \frac{1}{g_{m1}} \;//\; r_{o1} \;//\; r_{\pi 2}$$

$$C_1 = c_{\pi 1} + c_{\pi 2}$$

$$R_4 = r_{\pi 4} \;//\; \frac{1}{g_{m4}} \;//\; r_{o4}$$

$$C_1 = c_{\pi 4}$$

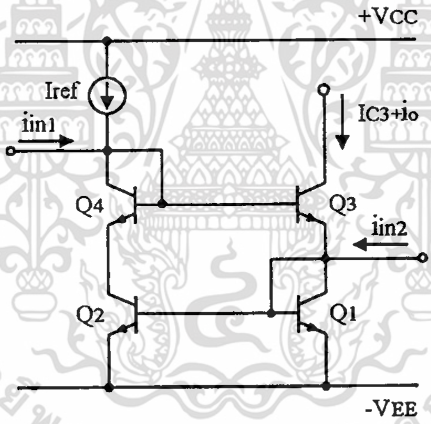
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>วงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว</u>

<u>(Differential Current Mirror)</u>

วงจรจะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ต่อกันเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว แต่เพิ่มจุดสัญญาณเข้าที่สอง ที่จุดสัญญาณเข้าของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 2 ตัว (Q_1, Q_2) ดังภาพที่ 13

ภาพที่ 13



แสดงวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว

<u>คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง</u>

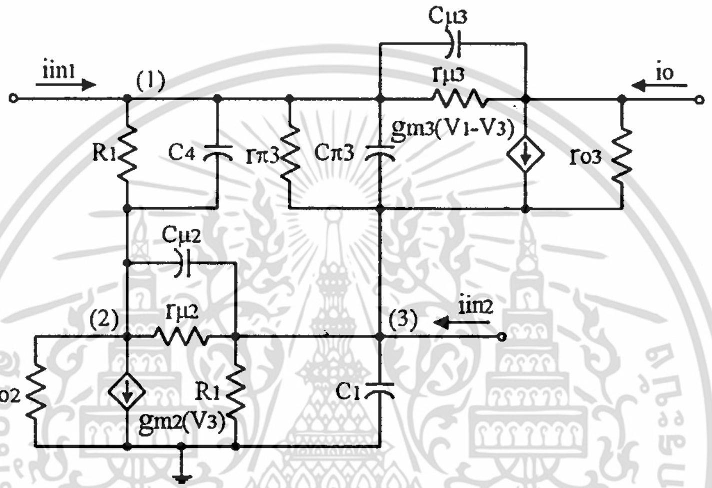
คุณสมบัติของวงจรจะเหมือนกับวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว เพียงแต่จะไม่มีกระแสไฟตรงจากภายนอกเข้าที่จุดสัญญาณเข้าที่สอง และสมการกระแสไฟตรงจะเป็น [ภาคผนวก ง]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{c3} \quad = \quad I_{ref}\left[1 - \frac{2}{\beta_F^2 + \beta_F + 2}\right] \qquad (3.5)$$

<u>คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ</u>

ภาพที่ 14



แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว

จากวงจรเสมือนของทรานซิสเตอร์ จึงนำมาเขียนเป็นวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ในภาพที่ 14 แล้วต่อจุดสัญญาณออกลงกราวด์เพื่อใช้หาอัตราขยายกระแสของวงจร ซึ่งอัตราขยายกระแสของ $\frac{i_o}{i_{in1}}$ จะเท่ากับสมการที่ (3.4) ส่วนอัตราขยายกระแส $\frac{i_o}{i_{in2}}$ จะได้เป็น [ภาคผนวก ง]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{i2} = \frac{i_o}{i_{in2}} = -\left\{g_m^3 + g_m^2 + g_m\left(g_m c_\pi + \frac{c_{\mu 3}}{r_\pi}\right)s + \left[g_m c_{\mu 3}\left(2c_{\mu 2} + c_\pi\right) + \right.\right.$$

$$\left.\left.\frac{2c_{\mu 3}}{r_\pi}\left(c_{\mu 2} + c_\pi\right)\right]s^2 + c_\pi c_{\mu 3}\left(2c_{\mu 2} + c_\pi\right)s^3\right\} /$$

$$\left\{g_m^3 + \frac{3g_m^2}{r_\pi} + g_m^2\left(2c_{\mu 2} + 2c_{\mu 3} + 3c_\pi\right)s + g_m\left[c_\pi\left(6c_\mu + 5c_{\mu 3} + 4c_\pi\right)s^2 + \right.\right.$$

$$\left.\left.4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right] + c_\pi\left[c_\pi\left(4c_{\pi 2} + 3c_{\mu 3} + 2c_\pi\right) + 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^3\right\} \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณาอัตราขยายกระแสที่ความถี่ต่ำจากสมการที่ (3.6) จะได้

$$A_{i2} = -\left(\frac{g_m + \frac{1}{r_\pi}}{g_m + \frac{3}{r_\pi}}\right)$$

$$= -\left(1 - \frac{2}{g_m r_\pi + 3}\right) \quad (3.7)$$

และถ้าให้ $r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$, $i_o = A_{i1}i_{in1} + A_{i2}i_{in2}$ **และจากสมการที่ (3.4) เมื่อพิจารณาอัตราขยายกระแสที่ความถี่ต่ำเป็น**

$$i_o = i_{in1} - i_{in2} + \frac{2}{\beta + 3}i_{in2} \quad (3.8)$$

และกำหนดให้ $\beta \geq 200$ **จะได้**

$$i_o = i_{in1} - i_{in2} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

จากสมการที่หาได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น พอที่จะสรุปคุณสมบัติของอัตราขยายกระแสได้ว่า วงจรสะท้อนกระแสแบบ Wilson (ภาพที่ 9) และแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว (ภาพที่ 10) มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันมาก เพียงแต่อัตราขยายกระแสของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากกว่าแบบ Wilson สำหรับวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้าแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว (ภาพที่ 14) จะมีอัตราขยายกระแสไฟตรงเหมือนกับวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว และอัตราขยายกระแสทางด้านไฟสลับของกระแสออกต่อกระแสเข้าที่จุดสัญญาณเข้าที่สอง มีค่าประมาณ -0.99 ความคลาดเคลื่อนจากหนึ่งประมาณ 1% ดังนั้น ถ้ายอมรับค่าคลาดเคลื่อน 1% จะได้กระแสออก $i_o = i_{in1} - i_{in2}$ เมื่อ i_{in1} และ i_{in2} คือกระแสเข้าที่จุดสัญญาณเข้าที่หนึ่งและสอง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

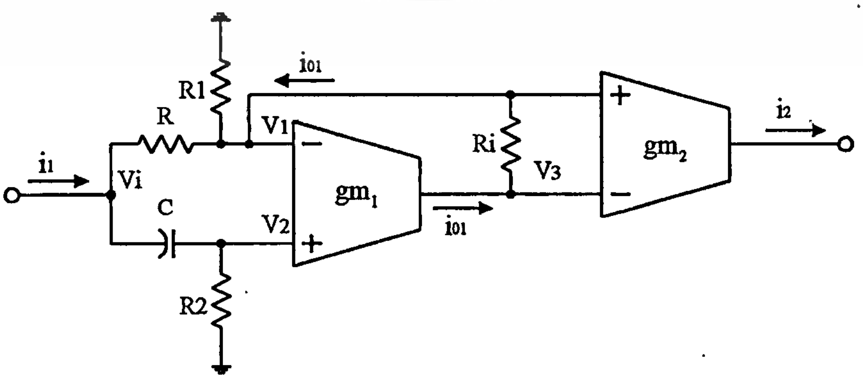
วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด

บทนำ

จากบทที่ 2 จะเห็นว่าวงจรความถี่ผ่านตลอดจะทำงานในลักษณะของแรงดัน ซึ่งผลตอบสนองทางด้านความถี่ของวงจรค่อนข้างจะจำกัด ในบทนี้จะแสดงถึงวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดโดยใช้โอทีเอ (OTA) 2 ตัว และอุปกรณ์พาสซีฟอีก 4 ตัว ซึ่งประกอบด้วยความต้านทาน 2 ตัว และตัวเก็บประจุ 2 ตัว รวมทั้งอิมพีแดนซ์ทางเอาท์พุทของวงจรยังมีค่าสูงอีกด้วย นอกจากนี้วงจรยังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่าแบบเก่า จากผลของการทดลองจะพบว่าวงจรสามารถเลื่อนเฟสได้จาก 0° ถึง -180° หรือ 180° ถึง 0° และอัตราขยายของวงจรจะมีค่าเป็นหนึ่งตลอดย่านการเลื่อนเฟสอีกด้วย

บทวิเคราะห์วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด

ภาพที่ 15



แสดงวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดและความแตกต่างของสัญญาณเอาท์พุทต่ออินพุท จะเปลี่ยนแปลงจาก 0° ถึง -180°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 15 จะกำหนดให้อินพุทอิมพีแดนซ์ของโอทีเอมีค่าเป็นอินฟินิตี้ (Infinity) โดยวงจรประกอบด้วยตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่กำหนดองศาการเลื่อนเฟส นอกจากนี้ยังประกอบด้วยตัวต้านทาน R_1, R_2, R_i และโอทีเออีกจำนวน 2 ตัว โดยกำหนดให้ i_1 คือกระแสที่ไหลเข้าวงจร i_{01} คือกระแสที่ไหลออกจากเอาท์พุทของโอทีเอ g_{m1} และ i_2 คือกระแสที่ไหลออกจากวงจร ในการพิจารณาวิเคราะห์วงจร จะเริ่มจาก i_2 ดังนี้

$$i_2 \quad g_{m2}V_{i2} \tag{4.1}$$

$$i_2 \quad g_{m2}(V_1 - V_3) \tag{4.2}$$

$$i_2 = -g_{m2} i_{01} R_i \tag{4.3}$$

$$\frac{i_2}{i_{01}} = -g_{m2} R_i \tag{4.4}$$

จากนั้นจะทำการหาทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นของกระแส i_2/i_1 โดยวิธีของ node voltage ที่ส่วนหน้าของวงจร

node ❷ ;

$$\frac{CsV_i}{1 + R_2Cs} + \frac{V_i - V_1}{R} = -i_1 \tag{4.5}$$

node ❶ ;

$$\frac{V_1 - V_i}{R} + \frac{V_1}{R_1} = i_{01} \tag{4.6}$$

จากสมการที่ (4.4) ถ้ากำหนดให้ $g_{m2}R_i = 1$ แล้ว จะได้ว่า

$$i_2 = -i_{01} \tag{4.7}$$

นำสมการที่ (4.7) แทนลงในสมการที่ (4.6) ได้เป็น

$$\frac{V_1 - V_i}{R} + \frac{V_1}{R_1} = i_2 \tag{4.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (4.5) และสมการที่ (4.8) มาจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{Cs}{1+R_2Cs}+\frac{1}{R}\right)V_i-\frac{V_1}{R} = -i_1 \tag{4.9}$$

$$\frac{-V_i}{R}+\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R}\right)V_1 = i_2 \tag{4.10}$$

แก้สมการที่ (4.9) และสมการที่ (4.10) โดยใช้วิธีดีเทอร์มิแนนท์ จะได้

$$\Delta = \left(\frac{Cs}{1+R_2Cs}+\frac{1}{R}\right)\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-\frac{1}{R^2} \tag{4.11}$$

$$V_i = \frac{\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-i_1+\frac{i_2}{R}}{\Delta} \tag{4.12}$$

$$V_1 = \frac{\left(\frac{Csi_2}{1+R_2Cs}-\frac{i_1}{R}\right)}{\Delta} \tag{4.13}$$

จากภาพที่ 15

$$i_{01} = \frac{V_3-V_1}{R_i} \tag{4.14}$$

$$i_{01} = gm_1(V_2-V_1) \tag{4.15}$$

จากสมการที่ (4.7) แทนค่าลงในสมการที่ (4.2) จะได้เป็น

$$-i_{01} = gm_2(V_1-V_3)$$

$$i_{01} = -gm_2(V_1-V_3) \tag{4.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (4.15) เท่ากับสมการที่ (4.16) เป็น

$$-gm_2(V_1 - V_3) = gm_1(V_2 - V_1)$$
$$gm_2V_3 - gm_2V_1 = gm_1V_2 - gm_1V_1$$
$$V_3 = \frac{(gm_2 - gm_1)V_1 + gm_1V_2}{gm_2} \qquad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.17) ให้ $gm_1 = gm_2$ แล้ว

$$V_3 = V_2 \qquad (4.18)$$

นำสมการที่ (4.18) แทนในสมการที่ (4.14) เป็น

$$i_{01} = \frac{V_2 - V_1}{R_i} \qquad (4.19)$$

นำสมการที่ (4.19) เท่ากับสมการที่ (4.15) จะได้

$$\frac{(V_2 - V_1)}{R_i} = gm_1(V_2 - V_1)$$
$$V_2 - V_1 = gm_1R_iV_2 - gm_1R_iV_1$$
$$(1 - gm_1R_i)V_2 = (1 - gm_1R_i)V_1$$
$$V_2 = V_1 \qquad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.12) สามารถหา V_2 ได้เป็น

$$V_2 = \frac{\left[\frac{R_2Cs}{R_2Cs+1}\right].\left[\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R_1}\right)-i_1+\frac{i_2}{R}\right]}{\Delta} \qquad (4.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.20) นำสมการที่ (4.13) และสมการที่ (4.21) มาแทนค่าจะได้

$$\left(\frac{1}{R}-\frac{R_2}{R_1}.Cs\right)i_1 = \frac{RCs+1}{R}.i_2$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1-RCs\beta}{1+RCs} \quad ; \ \beta = \frac{R_2}{R_1}$$

กำหนดให้ $R_1 = R_2$ หรือ $\beta = 1$ จะได้ว่า

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1-RCs}{1+RCs} \tag{4.22}$$

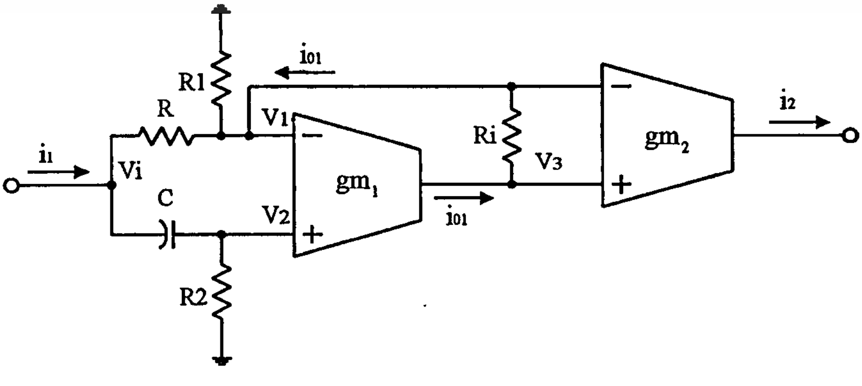
และถ้าให้ $S = j\omega$ และ $T = RC$ จะเป็น

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1-j\omega T}{1+j\omega T} \tag{4.23}$$

จากสมการที่ (4.23) จะสามารถหามุมของการเลื่อนเฟส (θ) ได้เป็น

$$\theta = -2\tan^{-1}\omega T \tag{4.24}$$

ภาพที่ 16



แสดงวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดจาก 180° ถึง 0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 16 สามารถหาค่าของทรานเฟอร์ฟังก์ชั่น ได้ดังต่อไปนี้

$$i_2 = gm_2 R_i i_{01}$$

$$\frac{i_2}{i_{01}} = gm_2 R_i \tag{4.25}$$

ให้พิจารณาที่ node❶ และ node❷ เพื่อแก้สมการและหาดีเทอร์มิแนนท์ก็จะสามารถหาสมการได้เป็น

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{RCs-\beta}{RCs+1} \quad ; \quad \beta = \frac{R_2}{R_1} \tag{4.26}$$

โดยที่ $R_1 = R_2$ จะได้ว่า

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{RCs-1}{RCs+1} \tag{4.27}$$

ถ้ากำหนดให้ $S = j\omega$ และ $T = RC$ จะได้เป็น

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{j\omega T-1}{j\omega T+1} \tag{4.28}$$

จากสมการที่ (4.28) มุมของการเลื่อนเฟสจะเป็น

$$\theta = \pi-2\tan^{-1}\omega T \tag{4.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

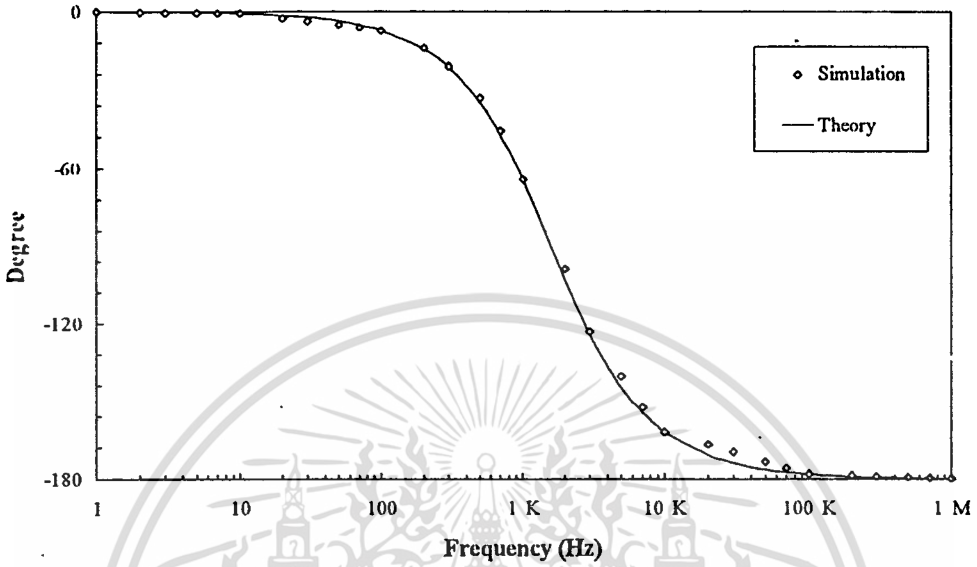
<u>การทดลองและผลการทดลอง</u>

จากภาพที่ 15 จะใช้การเลียนแบบวงจรด้วยโปรแกรม PSpice ซึ่งเลียนแบบวงจรของโอทีเอเบอร์ LM13600 และกำหนดให้ $R_1=R_2 = 8\ k\Omega$ $R = 20\ k\Omega$ $C = 0.005\mu f$ และ $R_i = 52\Omega$ ที่ต้องกำหนดให้ R_i มีค่าเท่ากับ 52Ω เพราะว่าค่าความไม่เป็นเชิงเส้นในวงจรส่วนหน้าของโอทีเอ gm_2 ซึ่งเป็นวงจรขยายความแตกต่างและมีช่วงความเป็นเชิงเส้นที่แคบมาก เพื่อลดผลอันนี้จะต้องกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของศักดาที่ตกคร่อม R_i มีค่าน้อยอยู่ในช่วงเชิงเส้นของโอทีเอgm_2 ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดค่า R_i ให้มีค่าน้อย รวมทั้งให้สอดคล้องกับสมการที่ (4.7) ในที่นี้จะกำหนดให้กระแสไบอัสโอทีเอ 2 (gm_2) มีค่าเป็น $1000\mu A$ เนื่องจากถูกกำหนดโดยสมการที่ (4.4) ส่วนโอทีเอ 1 (gm_1) จะกำหนดกระแสไบอัสเป็น $1000\mu A$ เช่นกัน ในภาพที่ 16 ก็จะใช้การเลียนแบบวงจรโดยโปรแกรม PSpice และค่าของอุปกรณ์ต่างๆจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรภาพที่ 15

ผลการทดลองของวงจรภาพที่ 15 จะพบว่าเมื่อป้อนสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้ววัดมุมต่างเฟสของสัญญาณด้านเอาท์พุท (i_2) ปรากฏว่ามีการเลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180° ขณะที่แอมปลิจูดของสัญญาณทางด้านอินพุทเท่ากับทางด้านเอาท์พุทตลอดย่านความถี่ และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีแล้วจะพบว่ามีค่าตรงกัน ส่วนผลการทดลองของวงจรภาพที่ 16 วงจรสามารถเลื่อนเฟสได้เช่นกัน แต่ความแตกต่างของเฟสของสัญญาณทางด้านเอาท์พุทกับทางด้านอินพุทจะเป็นการเปลี่ยนแปลงจาก 180° ถึง 0° รวมทั้งขนาดของแอมปลิจูดของสัญญาณด้านอินพุทมีค่าเท่ากับด้านเอาท์พุทตลอดย่านความถี่ และวงจรยังสามารถทำงานได้ที่ย่านความถี่สูงกว่าวงจรแบบเก่า ซึ่งผลการทดลองได้แสดงไว้ในภาพที่ 17 และ 18 ตามลำดับ

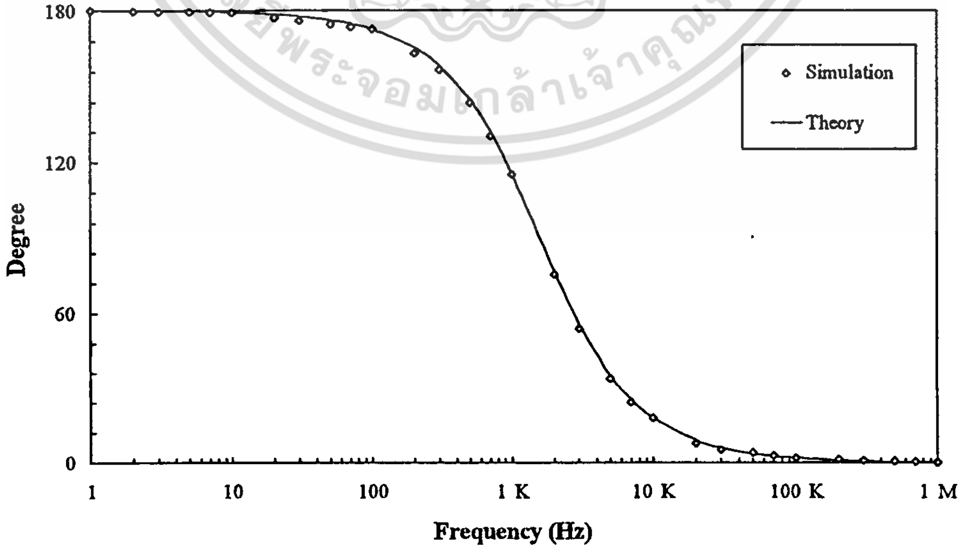
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 17



แสดงผลการทดลองของวงจรเลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180°

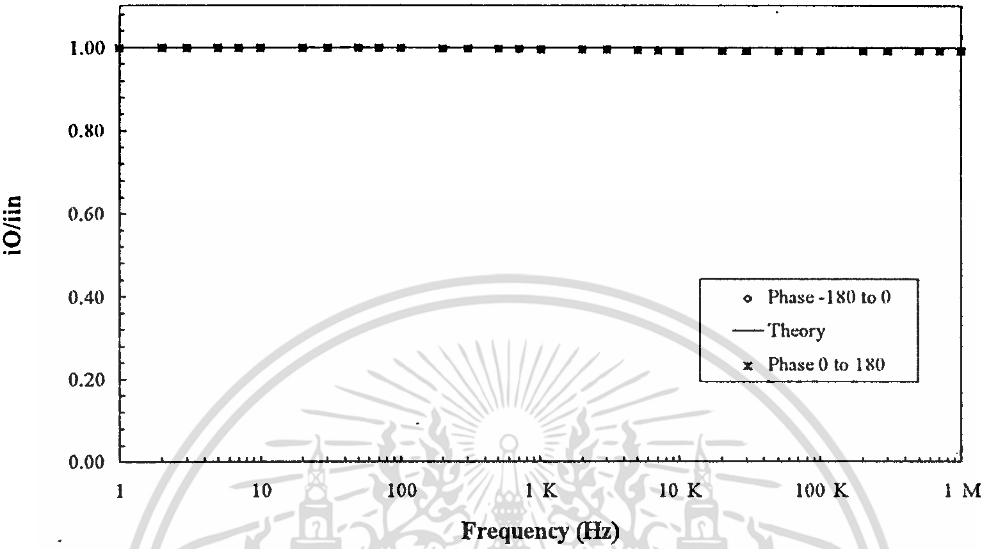
ภาพที่ 18



แสดงผลการทดลองของวงจรเลื่อนเฟสจาก 180° ถึง 0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 19



แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณทางด้านเอาท์พุทต่อด้านอินพุท

__บทสรุป__

วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอด ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้แสดงถึงวิธีการวิเคราะห์หาสมการคุณสมบัติของวงจร และผลการทดลองได้ยืนยันถึงความถูกต้องเมื่อเทียบกับผลทางทฤษฎี ซึ่งมุมของการเลื่อนเฟสที่วงจรทำงานได้ สามารถกำหนดได้โดยตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรออสซิเลเตอร์ได้โดยนำมาต่อคาสเคทกัน 2 ช่วง และต่อเข้ากับวงจรขยายกระแสที่มีอัตราขยายกระแสที่เหมาะสม หรืออาจจะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ด้วยวิธีอิเลคทรอนิคส์แทนที่ตัวต้านทาน R วงจรก็สามารถทำงานได้ และใช้กระแสในการปรับค่าการเลื่อนเฟส และคุณสมบัติของวงจรอีกข้อหนึ่งคือ อัตราขยายกระแสอินพุทต่อเอาท์พุทมีค่า ≈ 1 ตลอดย่านการเลื่อนเฟส รวมทั้งอิมพีแดนซ์ของวงจรทางด้านเอาท์พุทมีสูง จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ทำให้วงจรเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในทางปฏิบัติต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์แบบใหม่

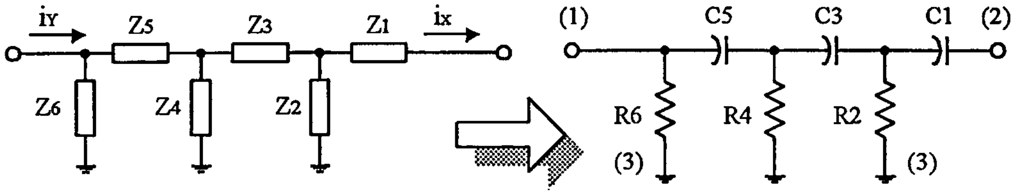
บทนำ

จากบทที่ 2 จะพบว่า วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบเก่านั้นจะทำงานในลักษณะของแรงดันโดยวงจรจะประกอบด้วยอาร์-ซีเป็นเน็ทเวิร์คย้อนกลับและโอเปอร์เรชั่นแนลแอมปลิไฟเออร์ ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายและกลับเฟส ทำให้อัตราการขยายภายในลูปมีค่าเป็นหนึ่งและเฟสของสัญญาณรวมกันมีค่าเป็นศูนย์ วงจรจึงสามารถให้กำเนิดสัญญาณรูปซายน์ได้

ในบทนี้จะแสดงถึงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบใหม่ ซึ่งจะอาศัยหลักการของการเลื่อนเฟสในลักษณะของกระแสโดยจะใช้อาร์-ซีเน็ทเวิร์ค และอาศัยวงจรสะท้อนกระแสกับวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างเป็นวงจรขยายและกลับเฟส เพื่อให้อัตราการขยายภายในลูปมีค่าเป็นหนึ่งและเฟสของสัญญาณรวมกันมีค่าเป็นศูนย์ วงจรจึงสามารถกำเนิดสัญญาณซายน์ได้ ซึ่งความถี่ในการออสซิเลทสูงกว่าแบบเก่าและค่าเซ็นซิติวิตี้ของวงจรมีค่าต่ำอีกด้วย

บทวิเคราะห์วงจรเน็ทเวิร์ค

ภาพที่ 20



แสดงวงจรพาสซีฟเน็ทเวิร์ค B(s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 20 เป็นวงจรพาสซีฟเน็ทเวิร์ค โดยจะพิจารณาทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นในรูปอัตราส่วนของกระแส ซึ่งจะได้ว่า [ภาคผนวก จ]

$$\frac{i_y}{i_x} = 1+\frac{Z_1}{Z_2}+\frac{Z_3}{Z_4}+\frac{Z_1}{Z_4}+\frac{Z_1}{Z_6}+\frac{Z_5}{Z_6}+\frac{Z_3}{Z_6}+\frac{Z_1Z_3}{Z_2Z_4}+\frac{Z_3Z_5}{Z_2Z_6}+\frac{Z_1Z_5}{Z_4Z_6}+\frac{Z_1Z_5}{Z_2Z_4}+\frac{Z_1Z_3}{Z_2Z_6}+\frac{Z_1Z_3Z_5}{Z_2Z_4Z_6} \quad (5.1)$$

จากสมการที่ (5.1) ถ้ากำหนดให้ $Z_1=\frac{1}{C_1s},\ Z_2=R_2,\ Z_3=\frac{1}{C_3s},\ Z_4=R_4,\ Z_5=\frac{1}{C_5s},\ Z_6=R_6$

ฉะนั้นจะได้สมการของทรานเฟอร์ฟังก์ชั่นเป็น

$$\frac{i_y}{i_x} = 1+\frac{1}{R_2C_1s}+\frac{1}{R_4C_3s}+\frac{1}{R_4C_1s}+\frac{1}{R_6C_1s}+\frac{1}{R_6C_5s}+\frac{1}{R_6C_3s}+\frac{1}{R_2R_4C_1C_5s^2}+$$

$$\frac{1}{R_2R_4C_1C_3s^2}+\frac{1}{R_2R_6C_3C_5s^2}+\frac{1}{R_4R_6C_1C_5s^2}+\frac{1}{R_2R_6C_1C_3s^2}+\frac{1}{R_2R_4R_6C_1C_3C_5s^3} \quad (5.2)$$

และจากสมการของการออสซิเลท [1]

$$AB(s) = 1 \quad (5.3)$$

โดยที่ $B(s) = \frac{i_y}{i_x}$

นำสมการที่ (5.2) แทนลงในสมการที่ (5.3) จะได้ว่า

$$A\{R_2R_4R_6C_1C_3C_5s^3+R_4R_6C_3C_5s^2+R_2R_6C_1C_5s^2+R_2R_6C_3C_5s^2+R_2R_4C_3C_5s^2+$$

$$R_2R_4C_1C_3s^2+R_2R_4C_1C_5s^2+R_6C_3s+R_6C_5s+R_4C_1s+R_2C_3s+R_4C_5s+1\}$$

$$= R_2R_4R_6C_1C_3C_5s^3 \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(A-1)R_2R_4R_6C_1C_3C_5s^3+A\big(R_4R_6C_3C_5s^2+R_2R_6C_1C_5s^2+R_2R_6C_3C_5s^2+ R_2R_4C_3C_5s^2+R_2R_4C_1C_3s^2+R_2R_4C_1C_5s^2+R_6C_3s+R_6C_5s+R_4C_1s+ R_2C_3s+R_4C_5s+1\big) = 0 \quad (5.5)$$

จากสมการที่ (5.5) สามารถแยกส่วนของ real part และส่วนของ imaginary part ได้เป็น

ส่วนของ real part

$$AR_4R_6C_3C_5s^2+AR_2R_6C_1C_5s^2+AR_2R_6C_3C_5s^2+AR_2R_4C_3C_5s^2+AR_2R_4C_1C_3s^2+ AR_2R_4C_1C_5 = -A$$

$$s^2 = -\frac{1}{R_4R_6C_3C_5+R_2R_6C_1C_5+R_2R_6C_3C_5+R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_3+R_2R_4C_1C_5}$$

$$w^2\big(R_4R_6C_3C_5+R_2R_6C_1C_5+R_2R_6C_3C_5+R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_3\big) = 1$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_3C_5R_4R_6+C_1C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_4+C_1C_3R_2R_4+C_1C_5R_2R_4}} \quad (5.6)$$

จากสมการที่ (5.6) เป็นสมการที่กำหนดความถี่ในการออสซิเลท

ต่อมาพิจารณาในส่วนของ imaginary part

$$R_2R_4R_6^3C_1C_3C_5(1-A) = As\big(R_6C_3+R_6C_5+R_4C_1+R_2C_3+R_4C_5\big)$$

$$1-A = A\left(\frac{1}{R_2R_4C_1C_5s^2}+\frac{1}{R_2R_4C_1C_3s^2}+\frac{1}{R_2R_6C_3C_5s^2}+\frac{1}{R_4R_6C_1C_5s^2}+ \frac{1}{R_2R_6C_1C_3s^2}\right)$$

$$1-A = A\left(\frac{R_6C_3+R_6C_5+R_4C_1+R_2C_3+R_4C_5}{R_2R_4R_6C_1C_3C_5s^2}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 = A\left[\frac{\begin{pmatrix}R_6C_3+R_6C_5+R_4C_1+\\R_2C_3+R_4C_5\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}R_4R_6C_3C_5+R_2R_6C_1C_5+R_2R_6C_3C_5+\\R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_3+R_2R_4C_1C_5\end{pmatrix}}{R_2R_4R_6C_1C_3C_5}\right]+A$$

$$-\frac{1}{A}=\frac{R_6C_3}{R_2C_1}+\frac{R_6C_5}{R_2C_1}+\frac{R_4}{R_2}+\frac{C_3}{C_1}+\frac{R_4C_5}{R_2C_1}+\frac{R_6}{R_4}+\frac{R_6C_5}{R_4C_3}+\frac{C_1}{C_3}+\frac{R_2}{R_6}+\frac{C_5}{C_3}+\frac{R_6C_3}{R_4C_1}+$$

$$\frac{R_6C_5}{R_4C_1}+\frac{R_2C_3}{R_4C_1}+\frac{C_5}{C_1}+\frac{C_3}{C_5}+\frac{R_4C_1}{R_6C_5}+\frac{R_4C_5}{R_6C_3}+\frac{R_4}{R_6}+\frac{R_4C_1}{R_6C}+\frac{R_2}{R_6}+\frac{R_4C_3}{R_6C_3}+\frac{C_3}{C_1}+$$

$$\frac{C_5}{C_1}+\frac{R_4}{R_6}+\frac{R_2C_3}{R_6C_1}+\frac{R_4C_5}{R_6C_1}+1 \qquad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.7) เป็นสมการที่กำหนดอัตราขยายของวงจรในการออสซิเลท

ถ้ากำหนดให้ $\frac{1}{C_1s}=\frac{1}{C_3s}=\frac{1}{C_5s}=\frac{1}{Cs}$ และ $R_2=R_4=R_6=R$ (5.8)

นำสมการที่ (5.8) ไปแทนลงในสมการที่ (5.6) และ สมการที่ (5.7) จะได้เป็น

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \qquad (5.9)$$

$$A = \frac{-1}{29} \qquad (5.10)$$

จากผลของ A ที่ได้จากสมการที่ (5.10) จะกำหนดค่าอัตราการขยายของวงจรออสซิเลเตอร์และสมการที่ (5.9) จะกำหนดความถี่ของวงจรที่เกิดการออสซิเลท ต่อมาจะพิจารณาถึงค่าของเซ็นซิติวิตี้ของความถี่เมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ในวงจรพาสซีฟเน็ทเวิร์ค [B(s)] ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_x^{\omega o} = \left(x/\omega o \right) \cdot \frac{\partial \omega o}{\partial x} \tag{5.11}$$

จากสมการที่ (5.11) จะได้ว่า [ภาคผนวก จ]

$$S_{C1}^{\omega o} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+\dfrac{R_4R_6C_3C_5+R_2R_6C_3C_5+R^2R_4C_3C_5}{R_2R_6C_1C_5+R_2R_4C_1C_3+R_2R_4C_1C_5}} \right) \tag{5.12}$$

$$S_{R2}^{\omega o} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+\dfrac{R_4R_6C_3C_5}{R_2R_6C_1C_5+R_2R_6C_3C_5+R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_3+R_2R_4C_1C_5}} \right) \tag{5.13}$$

$$S_{C3}^{\omega o} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+\dfrac{R_2R_6C_1C_5+R_2R_4C_1C_5}{R_4R_6C_3C_5+R_2R_6C_3C_5+R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_3}} \right) \tag{5.14}$$

$$S_{R4}^{\omega o} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+\dfrac{R_2R_6C_1C_5+R_2R_6C_3C_5}{R_4R_6C_3C_5+R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_3+R_2R_4C_1C_5}} \right) \tag{5.15}$$

$$S_{C5}^{\omega o} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+\dfrac{R_2R_4C_1C_3}{R_4R_6C_3C_5+R_2R_6C_1C_5+R_2R_6C_3C_5+R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_5}} \right) \tag{5.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{R6}^{\omega o} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+\frac{R_2R_4C_3C_5+R_2R_4C_1C_3+R_2R_4C_1C_5}{R_4R_6C_3C_5+R_2R_6C_1C_5+R_2R_6C_3C_5}}\right) \tag{5.17}$$

ถ้ากำหนดให้ $C_1=C_3=C_5=C$ และ $R_2=R_4=R_6=R$ แทนลงในสมการที่ (5.12) ถึงสมการที่ (5.17) จะได้

$$S_{C1}^{\omega o} = -\frac{1}{4} \tag{5.18}$$

$$S_{R2}^{\omega o} = -\frac{5}{12} \tag{5.19}$$

$$S_{C3}^{\omega o} = -\frac{1}{3} \tag{5.20}$$

$$S_{R4}^{\omega o} = -\frac{1}{3} \tag{5.21}$$

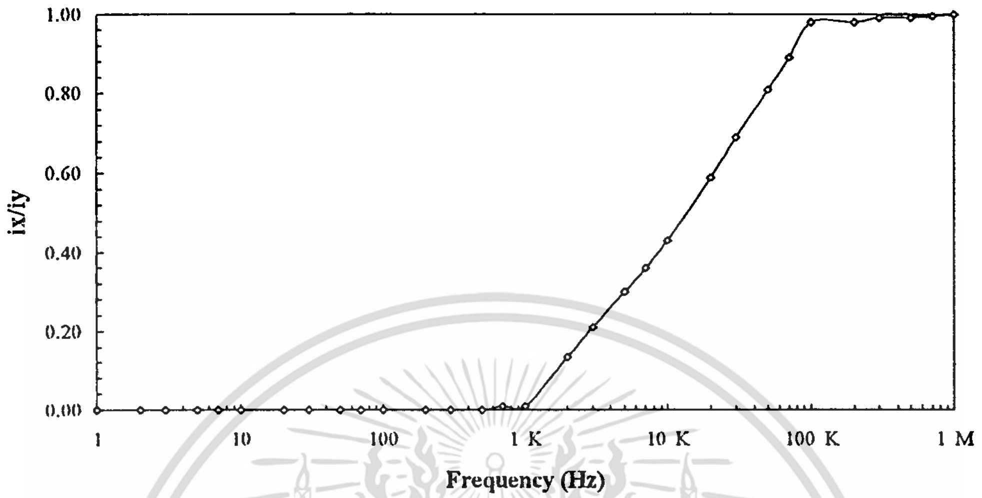
$$S_{C5}^{\omega o} = -\frac{5}{12} \tag{5.22}$$

$$S_{R6}^{\omega o} = -\frac{1}{4} \tag{5.23}$$

จากเน็ทเวิร์ค B(s) ที่ทำการวิเคราะห์ ทำให้เราสามารถหาค่าความถี่ในการออสซิเลทได้และหาค่าของอัตราการขยายของวงจรได้ ต่อไปจะเป็นการหาคุณสมบัติของเน็ทเวิร์คจากภาพที่ 20 จะทำการป้อนกระแสรูปซายน์เข้าที่โหนด (1) และโหนด (3) แล้ววัดสัญญาณกระแสที่โหนด (2) และโหนด (3) ซึ่งสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 21 โดยได้แสดงถึงขนาดของกระแส $\frac{i_y}{i_x}$ และภาพที่ 22 แสดงถึงสัญญาณด้านขาออก ซึ่งจะต่างกันจากสัญญาณด้านขาเข้าเป็น 180° ณ ความถี่ $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$ โดยที่ $R = 1k\Omega, \quad C = 0.01\,\mu f$

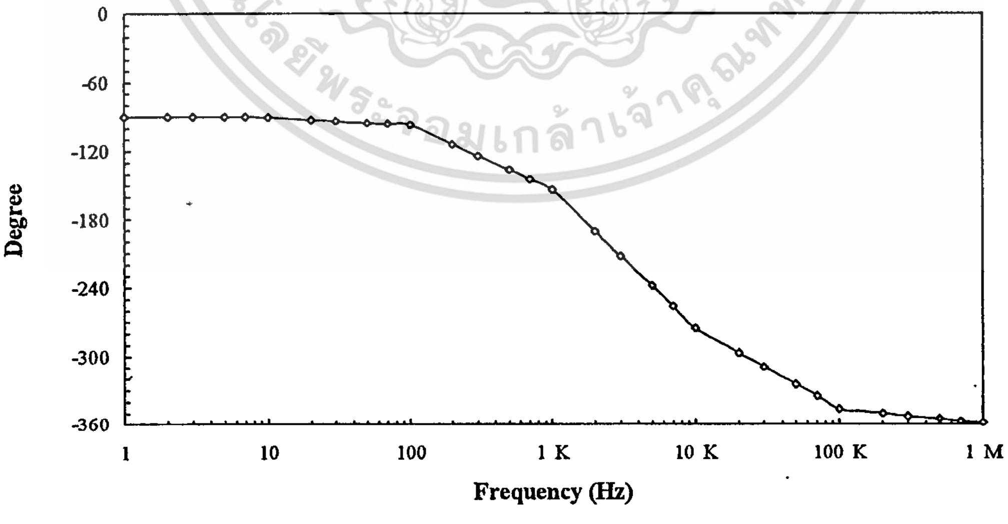
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 21



แสดงอัตราส่วนของกระแส $\frac{i_y}{i_x}$

ภาพที่ 22



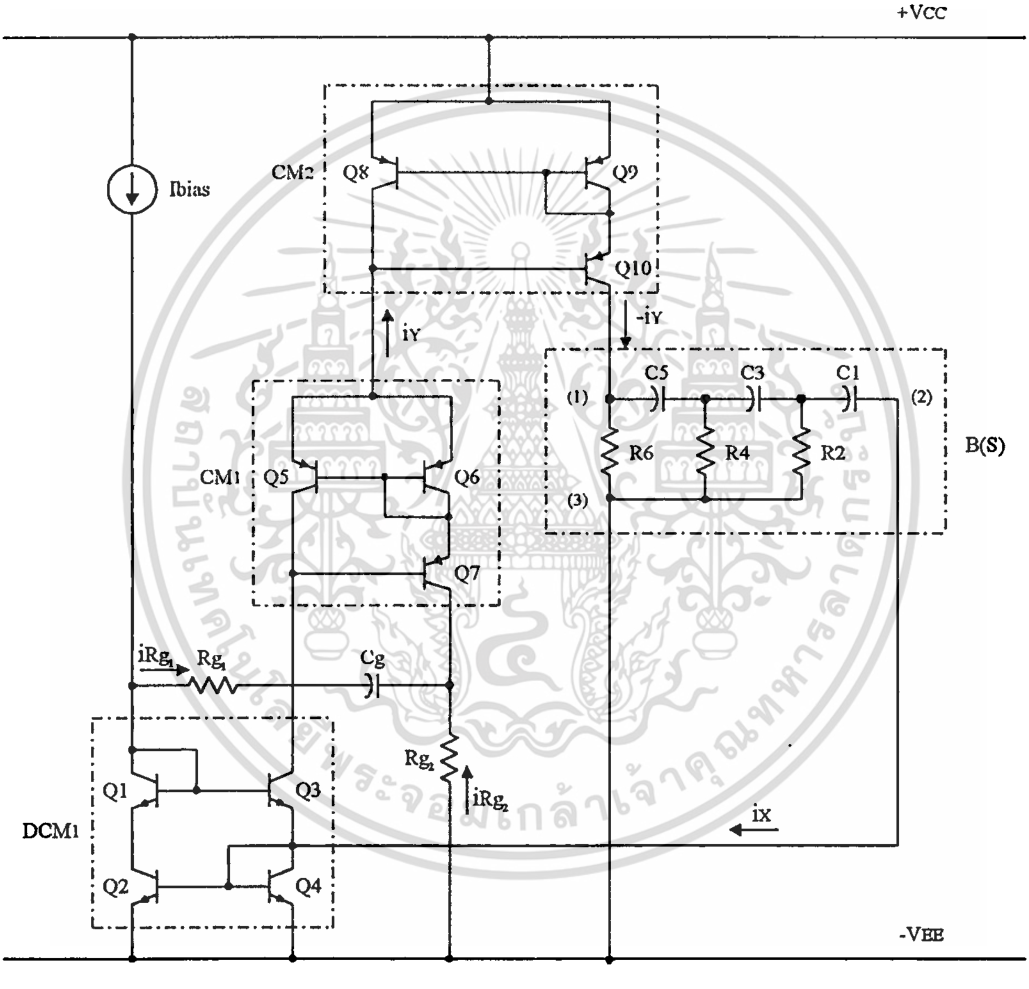
แสดงความแตกต่างของสัญญาณด้านขาเข้าและขาออก ณ ความถี่ $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทวิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของเน็ทเวิร์คแล้ว สามารถนำมาสร้างวงจรได้ดังภาพที่ 23

ภาพที่ 23



แสดงถึงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบใหม่จะประกอบด้วย DCM_1, CM_1, CM_2, Rg_1, Rg_2, Cg และ $B(s)$ ซึ่ง $B(s)$ จะเป็นเน็ทเวิร์คที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน R จำนวน 3 ตัว และตัวเก็บประจุ C อีก 3 ตัว CM_1 และ CM_2 จะเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบวิลสัน [11] ซึ่งมีอัตราการขยายกระแสเป็นหนึ่ง DCM_1 จะเป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบตามผลต่างกระแส [11] ซึ่งได้นำเสนอไปแล้วในบทที่ 3 ตามลำดับ โดยที่ CM_1 และ CM_2 จะใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3906 และ DCM_1 จะใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 *Ibias* เป็นตัวกำหนดค่ากระแสไบอัสให้กับวงจร

เมื่อพิจารณา CM_1, DCM_1, Rg_1, Rg_2, และ Cg จะเป็นการต่อในลักษณะอัตราขยายกระแสทางเอซี [12] และจะพิจารณาไว้ดังต่อไปนี้

$$\frac{i_y}{2} = i_x + iRg_1 \tag{5.24}$$

และจากหลักการของ Current Devider จะได้

$$iRg_1 = \frac{Rg_2}{Rg_1 + Rg_2 + 2r_e + \frac{1}{Cgs}} \cdot \frac{i_y}{2} \tag{5.25}$$

ถ้าให้ $Cg >> 1$ จะพบว่า $\frac{1}{Cgs} \cong 0$

นำสมการที่ (5.24) แทนค่าลงในสมการที่ (5.25) จะได้เป็น

$$\frac{i_y}{i_x} = 2\left(1 + \frac{Rg_2}{Rg_1 + 2r_e}\right) \tag{5.26}$$

แต่ทิศทางของ i_y กลับทางกัน ดังนั้น

$$\frac{i_y}{i_x} = -2\left(1 + \frac{Rg_2}{Rg_1 + 2r_e}\right) \tag{5.27}$$

และในวงจรเราจะใช้ CM_2 เป็นตัวกลับเฟสของสัญญาณให้ครบ 2π

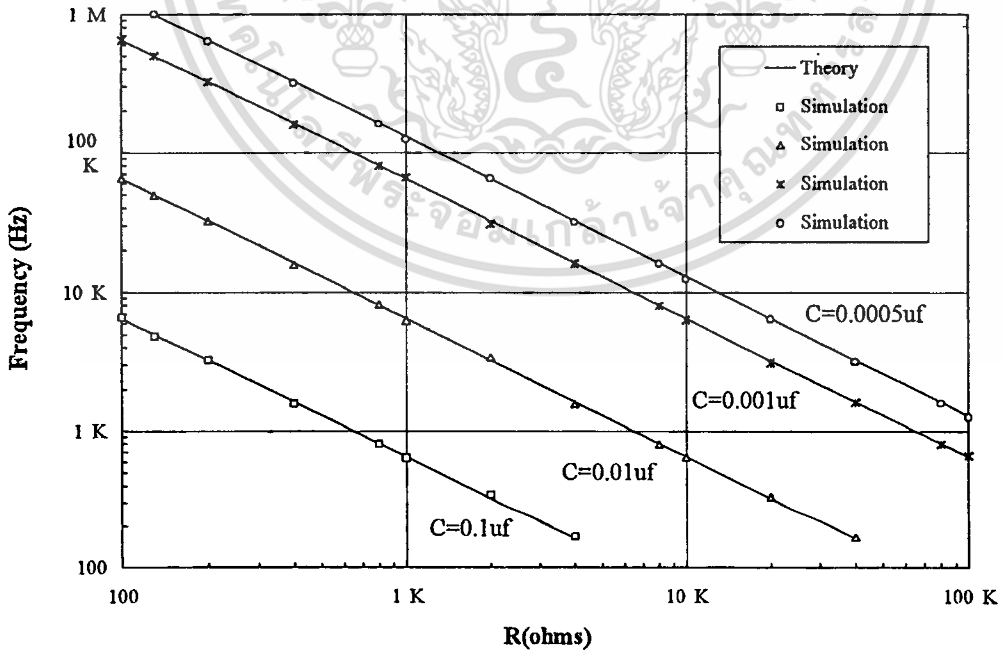
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>การทำงานของวงจรและผลการทดลอง</u>

เริ่มจากการพิจารณาการไหลของกระแสในวงจรส่วนของเน็ทเวิร์ค *B(s)* โดยให้ $-i_y$ ไหลเข้าโหนดที่ (1) และออกจากโหนดที่ (2) เป็น i_x ไหลเข้า DCM_1 ส่วน DCM_1 และ CM_1 ซึ่งต่อกันในลักษณะของวงจรขยายโดยอัตราการขยายกระแสจะกำหนดได้จากสมการที่ (5.10) และสมการที่ (5.27) กระแสที่ไหลออกจาก CM_1 แล้วไหลเข้า CM_2 เป็น i_y และจะไหลออกจาก CM_2 ก็จะครบลูป ซึ่งยังผลให้เฟสของสัญญาณรวมกันเป็นศูนย์พอดี แล้วลูปเกนก็มีค่าเป็นหนึ่งจึงเกิดการออสซิเลทสัญญาณรูปซายน์ได้

ข้อสังเกตุ เมื่อพิจารณาส่วนของเน็ทเวิร์ค *B(s)* จะเห็นได้ว่า กระแสสลับ (AC current) จะสามารถไหลผ่านจากโหนด (1) มาโหนด (2) ได้ ส่วนกระแสตรง (DC current) สามารถแยกกระแสดีซีที่ทางออกและทางเข้าของวงจรโดยเด็ดขาด ในสภาวะนี้เองทำให้เกิดสภาวะการแด้มปิ้งของกระแสสลับซึ่งเป็นการเริ่มต้นของการออสซิเลทนั่นเอง

ภาพที่ 24

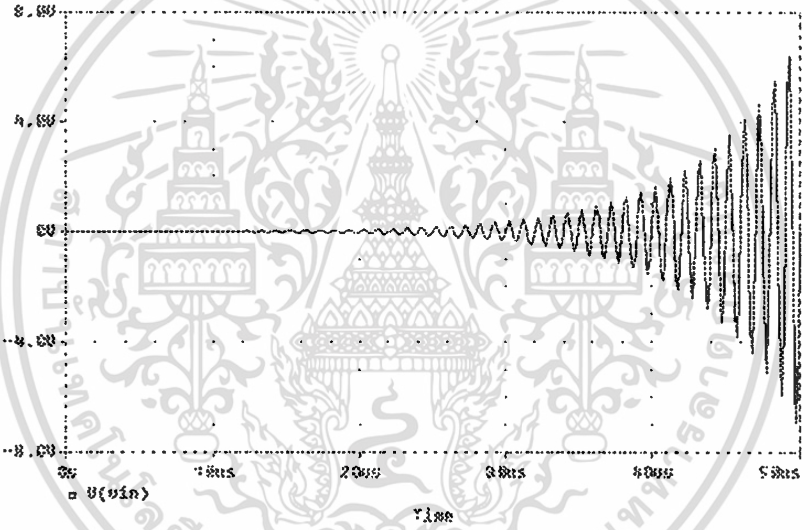


แสดงผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 24 แสดงถึงผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณค่าความถี่ในการออสซิเลทเทียบกับผลการซิมมูเลทจะพบว่า ได้ผลตรงกับที่คาดหมายไว้ และวงจรยังสามารถทำงานได้จนถึงความถี่ประมาณ *1MHz* โดยมีความถี่ในการออสซิเลทเป็น $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$ ซึ่งทำให้สูงกว่าแบบเก่าที่มีการต่อเน็ทเวิร์คแบบเดียวกัน

ภาพที่ 25

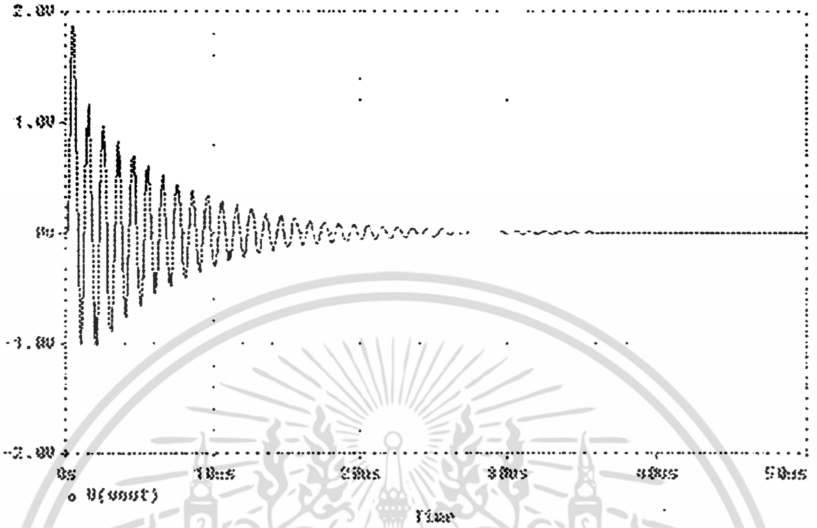


แสดงปรากฏการณ์ Overdamp Oscillation ของวงจรกำเนิดสัญญาณ

จากภาพที่ 25 จะสังเกตุได้ว่า วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ เกิดสภาวะของ Overdamp Oscillation ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ $AB(s) > 1$ หรือลูปเกนการขยายของวงจรมีค่ามากกว่าหนึ่งนั่นเอง ซึ่งก็จะเป็นจุดเริ่มให้วงจรเกิดการออสซิเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 26



แสดงปรากฏการณ์ของ Underdamp Oscillation ของวงจรกำเนิดสัญญาณ

จากภาพที่ 26 จะสังเกตุได้ว่า วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ เกิดสภาวะของ Underdamp Oscillation ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อ $AB(s) < 1$ หรือลูปเกนการขยายของวงจรมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง และสุดท้ายจะยังผลให้วงจรหยุดการออสซิเลท

<u>บทสรุป</u>

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบใหม่ ที่ใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็นวงจรสะท้อนกระแสและวงจรสะท้อนกระแสแบบตามผลต่างกระแส ซึ่งสามารถกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ได้ความถี่สูงกว่าแบบเก่า โดยอาศัยหลักการเลื่อนเฟสของเน็ทเวิร์คเหมือนวงจรแบบเก่า รวมทั้งเซ็นซิติวิตี้ของวงจรมีค่าต่ำทำให้เสถียรภาพของวงจรดี เหมาะที่จะนำมาใช้งานในทางปฏิบัติได้ เพราะเสถียรภาพด้านความถี่ของวงจรไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการขยายกระแสของอุปกรณ์แอคทีฟ แต่ขึ้นอยู่กับค่าผิดพลาดของอุปกรณ์พาสซีฟ ในวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์แบบใหม่นี้ สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายและยังสามารถใช้เป็นหลักการในการพัฒนาต่อไปอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทสรุปผลการวิจัย

วงจรอนาลอกฟังก์ชั่น 2 วงจร ที่ได้เสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้เป็นวงจรอนาลอกฟังก์ชั่นวงจรใหม่ที่ได้ทำการวิจัยและพัฒนาขึ้น การออกแบบวงจรจะใช้หลักการของวงจรรวมและการทำงานของวงจรอนาลอกฟังก์ชั่นทั้ง 2 วงจรอยู่ในรูปของกระแส ความเที่ยงตรงและความแม่นยำของวงจรสามารถที่จะยืนยันได้ด้วยผลการวิเคราะห์ ผลการเลียนแบบการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PSpice วงจรออสซิเลเตอร์แบบใหม่ใช้ไบโพล่าทรานซิสเตอร์เป็นองค์ประกอบสำคัญในวงจร ซึ่งจะต่อกันเป็นวงจรสะท้อนกระแส ส่วนวงจรความถี่ผ่านตลอดโดยใช้โอทีเอ 2 ตัว เป็นอุปกรณ์แอคทีฟ ซึ่งเมื่อพิจารณาภายในของวงจรโอทีเอจะพบว่าประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ล้วนๆ ซึ่งในอนาคตสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ และวงจรยังมีย่านการทำงานที่กว้างกว่าวงจรแบบเก่าอีกด้วย

บทที่ 2 แสดงคุณสมบัติของวงจรแบบเก่า ที่ได้จากการสร้างเลียนแบบวงจรด้วย PSpice และสมการที่ได้จากการวิเคราะห์โหนด รวมทั้งผลของการ Simulation ซึ่งจะพบว่ามีค่าผิดพลาดค่อนข้างมากเมื่อทำงานที่ความถี่สูง

บทที่ 3 แสดงคุณสมบัติของวงจรสะท้อนกระแสแบบต่างๆที่ได้จากสมการการวิเคราะห์โหนด (node analysis)

บทที่ 4 วงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดในลักษณะของกระแสโดยใช้โอทีเอ 2 ตัว แสดงการนำเอาโอทีเอมาทำเป็นวงจรความถี่ผ่านตลอด โดยค่าของการเลื่อนสามารถกำหนดได้จากตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C และวงจรยังสามารถเลื่อนเฟสจาก 0° ถึง -180° และจาก 180° ถึง 0° โดยเพียงแต่สลับขาอินพุทของสัญญาณของ g_{m2} เพียงตัวเดียวเท่านั้น รวมทั้งแอมปลิจูดของสัญญาณทางด้านเอาท์พุท มีค่าคงที่ตลอดย่านความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 แสดงการใช้วงจรสะท้อนกระแสเป็นตัวขยายสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ โดยมีตัวต้านทาน R ตัวเก็บประจุ C เป็นตัวเลื่อนเฟส และกำหนดความถี่ของการกำเนิดสัญญาณ โดยวงจรสามารถให้กำเนิดสัญญาณได้ที่ความถี่สูงกว่าแบบเก่า โดยอาศัยวงจรสะท้อนกระแสและวงจรสะท้อนกระแสแบบผลต่างกระแสเป็นอุปกรณ์พาสซีฟในวงจร และเซ็นซิติวิตี้ของวงจรมีค่าต่ำ

ปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะ

ในวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้กระแสชนิดความถี่ผ่านตลอดในลักษณะของกระแสนั้น จะอาศัยโอทีเอเป็นอุปกรณ์หลักในการทำงานของวงจร ซึ่งเป็นโอทีเอชนิดที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่าเป็นหลักซึ่งยังมีข้อที่ควรจะต้องปรับปรุงอีกสองส่วน คือในส่วนแรกโดยปกติการแปรค่าอัตราขยายของโอทีเอจะมีผลทำให้เกิดกระแสออฟเซ็ทขึ้นที่จุดออกของโอทีเอ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือศักดาออฟเซ็ทที่เกิดขึ้นระหว่างจุดขาเข้า (+) และจุดขาเข้า (-) ของโอทีเออาจไม่เท่ากันตามอุดมคติอันเนื่องมาจากความแตกต่างของกระแสที่ไหลผ่านคู่ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความแตกต่างในตัวโอทีเอและส่วนที่สองจะเห็นค่าอัตราขยาย g_m ของโอทีเอที่มีค่าขึ้นอยู่กับศักดาความร้อน V_T ซึ่งจะให้อัตราขยาย g_m แปรตามอุณหภูมิ ในส่วนของการออกแบบตัววงจรโอทีเอเพื่อลดผลของศักดาออฟเซ็ทและผลของศักดาความร้อน V_T จึงเป็นแนวทางที่จะทำการวิจัยต่อไป

ในวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์แบบใหม่ จะอาศัยวงจรสะท้อนกระแสเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในวงจร แต่จะพบปัญหาว่า วงจรสะท้อนกระแสจะมีกระแสที่ไหลออกจากทางด้านเอาท์พุทของวงจรมีค่าคลาดเคลื่อนจากอินพุทเล็กน้อย เนื่องจากทรานซิสเตอร์ไม่สมพงษ์กัน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเลือกทรานซิสเตอร์ให้สมพงษ์กันและเพิ่มทรานซิสเตอร์เข้าไปในส่วนของวงจรสะท้อนกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กนก สมุทรรัตน์. การประยุกต์ใช้งานวงจรสะท้อนกระแส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534.

กอบชัย เดชหาญ. วงจรที่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้โดยกระแส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2522.

สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์, ศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์ และ พินัย จุลประภา. "วงจรทวินทีออสซิเลเตอร์แบบใหม่." การประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13. เชียงใหม่. หน้า 3-11, 8-9 พฤศจิกายน 2533.

A. Budak. "Passive and active network analysis and systhesis." Honghton mifflin, 1974.

A. Fabre and P. Rochegude. "Current processing circuits with translinear operational current amplifiers." Int. J. Electron., vol.63 (1987) pp 9-28.

A. Sedra and K.C. Smith. "A second generation current conveyor and its application." IEEE Trans. Circuits Syst., vol.17 (august 1968) pp. 1368-1369.

A. Sedra, K.C. Smith and G. Roberts. Spice for microelectronic circuits. Saunders College Publishing, 1992.

B. Wilson. "Differential current-follower and conveyor using new mirror formulation." Electron. Lett., vol.22 (june 1986) pp. 708-710.

B. Wilson. "Current-mirrors, amplifiers and dampers." Wireless World, vol.78 (1981) pp. 47-50.

C. Tomuzou, F.J. Lidgey and C.A. Makris. "Extending voltage-mode op-amps to current-mode performance." Proc. IEE., vol. 137 (april 1990) pp. 166-180.

G.S. Moschytz and A. Caulosens. "A classification of current-mode Single-amplifier biquads based on a voltage-to-current transformation." IEEE Tran. Circuits Syst., vol.41 (february 1994) pp. 151-156.

J.E. Solomon. "The monalithic Op-amps : A tutorial study." IEEE J. Solid-State Circuit, vol.SC-9, no.6, december 1974.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K.C. Smith and A. Sedra. "The current conveyor-a new circuit building block." Proc. IEEE (letters), vol.56 (1968) pp. 1368-1369.

M. Higashimura and Y. Fukui. "Realization of current mode all-pass networks using a current conveyor." IEEE Trans. Circuit Syst., vol.CAS-37 (may 1990) pp. 660-661.

N.A. Shah and S.N. Ahmad. "Electronically tunable OTA based all-pass circuit." Int. J Electron., vol.68 (1990) pp. 963-966.

P.R. Gray and R.G. Meyer. Analysis and design of analog integrated circuits. Wiley, New York, 1984.

P.V. Mohan. "Generation of OTA-C filter structures from active RC filter structures." IEEE Trans. Circuits Syst., vol.37 (may 1990) pp. 656-659.

R.A. Gayakwad. "Op-Amps and Linear Integrated Circuit." Prentice Hall, Inc., 1988.

R. Geiger, P. Allen and N. Strader. VLSI Design techniques for analog and digital circuits, McGRAW-HILL, 1990.

R. Senani. "Novel circuit implemetation of current conveyors using on OA and OTA." Elect. Letts., vol.16 (1980) pp 2-3.

S. Pookaiyaudom, K. Dejhan and C. Watanachaiprateep. "An integrable electronically variable phase shifter." Proc. of IEEE, vol.67, no.1 (january 1979) pp. 183-185.

S. Pookaiyaudom and K. Samootrut. "A differential-current electronically-variable current-mirror phase-shifter." Int. J. Electron., vol.65 (1988) pp. 59-65.

S. Pookaiyaudom, K. Samootrut and W. Kurutach. "Current-mirros RC oscillators." Int. J. Electron., vol.62 (1987) pp. 803-808.

S. Pookaiyaudom, P. Apichonbaucha and others. "Muliple diode constant current sources." IEEE J. Solid-State Circuit., vol.SC-12 (october 1977) pp. 587-588.

S. Pookaiyaudom, W. Surakampontorn and T. Kuhanont. "Integrable Electronically variable general-resistance converter-A versatile active circuit element." IEEE Tran.Circuits Syst., vol.CAS-25, no.6 (june 1978) pp. 344-353.

W. Surakampontorn, S. Jutaviriya and V. Riewruja. "OTA-based electronically tunable voltage-controlled resistance converter." Int. J. Electron., vol.67 (1989) pp. 81-85.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

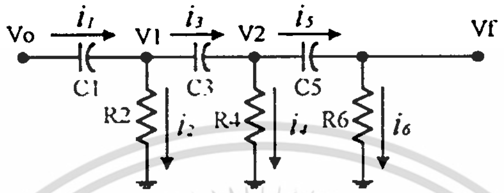
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

บทวิเคราะห์เน็ทเวิร์คของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีเลื่อนเฟสในลักษณะแรงดัน

ภาพที่ 27



แสดงเน็ทเวิร์คของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีเลื่อนเฟส

เพื่อให้ง่ายต่อการหาสมการฟังก์ชั่นถ่ายโอน จะกำหนดให้

$R_2=R_4=R_6=R$ และ $\frac{1}{C_{1s}}=\frac{1}{C_{3s}}=\frac{1}{C_{5s}}=\frac{1}{C_s}$

จากกฎของเคอร์ชอฟ ที่ node V_1 เราจะได้

$$i_1 = i_2+i_3$$

$$\frac{V_0-V_1}{1/Cs} = \frac{V_1}{R}+\frac{V_1-V_2}{1/Cs} \quad (ก.1)$$

$$V_1 = \frac{(V_0+V_2)RCs}{2RCs+1} \quad (ก.2)$$

จากกฎของเคอร์ชอฟที่ node V_2 เราจะได้

$$i_3 = i_4+i_5$$

$$\frac{V_1-V_2}{1/Cs} = \frac{V_2}{R}+\frac{V_2-V_3}{1/Cs} \quad (ก.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า V_1

$$V_1 = \frac{(2RCs+1)V_2}{RCs} - V_f \qquad (ก.4)$$

จากกฎของ Voltage devider จะได้ว่า

$$V_f = \frac{R}{R+1/Cs}V_2 \qquad (ก.5)$$

หรือ

$$V_2 = \frac{(RCs \cdot 1)V_f}{RCs} \qquad (ก.6)$$

แทนค่า V_2 ลงในสมการที่ (ก.2)

$$V_1 = \frac{RCsV_0}{2RCs+1} + \frac{(RCs+1)V_f}{2RCs+1} \qquad (ก.7)$$

แทนค่า V_2 ลงในสมการที่ (ก.4)

$$V_1 = \frac{(2RCs+1)(RCs+1)}{(RCs)(RCs)} - V_f \qquad (ก.8)$$

สมการที่ (ก.7) และสมการที่ (ก.8) มีค่าเท่ากันจะได้

$$\frac{RCsV_0+(RCs+1)V_f}{2RCs+1} = \frac{(2RCs+1)(RCs+1)V_f - R^2C^2s^2V_f}{R^2C^2s^2}$$

$$V_0R^3C^3s^3 = \left(R^3C^3s^3+6R^2C^2s^2+5RCs+1\right)V_f$$

$$\frac{V_0}{V_f} = \frac{R^3C^3s^3}{R^3C^3s^3+6R^2C^2s^2+5RCs+1} \qquad (ก.9)$$

จากสมการของการออสซิเลท

$$AB(s) = 1 \qquad (ก.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ (ก.9) แทนค่าลงในสมการที่ (ก.10)

$$\frac{AR^3C^3s^3}{R^3C^3s^3+6R^2C^2s^2+5RCs+1} = 1$$

$$R^3C^3s^3(A-1)+5RCs = 6R^2C^2s^2+1 \qquad \text{(ก.11)}$$

จากสมการที่ (ก.11) สามารถแยกส่วนของ imaginary และ real ได้

$$6R^2C^2s^2+1 = 0 \qquad \text{(ก.12)}$$

$$s^2 = \frac{-1}{6R^2C^2} \qquad \text{(ก.13)}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{6R^2C^2}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \qquad \text{(ก.14)}$$

$$R^3C^3s^3(A-1)-5RCs = 0 \qquad \text{(ก.15)}$$

$$R^3C^3s^3(A-1) = 5RCs$$

$$R^2C^2s^2(A-1) = 5 \qquad \text{(ก.16)}$$

จากสมการที่ (ก.16) นำสมการที่ (ก.13) ไปแทนค่า

$$-\frac{R^2C^2(A-1)}{6R^2C^2} = 5$$

$$A = -29 \qquad \text{(ก.17)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (ก.14) และสมการที่ (ก.17)

ความถี่ในการออสซิเลท $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$

เงื่อนไขในการออสซิเลท $A = -29$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

บทวิเคราะห์วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว

จากภาพที่ 9 เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว ซึ่งสามารถหาคุณสมบัติได้ดังนี้

คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง

กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีคุณสมบัติเหมือนกัน จากภาพที่ 9 หากระแส I_{E3} ออกจากขาอิมิตเตอร์ของ Q_3 คือ

$$I_{E3} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1}\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right) \qquad (ข.1)$$

ดังนั้น กระแสคอลเลคเตอร์ของ Q_3 คือ

$$I_{C3} = \left(\frac{\beta_F}{\beta_F+1}\right)I_{E3} = I_{C1}\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right)\left(\frac{\beta_F}{\beta_F+1}\right) \qquad (ข.2)$$

จัดสมการที่ (ข.2) ใหม่เป็น

$$I_{C1} = I_{C3}\left[\frac{1}{\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right)\left(\frac{\beta_F}{\beta_F+1}\right)}\right] \qquad (ข.3)$$

คิดกระแสไฟตรงที่เบสของ Q_3

$$I_{C2} = I_{ref} - \frac{I_{C3}}{\beta_F} \qquad (ข.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ $I_{C1} = I_{C2}$ ดังนั้นสมการที่ (ข.3) เท่ากับสมการที่ (ข.4) และแก้สมการได้เป็น

$$I_{C2} = I_{ref} - \left[1 - \frac{2}{\beta_F^2 + 2\beta_F + 2} \right] \quad \text{(ข.5)}$$

คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ

จากภาพที่ 10 แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 3 ตัว ซึ่งถ้าต่อจุดสัญญาณออกลงกราวด์เพื่อใช้หาอัตราขยายกระแสได้ดังนี้

ใช้วิธีวิเคราะห์โหนด (node analysis) สร้างสมการได้

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{r_{\pi 3}} + \frac{1}{r_{o2}} + \frac{1}{r_{\mu 2}} + \frac{1}{r_{\mu 3}} + \left(c_{\pi 3} + c_{\mu 2} + c_{\mu 3}\right)s & -\left(\frac{1}{r_{\pi 3}} + \frac{1}{r_{\mu 2}} + c_{\pi 3}s + c_{\mu 2}s\right) \\ -\left(\frac{1}{r_{\pi 3}} + \frac{1}{r_{\mu 2}} + c_{\pi 3}s + c_{\mu 2}s\right) & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_{\pi 3}} + \frac{1}{r_{o3}} + \frac{1}{r_{\mu 2}} + \left(C_1 + c_{\pi 3} + c_{\mu 2}\right)s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{(1)} \\ V_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{in} - g_{m2}V_{(2)} \\ g_{m3}\left(V_{(1)} - V_{(2)}\right) \end{bmatrix}$$

ตัดเทอมที่มีผลต่อสมการน้อย และย้ายเทอมทางขวามือที่ขึ้นกับแรงดันโหนดต่างๆมาทางซ้ายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s & -\left(-g_{m2}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+\frac{1}{r_{\mu 2}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right) \\ -\left(g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right) & g_{m3}+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+C_1 s+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{(1)} \\ V_{(2)} \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} i_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{ข.6}$$

$$\Delta = \left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s\right)\left(g_{m3}+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+C_1 s+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)$$
$$-\left(g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)\left(-g_{m2}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)$$

$$\Delta = \left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s\right)g_{m3}+\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s\right)\left(\frac{1}{R_1}\right)$$
$$+\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s\right)\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}\right)+\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s\right)c_1 s$$
$$+\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s\right)c_{\pi 3}s+\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s+c_{\mu 3}s\right)c_{\mu 2}s$$
$$+\left(g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)g_{m2}-\left(g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}\right)$$
$$-\left(g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)c_{\pi 3}s-\left(g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)c_{\mu 2}s$$

$$\Delta = g_{m2}g_{m3}+\frac{1}{R_1 r_{\pi 3}}+\frac{g_{m2}}{r_{\pi 3}}$$
$$+\left[g_{m3}c_{\mu 3}+\frac{1}{R_1}\left(c_{\pi 3}+c_{\mu 2}+c_{\mu 3}\right)+\frac{1}{r_{\pi 3}}\left(C_1+c_{\mu 3}\right)+g_{m2}\left(c_{\pi 3}+c_{\mu 2}\right)\right]s$$
$$+\left[c_1\left(c_{\pi 3}+c_{\mu 2}+c_{\mu 3}\right)+c_{\pi 3}c_{\mu 3}+c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2 \tag{ข.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 10 แทนค่า $\frac{1}{R_1} = g_{m1}+\frac{1}{r_{\pi 1}}+\frac{1}{r_{\pi 2}}$ และ $C_1 = c_{\pi 3}+c_{\pi 2}$ ลงในสมการที่ (ข.7)ได้

$$\begin{aligned}\Delta = \; & g_{m2}g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}(g_{m1}+g_{m2})+\frac{1}{r_{\pi 3}}\left(\frac{1}{r_{\pi 1}}+\frac{1}{r_{\pi 2}}\right)+\Big[g_{m3}c_{\mu 3}+g_{m1}(c_{\pi 3}+c_{\mu 2}+c_{\mu 3}) \\ & +\left(\frac{1}{r_{\pi 1}}+\frac{1}{r_{\pi 2}}\right)(c_{\pi 3}+c_{\mu 2}+c_{\mu 3})+\frac{1}{r_{\pi 3}}(c_{\pi 1}+c_{\pi 2}+c_{\mu 3})+g_{m2}(c_{\pi 3}+c_{\mu 2})\Big]s+ \\ & \left[(c_{\pi 1}+c_{\pi 2})(c_{\pi 3}+c_{\mu 2}+c_{\mu 3})+c_{\pi 3}c_{\mu 3}+c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2\end{aligned} \quad (ข.8)$$

เพื่อให้สมการดูง่ายขึ้นจะหาค่าประมาณของ Δ จากสมการที่ (ข.8) เนื่องจาก I_C ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นคิดว่า g_m, r_π และ c_π ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากัน คือ

$$\begin{aligned} g_{m1} &\approx g_{m2} \approx g_{m3} = g_m \\ r_{\pi 1} &\approx r_{\pi 2} \approx r_{\pi 3} = r_\pi \\ c_{\pi 1} &\approx c_{\pi 2} \approx c_{\pi 3} = c_\pi \end{aligned} \quad (ข.9)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (ข.8) ได้

$$\begin{aligned}\Delta = \; & g_m^2+2\frac{g_m}{r_\pi}+\frac{2}{r_\pi^2} \\ & +\left[2g_m(c_\pi+c_{\mu 2}+c_{\mu 3})+\frac{1}{r_\pi}(4c_\pi+2c_{\mu 2}+3c_{\mu 3})\right]s \\ & +\left[c_\pi(2c_\pi+2c_{\mu 2}+3c_{\mu 3})+c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2\end{aligned}$$

ตัดเทอมที่มีผลต่อสมการน้อยได้

$$\begin{aligned}\Delta \approx \; & g_m^2+2\frac{g_m}{r_\pi}+2g_m(c_\pi+c_{\mu 2}+c_{\mu 3})s \\ & +\left[c_\pi(2c_\pi+2c_{\mu 2}+3c_{\mu 3})+c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2\end{aligned} \quad (ข.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (ข.6) หาแรงดันที่โหนด 1 และ โหนด 2 ด้วยวิธี Cramer's rule

$$(1) \quad = \quad \left\{g_{m3}+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+C_1 s+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \qquad (ข.11)$$

$$(2) \quad = \quad \left\{g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \qquad (ข.12)$$

จากภาพที่ 9 กระแสออก (i_o) คือ

$$\begin{aligned} i_o &= g_{m3}\left(V_{(1)}-V_{(2)}\right)-\left(\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\mu 3}s\right)V_{(1)}-\left(\frac{1}{r_{o3}}\right)V_{(2)} \\ &\approx \left(g_{m3}-c_{\mu 3}s\right)V_{(1)}-g_{m3}V_{(2)} \end{aligned} \qquad (ข.13)$$

แทนค่า $V_{(1)}$ จากสมการที่ (ข.11) และ $V_{(2)}$ จากสมการที่ (ข.12) ลงในสมการที่ (ข.13) ได้

$$\begin{aligned} i_o &= \left\{\left(g_{m3}-c_{\mu 3}s\right)\left(g_{m3}+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+C_1 s+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)\right. \\ &\quad \left.-g_{m3}\left(g_{m3}+\frac{1}{r_{\pi 3}}+c_{\pi 3}s+c_{\mu 2}s\right)\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \\ i_o &= \left\{\frac{g_{m3}}{R_1}+\left[g_{m3}C_1-c_{\mu 3}\left(g_{m3}+\frac{1}{R_1}+\frac{1}{r_{\pi 3}}\right)\right]s-c_{\mu 3}\left(C_1+c_{\pi 3}+c_{\mu 3}\right)s^2\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \end{aligned} \qquad (ข.14)$$

แทนค่า $\dfrac{1}{R_1} = g_{m1}+\dfrac{1}{r_{\pi 1}}+\dfrac{1}{r_{\pi 2}}$ และ $C_1 = c_{\pi 1}+c_{\pi 2}$ ลงในสมการที่ (ข.14)

$$\begin{aligned} i_o &= \left\{g_{m1}g_{m3}+g_{m3}\left(\frac{1}{r_{\pi 1}}+\frac{1}{r_{\pi 2}}\right)+\left[g_{m3}\left(c_{\pi 1}+c_{\pi 2}\right)-c_{\mu 3}\left(g_{m3}+g_{m1}+\frac{1}{r_{\pi 1}}+\frac{1}{r_{\pi 2}}+\frac{1}{r_{\pi 3}}\right)\right]s\right. \\ &\quad \left. c_{\mu 3}\left(c_{\pi 1}+c_{\pi 2}+c_{\pi 3}+c_{\mu 2}\right)s\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \end{aligned} \qquad (ข.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ค่าประมาณจากสมการที่ (ข.9) และ Δ จากสมการที่ (ข.10) แทนลงในสมการที่ (ข.15) และตัดเทอมที่มีผลต่อสมการน้อยได้

$$\frac{i_o}{i_{in}} = \left\{g_m^2+2\frac{g_m}{r_\pi}+2g_m\left(c_\pi-c_{\mu3}\right)s-c_{\mu3}\left(3c_\pi+c_{\mu2}\right)s^2\right\}/ \left\{g_m^2+2\frac{g_m}{r_\pi}+2g_m\left(c_\pi+c_{\mu2}+c_{\mu3}\right)s+\left[c_\pi\left(2c_\pi+2c_{\mu2}+3c_{\mu3}\right)+c_{\mu2}c_{\mu3}\right]s^2\right\}$$

ดังนั้น ได้อัตราขยายกระแส *(A_i)* คือ

$$A_i = \frac{i_o}{i_{in}} = \left\{1+\frac{2s}{g_m+\frac{2}{r_\pi}}\left(c_\pi-c_{\mu3}\right)-\frac{c_{\mu3}}{g_m\left(g_m+\frac{2}{r_\pi}\right)}\left(3c_\pi+c_{\mu2}\right)s^2\right\}/\left\{1+\frac{2s}{g_m+\frac{2}{r_\pi}}\left(c_\pi+c_{\mu2}+c_{\mu3}\right)+\frac{1}{g_m\left(g_m+\frac{2}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(2c_\pi+2c_{\mu2}+3c_{\mu3}\right)+c_{\mu2}c_{\mu3}\right]s^2\right\} \quad \text{(ข.16)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

บทวิเคราะห์วงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว

จากภาพที่ 11 เป็นวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ซึ่งสามารถหาคุณสมบัติได้ดังนี้

คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง

กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทุกตัวมีคุณสมบัติเหมือนกัน จากภาพที่ 11 หากระแส I_{E1} และ I_{E2} ออกจากขาอิมิตเตอร์ของ Q_1 และ Q_2 คือ

$$I_{E1} = I_{E2} \tag{ค.1}$$

$$I_{B1}+I_{C1} = I_{B2}+I_{C2} \tag{ค.2}$$

$$I_{E1} = I_{C1}+I_{B1}+I_{B2} \tag{ค.3}$$

เปลี่ยน I_{C1} ให้อยู่ในเทอมของ I_{C3} จะได้

$$I_{E1} = I_{C2}\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right) \tag{ค.4}$$

เมื่อ I_{C2} เท่ากับ I_{E4} ดังนั้น

$$I_{E3} = I_{E4}\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right)$$

$$I_{C3}+I_{B3} = (I_{C4}+I_{B4})\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right) \tag{ค.5}$$

เปลี่ยน I_{C4} ให้อยู่ในเทอมของ I_{ref} ได้

$$I_{C3}+I_{B3} = (I_{ref}-I_{B3})\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right) \tag{ค.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$I_{C3}+I_{B3}+I_{B3}\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right) = I_{ref}\left(1+\frac{2}{\beta_F}\right)$$

$$I_{C3}\left(\beta_F^2+2\beta_F+2\right) = I_{ref}\left(\beta_F^2+2\beta_F\right)$$

$$I_{C3} = I_{ref}\left(1-\frac{2}{\beta_F^2+2\beta_F+2}\right) \qquad (ค.7)$$

<u>คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ</u>

จากภาพที่ 12 แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ซึ่งถ้าต่อจุดสัญญาณออกลงกราวด์เพื่อใช้หาอัตราขยายกระแสได้ดังนี้

ใช้วิธีวิเคราะห์โหนด (node analysis) สร้างสมการได้

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_4}+\frac{1}{r_{p3}}+\frac{1}{r_{m3}}+\left(C_4+c_{p3}+c_{m3}\right)s & -\left(\frac{1}{R_4}+C_4\right)s & -\left(\frac{1}{r_{p3}}+c_{p3}s\right) \\ -\left(\frac{1}{R_4}+C_4 s\right) & \frac{1}{R_4}+\frac{1}{r_{o2}}+\frac{1}{r_{m2}}+\left(C_4+c_{m2}s\right) & -\left(\frac{1}{r_{m2}}+c_{m2}s\right) \\ -\left(\frac{1}{r_{p3}}+c_{p3}s\right) & -\left(\frac{1}{r_{m2}}+c_{m2}s\right) & \frac{1}{R_1}+\frac{1}{r_{m2}}+\frac{1}{r_{o3}}+\frac{1}{r_{p3}}+\left(C_1+c_{p3}+c_{m2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{(1)} \\ V_{(2)} \\ V_{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{in} \\ g_{m2}V_{(3)} \\ g_{m3}\left(V_{(1)}-V_{(3)}\right) \end{bmatrix} \qquad (ค.8)$$

แทนค่า R_1, R_4, C_1, C_4 และตัดเทอมที่มีผลต่อสมการน้อย แล้วย้ายเทอมที่ขึ้นกับแรงดันโหนดมาทางซ้ายของสมการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} g_m+\frac{2}{r_\pi}+(2c_\pi+c_{\mu3})s & -\left(g_m+\frac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) & -\left(\frac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) \\ -\left(g_m+\frac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) & g_m+\frac{1}{r_\pi}+(c_\pi+c_{\mu2})s & -(-g_m+c_{\mu2}s) \\ -\left(g_m+\frac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) & -\left(\frac{1}{r_\pi}+c_{\mu2}s\right) & 2g_m+\frac{3}{r_\pi}+(3c_\pi+c_{\mu2})s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{(1)} \\ V_{(2)} \\ V_{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (ค.9)$$

หาดีเทอมิแนนท์ *(Δ)* ได้

$$\begin{aligned} \Delta = \; & g_m^3+3\frac{g_m^2}{r_\pi}+4\frac{g_m}{r_\pi^2}+\frac{2}{r_\pi^3}+\frac{g_m}{r_\pi r_{\mu2}}+\frac{g_m^2}{r_{\mu2}}-\frac{1}{r_\pi^2 r_{\mu2}}+\Big\{g_m^2(3c_\pi+2c_{\mu2}+2c_{\mu3}) \\ & +g_m\left[\frac{1}{r_\pi}(8c_\pi+6c_{\mu2}+5c_{\mu3})+\frac{1}{r_{\mu2}}(c_\pi-c_{\mu2}+c_{\mu3})\right]+\frac{1}{r_\pi^2}(6c_\pi+4c_{\mu2}+3c_{\mu3}) \\ & -\frac{2}{r_\pi r_{\mu2}}(c_\pi+c_{\mu2})\Big\}s \\ & +\Big\{g_m(4c_\pi^2+6c_\pi c_{\mu2}+5c_\pi c_{\mu3}+4c_\pi c_{\mu3})+\frac{1}{r_\pi}(3c_\pi^2+4c_\pi c_{\mu2}+6c_\pi c_{\mu3} \\ & +4c_{\mu2}c_{\mu3}-c_{\mu2}^2)-\frac{1}{r_{\mu2}}(c_\pi^2+2c_\pi c_{\mu2}+c_\pi c_{\mu3})\Big\}s^2 \\ & +(2c_\pi^3+4c_\pi^2 c_{\mu2}+3c_\pi^2 c_{\mu3}+4c_\pi c_{\mu2}c_{\mu3})s^3 \end{aligned} \qquad (ค.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (ค.10) เมื่อตัดเทอมที่มีผลต่อสมการน้อยได้

$$\begin{aligned}\Delta \;\approx\;& g_m^3 + 3\frac{g_m^2}{r_\pi} + g_m^2\left(3c_\pi + 2c_{\mu 2} + 2c_{\mu 3}\right)s \\ &+ g_m\left[c_\pi\left(4c_\pi + 6c_{\mu 2} + 5c_{\mu 3}\right) + 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2 \\ &c_\pi\left[c_\pi\left(2c_\pi + 4c_{\mu 2} + 3c_{\mu 3}\right) + 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^3\end{aligned} \quad (ค.11)$$

จากภาพที่ 11 และสมการที่ (ค.9) หาแรงดันที่โหนด 1 ได้

$$\begin{aligned}(1) \;=\;& \left\{\left[g_m + \frac{1}{r_\pi} + \left(c_\pi + c_{\mu 2}\right)s\right]\left[2g_m + \frac{3}{r_\pi} + \left(3c_\pi + c_{\mu 2}\right)s\right]\right. \\ &\left.-\left(\frac{1}{r_{\mu 2}} + c_{\mu 2}s\right)\left(-g_m + c_{\mu 2}s\right)\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\}\end{aligned} \quad (ค.12)$$

กระจายเทอมในสมการที่ (ค.12) ออกได้เป็น

$$\begin{aligned}(1) \;=\;& \left\{2g_m^2 + 5\frac{g_m}{r_\pi} + \frac{3}{r_\pi^2} + \frac{g_m}{r_{\mu 2}} + \left[g_m\left(5c_\pi + 4c_{\mu 2}\right) + \frac{1}{r_\pi}\left(6c_\pi + 4c_{\mu 2}\right)\right.\right. \\ &\left.\left.-\frac{c_{\mu 2}}{r_{\mu 2}}\right]s + c_\pi\left(3c_\pi + 4c_{\mu 2}\right)s^2\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\}\end{aligned} \quad (ค.13)$$

จากสมการที่ (ค.13) ตัดเทอมที่มีผลต่อสมการน้อยได้

$$(1) \;\approx\; \left\{2g_m^2 + 5\frac{g_m}{r_\pi} + g_m\left(5c_\pi + 4c_{\mu 2}\right)s + c_\pi\left(3c_\pi + 4c_{\mu 2}\right)s^2\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \quad (ค.14)$$

จากภาพที่ 11 และสมการที่ (ค. 9) หาแรงดันที่โหนด 3 ได้

$$\begin{aligned}(3) \;=\;& \left\{\left[g_m + \frac{1}{r_\pi} + c_\pi s\right]\left[\frac{1}{r_{\mu 2}} + c_{\mu 2}s\right] + \left[g_m + \frac{1}{r_\pi} + c_\pi s\right]\right. \\ &\left.g_m + \frac{1}{r_\pi} + \left(c_\pi + c_{\mu 2}\right)s\right)\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\}\end{aligned} \quad (ค.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายเทอมในสมการที่ (ค.15) ออกได้เป็น

$$_{(3)} \;=\; \left\{g_m^2 + 2\frac{g_m}{r_\pi} + \frac{1}{r_\pi^2} + \frac{g_m}{r_{\mu 2}} + \frac{1}{r_\pi r_{\mu 2}} + \left[2g_m\left(c_\pi + c_{\mu 2}\right) + \frac{2}{r_\pi}\left(c_\pi + c_{\mu 2}\right) + \frac{c_\pi}{r_{\mu 2}}\right]s + c_\pi\left(c_\pi + 2c_{\mu 2}\right)s^2\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \qquad \text{(ค.16)}$$

จากสมการที่ (ค.16) ตัดเทอมที่มีผลต่อสมการน้อยได้

$$_{(3)} \;\approx\; \left\{g_m^2 + 2\frac{g_m}{r_\pi} + 2g_m\left(c_\pi + c_{\mu 2}\right)s + c_\pi\left(c_\pi + 2c_{\mu 2}\right)s^2\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \qquad \text{(ค.17)}$$

จากภาพที่ 11 กระแสออก *(i_o)* คือ

$$\begin{aligned} i_o &= g_m\left(V_{(1)} - V_{(3)}\right) - \left(\frac{1}{r_{\mu 3}} + c_{\mu 3}s\right)V_{(1)} - \left(\frac{1}{r_{o3}}\right)V_{(3)} \\ &\approx \left(g_m - c_{\mu 3}s\right)V_{(1)} - g_m V_{(3)} \end{aligned} \qquad \text{(ค.18)}$$

แทนค่า $_{(1)}$ จากสมการที่ (ค.14) และ $_{(3)}$ จากสมการที่ (ค.17) ในสมการที่ (ค.18) ได้

$$\begin{aligned} i_o = & \left\{g_m^3 + 3\frac{g_m^2}{r_\pi} + \left[g_m^2\left(3c_\pi + 2c_{\mu 2} - 2c_{\mu 3}\right) - 5g_m\frac{c_{\mu 3}}{r_\pi}\right]s \right. \\ & + g_m\left[c_\pi\left(2c_\pi + 2c_{\mu 2} - 5c_{\mu 3}\right) - 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2 \\ & \left. - c_\pi c_{\mu 3}\left(3c_\pi + 4c_{\mu 2}\right)s^3\right\}\left\{\frac{i_{in}}{\Delta}\right\} \end{aligned} \qquad \text{(ค.19)}$$

หาค่าโดยประมาณของสมการที่ (ค.19) และแทน Δ จากสมการที่ (ค.11) ได้อัตราขยายกระแส *(A_i)* คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_i = \frac{i_o}{i_{in}} = \left\{ g_m^3 + 3\frac{g_m^2}{r_\pi} + g_m^2\left(3c_\pi + 2c_{\mu 2} - 2c_{\mu 3}\right)s \right.$$

$$+ g_m\left[c_\pi\left(2c_\pi + 2c_{\mu 2} - 5c_{\mu 3}\right) - 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2$$

$$\left. -c_\pi c_{\mu 3}\left(3c_\pi + 4c_{\mu 2}\right)s^3 \right\} /$$

$$\left\{ g_m^3 + 3\frac{g_m^2}{r_\pi} + g_m^2\left(3c_\pi + 2c_{\mu 2} - 2c_{\mu 3}\right)s \right.$$

$$+ g_m\left[c_\pi\left(4c_\pi + 6c_{\mu 2} - 5c_{\mu 3}\right) + 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2$$

$$\left. + c_\pi\left[c_\pi\left(2c_\pi + 4c_{\mu 2} - 3c_{\mu 3}\right) + 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^3 \right\} \qquad (ค.20)$$

$$A_i = \left\{ 1 + \frac{1}{g_m + \frac{2}{r_\pi}}\left(3c_\pi + 2c_{\mu 2} - 2c_{\mu 3}\right)s \right.$$

$$+ \frac{1}{g_m\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(2c_\pi + 2c_{\mu 2} - 5c_{\mu 3}\right) - 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2$$

$$\left. - \frac{c_\pi c_{\mu 3}}{g_m^2\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left(4c_\pi + 4c_{\mu 2}\right)s^3 \right\} /$$

$$\left\{ 1 + \frac{1}{g_m + \frac{2}{r_\pi}}\left(3c_\pi + 2c_{\mu 2} + 2c_{\mu 3}\right)s \right.$$

$$+ \frac{1}{g_m\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(4c_\pi + 6c_{\mu 2} + 5c_{\mu 3}\right) + 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2$$

$$\left. + \frac{c_\pi}{g_m^2\left(g_m + \frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(2c_\pi + 4c_{\mu 2} + 3c_{\mu 3}\right) + 4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^3 \right\} \qquad (ค.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
บทวิเคราะห์วงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้า

จากภาพที่ 13 เป็นวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้า ซึ่งสามารถหาคุณสมบัติได้ดังนี้

คุณสมบัติทางกระแสไฟตรง

เนื่องจากวงจรสะท้อนกระแสความแตกต่างสองสัญญาณเข้า ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัว และที่จุดสัญญาณเข้าที่สอง กำหนดไว้ว่าจะให้กระแสสลับไหลเข้าได้อย่างเดียว ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกระแสไฟตรง ซึ่งทำให้วงจรมีลักษณะเหมือนกับวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ยังผลให้สมการของอัตราขยายกระแสทางไฟตรงเป็น [ภาคผนวก ค]

$$I_{C3} = I_{ref}\left(1-\frac{2}{\beta_F^2+2\beta_F+2}\right) \qquad (ง.1)$$

ซึ่งเหมือนกับแบบของวงจรสะท้อนกระแสแบบทรานซิสเตอร์ 4 ตัว

คุณสมบัติทางกระแสไฟสลับ

จากภาพที่ 14 แสดงวงจรเสมือนของวงจรสะท้อนกระแสแบบความแตกต่างสองสัญญาณเข้า เนื่องจากวงจรเป็นวงจรเดียวกับใน ภาคผนวก ค เพียงแต่เพิ่มกระสแเข้า i_{in2} ที่โหนด 3 ดังนั้น อัตราขยายกระแส i_o ต่อ i_{in1} ได้หาไว้แล้วในภาคผนวก ค พิจารณาอัตราขยายกระแสของ i_o ต่อ i_{in2} สร้างสมการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} g_{m2}+\dfrac{2}{r_\pi}+\left(2c_\pi+c_{\mu 3}\right)s & -\left(g_m+\dfrac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) & -\left(\dfrac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) \\ -\left(g_m+\dfrac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) & g_m+\dfrac{1}{r_\pi}+\left(c_\pi+c_{\mu 2}\right)s & -\left(-g_m+c_{\mu 2}s\right) \\ -\left(g_m+\dfrac{1}{r_\pi}+c_\pi s\right) & -\left(\dfrac{1}{r_{\mu 2}}+c_{\mu 2}s\right) & 2g_m+\dfrac{3}{r_\pi}+\left(3c_\pi+c_{\mu 2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{(1)} \\ V_{(2)} \\ V_{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{in2} \end{bmatrix} \qquad (ง.2)$$

และดีเทอมิแนนท์ ($\varDelta$) เป็นค่าเดียวกับสมการที่ (ค.11) จากสมการที่ (ง.2) หาแรงดันที่โหนด 1 และโหนด 3 ได้เป็นสมการที่ (ง.3) และสมการที่ (ง.4) ตามลำดับ

$${}_{1} = \left\{-g_m^2+\frac{1}{r_\pi^2}+\left[g_m c_{\mu 2}+\frac{2}{r_\pi}\left(c_\pi+c_{\mu 2}\right)\right]s+c_\pi\left(c_\pi+2c_{\mu 2}\right)s^2\right\}\left\{\frac{i_{in2}}{\Delta}\right\} \qquad (ง.3)$$

$${}_{3} = \left\{\frac{g_m}{r_\pi}+\frac{1}{r_\pi^2}+\left[g_m\left(c_\pi+c_{\mu 2}+c_{\mu 3}\right)+\frac{1}{r_\pi}\left(2c_\pi+2c_{\mu 2}+c_{\mu 3}\right)s\right]s\right.$$

$$\left.+\left[c_\pi\left(c_\pi+2c_{\mu 2}+c_{\mu 3}\right)+c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2\right\}\left\{\frac{i_{in2}}{\Delta}\right\} \qquad (ง.4)$$

จากภาพที่ 13 จะกำหนดให้กระแส i_o ที่ไหลเข้าโหนดลงกราวดน์ ซึ่งสามารถหากระแสออก (i_o) ได้เป็น

$$i_o = g_m\left(V_{(1)}-V_{(3)}\right)-\left(\frac{1}{r_{\mu 3}}+c_{\mu 3}s\right)V_{(1)}-\left(\frac{1}{r_{o3}}\right)V_{(3)}$$

$$i_o \approx \left(g_m-c_{\mu 3}s\right)V_{(1)}-g_m V_{(3)} \qquad (ง.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $V_{(1)}$ จากสมการที่ (ง.3) $V_{(3)}$ จากสมการที่ (ง.4) และ Δ จากสมการที่ (ค.11) ลงในสมการที่ (ง.5) หาอัตราขยายกระแสได้

$$
\begin{aligned}
A_{i2} = \frac{i_o}{i_{in2}} = & -\Big\{g_m^3+\frac{g_m^2}{r_\pi}+g_m\left(g_m c_\pi+\frac{c_{\mu 3}}{r_\pi}\right)s \\
& +\left[g_m c_{\mu 3}\left(c_\pi+2c_{\mu 2}\right)+2\frac{c_{\mu 3}}{r_\pi}\left(c_\pi+c_{\mu 2}\right)\right]s^2 \\
& +c_\pi c_{\mu 3}\left(c_\pi+2c_{\mu 2}\right)s^3\Big\}\,/ \\
& \Big\{g_m^3+3\frac{g_m^2}{r_\pi}+g_m^2\left(3c_\pi+2c_{\mu 2}+2c_{\mu 3}\right)s \\
& +g_m\left[c_\pi\left(4c_\pi+6c_{\mu 2}+5c_{\mu 3}\right)+4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2 \\
& +c_\pi\left[c_\pi\left(2c_\pi+4c_{\mu 2}+3c_{\mu 3}\right)+4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^3\Big\}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
A_{i2} = & -\left\{\frac{g_m+\frac{1}{r_\pi}}{g_m+\frac{3}{r_\pi}}+\frac{1}{g_m\left(g_m+\frac{3}{r_\pi}\right)}\left(g_m c_\pi+\frac{c_{\mu 3}}{r_\pi}\right)s\right. \\
& +\frac{1}{g_m^2\left(g_m+\frac{3}{r_\pi}\right)}\left[g_m c_{\mu 3}\left(c_\pi+2c_{\mu 2}\right)+2\frac{c_{\mu 3}}{r_\pi}\left(c_\pi+c_{\mu 2}\right)\right]s^2 \\
& \left.+\frac{c_\pi c_{\mu 3}}{g_m^2\left(g_m+\frac{3}{r_\pi}\right)}\left(c_\pi+2c_{\mu 2}\right)s^3\right\}\,/ \\
& \left\{1+\frac{1}{g_m+\frac{3}{r_\pi}}\left(3c_\pi+2c_{\mu 2}+2c_{\mu 3}\right)s\right. \\
& +\frac{1}{g_m\left(g_m+\frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(4c_\pi+6c_{\mu 2}+5c_{\mu 3}\right)+4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^2 \\
& \left.+\frac{c_\pi}{g_m^2\left(g_m+\frac{3}{r_\pi}\right)}\left[c_\pi\left(2c_\pi+4c_{\mu 2}+3c_{\mu 3}\right)+4c_{\mu 2}c_{\mu 3}\right]s^3\right\} \qquad \text{(ง.6)}
\end{aligned}
$$

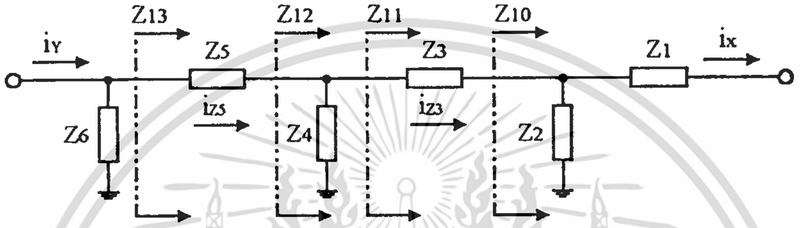
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

บทวิเคราะห์เน็ทเวิร์คของวงจรกำเนิดสัญญาณรูปซายน์ด้วยวิธีเลื่อนเฟสในลักษณะของกระแส

จากภาพที่ 28 แสดงภาพพาสซีฟเน็ทเวิร์ค ซึ่งสามารถหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนได้ดังนี้

ภาพที่ 28



แสดงวงจรพาสซีฟเน็ทเวิร์ค

จากหลักการของ current divider จะสามารถหาสมการได้เป็น

$$i_x = \frac{Z_2}{Z_1+Z_2} i_{z3} \quad (จ.1)$$

$$Z_{10} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1+Z_2} \quad (จ.2)$$

$$Z_{11} = Z_3 + Z_{10}$$

$$\frac{Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2}{Z_1+Z_2} \quad (จ.3)$$

$$i_{z3} = \frac{Z_4}{Z_4+Z_{11}} i_{z5}$$

$$\frac{Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4}{Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2} \quad (จ.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_{12} = \frac{Z_4 Z_{11}}{Z_4 + Z_{11}}$$

$$\frac{Z_1 Z_3 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4}{Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2} \quad \text{(ข.5)}$$

$$Z_{13} = Z_5 + Z_{12}$$

$$\{Z_1 Z_4 Z_5 + Z_2 Z_4 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_5 + Z_2 Z_3 Z_5 + Z_1 Z_2 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4\} / \{Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2\} \quad \text{(ข.6)}$$

$$i_{z5} = \frac{Z_6}{Z_6 + Z_{13}} i_y$$

$$\{Z_1 Z_4 Z_6 + Z_2 Z_4 Z_6 + Z_1 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_3 Z_6 + Z_1 Z_2 Z_6\} i_y / \{Z_1 Z_4 Z_6 + Z_2 Z_4 Z_6 + Z_1 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_3 Z_6 + Z_1 Z_2 Z_6 + Z_1 Z_4 Z_5\ Z_2 Z_4 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_5 + Z_2 Z_3 Z_5 + Z_1 Z_2 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4\ Z_1 Z_2 Z_4\} \quad \text{(ข.7)}$$

$$i_x = \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} = \frac{Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4}{(Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2)} i_{z5} \quad \text{(ข.8)}$$

$$\frac{i_x}{i_y} = \{Z_2 (Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4)(Z_1 Z_4 Z_6 + Z_2 Z_4 Z_6 + Z_1 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_3 Z_6 + Z_1 Z_2 Z_6)\} / \{(Z_1 + Z_2)(Z_1 Z_4 + Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2)(Z_1 Z_4 Z_6 + Z_2 Z_4 Z_6\ Z_1 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_4 Z_6 + Z_1 Z_2 Z_6 + Z_1 Z_4 Z_5 + Z_2 Z_4 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_5 + Z_2 Z_3 Z_5 + Z_1 Z_2 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4\} \quad \text{(ข.9)}$$

$$\frac{i_x}{i_y} = \{Z_2 Z_4 Z_6\} / \{Z_1 Z_4 Z_6 + Z_2 Z_4 Z_6 + Z_1 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_3 Z_6 + Z_1 Z_2 Z_6 + Z_1 Z_4 Z_5 + Z_2 Z_4 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_5 + Z_2 Z_3 Z_5 + Z_1 Z_2 Z_5 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4\} \quad \text{(ข.10)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{i_y}{i_x} = 1+\frac{Z_1}{Z_2}+\frac{Z_3}{Z_4}+\frac{Z_1}{Z_4}+\frac{Z_1}{Z_6}+\frac{Z_5}{Z_6}+\frac{Z_3}{Z_6}+\frac{Z_1Z_3}{Z_2Z_4}+\frac{Z_1Z_5}{Z_4Z_6}+\frac{Z_3Z_5}{Z_4Z_6}+\frac{Z_1Z_5}{Z_4Z_6}$$

$$\frac{Z_1Z_3}{Z_2Z_6}+\frac{Z_1Z_3Z_5}{Z_2Z_4Z_6} \qquad (ข.11)$$

การพิจารณาเซ็นซิติวิตี้ของความถี่เมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ในวงจรพาสซีฟเน็ทเวิร์ค *[B(s)]* ได้ดังนี้

จากสมการที่ (5.13) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐาน นำมาแทนค่าได้เป็น

$$S_{C_1}^{\omega_o} = \frac{C_1}{\omega_o}\cdot\frac{\partial\omega_o}{\partial C_1} \; ; \; \omega_o = \frac{1}{\sqrt{X}}$$

โดยที่ $\frac{1}{\sqrt{X}}$ คือ

$$\frac{1}{\sqrt{C_3C_5R_4R_6+C_1C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_4+C_1C_3R_2R_4+C_1C_5R_2R_4}}$$

$$= \frac{C_1}{\frac{1}{\sqrt{X}}}\left(-\frac{1}{2}\right)X^{-3/2}\left[C_5R_2R_6+C_3R_2R_4+C_5R_2R_4\right]$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้เป็น

$$= -\frac{1}{2}\left[\frac{1}{1+\frac{C_3C_5R_4R_6+C_3C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_4}{C_1C_5R_2R_6+C_1C_3R_2R_4+C_1C_5R_2R_4}}\right] \qquad (ข.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S^{\omega_o}_{R_2} = \frac{R_2}{\omega_O}\cdot\frac{\partial\omega_O}{\partial R_2} \quad ; \ \omega_O = \frac{1}{\sqrt{X}}$$

$$\frac{R_2}{\frac{1}{\sqrt{X}}}\left(-\frac{1}{2}\right)X^{-3/2}[C_1C_5R_6+C_3C_5R_6+C_3C_5R_4+C_1C_3R_4+C_1C_5R_4]$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้เป็น

$$= -\frac{1}{2}\left[\frac{1}{1+\frac{C_3C_5R_4R_6}{C_1C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_4+C_1C_3R_2R_4+C_1C_5R_2R_4}}\right] \qquad \text{(จ.13)}$$

$$S^{\omega_o}_{C_3} = \frac{C_3}{\omega_O}\cdot\frac{\partial\omega_O}{\partial C_3} \quad ; \ \omega_O = \frac{1}{\sqrt{X}}$$

$$\frac{C_3}{\frac{1}{\sqrt{X}}}\left(-\frac{1}{2}\right)X^{-3/2}[C_5R_4R_6+C_5R_2R_6+C_5R_2R_4+C_1R_2R_4]$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้เป็น

$$-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{1+\frac{C_1C_5R_2R_6+C_1C_5R_2R_4}{C_3C_5R_4R_6+C_3C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_4+C_1C_3R_2R_4}}\right] \qquad \text{(จ.14)}$$

$$S^{\omega_o}_{R_4} = \frac{R_4}{\omega_O}\cdot\frac{\partial\omega_O}{\partial R_4} \quad ; \ \omega_O = \frac{1}{\sqrt{X}}$$

$$\frac{R_4}{\frac{1}{\sqrt{X}}}\left(-\frac{1}{2}\right)X^{-3/2}[C_3C_5R_6+C_3C_5R_2+C_1C_3R_2+C_1C_5R_2]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการใหม่ ได้เป็น

$$-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{1+\frac{C_1C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_6}{C_3C_5R_4R_6+C_3C_5R_2R_4+C_1C_3R_2R_4+C_1C_5R_2R_4}}\right] \quad (ข.15)$$

$$S^{\omega_o}_{C_5} = \frac{C_5}{\omega_O}\cdot\frac{\partial\omega_O}{\partial C_5} \quad ; \ \omega_O = \frac{1}{\sqrt{X}}$$

$$\frac{C_5}{\frac{1}{\sqrt{X}}}\left(-\frac{1}{2}\right)X^{-3/2}[C_3R_4R_6+C_1R_2R_6+C_3R_2R_6+C_3R_2R_4+C_1R_2R_4]$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้เป็น

$$-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{1+\frac{C_1C_3R_2R_4}{C_3C_5R_4R_6+C_1C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_4+C_1C_5R_2R_4}}\right] \quad (ข.16)$$

$$S^{\omega_o}_{R_6} = \frac{R_6}{\omega_O}\cdot\frac{\partial\omega_O}{\partial R_6} \quad ; \ \omega_O = \frac{1}{\sqrt{X}}$$

$$\frac{R_6}{\frac{1}{\sqrt{X}}}\left(-\frac{1}{2}\right)X^{-3/2}[C_3C_5R_4+C_1C_5R_2+C_3C_5R_2]$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้เป็น

$$-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{1+\frac{C_3C_5R_2R_4+C_1C_3R_2R_4+C_1C_5R_2R_4}{C_3C_5R_4R_6+C_1C_5R_2R_6+C_3C_5R_2R_6}}\right] \quad (ข.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

K. Dejhan, F. Cheevasuvit and S. Limpaiboon. "A Current mode all-pass variable phase shifter." Proc. of Int. Conf. ISIC-95, 6-8 september 1995 : 480-483.

ศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์, กอบชัย เดชหาญ และคนอื่นๆ. "วงจรออสซิเลเตอร์แบบใหม่." การประชุมวิชาการทางวิศวกรรม ครั้งที่ 18, 22-24 พฤศจิกายน 2538 : 661-666.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายศิริวัฒน์ ลิ้มไพบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2534 และเข้าศึกษาต่อที่บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2534 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับและตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ 1 เรื่อง ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างประเทศ 1 เรื่อง ปัจจุบันทำงานที่บริษัท อุตสาหกรรมปิโตรเคมีกัลไทย จำกัด (มหาชน) ตำแหน่งวิศวกร ฝ่ายวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้