

วงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล

โดยใช้เทคนิคการแซมปลิงสัญญาณ

LOGARITHMIC AND EXPONENTIAL AMPLIFIERS

BASED ON SAMPLING TECHNIQUES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่.....

เลขที่ ยื่น..... 29381

วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2541

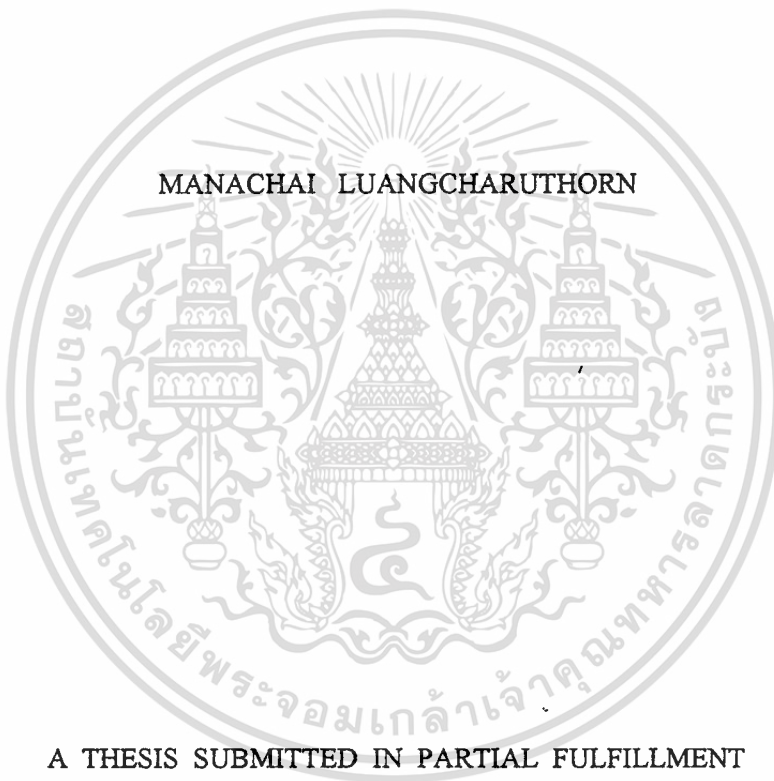
พ.ศ. 2540

ISBN 974-622-076-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LOGARITHMIC AND EXPONENTIAL AMPLIFIERS  
BASED ON SAMPLING TECHNIQUES



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

1997

ISBN 974-622-076-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์: วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล  
โดยใช้เทคนิคการแฉมปลิงสัญญาณ  
ชื่อนักศึกษา นายมานะชัย เหลืองจารุธร  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์  
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2540

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอผลการศึกษาวิจัยที่ได้นำเอาเทคนิคการชักตัวอย่างสัญญาณมาใช้ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล

วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ได้ทำการออกแบบขึ้นนี้ได้ใช้หลักการถ่ายเทประจุซึ่งประกอบด้วยการเก็บประจุและการคายประจุของตัวเก็บประจุทำงานร่วมกับสวิตช์ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกา เพื่อทำการประมวลสัญญาณ วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบใหม่มีความแม่นยำในการประมวลผลดีกว่าวงจรสามัญที่ใช้สารกึ่งตัวนำพวก ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์มาใช้ในการออกแบบ เนื่องจากวงจรที่ออกแบบนี้มีคุณสมบัติที่ผลความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัวอุปกรณ์ มีผลต่อวงจรน้อยมาก และวงจรแบบใหม่สามารถที่จะปรับปรุงเป็นวงจรที่สร้างจากตัวเก็บประจุและสวิตช์ได้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด ซึ่งจะสามารถพัฒนาเป็นวงจรรวมได้ต่อไปในอนาคต

เพื่อเป็นการพิสูจน์หลักการที่ใช้ในการออกแบบที่น่าเสนอ จึงได้ทดลองต่อวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งได้ผลการทดลองที่สนับสนุนหลักการที่น่าเสนอ และวงจรทำงานได้เป็นอย่างดี

**THESIS TITLE** LOGARITHMIC AND EXPONENTIAL AMPLIFIERS  
BASED ON SAMPLING TECHNIQUES

**STUDENT** MR.MANACHAI LUANGCHARUTHORN

**THESIS ADVISOR** ASSOC.PROF.WIWAT KIRANON

**LEVEL OF STUDY** MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG

**YEAR** 1997

### Abstract

In this thesis, logarithmic and exponential amplifiers based on sampling techniques are proposed. The responses of the circuits are derived from the discharging rate of capacitors. They have high accuracies because of their less temperature sensitivity, in comparison with conventional circuits which using diodes or transistors. The proposed amplifiers can easily be modified to the switched capacitors versions. Therefore the presented circuits are superior to those of an easier system in so many aspect.

The circuits are established for experiments. The experimental results are obviously agreed with the theoretical principles.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดเวลา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย รศ.ภคคีณี ยิมเรวัต ผศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน อาจารย์วิชา แสงพิสิทธิ์ อาจารย์ทุกท่านที่มีได้เอ่ยนามที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญและผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้บันทึกทฤษฎีต่างๆที่เป็นพื้นฐานในการออกแบบค้นคว้าและพัฒนาความรู้จนเป็นตำราให้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและค้นคว้าตลอดมา รวมทั้งมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร (C&C) ที่ได้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทั้งอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ และสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอขอบคุณประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ แต่ผู้มิมีพระคุณทุกท่าน

มานะชัย เหลืองจรรย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
6 วิธีการที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย.....	4
2. วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบทั่วไป.....	5
1 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล แบบทั่วไป.....	5
1.1 การพิจารณาพื้นฐานการออกแบบวงจรทั่วไป.....	5
1.2 รูปแบบการต่อวงจรโดยการใช้ทรานซิสเตอร์.....	8
1.3 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ.....	12
1.4 เสถียรภาพของวงรอบปิด.....	15
1.5 การใช้งานวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม.....	20
1.6 วงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล.....	25
2. วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้อัตราขยายประจุของตัวเก็บประจุ.....	27

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.1	28
3. การวิเคราะห์ข้อมูลและออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียล โดยใช้เทคนิคการแรมปลิงสัญญาณ	33
1. วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียล โดยใช้เทคนิคการแรมปลิงสัญญาณ	33
2. วงจรและการทำงาน	34
3. สมการผลต่างแบบไม่เป็นเชิงเส้น	38
4. ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ออกแบบใหม่	44
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก	56
ภาคผนวก ข	63
ประวัติผู้เขียน	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	ผลของอุณหภูมิต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร..... 6
2	แสดงความสัมพันธ์ของค่า $\alpha, \alpha_n$ และค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ในวงจร.. 11
3	แสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ป้อนเข้าและความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้..... 13
4	ค่าที่ได้จากการคำนวณที่กำหนดค่าสถานะเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ $y(0) = 0$ และค่าของ $c = 0$ .....39
5	แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยมีจำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 2 รอบการคำนวณ.. 40
6	แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยมีจำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 5 รอบการคำนวณ.. 41
7	แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยมีจำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 10 รอบการคำนวณ 42



## สารบัญภาพ

หน้า

1. วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบทั่วไปที่ใช้ไดโอด.....	6
2 การประยุกต์ใช้งานวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมโดยใช้ทรานซิสเตอร์.....	9
2ก การใช้ทรานซิสเตอร์มาใช้งานในวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม.....	9
2ข การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ 2 ขั้วในวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม.....	9
2ค ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของไดโอดและทรานซิสเตอร์.....	9
3 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงดันออฟเซตและกระแสไบแอส.....	13
4 การกำจัดผลความคลาดเคลื่อนเนื่องจากกระแสไบแอส.....	14
4ก การกำจัดผลของกระแส $I_B$ โดยการชดเชย.....	14
4ข การกำจัดผลของกระแส $I_B$ โดยวิธีสมมาตร.....	14
5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรโดยวิธีโบค.....	15
6 วงจรที่เพิ่มเติมตัวทานต้านและตัวเก็บประจุเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของวงจร.....	17
7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์โดยวิธีโบค.....	19
7ก แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจร.....	19
7ข ความสัมพันธ์ของขนาดตามวิธีโบค.....	19
8 วงจรหาค่าอัตราส่วนเชิงลอการิทึมที่มีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุณหภูมิแล้ว ( $I_{ES}$ ).....	21
9 วงจรหาค่าอัตราส่วนเชิงลอการิทึม.....	22
10 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่มีการชดเชยผลเนื่องจากอุณหภูมิแล้ว.....	24
11 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่มีการชดเชยผลเนื่องจากอุณหภูมิโดยใช้แรงดันอ้างอิงภายใน.....	24
12 วงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล.....	26
13 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้หลักการคายประจุไฟฟ้า.....	28

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

14 คุณลักษณะการทำงานของวงจรถายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้หลักการคายประจุไฟฟ้า..	29
15 วงจรถายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ปรับปรุงขึ้นใหม่.....	34
16 วงจรถายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล.....	36
17 กราฟแสดงจำนวนครั้งที่ใช้ในการคำนวณกับผลที่ได้จากการคำนวณ.....	39
18 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าที่ป้อนเข้ากับผลที่ได้โดยมีจำนวนครั้ง การคำนวณเท่ากับ 2 รอบการคำนวณ.....	40
19 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าที่ป้อนเข้ากับผลที่ได้โดยมีจำนวนครั้ง การคำนวณเท่ากับ 5 รอบการคำนวณ.....	41
20 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าที่ป้อนเข้ากับผลที่ได้โดยมีจำนวนครั้ง การคำนวณเท่ากับ 10 รอบการคำนวณ.....	42
21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรถายสัญญาณเชิงลอการิทึม เส้นทึบเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ จุด X เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในวงจร.....	45
22 ผลที่ได้จากวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเข้าวงจรถายสัญญาณเชิงลอการิทึม ช่องบนเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากวงจร.....	46
23 ผลที่ได้จากวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปไซน์เข้าวงจรถายสัญญาณเชิงลอการิทึม ช่องบนเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากของวงจร.....	46
24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรถายสัญญาณเชิง เอกซ์โพเนนเชียลเส้นทึบเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ จุด X เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในวงจร..	47
25 ผลที่ได้จากวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเข้าวงจรถายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล ช่องบนเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากวงจร.....	48
26 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่เป็นวงจรถายสัญญาณเชิงลอการิทึม.....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม (Logarithmic Amplifier) และวงจรรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Amplifier) หรือเชิงแอนติลอการิทึม (Antilogarithm Amplifier) เป็นวงจรที่สามารถจะนำมาประยุกต์การใช้งานได้อย่างมากมาย ตัวอย่างเช่นการนำเอาวงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลมาใช้งานร่วมกัน เพื่อใช้ในการช่วยประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) หรือการนำมาใช้ร่วมกับวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมจะทำให้สามารถสร้างวงจรรคูณ (Multiplier circuit) วงจรรหาร (Divider circuit) วงจรรยกกำลัง (Power circuit) วงจรรถอดกรณท์ (Rooter circuit) และวงจรรช่วยในการบีบอัดสัญญาณ (Compressing circuit) หรือวงจรรช่วยในการขยายสัญญาณ (Expanding circuit) ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งวงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียลนี้สามารถที่จะนำไปใช้งานได้ อย่างกว้างขวางและเป็นประโยชน์มาก

แต่เนื่องจากการทำงานของวงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่มีการใช้งานอยู่โดยทั่วไปจะอาศัยคุณสมบัติของความสัมพันธ์ทางฟังก์ชันเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำประเภทของไดโอด (Diode) หรือทรานซิสเตอร์ (Transistor) ซึ่งมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor junction) เป็นพื้นฐานในการออกแบบวงจร ทำให้ได้วงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่มีคุณสมบัติการทำงานที่ให้ผลจากการประมวลผลที่คลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ ซึ่งส่งผลทำให้วงจรไม่มีความแม่นยำในการประมวลผล แต่วงจรที่ใช้งานโดยทั่วไปสามารถที่จะทำการปรับปรุงวงจรให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นได้โดยการออกแบบวงจรที่ทำหน้าที่ในการชดเชยผลอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ทำให้ได้วงจรที่จะนำมาใช้งานได้เป็นวงจรที่ยืดหยุ่นมากขึ้น อีกทั้งสามารถใช้งานได้ในช่วงการทำงานที่แคบอันเนื่องมาจากคุณสมบัติของรอยต่อสารกึ่งตัวนำเป็นตัวกำหนดขอบเขตการใช้งาน

## 2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลเป็นวงจรที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานมากมาย แต่การทำงานของวงจรสามารถประมวลผลสัญญาณที่มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ ส่งผลให้วงจรไม่มีความแม่นยำในการประมวล แต่สามารถที่จะทำการปรับปรุงวงจรให้มีความแม่นยำได้โดยการออกแบบวงจรในการชดเชยผลอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ทำให้ได้วงจรที่จะใช้งานเป็นวงจรที่ซับซ้อนเพิ่มขึ้น อีกทั้งการใช้งานจะใช้งานได้ในช่วงแคบเนื่องจากคุณสมบัติของรอยต่ออินสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นตัวกำหนดขอบเขตย่านการใช้งาน จึงพิจารณาว่าควรจะทำการศึกษา ออกแบบ และทดสอบการทำงานของวงจรที่ได้ทำการออกแบบขึ้นใหม่ ให้มีความสามารถที่จะทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล วงจรที่จะทำการออกแบบใหม่ต้องมีคุณสมบัติให้ความแม่นยำไม่มีผลความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ ทำให้วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่มีความแม่นยำในการประมวลผลดีกว่า และอีกทั้งสามารถที่จะปรับปรุงให้เป็นวงจรที่มีการสร้างจากตัวเก็บประจุและสวิตช์ได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถจะทำการพัฒนาให้เป็นวงจรรวม (Integrated circuit) ได้ต่อไปในอนาคต

## 3 สมมติฐานของการศึกษา

หลักในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบทั่วไปนั้น การทำงานของวงจรจะอาศัยคุณสมบัติความถี่ของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลในสารกึ่งตัวนำพวกไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะมีรอยต่อของสารกึ่งตัวนำเป็นพื้นฐานในการออกแบบ ดังนั้นวงจรที่ทำการออกแบบออกมานั้นจะมีผลความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ ทำให้วงจรให้ผลที่ประมวลผลคลาดเคลื่อน ดังนั้นในการที่จะใช้งานวงจร จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรในส่วนที่จะทำหน้าที่ชดเชยผลอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ด้วย จึงทำให้วงจรที่ได้รับการปรับปรุงเป็นวงจรที่มีความสลับซับซ้อนไม่สะดวกต่อการใช้งาน และเพื่อที่จะทำการแก้ไขความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิภายในตัวอุปกรณ์ จึงมีการเสนอวิธีออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้เทคนิคการกระตุ้นการทำงานของวงจรรวมเบอร์ 555 ให้มีการทำหน้าที่ถ่ายเทประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแล้วทำการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งมีข้อเสียอยู่เนื่องจากผลสัญญาณที่ได้จากการประมวลจะมีการกระเพื่อม (ripple) ของสัญญาณสูง ผลตอบสนองของวงจรช้า และมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความกว้างของสัญญาณที่นำมาใช้กระตุ้นการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของวงจรรวมเบอร์ 555 ต่อมาจึงได้มีการนำเอาหลักการการคายประจุของตัวเก็บประจุที่ได้อัดประจุในวงจรให้ผ่านตัวความต้านทานมาใช้ในการออกแบบ แล้วนำสัญญาณที่ได้จากตัวเก็บประจุมาควบคุมการประจุไฟฟ้าในส่วนของวงจรอินทิเกรต (Integrating circuit) แล้วทำการชักตัวอย่างและคงค่า (Sample and Hold) สัญญาณที่ได้ไว้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าที่ได้ มีความสัมพันธ์ลักษณะเชิงลอการิทึมเมื่อเทียบกับค่าศักดาไฟฟ้าทางขาเข้า ซึ่งพบว่าหลักการที่ได้มีการนำเสนอสามารถที่จะทำการพัฒนาต่อไปได้อีกมาก

#### 4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่ทำการออกแบบ และสร้างใหม่จะอาศัยหลักการเทคนิคการเก็บประจุไฟฟ้าและการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีการทำงานร่วมกับสวิตช์ที่ควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกา (clock) ทำการประมวลผลสัญญาณ เพื่อให้คุณสมบัตินำเข้าเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม อีกทั้งวงจรที่ออกแบบใหม่ยังสามารถที่จะทำการปรับปรุงให้เป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลได้ โดยนำมาทำการป้อนกลับ (Feedback) สัญญาณได้ อีกทั้งวงจรที่ออกแบบจะมีคุณสมบัติที่ไม่มีผลความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในของตัวอุปกรณ์ จึงทำให้วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่มีความแม่นยำในการประมวลผลที่ได้ดีกว่าและยังสามารถที่จะทำการปรับปรุงเป็นวงจรที่สร้างจากตัวเก็บประจุและสวิตช์ได้ทั้งหมด ซึ่งจะมีการพัฒนาเป็นวงจรรวมต่อไปได้ในอนาคต

#### 5 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาหลักการ ออกแบบ จัดสร้าง และทดสอบการทำงานของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้หลักการเทคนิคการเก็บประจุและการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีการทำงานร่วมกับสวิตช์ที่ควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลสัญญาณ เพื่อให้ได้คุณสมบัติวงจรที่มีการทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม และทำการปรับปรุงให้เป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลโดยนำสัญญาณมาทำการป้อนกลับ โดยที่ความต้องการให้วงจรที่ทำการออกแบบต้องมีคุณสมบัติที่ไม่มีผลของความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในของตัวอุปกรณ์เกิดขึ้น ทำให้วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่มีความแม่นยำในการประมวลผลที่ดีกว่า และสามารถทำการปรับปรุงเป็นวงจรที่สร้างจากตัวเก็บประจุและสวิตช์ได้ทั้งหมด ซึ่งจะมีการพัฒนาเป็นวงจรรวมต่อไปได้ในอนาคต

## 6 วิธีที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

ศึกษาคูณสมบัติและหลักการการทำงานของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบเดิมที่มีการใช้งานโดยทั่วไปว่ามีคุณสมบัติการทำงาน และการชดเชยผลที่จะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่างๆ เพื่อทำการพิจารณาถึงข้อดี ข้อเสียของวงจรที่มีต่อการใช้งาน ตลอดจนการพัฒนาหลักการที่ใช้ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่อันได้แก่เทคนิคการกระตุ้นการทำงานของวงจรรวมเบอร์ 555 ให้มีการประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าแล้วทำการประมวลผลสัญญาณ และหลักการที่นำเอาการคายประจุของตัวเก็บประจุในวงจรผ่านตัวความต้านทานมาใช้ในการออกแบบ การนำสัญญาณที่ได้จากตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาควบคุมการประจุไฟฟ้าในส่วน of วงจรอินทิเกรต และทำการชักตัวอย่างและคงค่าสัญญาณที่ได้ไว้ ทำให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์ลักษณะเชิงลอการิทึม เมื่อเทียบกับค่าศักดาไฟฟ้าทางขาเข้า จะพบว่าหลักการที่เป็นพื้นฐานที่จะทำการพัฒนา ออกแบบ และสร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบหลักการและสภาพการใช้งานที่ได้ทำการศึกษา



## บทที่ 2

### วงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบทั่วไป

#### 1. วงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบทั่วไป

วงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลเป็นวงจรที่มีการนำมาประยุกต์การใช้งานอย่างมากมาย ตัวอย่างเช่น การนำวงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลใช้ร่วมกันเพื่อใช้ช่วยประมวลผลสัญญาณ และนำมาใช้ร่วมกับวงจรถอดรหัสที่ เหมาะสมจะสามารถสร้างวงจรรคูณ หหาร ยกกำลัง ถอดครมภ์ และบีบอัดสัญญาณ หรือขยายสัญญาณได้ จะพบว่าวงจรทั้งสองสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางและเป็นประโยชน์มาก

วงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้งานในปัจจุบันโดยทั่วไปจะอาศัยความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลของรอยต่อสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์พวกไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ เมื่อนำมาใช้งานมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นในการออกแบบวงจรให้มีความสมบูรณ์จะต้องมีการใช้อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ เพื่อชดเชยผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้วงจรมีการออกแบบและใช้งานที่ซับซ้อน ช่วงการใช้งานจะใช้ได้อยู่ในย่านกระแสประมาณตั้งแต่  $10^{-11}$  แอมแปร์ ถึง  $10^{-2}$  แอมแปร์

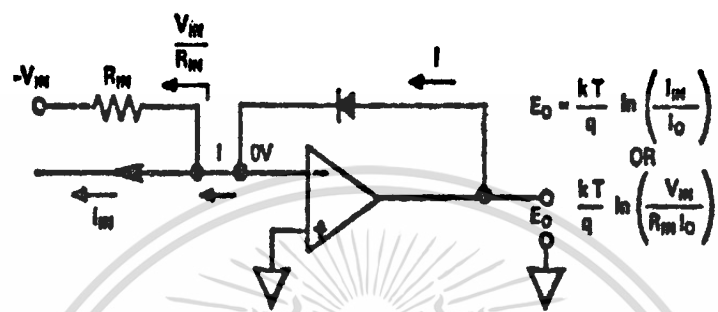
ในบทนี้จะอธิบายคุณสมบัติพื้นฐานในการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม การชดเชยผลความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิและเสถียรภาพทางพลวัต (Dynamic Stability) ของวงจรที่มีการใช้งานทั่วไป

#### 1.1 การพิจารณาพื้นฐานการออกแบบวงจรทั่วไป

ในการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมโดยทั่วไปจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลดังสมการ (1)

$$I = I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1)$$

- เมื่อ  $I_0$  เป็นค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse Saturation Current)
- $k$  เป็นค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ =  $1.38062 \cdot 10^{-23}$  จูลต่อองศาเคลวิน (Boltzman's constant)
- $T$  เป็นค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature) ในหน่วย องศาเคลวิน (Kelvin)
- $q$  เป็นค่าขนาดของประจุอิเล็กตรอน =  $1.60219 \cdot 10^{-19}$  คูลอมบ์



รูป 1 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบทั่วไปที่ใช้ไดโอด

การนำไดโอดมาเชื่อมต่อกับวงจรในส่วนป้อนกลับของวงจรขยายเชิงค่าเนินการ (operational amplifier, op-amp, ออปแอมป์) ดังรูป 1 จะสามารถหาค่าของแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรได้ดังสมการ (2)

$$E_o = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{kT}{q} \ln(10) \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{2}$$

ทั้งนี้ภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า  $\frac{I}{I_0}$  มีค่ามากกว่า 1 มากๆ

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับวงจรในขณะที่ใช้งานในสภาพแวดล้อม ณ อุณหภูมิที่ต่างกัน จะได้ค่าตัวคูณ (scale factors) ที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร

$T(^{\circ}C)$	$T(K)$	$\frac{kT}{q}$	$\frac{kT}{q} \ln(10)$
24.21	297.36	25.62mV	59.00mV
25.00	298.15	25.69mV	59.16mV
26.85	300.00	25.85mV	59.52mV
28.58	301.73	26.00mV	59.87mV
29.25	302.40	26.06mV	60.00mV

จากตารางที่ 1 พบว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ถ้ามีอัตรากระแสไฟฟ้า  $\frac{I}{I_0}$  เท่ากับ 10:1 จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร  $E_0$  มีค่าแรงดันไฟฟ้า 59.16 มิลลิโวลต์ และถ้ามีอัตรากระแสไฟฟ้าเท่ากับ  $e:1$  (2.7183:1) จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจร  $E_0$  มีค่าแรงดันไฟฟ้า 25.69 มิลลิโวลต์

ในวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้มีการนำไดโอดมาใช้งานกันมากในระยะเริ่มแรก เนื่องจากว่าไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 2 ขั้ว สามารถกำหนดทิศทางกระแสไหลของกระแสไฟฟ้าจากขั้วใดขั้วหนึ่ง การต่อวงจรอนุกรมไดโอดสามารถทำการเพิ่มศักดาไฟฟ้าได้ และไม่ต้องต่อวงจรลงดิน แต่มีข้อเสียคือ มีช่วงการทำงานในลักษณะเชิงลอการิทึมที่ไม่กว้าง ซึ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรสามารถที่จะพิจารณาได้จาก 2 กรณี คือ กรณีแรก พิจารณาเมื่อมีการเชื่อมต่อศักดาไฟฟ้าสูงมาก จะสามารถพบว่าในสภาพการทำงานของวงจร จะเสมือนว่ามีความต้านทานไฟฟ้าอันเกิดจากความต้านทานในตัวไดโอด (Buck resistance :  $R_B$ ) เชื่อมต่ออยู่ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเสริมอยู่ตามสมการ (3)

$$V = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) + IR_B \quad (3)$$

และในกรณีหลัง พิจารณาเมื่อมีการเชื่อมต่อศักดาไฟฟ้าต่ำมาก จะพบว่ามีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกับกรณีเมื่อมีศักดาไฟฟ้าสูงมากเชื่อมต่ออยู่ แต่จะมีความชัน (slop) ของความสัมพันธ์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเสมือนมีค่าตัวคูณ  $m$  ซึ่งจะมีค่าอยู่ในระหว่าง 1 ถึง 4 มาคูณร่วมอยู่ โดยค่าตัวคูณนี้จะมีสาเหตุเกิดจากคุณสมบัติการแพร่ของประจุไฟฟ้าที่ไหลไปพื้นที่ที่รอยต่อของไดโอด ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะสามารถพิจารณาได้เป็นดังสมการ (4)

$$V = m \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (4)$$

เนื่องจากค่าของพารามิเตอร์ทั้งสอง ได้แก่ ตัวคูณ  $m$  และค่าความต้านทานไฟฟ้า เป็นค่าที่แปรเปลี่ยนได้ และเป็นคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ โดยทั่วไปไดโอดที่นำมาใช้งานในการสร้างวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมจึงจะต้องมีค่าความถูกต้องของความสัมพันธ์ ตามสมการ (2) ในการคำนวณเชิงลอการิทึมอยู่ในช่วงที่กว้างตั้งแต่ 10 เท่า ถึง 100 เท่า อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีการสร้างวงจรไฟฟ้าที่สมดุลในส่วนของความต้านทานไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการใช้งานตามกฎของโอห์ม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ก็ตาม แต่ถ้านำไดโอดที่มีการใช้งานเฉพาะด้านสำหรับการประมวลผลเชิงลอการิทึมมาใช้งานก็เป็นการยากที่จะสร้างมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ที่มีสภาพการแข่งขันทางด้านราคาได้ จึงทำให้มีการใช้ทรานซิสเตอร์คู่โมโนลิธิค (Monolithic dual transistors) มาปรับปรุงเพื่อให้ทำหน้าที่เหมือนไดโอดขึ้น

1.2 รูปแบบการต่อวงจรโดยการใช้งานทรานซิสเตอร์

วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้คุณสมบัติทรานซิสเตอร์มาดัดแปลงให้มีคุณสมบัติคล้ายไดโอดมาทำการเชื่อมต่อในส่วนป้อนกลับของวงจรขยายเชิงค่านินการจะมีลักษณะดังแสดงในรูป 2ก. เราสามารถพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์จากกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าขาเข้า โดยสมมติให้วงจรขยายเชิงค่านินการมีการทำงานตามอุดมคติ จะพิจารณาได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขาคอลเล็กเตอร์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าที่ขาคอลเล็กเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ เนื่องจากขาเบสของทรานซิสเตอร์ต่อลงดิน ทำให้ขาเบสกับขาคอลเล็กเตอร์มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน โดยไม่ต้องคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าที่ขาเบสว่าจะมีค่าเท่าใด แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมเป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างขามิตเตอร์กับขาเบส ซึ่งจะสอดคล้องเป็นไปตามเงื่อนไขของขาคอลเล็กเตอร์ขณะที่จ่ายกระแสโอมิตเตอร์

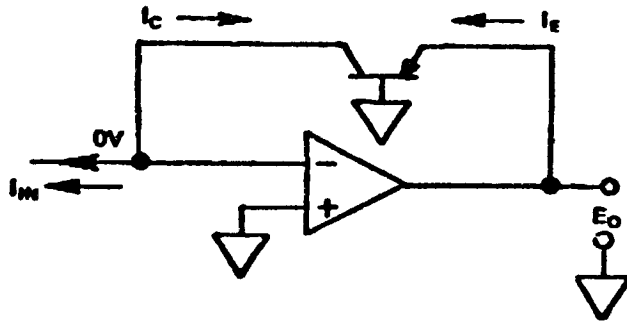
การวิเคราะห์วงจรโดยรวมต้องพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าต่างๆ ในวงจร โดยจะอาศัยจากความสัมพันธ์ของสมการที่พัฒนาจากสมการอีเบอร์ส์-มอลล์ (Ebers and Moll Equations) ซึ่งพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของกระแสโอมิตเตอร์และกระแสคอลเล็กเตอร์ในสภาพที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ต่อลงดิน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังในสมการ (5) และสมการ (6)

$$I_E = I_{ES} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1) - \alpha_I I_{CS} (e^{\frac{qV_C}{kT}} - 1) + \Sigma I_{ES_j} (e^{\frac{qV_E}{m_j kT}} - 1) \tag{5}$$

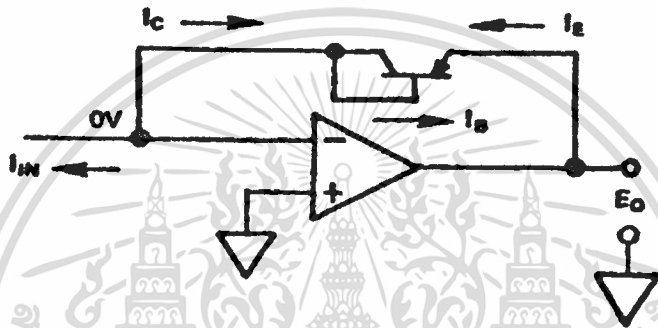
$$I_C = -\alpha_N I_{ES} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1) + I_{CS} (e^{\frac{qV_C}{kT}} - 1) + \Sigma I_{CS_j} (e^{\frac{qV_C}{m_j kT}} - 1) \tag{6}$$

- โดย  $V_E$  คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างขามิตเตอร์กับขาเบสของทรานซิสเตอร์
- $V_C$  คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาคอลเล็กเตอร์กับขาเบสของทรานซิสเตอร์
- $I_{ES}$  คือกระแสไฟฟ้าอิมิตัวของขามิตเตอร์
- $I_{CS}$  คือกระแสไฟฟ้าอิมิตัวของขาคอลเล็กเตอร์

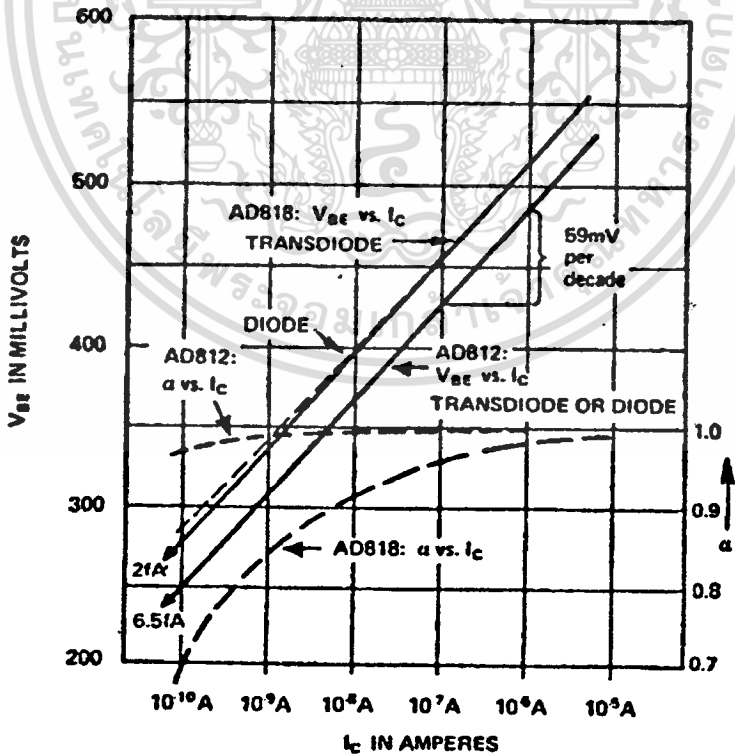
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2ก. การใช้ทรานซิสเตอร์มาใช้งานในวงจรขยายสัญญาณแรงกลอกริทึม



รูป 2ข. การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ 2 ขั้วในวงจรขยายสัญญาณแรงกลอกริทึม



รูป 2ค ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของไดโอดและทรานซิสเตอร์

รูป 2 การประยุกต์ใช้งานวงจรขยายสัญญาณแรงกลอกริทึมโดยใช้ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\alpha_N$  คือค่าอัตราการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าในสภาพการทำงานปกติ

$\alpha_f$  คือค่าอัตราการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าในสภาพการทำงานกลับทิศทาง

$m_f > 1$  และ  $m_r > 1$  คือส่วนประกอบของกระแสที่ไม่ได้รวบรวมที่ไหลผ่านตู้ขายเบสในวงจร

ตามรูป 2ก. แรงดันไฟฟ้า  $V_C$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ ทำให้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่ขาอิมิตเตอร์ตามสมการ (6) จะลดรูปสมการได้เป็นดังนี้คือ

$$I_C = -\alpha_N I_{ES} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1) \quad (6ก)$$

และเมื่อพิจารณาตามอุดมคติของวงจรขยายเชิงค่านินการจะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาสู่วงจร แต่จะมีทิศทางตรงกันข้าม ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมเป็นแรงดันที่ขาอิมิตเตอร์ ( $V_E$ ) หาได้เป็นไปตามสมการ (6ข)

$$V_E = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{IN}}{I_{ES}}\right) - \frac{kT}{q} \ln(\alpha_N) \quad (6ข)$$

ในการใช้งานปกติค่าอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้า  $\frac{I_{IN}}{I_{ES}}$  จะมากกว่า 1 มากๆ เช่นในตัวทรานซิสเตอร์ที่มีการใช้สารกึ่งตัวนำประเภทสารซิลิกอนจะมีค่าของกระแส  $I_{ES}$  อยู่ในระดับ  $10^{-15}$  แอมแปร์หรือน้อยกว่า ดังนั้นความสัมพันธ์ตามสมการ (6ข) สามารถใช้ในการคำนวณการเชิงลอการิทึมได้ทั่วไป อีกทั้งค่าของ  $\alpha_N$  เป็นค่าที่ใกล้เคียง 1 และมีความสำคัญต่อช่วงความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นในพจน์ของ  $\ln(\alpha_N)$  จะมีค่าที่ใกล้ศูนย์ จึงสามารถที่จะไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ แต่ถ้าวัดค่าของ  $\alpha_N$  ไม่เท่ากับ 1 เช่น เท่ากับ 0.99 จะมีผลทำให้เกิดค่าคงที่ที่เป็นค่าแรงดันออฟเซตของวงจรประมาณ 0.25 มิลลิโวลต์ ค่าของ  $\alpha_N$  ในสมการไม่ควรสับสนกับค่าของอัตราขยายกระแสของวงจรทรานซิสเตอร์ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อขาเบสลงดิน(Common Base) ซึ่งโดยทั่วไปใช้สัญลักษณ์  $\alpha$  และเนื่องจากกระแสอิมิตเตอร์จะมีส่วนประกอบจากทั้งกระแสคอลเลกเตอร์และกระแสในพจน์ของ  $m_f$  รวมกันมากกว่า 1 จึงทำให้  $\alpha$  มีค่าน้อยกว่า  $\alpha_N$  เสมอ อีกทั้งเป็นเพราะความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขาอิมิตเตอร์ที่จะลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้ามี่ค่าน้อย ดังแสดงในรูป 2ก. ในรูปเดียวกันนี้ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างที่ขาเบสกับขาอิมิตเตอร์และค่าของ  $\alpha$  ในตัวทรานซิสเตอร์ที่ใช้ทั่วไปในวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม ซึ่งจะ

ให้ค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำพอสมควร เมื่อกำหนดให้  $\alpha$  มีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้ทรานซิสเตอร์โดยให้ขาคอลเลกเตอร์และขาเบสมีการเชื่อมต่อกันตามรูป 2ข. เป็นวงจรที่มีคุณสมบัติคล้ายการทำงานของไดโอด ทำให้ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์เป็นกระแสอิมิตเตอร์ มีความสัมพันธ์ตามสมการ (5) ซึ่งพจน์แรกจะมีค่าใกล้เคียงกับกระแสคอลเลกเตอร์ และในพจน์ที่ 2 มีค่าเท่ากับศูนย์ และพจน์ที่เป็นผลรวมของพจน์ที่  $m_i > 1$  มีค่าเท่ากับกระแสขาเบส ดังพิจารณาจากสมการ (7)

$$I_{IN} = -I_C - I_B = -I_C \left[ 1 + \frac{1}{h_{FE}} \right] = \alpha_N I_{ES} \left( e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1 \right) \left[ 1 + \frac{1}{h_{FE}} \right] \quad (7)$$

ควรสังเกตว่าค่า  $1/h_{FE}$  เป็นพจน์ที่ใช้เป็นเกณฑ์วัดค่าของ  $m_i$  ว่ามากกว่า 1 มากน้อยอย่างไร รูปสมการ (7) สามารถดัดแปลงใหม่ได้ดังสมการ (7ก)

$$V_E = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{IN}}{I_{ES}} \right) - \frac{kT}{q} \ln \left[ \alpha_N \left( 1 + \frac{1}{h_{FE}} \right) \right] \quad (7ก)$$

เพราะว่าค่า  $1 + \frac{1}{h_{FE}}$  เท่ากับ  $\frac{1}{\alpha}$  ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่า  $\alpha, \alpha_N$  และค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้ในวงจร

$h_{FE}$ ( $\alpha_N \cong 1$ )	$\frac{\alpha}{\alpha_N}$	$-\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\alpha}{\alpha_N} \right)$ mV @ 25°C
$\infty$	1	0
1000	0.999	0.03
200	0.995	0.13
100	0.99	0.26
50	0.98	0.51
19	0.95	1.32
11.5	0.92	2.14
9	0.9	2.7
4	0.8	5.7
3	0.75	7.4
1	0.5	17.8

จากการพิจารณาค่าต่างๆ ที่เกิดขึ้นสามารถที่จะนำเอาทรานซิสเตอร์ที่มีค่า  $h_{FE}$  มากๆ มาแทนไดโอดได้ และวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ได้จะมีย่านการใช้งานที่กว้างตามย่านกระแสอิมิตเตอร์

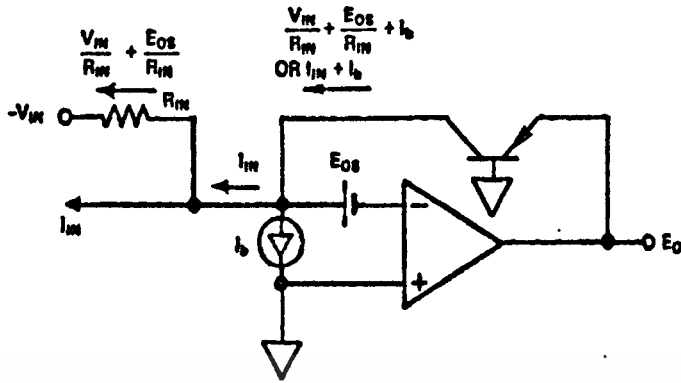
### 1.3 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมมีค่าน้อย และพิจารณาจากสมการ (6) เมื่อค่า  $V_{CB}$  ไม่เท่ากับศูนย์โวลต์ พจน์ต่างๆ ในข้างขวามือของสมการ จะมีส่วนที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขาอิมิตเตอร์ เมื่อพิจารณาบริเวณที่มีการนำกระแสไฟฟ้าข้างหน้า (forward conducting region) สามารถพิจารณาได้ดังสมการ (8)

$$V_E = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_{IN}}{\alpha_N I_{ES}} + \frac{I_{CS}}{\alpha_N I_{ES}} (e^{\frac{qV_C}{kT}} - 1) + \Sigma(etc.) \right] \quad (8)$$

โดยในที่นี้การใช้งานต่อขาเบสของทรานซิสเตอร์ลงดิน  $V_E = V_{EB}$ ,  $V_C = V_{CB}$  วงจรขยายสัญญาณเชิงคำนวณการจะเกิดแรงดันไฟฟ้าออฟเซต  $V_{OS}$  ไบแอสทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขาคอลเลกเตอร์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่วงจรถูกป้อนร่วมกัน ดังนั้นการใช้งานกับวงจรขับเบส การออกแบบวงจรต้องมั่นใจถึงการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่ขาคอลเลกเตอร์กับขาเบสส่วนเกิดขึ้นหรือไม่ และกระแสไฟฟ้าใช้งานที่ต้องการมีค่าน้อยเพียงใด ถึงเข้ากันได้กับวงจรที่จะใช้งาน อีกทั้งขนาดความคลาดเคลื่อนของกระแสคอลเลกเตอร์มีผลต่อการประมวลสัญญาณ พิจารณาผลจากการทดลองต่อวงจรโดยให้ขาอิมิตเตอร์กับขาเบสเข้าด้วยกัน ป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ขาคอลเลกเตอร์  $V_C$  เป็นบวกเมื่อใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP แต่ต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าเป็นลบเมื่อใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN กระแสไฟฟ้าที่ขาคอลเลกเตอร์จะประกอบด้วยค่าของพจน์  $V_C \neq 0$  และเนื่องจาก  $V_E = 0$  การวัดค่าความคลาดเคลื่อนที่ขาคอลเลกเตอร์กับขาเบสเสมือนไดโอดที่ทำงานลักษณะไบแอสแบบฟอร์เวิร์ด (Forward Bias) ซึ่งเป็นกรณีที่เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุด และเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าจะมีค่ามากกว่าการไบแอสแบบรีเวิร์ด (Reverse Bias) จึงควรระมัดระวังการป้อนกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่เกินค่ามากๆ และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเพื่อไบแอสวงจขยายสัญญาณ  $I_b$  เป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนในลักษณะเชิงเส้นเมื่อเทียบกับสัญญาณที่ป้อนเข้าและความคลาดเคลื่อนของสัญญาณขาออกจากวงจขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม

แรงดันออฟเซตของวงจขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม  $E_{os}$  ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ในส่วนป้อนกลับ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ของความต้านทานที่ต่ออยู่ในด้านที่ทำการป้อนเข้า  $E_{os}/R_{in}$  ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะให้ผลที่เหมือนกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากกระแสไบแอส แต่สำหรับแหล่ง



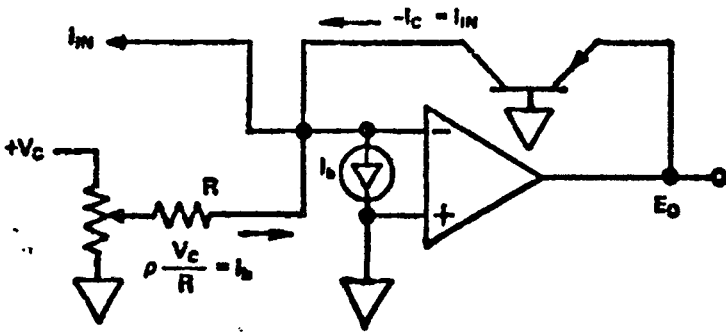
รูป 3 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงดันออฟเซตและกระแสไบแอส

ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่ป้อนเข้าและความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้

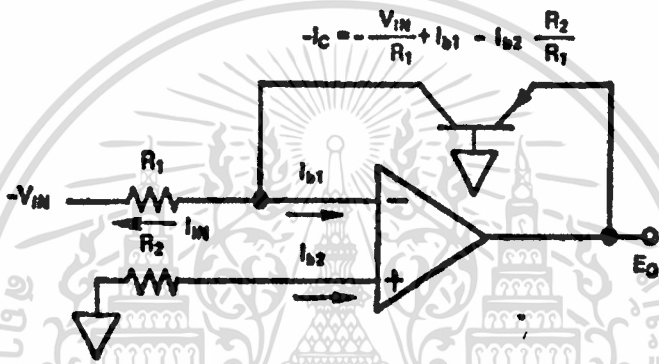
INPUT	ERROR
$\frac{I_{IN} + I_b}{I_{IN}}$	$\frac{kT}{q} \left( \ln \left[ \frac{I_{IN} + I_b}{\alpha I_{ES}} \right] - \ln \frac{I_{IN}}{I_{ES}} \right)$
0.9	-2.7mV
0.99	-0.26mV
0.999	-26. μV
1.000	0
1.001	26 μV
1.01	0.26mV
1.1	2.45mV

จ่ายกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าจะให้  $\frac{1}{R_{in}}$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนที่เหลืออยู่ที่สำคัญของ  $E_{os}$  จะเป็นผลเนื่องจากค่า  $V_{cb}$

ความคลาดเคลื่อนของกระแสไบแอสสามารถแก้ไขให้ลดลงได้หลายวิธี วิธีที่มีประสิทธิภาพและเห็นผลชัดเจน คือการเลือกวงจรขยายเชิงค่านินการที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ซึ่งวงจขยายเชิงค่านินการที่มีการพัฒนาที่ดีขึ้นอาจจะถูกนำมาใช้ในลักษณะการต่อวงจร ตามรูป 4ก. จะมีส่วนที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนซึ่งจะนำไปรวมกับกระแสไฟฟ้าที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากอุณหภูมิหนึ่งๆ หรือนำมาใช้ในลักษณะการต่อวงจรตามรูป 4ข. เป็นการออกแบบวงจรให้มีการชดเชยผลความคลาดเคลื่อนโดยต่อตัวต้านทานไฟฟ้าอนุกรมกับขาบวกของสัญญาณที่ป้อนเข้าเพื่อให้เกิดการชดเชยค่ากระแสไบแอสตามค่าต่างๆ เมื่อวงจขยายสัญญาณเชิง



รูป 4ก การกำจัดผลของกระแส  $I_b$  โดยการชดเชย



รูป 4ข การกำจัดผลของกระแส  $I_b$  โดยวิธีสมมาตร

รูป 4 การกำจัดผลความคลาดเคลื่อนเนื่องจากกระแสไบแอส

$$-I_C = I_{IN} + I_{b1} - I_{b2} \frac{R_2}{R_1} \tag{9}$$

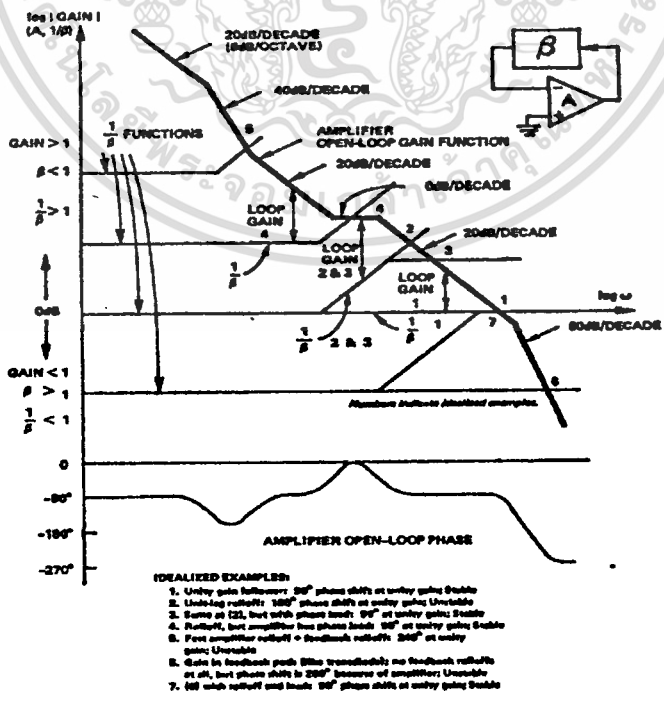
กำหนดให้  $I_{b1} = I_{b2}$  และ  $R_1 = R_2$  จะได้  $-I_C = I_{IN}$  โดยที่  $I_{b2} R_2$  ควรไม่เป็นค่าที่มากจนส่งผลกระทบต่อ  $V_c$  และกระแสไฟฟ้าที่ขอมต่อการใช้ไบโพลารานซิสเตอร์ที่ป้อนเข้าวงจรขยายเชิงค่านินการ

ความคลาดเคลื่อนของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันออฟเซตสามารถลดลง ณ อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ หรือในอุณหภูมิบางค่า หรือเกินค่าอุณหภูมิที่กำหนด โดยวงจรขยายเชิงค่านินการจะกระทำเป็นศูนย์ แม้ไม่ควบคุมสภาพแวดล้อมทางอุณหภูมิที่ใช้งาน วงจรขยายเชิงค่านินการต้องมีการกำหนดการทำงาน เนื่องจาก  $I_{ES}$  มีค่า  $10^{-4}$  หรือน้อยกว่า ซึ่งมีความสำคัญและควรระมัดระวังการเลือกวงจรถ่ายเชิงค่านินการเป็นตัวแทนจ่ายกระแสรั่ว ณ จุดรวม เนื่องจากขีดจำกัดของช่วงพฤติกรรมเชิงลอการิทึม โดยปกติจะกำหนดคุณสมบัติการป้อนเข้าของวงจรถ่ายเชิงค่านินการและการออกแบบวงจร

การใช้ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียวจะเป็นวิธีที่ใช้เทคนิคทางวงจรมีน้อยที่สุด แต่จะมีความคลาดเคลื่อนจากแหล่งที่ก่อให้เกิดอยู่ 2 จุด ได้แก่การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิของ  $I_{ES}$  มีค่าสองเท่าต่อการเพิ่มประมาณ 10 องศาเซลเซียส และการแปรผันของ  $\frac{kT}{q}$  ประมาณ 0.33%/°C ที่ 25 °C ประมาณ 2 mV/°C หรือการเปลี่ยนแปลง 8%/°C ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $E$

1.4 เสถียรภาพของวงรอบปิด

ในวงจรมีขั้วเชิงดำเนินการเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบคือการเคลื่อนเฟสวงรอบของวงจรมีค่าน้อยกว่า 180 องศา ความถี่ที่ให้ค่าอัตราขยายวงรอบ  $AB$  น้อยกว่า 1 สามารถแสดงลักษณะความสัมพันธ์ของโบด (Bode Plot) ของวงจรมีขั้วเชิงดำเนินการน้อยใช้ตัวต้านทานไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุไฟฟ้า (RC) ซึ่งจะบอกถึงค่าของ  $A$  และ  $B$  มีความชันที่ต่างกันน้อยกว่า 40 dB ต่อ 10 เท่า เมื่อความชันตัดข้ามอัตราขยายวงรอบปิดเท่ากับหนึ่ง ในรูป 5 วงจรมีขั้วเชิงดำเนินการที่ใช้อุปกรณ์แบบตัวประกอบแบบเก็ยป้อนกลับ (passive feedback component) ค่า  $\frac{1}{\beta}$  จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง ดังนั้นอัตราขยายของวงจรมีค่า 20 dB ต่อ 10 เท่า ให้เป็นหนึ่ง ซึ่งวงจรมีเสถียรด้วยการป้อนกลับด้วยตัวต้านทานไฟฟ้า



รูป 5 การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรมีขั้วเชิงดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อทรานซิสเตอร์เป็นการนำทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ให้มีคุณสมบัติคล้ายไดโอดในทางป้อนกลับ ซึ่งจะมีทั้งแบบไวต่อการใช้งานและความไม่เป็นเชิงเส้น อาจมีอัตราการขยายของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าที่สูงกว่าการป้อนกลับโดยใช้ตัวต้านทานไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งจะไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากค่าอัตราการขยายที่ความถี่หนึ่งๆ อาจเกิดอัตราการขยายที่เท่ากับหนึ่งตัดผ่าน อัตราขยายของวงจรมีค่าน้อยกว่าหนึ่งถูกนำมาเลื่อนเฟสมาก ในความเป็นจริงค่าอัตราการขยายจะสัมพันธ์กับระดับสัญญาณ และอาจเป็นตัวเลือกระหว่างเสถียรภาพที่ระดับสูงและความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) ที่ระดับต่ำ

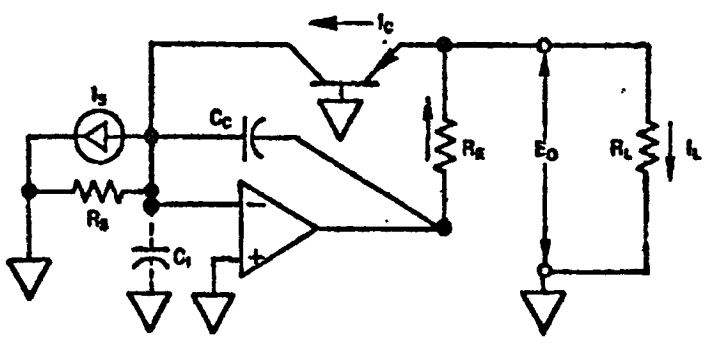
ค่าแอมพลิจูดที่ป้อนกลับมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของแรงดันอิมิตเตอร์ ดังสมการ (10)

$$\frac{dI_C}{dV_E} = \frac{q}{kT} I_C \cong \frac{I_C}{V_T} = \frac{1}{r_E} \quad (10)$$

โดยในที่นี้  $V_T$  เป็นแรงดันอุณหภูมิตัว (thermal voltage) เท่ากับ  $\frac{kT}{q}$  ซึ่งมีค่าประมาณ 0.026 โวลต์ที่อุณหภูมิของห้อง (300 °K) เนื่องจากกระแสอิมิตเตอร์กับกระแสคอลเลกเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน ด้านศักดาสูงความต้านทานไฟฟ้าที่มองเข้าสู่จอร์มิเตอร์มีค่าเท่ากับ  $\frac{0.026}{I_C}$  ซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า  $r_E$  ค่อนข้างกว้างมาก เช่นจะมีค่า 26 โอห์ม ที่กระแส 1 มิลลิแอมแปร์ และจะมีค่า 26 เมกกะโอห์มที่กระแส 1 นาโนแอมแปร์ เพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพจากการปฏิบัติ การใช้งานทั่วไปจะต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าคร่อมส่วนป้อนกลับ เพื่อที่จะได้ค่าความถี่ที่จุดหัก (break frequency) ที่ความถี่สูง เช่นถ้าต้องการให้เกิดจุดหักที่ 1.6 เมกกะเฮิรตซ์ ที่ด้านศักดาไฟฟ้าสูง จะต้องนำตัวเก็บประจุค่า 0.039 ไมโครฟารัดมาต่อขนานกับทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่เชิงลอการิทึม โดยวิธีนี้ด้านศักดาไฟฟ้าค่าความถี่ที่จุดหักจะมีค่าเท่ากันด้วย อย่างไรก็ตามการชากที่จะให้วงจรขยายเชิงดำเนินการรับภาระ 26 โอห์ม ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้ามากที่สุด ประมาณ 0.6 โวลต์ วงจรขยายเชิงดำเนินการเกือบทั้งหมดจะมีพิสัยสำหรับภาระ 1 กิโลโอห์มหรือมากกว่า

การแก้ปัญหาวิธีที่ง่ายเพื่อลดผลความคลาดเคลื่อนควรต่อตัวต้านทานไฟฟ้า  $R_E$  อนุกรมกับขาออกของวงจรมีค่าเชิงดำเนินการและขาอิมิตเตอร์ ตามรูป 6 ซึ่งไม่เป็นการเพิ่มภาระของวงจรมีค่าเชิงดำเนินการและทำหน้าที่เป็นตัวลดผลระหว่างขาออกของวงจรมีค่าเชิงดำเนินการกับขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะทำหน้าที่ป้อนกลับ  $C_C$  จะเชื่อมขาออกของวงจรมีค่าเชิงดำเนินการกับจุดรวมสัญญาณ ซึ่งสามารถที่จะลดขนาดความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 6 วงจรที่เพิ่มเติมตัวต้านทานด้านและตัวเก็บประจุเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของวงจร

สัญญาณที่ได้ออกมาจากขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ จึงสามารถประมวลผลสัญญาณได้เร็ว และค่า  $R_E$  ควรมีค่ามากเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่จะถูกจำกัดโดยคุณลักษณะการจ่ายภาระของวงจรขยายเชิงค่านินการ เพราะว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวความต้านทานไฟฟ้าจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์ร่วมกับกระแสไฟฟ้าของภาระและค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมไดโอดประมาณ 0.7 โวลต์ ดังนั้นวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ จะได้ค่าของ  $R_E$  ได้ดังสมการ (11)

$$R_E \cong \frac{9.3}{I_C + I_L} \tag{11}$$

ค่า  $R_E$  ช่วยป้องกันรอยต่อของทรานซิสเตอร์เมื่อเกิดสภาพที่แรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าเกิน และมีข้อเสียคือการป้อนกลับโดยใช้ตัวเก็บประจุจะขึ้นกับค่าประจุไฟฟ้ารวมในตัวเก็บประจุไฟฟ้า ว่ามีค่ามากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ทางโบด ดังแสดงในรูป 7

แต่ในระดัปลสัญญาณที่มีขนาดเล็กน้อยๆ ผลตอบสนองของส่วนป้อนกลับของวงรอบปิด

$$\beta = \frac{\Delta V_E}{\Delta E_A} \text{ จะหาได้จากสมการ (12)}$$

$$\frac{\Delta V_f}{R_s} (1 + R_s C_1 p) = (\Delta E_A - \Delta V_f) C_c p = \Delta I_C \tag{12}$$

เมื่อพิจารณาค่า  $\Delta I_C$  จะหาได้จากสมการ (13)

$$\Delta I_C = \frac{\Delta E_0}{r_E} = \frac{\Delta E_A}{R_E + r_E} \tag{13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีภาระต้องพิจารณา ผลของภาระความต้านทานไฟฟ้า โดยรวมผลของ  $\frac{r_E R_E}{R_L}$  กับ  $(R_E + r_E)$  จะสามารถหาค่า  $\beta$  ได้ดังสมการ (14)

$$\beta = \frac{\Delta V_f}{\Delta E_A} = \frac{R_s}{R_E + r_E} \frac{1 + (R_E + r_E) C_c p}{1 + R_s (C_I + C_c) p} \quad (14)$$

เมื่อพิจารณาส่วนป้อนเข้าเป็นแหล่งจ่ายกระแส ( $R_s \rightarrow \infty$ ) พิจารณาได้ดังสมการ (15)

$$\beta = \frac{1}{R_E + r_E} \frac{1 + (R_E + r_E) C_c p}{(C_I + C_c) p} \quad (15)$$

พิจารณาที่ความถี่สูง ค่าของ  $p \rightarrow j\omega \gg 2\pi f_T$  สามารถประมาณค่า  $\beta$  ได้ตามสมการ (16)

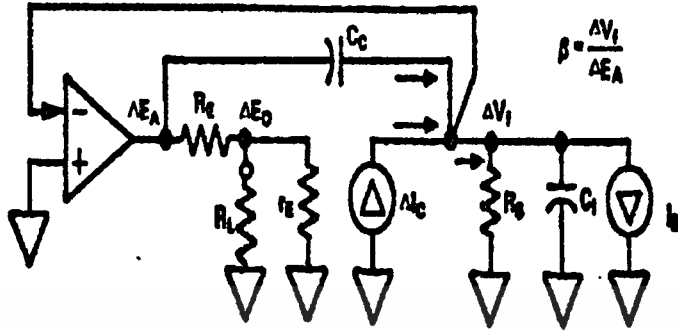
$$\beta = \frac{C_c}{(C_I + C_c)} \quad (16)$$

และพิจารณาที่ความถี่ต่ำ กรณีแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ามีความต้านทานไฟฟ้าของแหล่งจ่ายเป็น  $R_s$  มีค่าจำกัด จะสามารถประมาณค่า  $\beta$  ได้ตามสมการ (17)

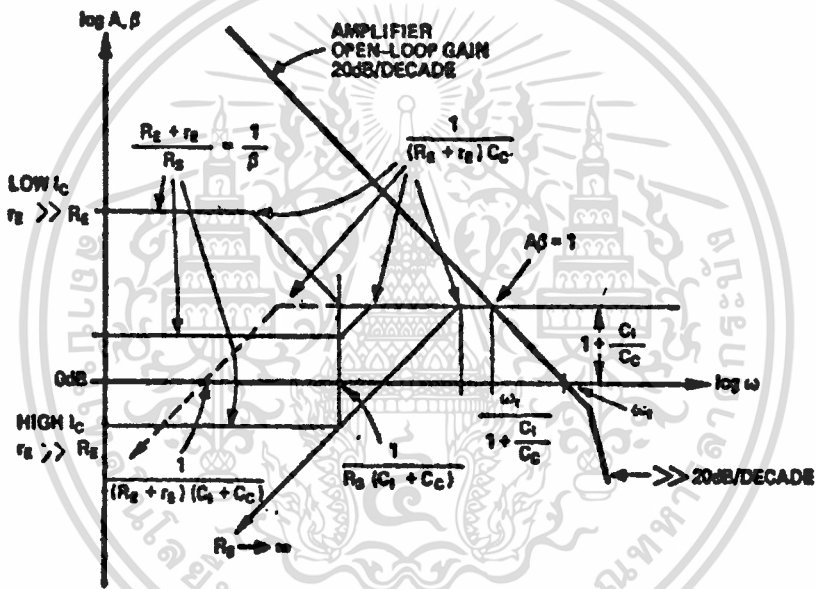
$$\beta = \frac{R_s}{R_E + r_E} \quad (17)$$

จากสมการ 10 ค่าของตัวความต้านทานไฟฟ้า  $r_E$  จะมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ ค่าเวลาคงตัวจะมีส่วนของตัวความต้านทานไฟฟ้า  $r_E$  ลักษณะแปรผันตามกัน สำหรับค่ากระแสคอลเล็กเตอร์น้อยๆ และจะคงที่ สมมูลกับค่า  $R_E$  สำหรับค่ากระแสคอลเล็กเตอร์มากๆ

ในการนำมาใช้งานเสถียรภาพของระบบที่ใช้ระดับสัญญาณต่ำๆ ส่วนตัวหารจะมีเกิดจุดหักความถี่  $\omega_c = \frac{1}{R_B r_B} C_c$  ซึ่งจะมีค่าไม่เกิน 8 เท่า เช่น 4 เท่า ความถี่ซึ่ง  $\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{C_I}{C_c}$  อัตราการขยายแบบวงรอบเปิดของวงจรขยายเชิงค่านินการจะให้ค่ากระแสคอลเล็กเตอร์มากที่สุด



รูป 7ก แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจร



รูป 7ข ความสัมพันธ์ของขนาดตามวิธีโบด

รูป 7 การวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์โดยวิธีโบด

ตัวอย่างถ้า  $R_E = 2.2$  กิโลโอห์ม  $\omega_T = 10^7$  เรเดียนต่อวินาที  $C_I = 10$  พิโคฟาร์ด ที่กระแส 1 มิลลิแอมแปร์ ค่าความต้านทานไฟฟ้า  $r_E$  จะมีค่าเท่ากับ 26 โอห์ม

$$\frac{1}{2200C_c} = \frac{1}{2} \left( \frac{\omega_t}{1 + C_I/C_c} \right) \tag{18}$$

ซึ่งสามารถหาค่า  $C_c$  ได้เท่ากับ 88 pF แต่จะใช้ค่า 100 pF จะเป็นค่าที่นำมาใช้งาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 การใช้งานวงจรถยายสัญญาณเชิงลอการิทึม

วงจรถยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบทั่วไปจะไม่นิยมนำมาใช้งาน เนื่องจากวงจรมีความไวต่อการตอบสนองทางอุณหภูมิ กล่าวคือสัญญาณที่ได้จะขึ้นกับค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง  $\alpha_{ES}$  ซึ่งจะต่างกันออกไปในแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้งาน และจะมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 2 เท่าต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 10 องศาเซลเซียส ค่าตัวประกอบในการปรับค่า  $\frac{kT}{q}$  จะเปลี่ยนไปในทางเดียวกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ด้วยขนาด 0.33 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 27 องศาเซลเซียส

การจับคู่ทรานซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ จะทำให้ค่า  $V_{BE}$  ของทรานซิสเตอร์จะมีค่าที่เท่ากันสำหรับกระแสคอลเล็กเตอร์และอุณหภูมิตั้งที่ ในอัตราส่วนของพจน์  $\alpha_{ES}$  จะคงที่ต่ออุณหภูมิ ทรานซิสเตอร์ที่นำมาใช้คำนวณเชิงลอการิทึมจะนำมาใช้งานเป็นคู่เพื่อทำการชดเชยผลการเปลี่ยนแปลงของ  $\alpha_{ES}$  กับอุณหภูมิ การชดเชยจะกระทำโดยการหักล้าง ดังในสมการ (19)

$$\frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{\alpha_{ES_1}} - \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{\alpha_{ES_2}} = \frac{kT}{q} \left[ \ln \frac{I_1}{I_2} + \ln \frac{\alpha_{ES_2}}{\alpha_{ES_1}} \right] \quad (19)$$

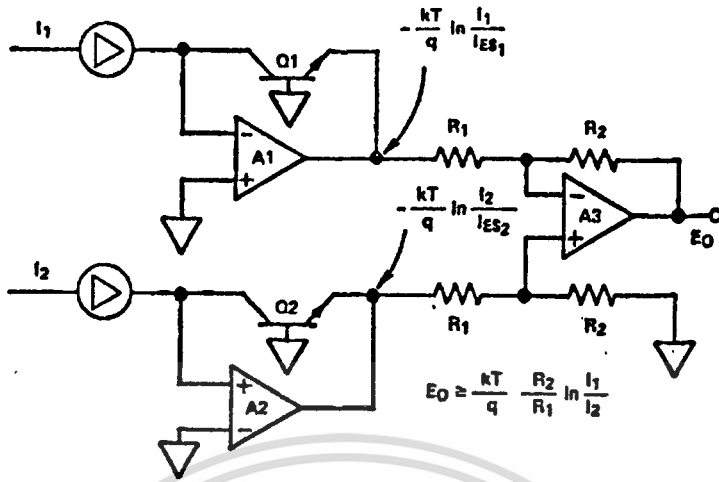
ในพจน์ที่เกิดความคลาดเคลื่อนมีค่าใกล้เคียง 1 จะทำให้ค่า  $\ln(I)=0$  ซึ่งในการพิจารณาถ้าไม่สามารถละทิ้งได้ แต่จะสามารถกำหนดออกมาเป็นค่าคงที่ด้วยแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าในสถานะต่อมาได้ ในการหักล้างจะกระทำโดยการใช้ตัวลบ ดังแสดงในรูป 8 และ 9 หรือต่อวงจรถยายสัญญาณเชิงลอการิทึมในลักษณะที่เรียงลำดับตรงกันข้าม ดังรูป 10, 11 และ 12

ในรูป 8 ผลแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรถยายเชิงดำเนินการ  $A_1$  และวงจรถยายเชิงดำเนินการ  $A_2$  เมื่อใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นพีเอ็น จะได้ดังสมการ (20)

$$E_{o_1} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{\alpha_{ES_1}}, E_{o_2} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{\alpha_{ES_2}} \quad (20)$$

เมื่อนำมาลบกันในวงจรถยายผลต่าง ผลที่ได้จากวงจรถยายเชิงดำเนินการ  $A_3$  เป็นสมการ (21)

$$E_o = \frac{R_2}{R_1} \frac{kT}{q} \left( \ln \frac{I_1}{I_2} + const. \right) \quad const. \rightarrow 0 \quad (21)$$



รูป 8 วงจรหาค่าอัตราส่วนเชิงลอการิทึมที่มีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอุณหภูมิแล้ว ( $I_{ES}$ )

เมื่อนำทรานซิสเตอร์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการมาใช้งาน คุณสมบัติของวงจรที่มีการนำเอาอัตราส่วนเชิงลอการิทึมมาใช้งานจะมีความสัมพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับค่าของ  $I_{ES}$  ตัวอย่างเช่นเมื่อป้อนสัญญาณป้อนกระแสไฟฟ้า  $I_1$  โดยที่มีอัตราส่วนกระแสไฟฟ้าอ้างอิง  $I_2$  มีค่าคงที่เป็นจำนวนเท่าของ  $I_1$  เช่นถ้ากำหนดให้  $I_2 = I_1$  จะได้  $\ln(\frac{I_1}{I_2}) = 0$  เป็นต้น หรืออาจจะมีการกำหนดค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของ  $I_1$  ในช่วงการใช้งาน หรือเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเรขาคณิต เพื่อให้เกิดการสมมาตร แต่โดยมากผลอันเนื่องมาจาก  $\frac{kT}{q}$  จะไม่นำมาพิจารณาเพื่อความสะดวกต่อการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้า แต่จะใช้ค่าอัตราส่วน  $\frac{R_2}{R_1}$  เป็นพหุคูณ ที่จะให้ค่าอัตราขยายในการใช้งาน เช่นถ้าต้องการให้สัญญาณที่ได้จากวงจรมีค่าพหุคูณเป็น 1 โวลต์ต่อ 10 เท่าจะได้

$$E_o = K \log_{10}(I_1 / I_2) = 1.0 \log_{10}(I_1 / I_2) \tag{22}$$

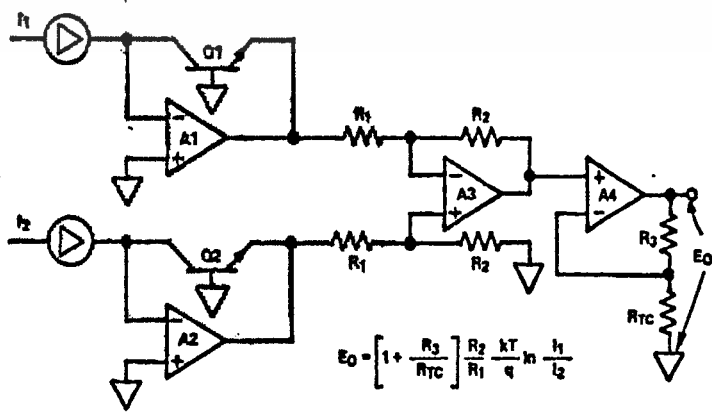
เมื่อกำหนดให้  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{q}{kT(\ln 10)}$  ค่านี้จะมีค่าเท่ากับ 16.903 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวงจรมีค่าประมาณ 0.33 เปอร์เซ็นต์ต่อองศาเซลเซียส เป็นค่าที่มากกว่าค่าที่ต้องการต่อเสถียรภาพของวงจรและย่านอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถทำการปรับตามค่าอัตราขยายในสถานะที่ต่อเพิ่มให้มีค่าเท่ากัน แต่มีค่าเครื่องหมายสัมประสิทธิ์ตรงข้ามกับค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิดังแสดงในรูป 9 ค่าอัตราขยายที่เป็นลบจะกำหนดโดยวงจรที่ต่อเพิ่มเติมและอัตรการขยายของวงจรความต้านทานไฟฟ้า  $R_{TC}$  ซึ่งจะสามารถเลือกอัตราขยายได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ (23)

$$G = 1 + \frac{R_3}{R_{TC}} \tag{23}$$

เมื่อต้องการให้วงจรที่ต่อเพิ่มมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง  $-0.33$  เปอร์เซ็นต์ต่อองศาเซลเซียส กำหนดให้  $G=16.9$ , และ  $R_{TC}=1$  กิโลโอห์ม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส  $R_3=15.9$  กิโลโอห์ม และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ  $R_{TC}$  ประมาณ 0.35 เปอร์เซ็นต์ต่อองศาเซลเซียส วงจรตามรูป 8 และรูป 9 ที่แสดงจะไม่มืองค์ประกอบที่ก่อให้เกิดความเสถียรภาพทางพลวัต คือ  $R_E$  และ  $C_C$  แต่สามารถถูกนำมาใช้งานได้

ขณะที่วงจรตามรูป 8 และรูป 9 สามารถทำงานได้ แต่จะมีราคาแพงเมื่อนำมาใช้งานและเป็นการยากต่อการผลิตเป็นสินค้า จึงมีการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมตามรูป 10 และรูป 11 ซึ่งมีการใช้งานมากกว่า และพัฒนาเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลได้ จะแตกต่างจากวงจรตามรูป 8 และรูป 9 ในการจัดวางการทำงานในการลบสัญญาณ โดยมีการเชื่อมต่อวงจรอนุกรมกันในค่าเครื่องหมายที่ต่างกันของไดโอดที่เป็นตัวทำหน้าที่เชิงลอการิทึม ในรูป 10 จะสามารถแสดงหลักการการทำงานได้ดังนี้ เมื่อกระแสไฟฟ้า  $I_1$  เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่วงจร ซึ่งอาจจะเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีความต้านทานขาเข้า  $R_{IN}$  เชื่อมต่อแหล่งจ่ายแรงดันขาเข้า  $V_{IN}$  และค่ากระแสไฟฟ้า  $I_2$  เป็นค่าอ้างอิงหรือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าอีกค่าหนึ่งที่ถูกเตรียมไว้ จะสามารถพิจารณาได้ว่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาอิมิตเตอร์และขาเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะมีค่าเป็น  $-\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_1}{\alpha I_{ES1}}\right)$  และกำหนดให้ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  มีค่าอัตราขยายกระแสไฟฟ้า  $h_{FE}$  มี



รูป 9 วงจรหาค่าอัตราส่วนเชิงลอการิทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามาก ๆ ซึ่งหมายความว่ากระแสที่ขาเบสจะละทิ้งไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาอิมิตเตอร์และขาเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  จะมีค่าเป็น  $-\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_2}{\alpha I_{ES2}}\right)$  ซึ่งจะได้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  คือ  $\frac{E_0 R_{TC}}{R_2 + R_{TC}}$  และแรงดันที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_1$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ขาอิมิตเตอร์จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_2 - \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{\alpha I_{ES2}} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{\alpha I_{ES1}} \quad (24)$$

$$E_o = \left[1 + \frac{R_2}{R_{TC}}\right] V_2 = -\left[1 + \frac{R}{R_{TC}}\right] \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_1}{I_2} \frac{\alpha I_{ES2}}{\alpha I_{ES1}}\right] \quad (25)$$

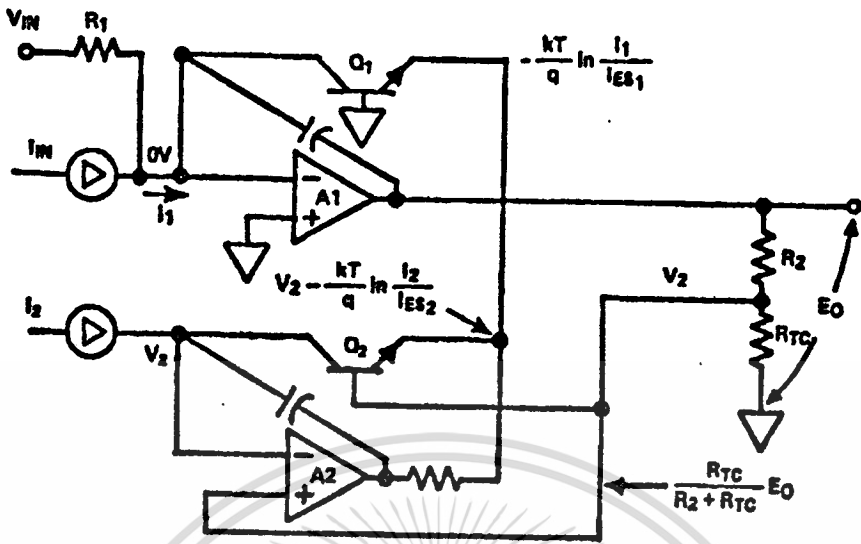
การต่อวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า  $V_2$  ด้วยขาป้อนเข้าอ้างอิงของวงจรถยายเชิงค่านินการ  $A_2$  เพื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาคอลเลกเตอร์และขาเบสของทรานซิสเตอร์  $Q_2$  มีค่าเป็นศูนย์จริง เนื่องจากส่วนของวงจรถอยป้อนเข้าขาเบสของวงจรถยายเชิงค่านินการ  $A_2$  มีค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_2$  จ่ายค่ากระแสไฟฟ้า  $I_2$  จากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งและแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_2$  หรือใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่ามากต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานไฟฟ้าค่ามาก ๆ ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าจะแบ่งแรงดันไฟฟ้าเพื่อชดเชยผลการเปลี่ยนแปลงด้านอุณหภูมิของค่า  $\frac{kT}{q}$  และจัดให้มีตัวประกอบในการคำนวณค่าขนาด คือถ้า  $1 + \frac{R_2}{R_{TC}} = 16.9$  ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะได้

$$E_o = -IV \bullet \log_{10} \frac{I_1}{I_2} \quad (26)$$

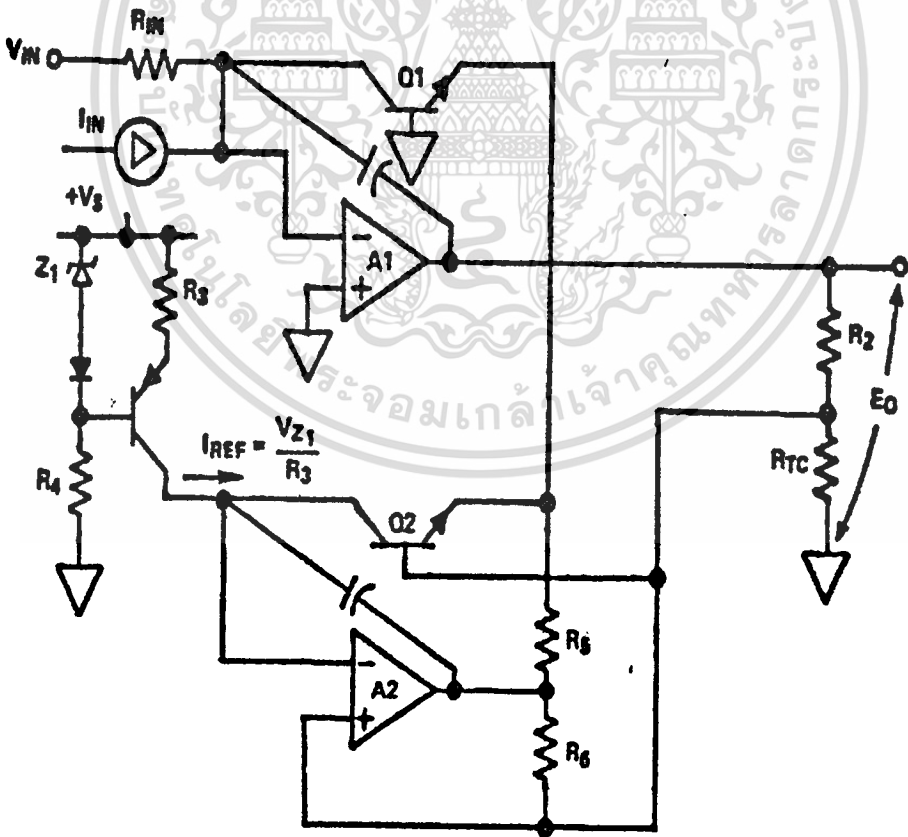
จากรูป 11 แสดงวงจรที่เหมือนกันโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าอ้างอิงคงที่ เพื่อความถูกต้องของการแปลงค่าเชิงลอการิทึมของค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง ๆ หรือการป้อนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าหนึ่ง ๆ โดยกระแสไฟฟ้าอ้างอิงเท่ากับ  $\frac{V_2}{R_3}$  จะได้

$$E_o = K \log_{10} \frac{I_{IN}}{I_{REF}} = K \log_{10} \frac{V_{IN}}{E_{REF}} \quad (27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 10 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่มีการชดเชยผลเนื่องจากอุณหภูมิแล้ว



รูป 11 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่มีการชดเชยผลเนื่องจากอุณหภูมิโดยใช้แรงดันอ้างอิงภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$E_{REF} = V_{z_1} \frac{R_{IN}}{R_3}$$

และ

$$K = \left[ 1 + \frac{R_2}{R_{TC}} \right] \frac{kT}{q} \ln 10$$

โดยที่ความต้านทานไฟฟ้า  $R_6$  ต่อกับด้านออกของค่าสูงในย่านพลวัตที่จะขยายตัว 1 มิลลิแอมแปร์ ก่อให้เกิดผลของสภาพความต้านทานมีค่าเป็นลบเกิดขึ้นและส่วนผลที่จะลดการเกิดแรงดันไฟฟ้า ตกคร่อมความต้านทานไฟฟ้าค่ามากๆของ  $Q_1$  จะไปคำนวณโดย

$$R_6 = \frac{R_3}{R_B} \frac{R_{TC} R_2}{R_{TC} + R_2} \quad (28)$$

เมื่อ  $R_B$  เป็นค่าความต้านทานมากๆ

### 1.6 วงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล

ตำแหน่งความต้านทานและวงจรขยายเชิงดำเนินการเชิงลอการิทึมมีการเปลี่ยนตำแหน่ง โดยพื้นฐานการออกแบบรวมกับหลักการที่เหมือนกันสามารถที่จะใช้สร้างวงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล ได้ดังสมการ (28)

$$E_o = -E_{REF} e^{-V_{IN}/K} = -E_{REF} (10)^{-V_{IN}/K_{10}} \quad (29)$$

ซึ่งสามารถที่จะต่อวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้ดังรูป 12 ทรานซิสเตอร์  $Q_2$  ทำหน้าที่ในการสร้างกระแสไฟฟ้าอ้างอิงในการดำเนินการเชิงลอการิทึมนั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฐานของแรงดันไฟฟ้าที่ 600 มิลลิโวลต์ จะได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ (29) และสมการ (30) เมื่อทำการเปลี่ยนฐาน เพื่อให้เป็นฐานการคำนวณเป็นฐาน 10 จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (31)

$$-\frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{E_o}{R_1 \alpha I_{ES1}} \right] = \left[ \frac{R_{TC}}{R_2 + R_{TC}} \right] V_{IN} - \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_{REF}}{\alpha I_{ES2}} \right] \quad (30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{q}{kT} \ln \left[ \frac{R_{TC}}{R_2 + R_{TC}} \right] V_{IN} = -\ln \left[ \frac{E_o}{R_1 I_{REF}} \frac{\alpha I_{ES_2}}{\alpha I_{ES_1}} \right] \tag{31}$$

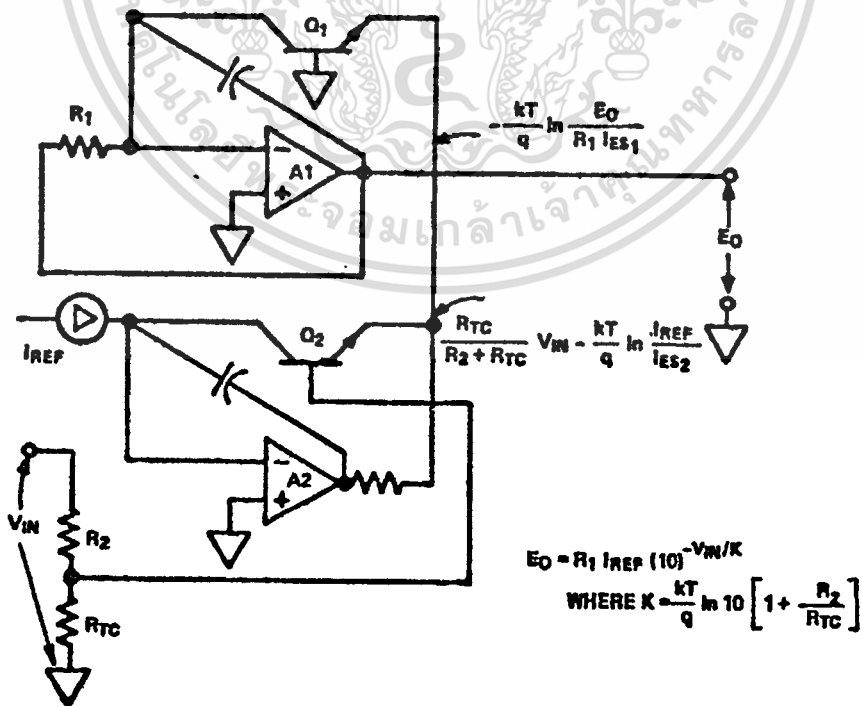
$$= -\ln(10) \log_{10} \left[ \frac{E_o}{R_1 I_{REF}} \frac{\alpha I_{ES_2}}{\alpha I_{ES_1}} \right] \tag{32}$$

เมื่อกำหนดให้  $E_{REF} = I_{REF} R_1$  และกำหนดให้  $\alpha I_{ES_1} = \alpha I_{ES_2}$  และ

$$\frac{kT}{q} \left[ 1 + \frac{R_2}{R_{TC}} \right] \ln 10 = K_{10}$$

จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (33)

$$E_o = R_1 I_{REF} (10)^{-V_{IN}/K_{10}} \tag{33}$$



รูป 12 วงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้อัตราการขยายประจุของตัวเก็บประจุ

วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม ที่สร้างขึ้นโดยการใช้ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์เป็นส่วนป้อนกลับของวงจรขยายเชิงค่านินการ ซึ่งใช้คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดตามสมการ (1) นั้น โดยวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่อาศัยหลักการดังกล่าวจะมีข้อเสีย ที่เห็นได้ชัดเจนดังต่อไปนี้

1. วงจรจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกค้ำมาก กล่าวคือแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าถึง 10 เท่าตัว (1 decade) ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกเพียงประมาณ 60 มิลลิโวลต์ เท่านั้น

2. อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ได้ทางด้านขาออกของวงจรมาก ดังจะเห็นได้จากสมการ (1) ว่าอุณหภูมิ  $T$  ปรากฏอยู่ในพจน์ของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล และยิ่งกว่านั้นค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัว  $I_0$  ยังมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย

สำหรับค่ากระแส  $I$  ที่คงที่ แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมไดโอดจะเปลี่ยนไปประมาณ 26 มิลลิโวลต์ ต่อองศาเซลเซียส นั่นคือ สมมติว่าอุณหภูมิเปลี่ยนไป 30 องศาเซลเซียส ย่อมจะเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนไปของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของวงจร เป็นจำนวนเท่ากับการเปลี่ยนแปลงเกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเปลี่ยนไป 10 เท่า ดังนั้นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการชดเชยต่ออิทธิพลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวมาแล้วโดยได้มีการคิดออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมขึ้นใหม่ที่ใช้เทคนิคการกระตุ้น วงจรรวมเบอร์ 555 โดยการขยายประจุไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าขึ้น<sup>[1]</sup> แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย ที่ด้านขาออกของวงจรจะมีการกระเพื่อมของสัญญาณสูง ผลตอบสนองช้า และยังมีค่าผิดพลาดที่เกิดจากความกว้างของสัญญาณที่นำมาใช้กระตุ้นการทำงานของวงจรรวมเบอร์ 555 ด้วย

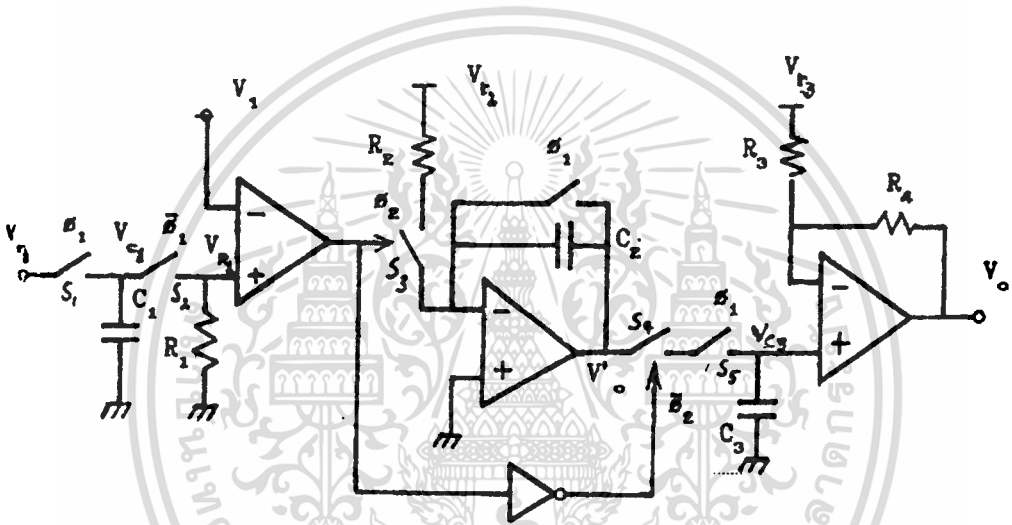
ดังนั้นการพัฒนาวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมโดยใช้หลักการขยายประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรที่ประกอบด้วยความต้านทานไฟฟ้ากับตัวเก็บประจุไฟฟ้า มาใช้ควบคุมการประจุไฟฟ้าของวงจรอินทิเกรต และทำการซั๊กและคงค่าสัญญาณด้านขาออกนั้นไว้ ทำให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าที่ด้านขาออกในลักษณะที่เป็นเชิงลอการิทึม เมื่อเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า วงจรนี้มีข้อดีเหนือกว่าวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบทั่วไปคือ

1. อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการขยายน้อยมาก
2. อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า สามารถที่เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ด้านขาออกได้มาก โดยจะขึ้นกับอัตราการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในวงจรอินทิเกรต

ขีดจำกัดของวงจรใหม่นี้คือ สามารถใช้ได้ดีในย่านความถี่ที่ไม่สูงนัก เช่นใช้ในย่านความถี่เสียง เป็นต้น เพราะมีหลักการทำงานโดยอาศัยเทคนิคการแฉมปลิงและคงค่าสัญญาณ

2.1 วงจรและการทำงาน

วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบนี้ จากหลักการที่กล่าวมาจะสามารถสร้างวงจรได้ดังรูป 13 วงจรจะมีการทำงานโดยมีส่วนของวงจรที่ทำการสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์  $\phi_1$  และ  $\phi_2$  ที่มีลักษณะสัมพันธ์กันดังรูป 14

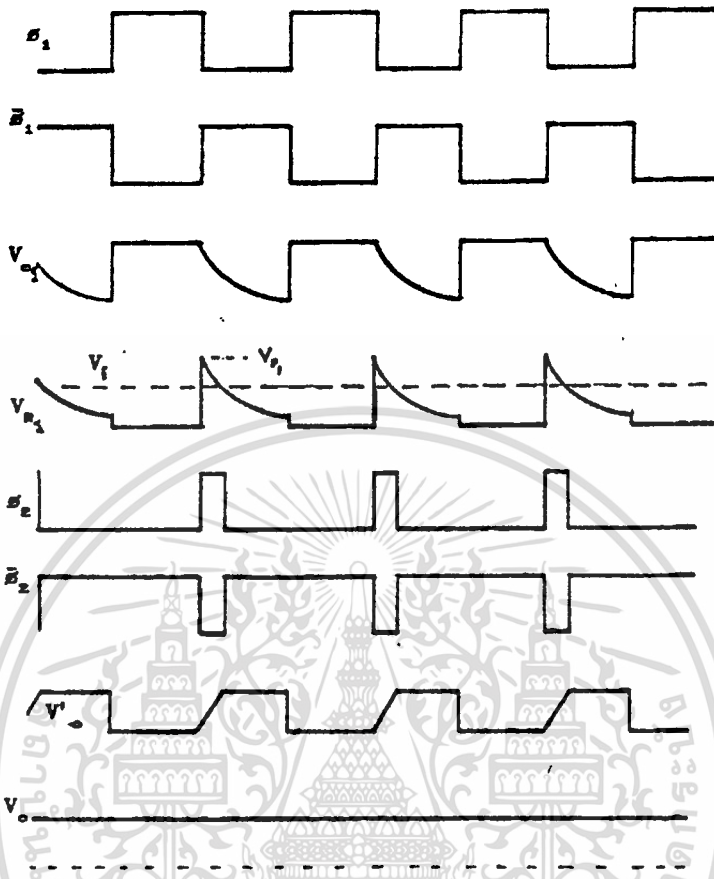


รูป 13 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้หลักการคายประจุไฟฟ้า

เมื่อสัญญาณควบคุม  $\phi_1$  ทำงานจะทำให้เกิดการประจุไฟฟ้าเข้าตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_1$  ให้มีแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_1$  มีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_n$  และเมื่อสัญญาณควบคุม  $\phi_1$  ไม่ทำงานและสัญญาณควบคุม  $\phi_2$  ทำงานจะเกิดการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_1$  ผ่านตัวความต้านทาน  $R_1$  ขึ้นทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า  $V_{R_1}$  ตกคร่อมตัวความต้านทาน  $R_1$  ที่เปลี่ยนแปลงลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล กล่าวคือ

$$V_{R_1} = V_n e^{-\frac{t-t_0}{R_1 C_1}} \tag{34}$$

โดยที่เวลา  $t$  คือเวลาที่เริ่มต้นคายประจุไฟฟ้า (เวลาที่สัญญาณควบคุม  $\phi_2$  เริ่มทำงาน) ค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{R_1}$  จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า  $V_i$  โดยอาศัยวงจรขยายเชิงดำเนินการ  $A$  เป็นตัวทำการเปรียบเทียบ โดยวงจรขยายเชิงดำเนินการ  $A$  จะให้สัญญาณที่ใช้



รูป 14 คุณลักษณะการทำงานของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ใช้หลักการคายประจุไฟฟ้า

เป็นสัญญาณควบคุม  $\phi_2$  ออกมาเป็นค่าบวก เมื่อ  $V_{R_1} > V_i$  ดังนั้นช่วงเวลา  $T$  ที่สัญญาณที่ได้จากวงจรขยายเชิงดำเนินการ  $A_1$  มีค่าเป็นบวก ซึ่งจะสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการ (34) เมื่อให้  $t_0 = T$  กล่าวคือ

$$V_1 e^{\frac{-T}{R_1 C_1}} = V_i \quad (35)$$

ซึ่งจะคำนวณต่อไปได้ว่า

$$e^{\frac{-T}{R_1 C_1}} = \frac{V_i}{V_1} \quad (36)$$

เอกหรือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = R_1 C_1 \ln V_i - R_1 C_1 \ln V_r$$

$$T = R_1 C_1 \ln V_i - k_1 \quad (37)$$

โดยในที่นี้  $k_1 = R_1 C_1 \ln V_r$  ซึ่งจะมีค่าคงที่ ถ้าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_{R_1}$  คงที่ และเนื่องจากสวิทช์  $S_3$  ถูกควบคุมให้ทำงานโดยสัญญาณควบคุม  $\phi_2$  ดังนั้นส่วนของวงจรถอดสัญญาณ วงจรขยายเชิงดำเนินการ  $A_2$  จะทำการอินทิเกรตสัญญาณจากแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_{R_1}$  เป็นเวลา  $T$  วินาที เพราะฉะนั้นถ้าเวลาเริ่มต้นไม่มีประจุไฟฟ้าค้างอยู่บนตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_2$  เลย สัญญาณที่ได้  $V'_0$  ของส่วนวงจรถอดสัญญาณจากวงจรถ่ายเชิงดำเนินการ  $A_2$  จะมีค่าสูงสุด คือ

$$V'_0|_{\max} = \frac{V_{R_1} T}{R_2 C_2} \quad (38)$$

สวิทช์  $S_4$  และ  $S_5$  จะทำงานร่วมกันเหมือนการทำงานของวงจรถอดสัญญาณ (AND GATE) ที่จะทำการชักตัวอย่างค่าสัญญาณที่ได้จากวงจรถ่ายเชิงดำเนินการ  $A_2$  มาไว้บนตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_3$  ในช่วงเวลาที่สัญญาณที่ได้จากวงจรถ่ายเชิงดำเนินการ  $A_1$  มีค่าเป็นศูนย์ และสัญญาณควบคุม  $\phi_2$  ทำงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าความต้านทานขาเข้าของวงจรถ่ายเชิงดำเนินการ  $A_3$  และความต้านทานขณะปิด (off resistance) ของสวิทช์  $S_3$  และ  $S_4$  มีค่าสูงมาก  $C_3$  จะทำหน้าที่รักษาแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวมัน ให้มีค่าคงที่เท่ากับ  $V_0$  อยู่ตลอดเวลา วงจรถ่ายเชิงดำเนินการ  $A_3$  นอกจากจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรถ่ายเชิงดำเนินการ ซึ่งทำการคงค่าให้กับค่าสัญญาณบน  $C_3$  แล้ว ยังทำหน้าที่เป็นวงจรถ่ายเชิงแตกต่าง (differential amplifier) ซึ่งให้สัญญาณขาออก  $V_0$  ที่สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้คือ

$$V_0 = V_{C_3} \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right) - V_{R_3} \frac{R_4}{R_3} \quad (39)$$

โดยในที่นี้  $V_{C_3}$  และ  $V_{R_3}$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่คร่อม  $C_3$  และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ต่อคร่อมอยู่กับ  $R_3$  ตามลำดับ

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้า  $V_{C_3}$  จะถูกคงค่าให้เท่ากับแรงดันไฟฟ้า  $V_0$  อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นโดยอาศัยสมการ (37), (38) และ (39) เราจะได้

$$V_0 = V_{R_2} (R_1 C_1 \ln V_1 - k_1) \frac{1 + \frac{R_4}{R_3}}{R_2 C_2} - V_{R_3} \frac{R_4}{R_3}$$

$$V_0 = \frac{V_{R_2} (R_3 + R_4) (R_1 C_1 \ln V_1 - k_1)}{R_2 R_3 C_2} - V_{R_3} \frac{R_4}{R_3} \quad (40)$$

ถ้าเราเลือกใช้ค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{R_3} = -\frac{k_1 V_{R_2} (R_3 + R_4)}{R_2 R_4 C_2}$  แล้วจะได้

$$V_0 = \frac{V_{R_2} (R_3 + R_4) R_1 C_1 \ln V_1}{R_2 R_3 C_2}$$

$$V_0 = \frac{V_{R_2} (R_3 + R_4) R_1 C_1 \log V_1}{R_2 R_3 C_2 \log e}$$

$$V_0 = K_2 \log V_1 \quad (41)$$

$$K_2 = \frac{V_{R_2} R_1 C_1 (R_3 + R_4)}{R_2 R_3 C_2 \log e}$$

ซึ่งจะพบว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ด้านขาออก  $V_0$  จะแปรผันตามค่าความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเชิงลอการิทึมของสัญญาณที่ป้อนเข้า  $V_1$  ต่อมาเมื่อสัญญาณควบคุม  $\phi_1$  เริ่มต้นทำงานอีกครั้ง จะพบว่าสถานะภาพต่างๆ ของวงจรทำงานเสมือนถูกทำให้มีการกลับไปสู่สถานะภาพเดิมที่เริ่มต้น กล่าวคือ ส่วนของตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_1$  จะถูกประจุไฟฟ้าทำให้มีแรงดันไฟฟ้าคร่อมเท่ากับ  $V_{R_1}$  และประจุไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_2$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ยกเว้นเพียงแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_3$  เท่านั้นที่จะถูกรักษาไว้ให้มีค่าคงที่เท่าเดิมคือค่าตามสมการ (38) ซึ่งหมายความว่าสัญญาณที่ด้านขาออก  $V_0$  จะมีค่าแปรผันตามค่าฟังก์ชันเชิงลอการิทึมของสัญญาณที่ป้อนเข้า  $V_1$  ดังความสัมพันธ์สมการ (40) ตลอดเวลา

เมื่อสัญญาณที่ป้อนเข้าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  มีค่าเปลี่ยนไป โดยที่  $V_1 < V_{R_1}$  และช่วงเวลา  $T$  ตามสมการ (37) มีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาที่สัญญาณควบคุม  $\phi_1$  ทำงาน วงจรนี้ก็ยังคงทำงานได้เช่นเดียวกับที่ได้ตั้งอธิบายในข้างต้นแล้ว โดยค่าแรงดันไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ก็จะเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า  $V$ , มานั้น และแรงดันไฟฟ้าที่ได้ตอนขาออก  $V_o$  ก็ยังคงเปลี่ยนแปลงตามค่าลอการิทึมของแรงดันไฟฟ้า  $V$ , ตามความสัมพันธ์ของสมการ (40) เช่นเดิม

เนื่องจากการทำงานของวงจรนี้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ได้ขาออกและสัญญาณที่ป้อนเข้าเป็นไปตาม (41) จึงกล่าวได้ว่าวงจรนี้ทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้ตามต้องการ



### บทที่ 3

## การวิเคราะห์ข้อมูลและออกแบบวงจรขยายสัญญาณ เชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการแฉมปลิงสัญญาณ

### 1. วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการแฉมปลิงสัญญาณ

วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม และวงจรขยายสัญญาณเชิงแอนติลอการิทึม หรือวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล มีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้ช่วยประมวลผลสัญญาณ การใช้วงจรเหล่านี้ร่วมกันกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมจะสามารถสร้างวงจรทำการคูณ,หาร, ยกกำลัง, ถอดกรณฑ์ และ บีบอัด หรือ แฉมขยายสัญญาณได้ ซึ่งโดยทั่วไปวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลจะใช้คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำประเภท ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าของอุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $I$  และแรงดันไฟฟ้า  $V$  มาก ดังนั้นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นโดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการ (1) จึงมักขาดเสถียรภาพเมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพราะจะเห็นว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 26 มิลลิโวลต์ต่อองศาเซลเซียส ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความหมายมาก จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบวงจรที่จะทำการชดเชยการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมินี้มาประกอบรวมด้วยเสมอ ซึ่งจะทำให้วงจรที่จะนำมาใช้งานนั้นมีความยุ่งยากและใช้ได้เฉพาะในช่วงของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จำกัดเท่านั้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในเรื่องนี้ จึงได้มีการเสนอแนวคิด การออกแบบ และการทดลองประดิษฐ์วงจรที่ใช้คุณสมบัติการเก็บประจุไฟฟ้าหรือการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าผ่านตัวความต้านทานมาทำการสร้างเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่สร้างขึ้นด้วยหลักการนี้แม้จะมีผลตอบสนองช้าลงบ้างเนื่องจากใช้หลักการชั่งค่าตัวอย่างสัญญาณมาเปรียบเทียบ แต่มีข้อดีในเรื่องการมีเสถียรภาพของวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เครื่องมือวัดได้เป็นอย่างดี ถึงอย่างไรก็ตามยังไม่พบวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่ใช้หลักการคายประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า จึงเห็นว่าควรที่จะได้เสนอดังวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมซึ่งปรับปรุงจากวงจรแบบเดิมที่ได้เสนอไว้ วงจรแบบใหม่นี้ไม่ต้องใช้อินเวอร์เตอร์และสามารถดัดแปลงให้เป็นวงจรที่ใช้สวิตช์และตัวเก็บประจุไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ได้ง่าย อีกทั้งโดยการเปลี่ยนแปลงแก้ไขวงจรเพียงเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวขยายเชิงดำเนินการ  $A_1$  จะทำหน้าที่เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวความต้านทาน  $R_1$  กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า  $V_{in}$  โดยให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้เป็นสัญญาณควบคุม  $\phi'$  ออกมาเป็นค่าบวกเมื่อแรงดันไฟฟ้า  $V_{R_1} > V_{in}$  ดังนั้นถ้าแรงดันไฟฟ้า  $V_r > V_{in}$  จะพบว่าช่วงเวลา  $T$  ที่สัญญาณควบคุม  $\phi'$  มีค่าเป็นบวกจะมีค่าคงสมการ (43)

$$T = R_1 C_1 \ln V_{in} - k_k \quad (43)$$

โดยที่  $k_k = R_1 C_1 \ln V_r$  ทั้งนี้โดยสมมติว่าช่วงเวลาสัญญาณควบคุม  $\phi'$  ปกติวงจรนั้นมีค่ามากกว่าช่วงเวลา  $T$  ดังนั้นเมื่อใช้สัญญาณควบคุม  $\phi'$  ไปควบคุมสวิตช์  $S_1$  ของตัววงจรที่ใช้ในการอินทิเกรต  $A_2$  ให้ทำการอินทิเกรตสัญญาณ  $V_r$  จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของวงจรการอินทิเกรตที่ปลายช่วงเวลาสัญญาณ  $\phi'$  ปกติวงจรคือ

$$V_o|_T = -\frac{V_r T}{R_2 C_2}$$

$$V_o|_T = -\eta \ln V_{in} - \beta \quad (44)$$

โดย  $\eta = \frac{R_1 C_1 V_r'}{R_2 C_2}$  และ  $\beta = \frac{k_k V_r'}{R_2 C_2}$  ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าตามสมการ (44) นี้จะทำให้เกิดอัตราประจุไฟฟ้าเข้าภายในตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_3$  เท่ากับ

$$Q_3 = -\eta C_3 \ln V_{in} + C_3 \beta \quad (45)$$

โดยการเลือกค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_4 = \frac{C_3 \beta}{V_r}$  และ  $C_5 = C_6 = C$

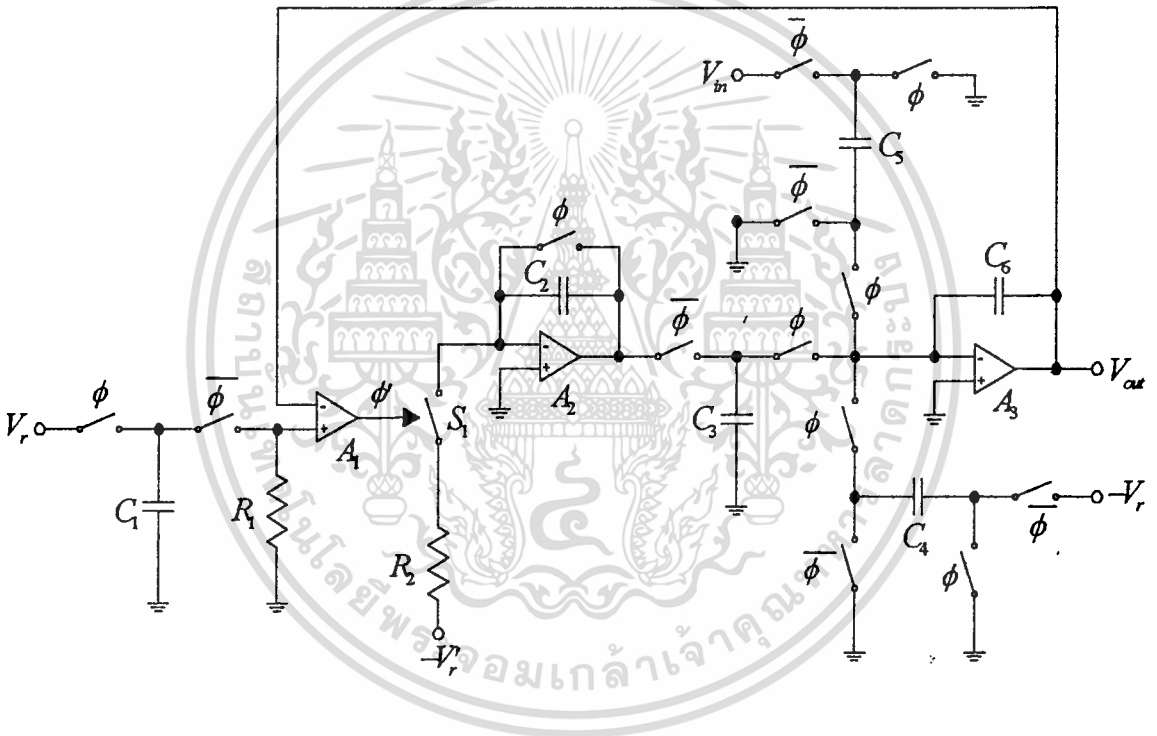
วงจรขยายเชิงดำเนินการ  $A_3$  จะทำตัวเป็นวงจรรวมสัญญาณ (summing amplifier) ซึ่งจะรวมค่าประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_3$ ,  $C_4$  และ  $C_5$  ไปไว้ในตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_6$  ในช่วงเวลา  $\phi$  ที่จะปิดวงจรในจังหวะสัญญาณนาฬิกาต่อไปจาก  $\phi$  ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าด้านขาออก  $V_{out}$  คือ

$$V_{out} = \frac{\eta C_3}{C} \ln V_{in} \quad (46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะเห็นว่าวงจรนี้มีแรงดันด้านขาออกแปรผันกับค่าลอการิทึมของสัญญาณ  $V_{in}$  ที่ทำการป้อนเข้า จึงถือว่ามี การปฏิบัติตัวเป็นคังวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมนั่นเอง

อีกทั้งเพื่อที่จะทำให่วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมดังที่แสดงตามรูปที่ 15 ให้กลายเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลนั้น สามารถทำได้โดยทำการป้อนกลับสัญญาณจากขาออกของวงจรมายังด้านขาเข้าของวงจรเดิม และทำการตัดทางป้อนกลับเดิมที่มีไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_6$  ให้เป็นจุดที่ทำการป้อนสัญญาณด้านเข้าใหม่พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนค่า  $V_r$  เป็น  $-V_r$  ดังแสดงในรูปที่ 16



รูป 16 วงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล

โดยการพิจารณาว่าสัญญาณด้านขาออก  $V_{out}$  ในขณะสัญญาณควบคุม ณ เวลา  $\phi^i$  คือ  $V_{out}^i$  ถูกทำการป้อนกลับไปยังด้านขาเข้า  $V_{in}$  เดิม ก็จะทำให้ได้ประจุไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_3$  ที่เวลา  $\phi^i$  มีค่าเป็น

$$Q_3^i = \eta C_3 \ln V_{out}^i - C_3 \beta \tag{47}$$

และพิจารณาขณะที่เวลา  $\phi^i$  นี้จะมีประจุไฟฟ้าที่เตรียมอยู่ในตัวเก็บประจุ  $C_4, C_5$  และ  $C_6$  เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_4^i = -C_4 V_r = -C_3 \beta \quad (48)$$

$$Q_5^i = C_5 V_{out}^i \quad (49)$$

และ

$$Q_6^i = C_6 V_{in} \quad (50)$$

ตามลำดับแล้ว ซึ่งเมื่อถึงช่วงเวลา  $\phi$  ทำงานใหม่ คือเริ่มช่วงเวลา  $\phi^{i+1}$  ปีควงจร เราจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกดังสมการ (51)

$$V_{out}^{i+1} = V_{out}^i + \frac{C_6}{C_5} V_{in} - \frac{\eta C_3}{C_5} \ln V_{out}^i \quad (51)$$

โดยการเลือกให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_5 = C_6$ ,  $C_3 = \frac{C_5}{\eta}$  พร้อมทั้ง  $C_4 = \frac{C_3 \beta}{V_r}$  จะทำให้สมการ (51) กลายเป็น

$$V_{out}^{i+1} = V_{out}^i + V_{in} - \ln V_{out}^i \quad (52)$$

ซึ่งจะเห็นว่าสมการ (52) แสดงถึงสมการการป้อนกลับทางลบ ซึ่งจะเกิดความสมดุลขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ  $V_{out}^{i+1} = V_{out}^i$  ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้า  $V_{in} = \ln V_{out}^i$  อันเป็นเงื่อนไขที่แสดงว่าสัญญาณด้านออกของวงจรที่สถานะเข้าสู่สมดุลจะได้เป็น

$$V_{out} = e^{V_{in}} \quad (53)$$

นั่นคือจะได้วงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลตามต้องการ

### 3. สมการผลต่างแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear difference equation)

จากสมการ (51) และสมการ (52) แสดงถึงสมการความสัมพันธ์การป้อนกลับทางลบ ที่มีรูปแบบของสมการเป็นรูปแบบสมการผลต่าง (difference equation) หรือสมการที่มีความสัมพันธ์แบบกลับมามาก (recursion relation) ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบเห็นได้บ่อยมากในการใช้งานทางคณิตศาสตร์ประยุกต์และในทางวิศวกรรม โดยที่ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นจะมุ่งพิจารณาพฤติกรรมของสมการเพื่อที่จะหาคำตอบของสมการ ซึ่งรูปแบบของสมการนั้นอาจจะเป็นรูปแบบของคำตอบที่มีรูปแบบที่แน่นอน (closed form) หรือไม่สามารที่จะหา รูปแบบของสมการได้โดยจะหาคำตอบที่เป็นเชิงตัวเลข (numerical method) แทนหาคำตอบควรจะเป็นเท่าอะไร ซึ่งวิธีในการหาคำตอบของสมการผลต่างนั้นสามารถที่จะกระทำได้หลายวิธี เช่นวิธีการประมาณค่าคำตอบของสมการว่ามีค่าการเข้าสู่ค่าขอบเขตใด (asymptotic method) เป็นต้น ซึ่งสามารถที่จะพิจารณาสมการ (51) และสมการ (52) เป็นรูปแบบต่างๆ ได้ดังนี้

$$y(n+1) = y(n) - \delta \ln y(n) + c \quad (54)$$

โดย  $\delta$  เป็นค่าคงที่ที่เทียบได้กับ  $\eta \frac{C_3}{C_5}$  ในสมการ (51) และ  $c$  เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เทียบได้กับ  $\frac{C_6}{C_5} V_{in}$

ในสมการ (51) ซึ่งจะถือว่าเป็นค่าคงที่ในขณะที่มีขบวนการในการคำนวณ

เมื่อพิจารณาสมการ (54) ในขั้นต้นจะสามารถพิจารณาได้ว่าเมื่อค่าของ  $\delta$  มีค่าเป็นค่าที่น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ สมการ (54) จะไม่สามารถที่จะเกิดการเข้าสู่ค่าใดๆ ได้ (divergence) แต่เมื่อค่าของ  $\delta$  มีค่าที่มากกว่าศูนย์ จะเห็นได้ว่าค่าของ  $y(n)$  ตามสมการ (54) ก็อาจสามารถที่จะเข้าสู่ค่าหนึ่งๆ ได้ (convergence) โดยค่าที่เข้าสู่จะมีค่าเป็น

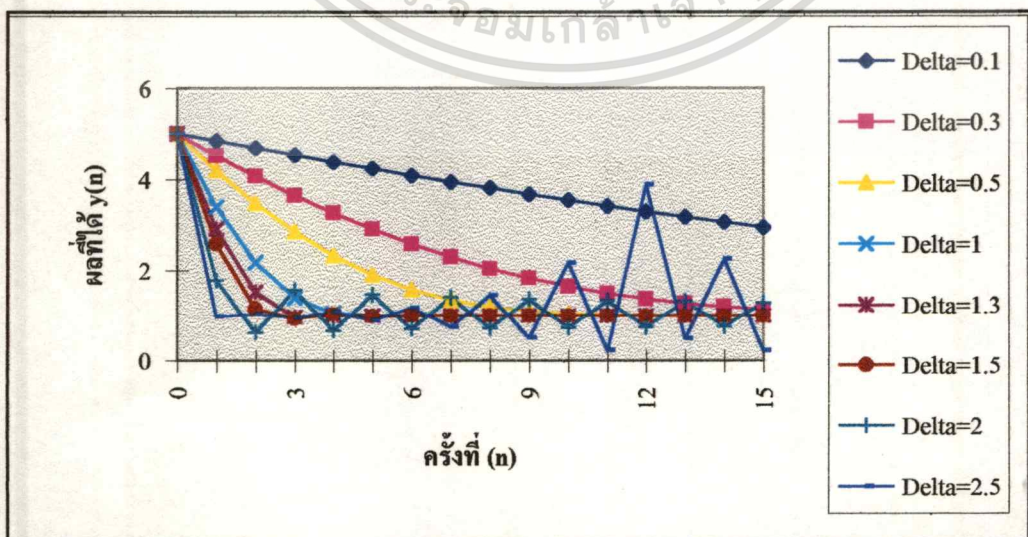
$$y(n) = e^{\frac{c}{\delta}} \quad (55)$$

เมื่อทำการพิจารณาการคำนวณโดยใช้ค่าของ  $\delta$  มีค่าต่างๆ ดังในตารางที่ 4 ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณที่เหมือนกับการทำงานของวงจรที่ได้ตามรูป 16 ที่กำหนดค่าสถานะเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์  $y(0) = 0$  และมีการให้ค่าของ  $c = 0$  ซึ่งในขั้นตอนการคำนวณของวงจรที่ออกแบบนั้นจะได้ว่าค่าของ  $y(1) = 5$  เนื่องจากแรงดันที่ใช้เลี้ยงวงจรและไฟที่อ้างอิงต่างๆ ได้มีค่า  $\pm 5$  โวลต์ จากนั้นค่าของ  $y(n)$  ก็จะเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่า  $y(n) = e^0 = 1$  ดังแสดงตามตารางที่ 4 และรูป 17

ตารางที่ 4 ค่าที่ได้จากการคำนวณที่กำหนดค่าสถานะเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์  
 $y(0) = 0$  และป้อนค่าของอินพุต  $c = 0$  โดยใช้ค่า  $\delta$  ต่างๆกัน

n	Delta=0.1	Delta=0.3	Delta=0.5	Delta=1	Delta=1.3	Delta=1.5	Delta=2	Delta=2.5
0	5	5	5	5	5	5	5	5
1	4.839056	4.517169	4.195281	3.390562	2.907731	2.585843	1.781124	0.976405
2	4.681384	4.064803	3.478301	2.169566	1.520146	1.160766	0.626635	1.036099
3	4.527025	3.644093	2.855029	1.395039	0.975698	0.937146	1.561418	0.947442
4	4.376018	3.256161	2.330488	1.062117	1.007681	1.03452	0.670229	1.082416
5	4.228404	2.901996	1.907449	1.001853	0.997734	0.983614	1.4705	0.884427
6	4.084222	2.582377	1.584566	1.000002	1.000683	1.008397	0.699295	1.191465
7	3.943509	2.297764	1.354411	1	0.999795	0.995854	1.41466	0.753506
8	3.806302	2.048183	1.202727	1	1.000061	1.002086	0.720882	1.461052
9	3.672636	1.833097	1.110431	1	0.999982	0.99896	1.375443	0.51316
10	3.542545	1.651295	1.058057	1	1.000006	1.000521	0.737892	2.181079
11	3.41606	1.500827	1.02984	1	0.999998	0.99974	1.345808	0.23153
12	3.293212	1.379022	1.015138	1	1	1.00013	0.751819	3.889147
13	3.174025	1.28261	1.007626	1	1	0.999935	1.322339	0.493672
14	3.058525	1.207941	1.003827	1	1	1.000033	0.763535	2.258381
15	2.946732	1.151266	1.001917	1	1	0.999984	1.303128	0.221761

หมายเหตุ n : จำนวนรอบการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูป 17 กราฟแสดงจำนวนครั้งที่ใช้ในการคำนวณกับผลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

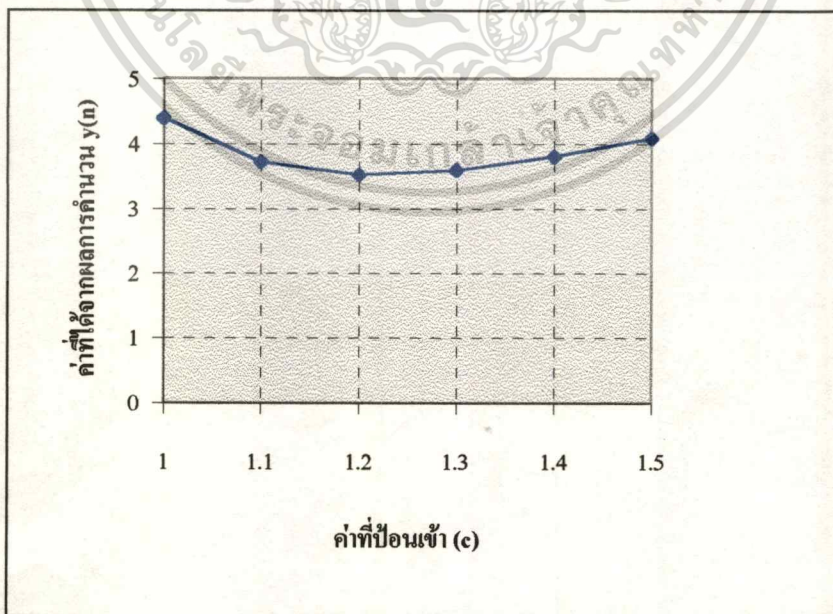
จากตารางที่ 4 และรูป 17 จะพบว่าค่าการคำนวณตามสมการ (54) นั้นเมื่อกำหนดให้ค่าของ  $\delta$  มีค่าเท่ากับ 1 จะมีการเข้าสู่ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อให้ค่าที่น้อยกว่าหรือมากกว่า 1 จะทำให้การคำนวณมีจำนวนครั้งที่มาก ซึ่งพบว่าการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียลนี้ได้มีการกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\delta$  มีค่าเท่ากับ 1

เมื่อได้พิจารณาสมการ (54) โดยได้สังเกตความสัมพันธ์ของค่า  $y(n)$  กับค่าสัมประสิทธิ์  $\delta$  แล้ว ก็ควรที่ต้องทำการพิจารณาพฤติกรรมของ  $y(n)$  เมื่อกำหนดให้ค่าของ  $\delta$  คงที่เท่ากับ 1 แต่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $c$  ทั้งนี้เพื่อที่จะพิจารณาจำนวนครั้งการคำนวณที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาในการกำหนดความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพ

ตารางที่ 5 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยมีค่าที่ป้อนเข้า  $c$  ต่างๆกัน และใช้จำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 2 รอบการคำนวณ และ  $\delta$  เท่ากับ 1

n	ค่าที่ป้อนเข้า (c)					
	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0	0	4.390562	3.722038	3.524678	3.593756	3.802298
1	5	4.011105	3.607767	3.564889	3.714558	3.966693
2	4.390562	3.722038	3.524678	3.593756	3.802298	4.08876

หมายเหตุ n : จำนวนรอบการคำนวณ



รูป 18 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าที่ป้อนเข้ากับผลที่ได้

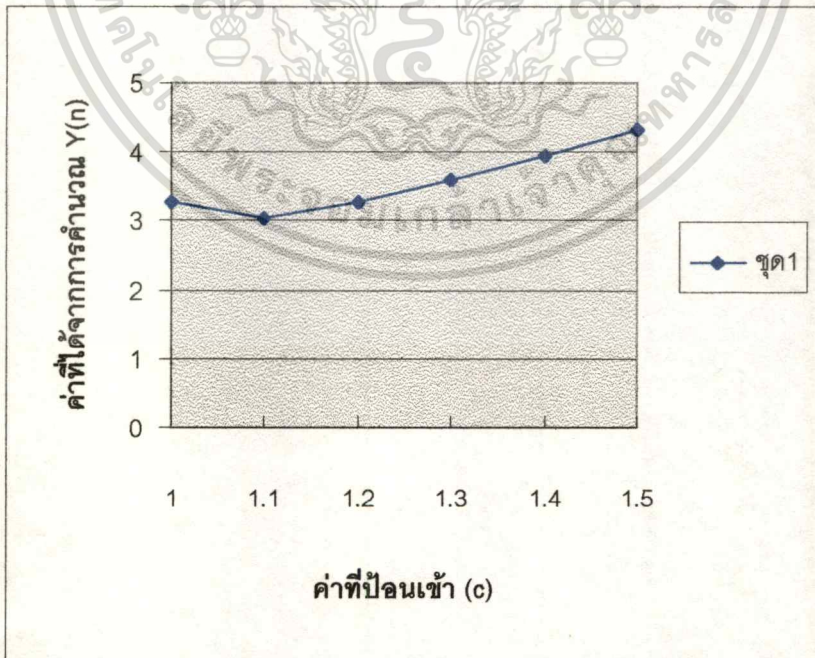
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โดยมีจำนวนครั้งการคำนวณเท่ากับ 2 รอบการคำนวณ และ  $\delta$  เท่ากับ 1 ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนนเขียนแบบใหม่ ตารางที่ 5 กับรูป 18 ได้จากการคำนวณโดยกำหนดให้รอบการคำนวณเท่ากับ 2 และตารางที่ 6 กำหนดให้รอบการคำนวณเท่ากับ 5 แต่ค่าเริ่มต้น  $y(0)$  ของการคำนวณแต่ละค่าใช้ต่อเนื่องจากค่า  $y(5)$  ของการคำนวณค่าที่มีมาก่อนหน้าเดิม และตารางที่ 7 กับรูป 19 กำหนดให้รอบการคำนวณเท่ากับ 10 จะปรากฏเห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5 และรูป 18 จะพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าความคลาดเคลื่อนในรอบการคำนวณตอนต้นๆ เนื่องจากมี

ตารางที่ 6 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณโดยมีจำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 5 รอบการคำนวณ

n	ค่าที่ป้อนเข้า (c)					
	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0	0	3.281102	3.042962	3.276232	3.593934	3.949697
1	5	3.192923	3.13013	3.389538	3.714686	4.076058
2	4.390562	3.131986	3.189056	3.468844	3.802392	4.170927
3	3.911105	3.090319	3.229331	3.525023	3.866762	4.242789
4	3.547285	3.062045	3.257056	3.565136	3.914344	4.297568
5	3.281102	3.042962	3.276232	3.593934	3.949697	4.339519

หมายเหตุ n : จำนวนรอบการคำนวณ



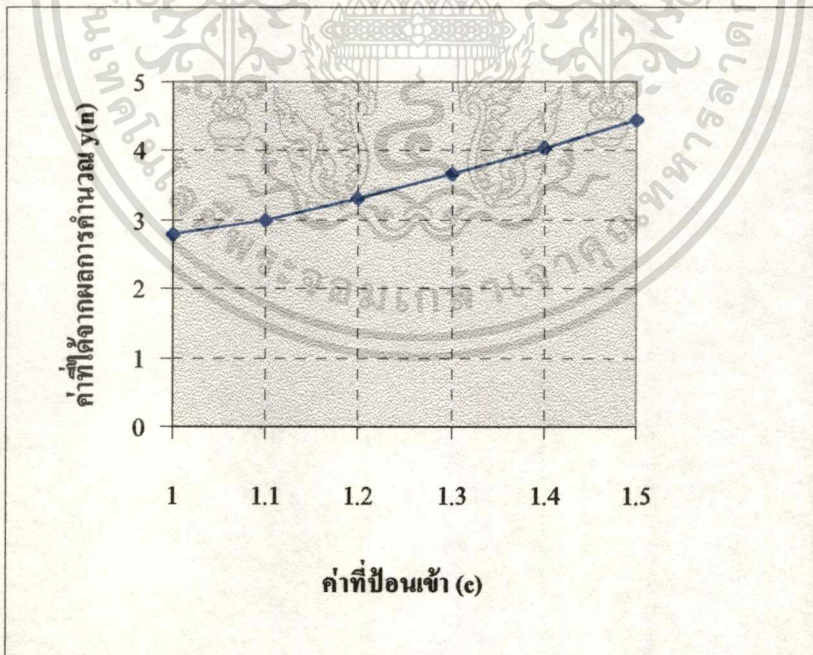
รูป 19 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าที่ป้อนเข้ากับผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยที่สนับสนุนโดยสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยมีจำนวนรอบการคำนวณเท่ากับ 10 รอบการคำนวณ

n	ค่าที่ป้อนเข้า (c)					
	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0	5	2.759833	3.000151	3.311818	3.655398	4.033076
1	4.390562	2.844663	3.101489	3.414321	3.759193	4.138547
2	3.911105	2.899218	3.169606	3.486342	3.834988	4.218202
3	3.547285	2.934777	3.215999	3.537489	3.890822	4.278793
4	3.281102	2.958146	3.247861	3.574072	3.932202	4.325122
5	3.092923	2.973583	3.269864	3.600366	3.963002	4.360682
6	2.963806	2.983815	3.285116	3.619331	3.986	4.388053
7	2.877332	2.990613	3.295714	3.633042	4.003212	4.409168
8	2.820469	2.995134	3.303091	3.642971	4.016115	4.425482
9	2.783566	2.998145	3.308232	3.650172	4.0258	4.438103
10	2.759833	3.000151	3.311818	3.655398	4.033076	4.447876

หมายเหตุ n : จำนวนรอบการคำนวณ



รูป 20 แสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าที่ป้อนเข้ากับผลที่ได้ โดยมีจำนวนครั้งการคำนวณเท่ากับ 10 รอบการคำนวณ

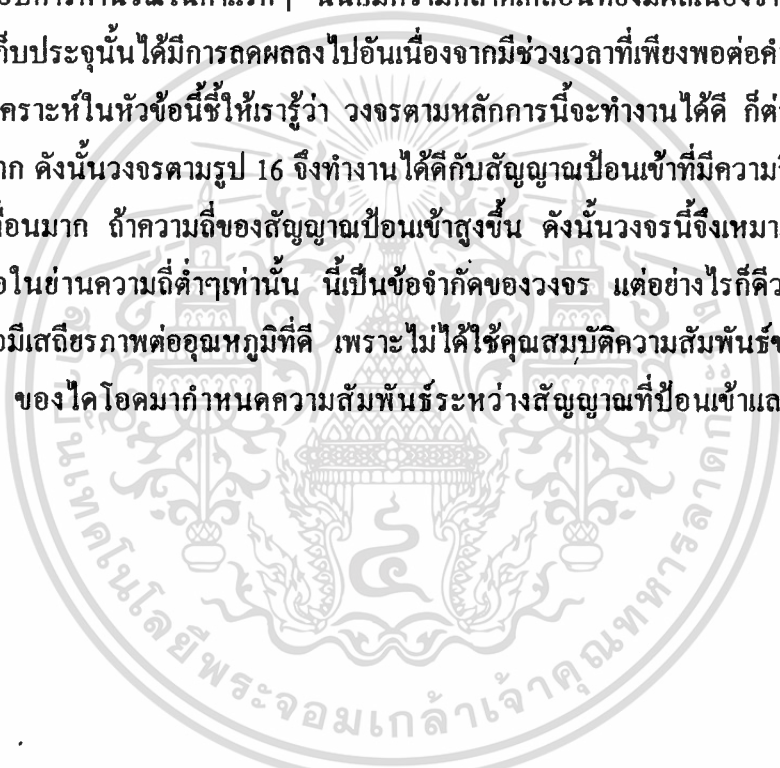
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบการคำนวณเพียง 2 รอบเท่านั้น

จากตารางที่ 6 และรูป 19 จะพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากขึ้น และมีความคลาดเคลื่อนน้อยลงกว่าการกำหนดให้มีจำนวนรอบการคำนวณเพียง 2 รอบเท่านั้น สังเกตได้ว่าในรอบการคำนวณในค่าแรกๆ นั้นก็มีความคลาดเคลื่อนที่ยังมีผลอยู่มากเนื่องจากค่าประจุที่เริ่มต้นภายในตัวเก็บประจุ

จากตารางที่ 7 และรูป 20 จะพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากขึ้น และมีความคลาดเคลื่อนน้อยลงกว่าการกำหนดให้มีจำนวนรอบการคำนวณเพียง 5 รอบเท่านั้น และในรอบการคำนวณในค่าแรกๆ นั้นก็มีความคลาดเคลื่อนที่ยังมีผลเนื่องมาจากค่าประจุที่เริ่มต้นภายในตัวเก็บประจุนั้นได้มีการลดลงไปอันเนื่องจากมีช่วงเวลาที่เพียงพอค่อคำนวณ

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ซึ่งให้เรารู้ว่า วงจรตามหลักการนี้จะทำงานได้ดี ก็ต่อเมื่อมีรอบการคำนวณ  $n$  ที่มาก ดังนั้นวงจรตามรูป 16 จึงทำงานได้ดีกับสัญญาณป้อนเข้าที่มีความถี่ต่ำๆ และจะมีความคลาดเคลื่อนมาก ถ้าความถี่ของสัญญาณป้อนเข้าสูงขึ้น ดังนั้นวงจรนี้จึงเหมาะสมที่จะใช้กับวงจรเครื่องมือในย่านความถี่ต่ำๆ เท่านั้น นี่เป็นข้อจำกัดของวงจร แต่อย่างไรก็ดีวงจรมีข้อดีที่น่าสนใจมาก คือมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิที่ดี เพราะไม่ได้ใช้คุณสมบัติความสัมพัทธ์ของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดมากำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ป้อนเข้าและสัญญาณที่ได้ของวงจร



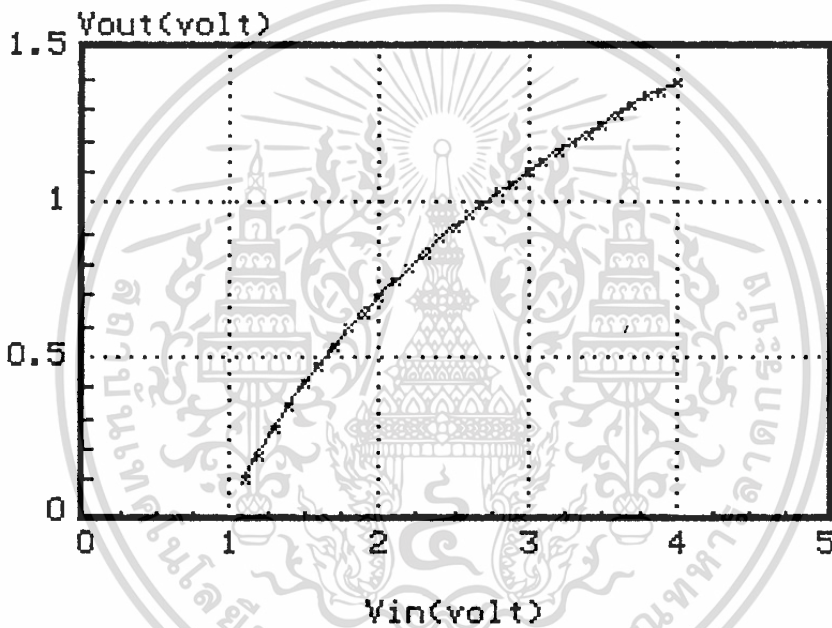
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่ออกแบบใหม่

วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่ทำการออกแบบ และจัดสร้างโดยอาศัยหลักการทางเทคนิคการเก็บประจุไฟฟ้าและการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งมีการทำงานร่วมกับสวิตช์ที่ถูกควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกาเพื่อทำการประมวลผลสัญญาณ ตามคุณสมบัติการทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม อีกทั้งวงจรที่ออกแบบใหม่ตามหลักการใหม่นี้สามารถที่จะทำการปรับปรุงให้เป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลได้โดยนำมาทำการป้อนกลับสัญญาณ และวงจรที่ออกแบบจะมีคุณสมบัติที่มีผลความคลาดเคลื่อนอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในของตัวอุปกรณ์น้อยมาก เพราะไม่ได้กำหนดคุณสมบัติด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและโวลเตจของสารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด ดังที่นิยมทำกันอยู่โดยทั่วไป จึงทำให้วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่นี้มีความแม่นยำในการประมวลผลที่ได้ดีกว่าและยังสามารถที่จะทำการปรับปรุงเป็นวงจรที่สร้างจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าและสวิตช์ที่เรียกว่า วงจรสวิตช์-คาปาซิเตอร์ ได้ทั้งหมด

จากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้เสนอแนวคิด หลักการ ที่สามารถนำมาเพื่อทำการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม และวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่ และได้จำลองสภาพการทำงานของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม และวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่ที่ได้ออกแบบ พบว่าวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม และวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่สามารถที่จะทำงานได้ผลดีดังตัวอย่างการประมวลผลในบทที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวงจรที่ได้ทำการออกแบบขึ้นสามารถที่จะทำงานได้ตามหลักการที่นำเสนอ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบโดยการต่อวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมตามรูปที่ 15 เพื่อทำการทดสอบหลักการ และสภาพการใช้งานที่แท้จริง โดยการต่อวงจรที่ได้ทำการออกแบบนั้น ในการที่ได้ใช้วงจรรวมที่เป็นวงจรขยายเชิงดำเนินการเบอร์ LF351 สำหรับทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณ  $A_1$ ,  $A_2$  และ  $A_3$  โดยใช้ตัวความต้านทาน  $R_1 = 20k\Omega$ ,  $R_2 = 20k\Omega$ , ตัวเก็บประจุไฟฟ้า  $C_1 = 220nF$ ,  $C_2 = 2200nF$ ,  $C_3 = 0.1\mu F$ ,  $C_4 = 0.0033\mu F$ ,  $C_5 = 0.01\mu F$  และ  $C_6 = 0.01\mu F$ , แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง  $V_r = 5V$  และ  $V_r' = 5V$  สัญญาณไฟเลี้ยงวงจรขยายเชิงดำเนินการ  $\pm 12$  โวลต์โดยให้สัญญาณนาฬิกาที่ทำการควบคุม  $\phi$  ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 1 กิโลเฮิรตซ์

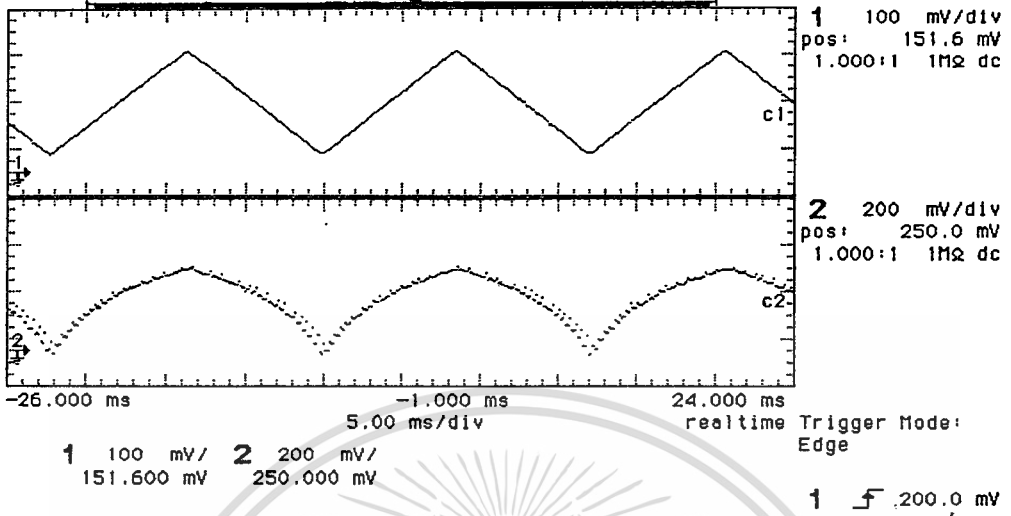
duty cycle 45 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการทดลองป้อนสัญญาณในลักษณะต่างๆเพื่อทำการทดสอบผลตอบสนองของวงจรในเชิงสติกส์ก่อนในเบื้องต้น โดยทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการทดสอบผลตอบสนองที่เกิดที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ และสามารถนำผลการทดสอบที่ได้จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าที่มีค่าต่างๆมาทำการวาดกราฟจะสามารถวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรออกมาได้ในลักษณะดังแสดงในรูป 21 ซึ่งจากรูปความสัมพันธ์แสดงว่าวงจรสามารถที่จะตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้อย่างดี



รูป 21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม เส้นทึบเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ จุด X เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในวงจร

หลังจากที่ได้ทำการผลตอบสนองของวงจรโดยทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการทดสอบผลตอบสนองว่า วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบใหม่จะสามารถจะตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้ดังแสดงในรูปที่ 21 แล้ว จึงได้ทำการทดสอบป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะตามเวลา เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงพลวัตของวงจรดูบ้าง โดยทำการทดสอบป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangle Waveform) ที่มีความถี่ 60 เฮิร์ตซ์ ที่มีการปรับระดับของค่าสัญญาณให้มีค่าเป็นค่าบวกทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดกรณีที่เป็นการหาค่าลอการิทึมของจำนวนที่เป็นค่าลบ ซึ่งจะไม่สามารถนิยามได้ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เป็นดังแสดงในรูป 22 โดยที่สัญญาณของบนเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่ป้อนเข้า

hp running

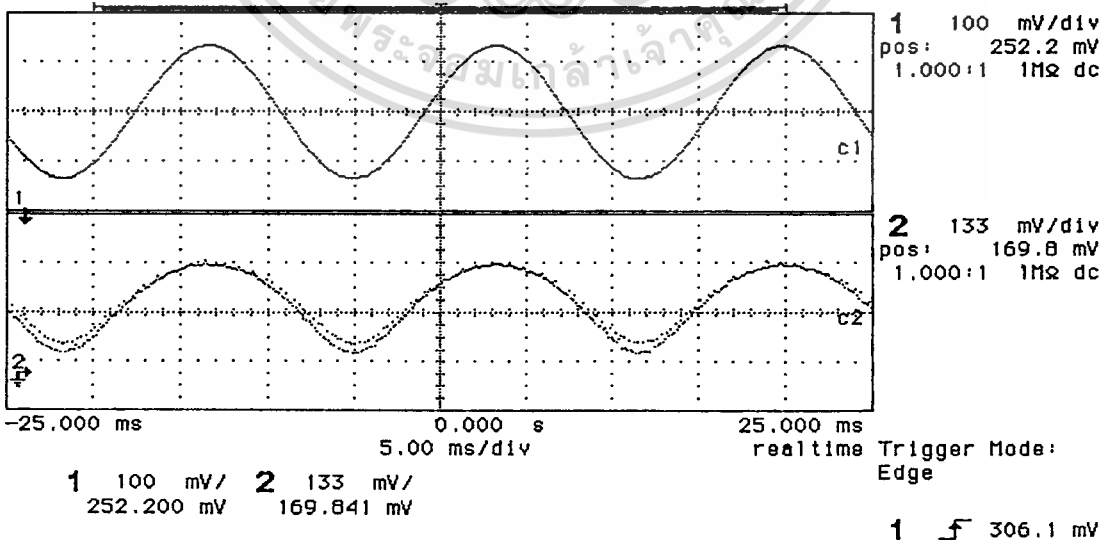


รูป 22 ผลที่ได้จากวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเข้าวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม  
ช่องบนเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากวงจร

และสัญญาณช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากวงจร ซึ่งเป็นลักษณะของสัญญาณค่าลอการิทึมของ  
สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมนั่นเอง

จากการทดสอบการทำงานของวงจร โดยการป้อนคลื่นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเข้าทำการ  
ทดสอบแล้ว ได้ทำการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นสัญญาณทดสอบ โดยได้ทำการทดสอบป้อนคลื่น

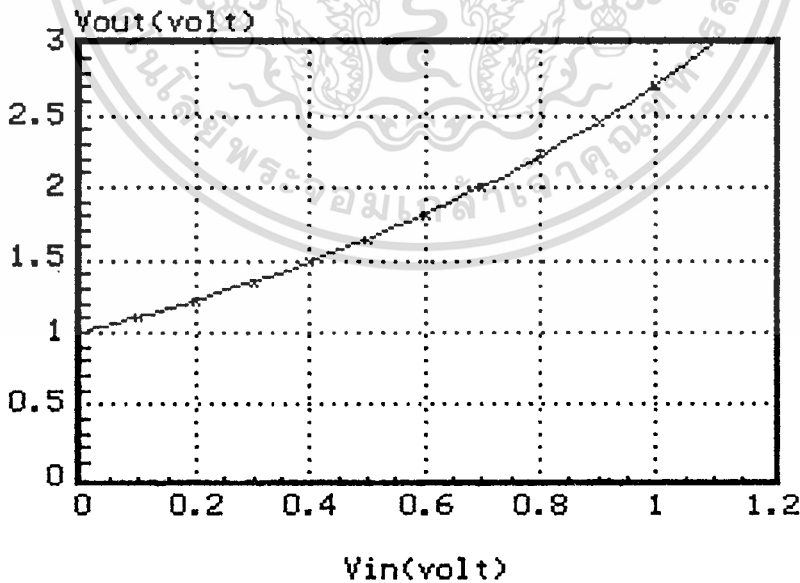
hp stopped



รูป 23 ผลที่ได้จากวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปไซน์เข้าวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม  
ช่องบนเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากวงจร

สัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) ที่มีความถี่ 60 เฮิรตซ์ ที่มีการปรับให้ระดับของค่าสัญญาณให้มีค่าเป็นค่าบวกทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดกรณีที่เป็นการหาค่าลอการิทึมของจำนวนที่เป็นค่าลบ ซึ่งจะไม่สามารถนิยามได้ จะได้ผลการทดลองดังรูป 23 โดยสัญญาณในช่องบนเป็นสัญญาณรูปไซน์ความถี่ 60 เฮิรตซ์ ที่ป้อนเข้า และสัญญาณในช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากวงจรตามลำดับ ซึ่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แสดงในช่องที่ 1 และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในช่องที่ 2 เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าและสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกจากวงจรตามลำดับจากผลการทดลองจะพบว่าวงจรที่ได้ทำการออกแบบใหม่สามารถทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้ในเชิงพลวัต หากสัญญาณป้อนเข้ามีความถี่น้อยกว่าความถี่สัญญาณนาฬิกา

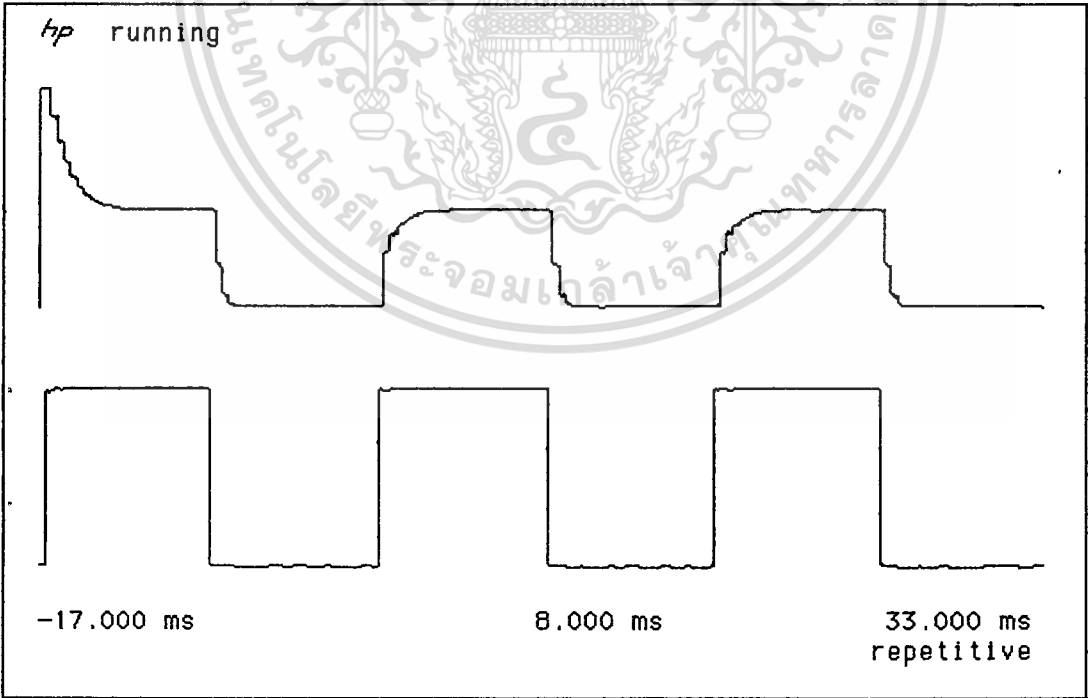
เมื่อทำการทดลองต่อวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรียลไทม์ตามรูป 16 โดยมีการใช้ค่าอุปกรณ์ต่างๆมีค่าเท่ากับที่ใช้ในการทดลองวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมเพียงแต่เปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้า  $V_i$  ให้มีค่าแรงดันไฟฟ้า -5 V แล้วทำการทดลองป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการทดสอบผลสนองต่อแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงจะได้ผลการทดลองที่สามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรจะได้ดังรูป 24 จากการทดลองจะพบว่าวงจรสามารถทำงานเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรียลไทม์ได้ตามหลักการที่เสนอ



รูป 24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรียลไทม์

เส้นทึบเป็นค่าที่ได้จากคำนวณ จุด X เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในวงจร

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบสนองของวงจร โดยทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำการทดสอบผลตอบสนอง วงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียลแบบใหม่สามารถจะตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะของวงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ จึงได้ทดสอบการทำงานของวงจร โดยทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้าที่มีลักษณะที่เป็นการเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยกำหนดลักษณะสัญญาณที่ทำการป้อนเข้าให้มีลักษณะเป็นคลื่นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่ขนาด 0 โวลต์ และ 1 โวลต์ สลับกันด้วยค่าความถี่ 60 เฮิรตซ์ เพื่อทำการทดสอบผลตอบสนองและการทำงานของวงจร ซึ่งจะสามารถทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรดังแสดงในรูป 25 โดยรูปสัญญาณในช่องล่างเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าสู่วงจร และรูปสัญญาณในช่องบนเป็นสัญญาณที่ได้จากวงจร ซึ่งจะพบว่ารูปสัญญาณที่ได้จากวงจรมีเป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ค่าเอ็กซ์โพเนนเชียลของสัญญาณป้อนเข้าในแต่ละรอบการคำนวณ โดยที่ในช่วงต้นจะมีการปฏิบัติการคำนวณวนรอบที่ค่าเริ่มต้นเพื่อที่จะดูค่าตามความสัมพันธ์เชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล และควรสังเกตว่าในช่วงเวลาที่มีการเริ่มต้นใช้งานวงจรมันจะมีค่าที่เป็นค่าดูเข้าจากสัญญาณไฟเลี้ยงที่ป้อนอยู่ ซึ่งในการที่จะนำเอาวงจรนี้ไปใช้งานนั้นเราจะไม่สามารถมองเห็นลักษณะการคำนวณนี้ได้เนื่องจากรอบการคำนวณในวงจรมันจะเร็วมาก



รูป 25 ผลที่ได้จากวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเข้าวงจรขยายสัญญาณเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล  
ช่องล่างเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องบนเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองดังกล่าวแล้วของทั้งสองวงจรจะพบว่าวงจรทั้งสองสามารถทำงานได้คมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎีน้อยมาก ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีระดับค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สูงเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกจากวงจรแบบที่ใช้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอด และผลตอบสนองของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมเกิดขึ้นได้เร็วแม้สัญญาณที่ป้อนเข้าจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล มีผลตอบสนองที่ค่อนข้างช้า เพราะอาศัยการป้อนกลับที่ต่อรอกการเข้าสู่สถานะที่สมดุล จึงควรต้องระวังเรื่องเหล่านี้ให้ดีขึ้นในเวลาดำเนินงานวงจร

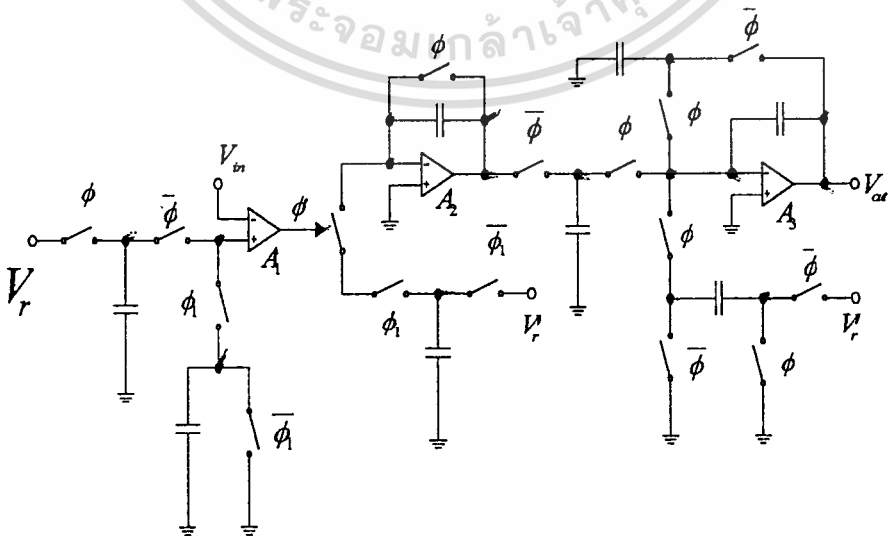


## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการใหม่ในการสร้างวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียล ที่ใช้หลักการของการคายประจุของคาปาซิเตอร์ผ่านตัวต้านทาน โดยวงจรสามารถที่จะทำงานได้ดีในย่านความถี่ไม่สูงนัก เช่นในย่านของความถี่เสียง เป็นต้น วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลแบบใหม่มีความเสถียรภาพต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดี เมื่อเทียบกับวงจรที่ทำมาจากการอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างโวลเตจและกระแสที่ผ่านสารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด ซึ่งในทางปฏิบัติการนำวงจรมาใช้งานนั้นควรที่จะเลือกค่าเวลาคงตัว  $RC$  ให้มีค่าน้อยกว่าระยะเวลาที่สัญญาณควบคุม  $\phi$  ปีกวงจรมากๆ วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่เสนอใหม่มีข้อดีกว่าวงจรแบบเก่าที่ไม่ต้องใช้สัญญาณควบคุม  $\phi'$  ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้วงจรส่วนอินเวอร์เตอร์ดังเช่นวงจรที่มีการนำเสนอมาก่อน จึงทำให้วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมนี้มีส่วนประกอบที่ง่ายขึ้น และข้อดีอีกประการหนึ่งของวงจรที่ได้นำเสนอคือสามารถใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบปฏิบัติการเข้ามาประยุกต์ใช้ ทำให้สามารถปรับปรุงวงจรเป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลได้ นอกจากนี้วงจรที่ให้หลักการนี้ยังมีข้อดีที่วงจรสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นวงจรที่สร้างจากสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่สมบูรณ์ได้ ดังเช่นแสดงในรูป

26



รูป 26 วงจรสวิตช์คาปาซิเตอร์ที่เป็นวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการแทนค่าตัวความต้านทาน  $R_1$  และตัวความต้านทาน  $R_2$  ด้วยสวิตช์และตัวเก็บประจุที่ใช้ ความถี่ของสัญญาณควบคุม  $f_1$  สูงกว่าความถี่ของสัญญาณควบคุม  $f$  มาก ซึ่งค่าของตัวความต้านทาน  $R$  จะสัมพันธ์กับค่าของตัวเก็บประจุ  $C$  และความถี่  $f_{p1}$  ของสัญญาณควบคุม ดังสมการ (56)

$$R = \frac{1}{Cf_{p1}} \quad (56)$$

ซึ่งจะทำให้วงจรที่สร้างด้วยหลักการนี้เหมาะสมกับการที่จะนำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้อย่างดี และควรพิจารณาด้วยว่าแม้วงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลทำงานได้แม่นยำดี แต่มีผลตอบสนองที่ช้า เพราะใช้หลักการป้อนกลับที่ปฏิบัติการช้า จึงใช้ได้ดีกับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างช้ามากเท่านั้น

สิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งที่ควรกล่าวไว้ในบทสรุปนี้ก็คือการสร้างวงจรขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลยังสามารถที่จะทำการสร้างโดยการใช้วงจรกลับค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้ ซึ่งรายละเอียดของวงจรกลับค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันมีดังในเอกสารภาคผนวก



## บรรณานุกรม

1. วิวัฒน์ กิรานนท์. “เครื่องขยายสัญญาณซึ่งมีอัตราขยายแบบล็อก” วิศวกรรมภาคกระบัง, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1 (กันยายน 2526) : 86-93
2. วิวัฒน์ กิรานนท์, ปราโมทย์ วาดเขียน และ จริยา เลิศจรัสอร่ามดี. “เครื่องขยายสัญญาณซึ่งมีอัตราขยายแบบล็อกชนิดใหม่” บทความการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12 ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, : 2527
3. อธิคม ฤกษบุตร. “คู่มือการใช้ Spice เบื้องต้น พร้อมทั้งตัวอย่างโปรแกรมใช้งาน” ภาควิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยมหานคร
4. D. Ghosh and D. Patranabis, “A Simple Analog Divider Having Independent Control of Sensitivity Design Condition.”, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Jun. 1990., pp.522-526
5. J.K.Stevenson. “Two-Way Circuits with Inverse Transmission Properties”, Electronic Letter, Nov. 1984 pp.965-967
6. M.A.Al - Alaoi. “A Novel approach to Designing a Noninverting Integrator with Built-in Low Frequency Stability, High Frequency Compensation and High Q” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Dec. 1989 pp.1116-1121
7. Allen, Phillip E. and Edgar Sanchez-Sinencio. Switched Capacitor Circuits, New York : Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1984
8. Aizerman, M. A. and Gantmacher, F. R. (Translated by E. Polak). Absolute Stability of Regulator Systems. The United States of America : Holden-Day, Inc., 1964
9. Bacon, Francis. Time-Domain Analysis and Design of Control Systems. The United States of America : Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1965
10. Bender, Carl M. and Orszag, Steven A. Advanced Mathematical Methods for Scientists and Engineers. Singapore : McGraw-Hill, Inc., 1978
11. Berlin, Howard M. Design of OP-AMP Circuits with experiments. Indiana : Howard W. Sams & Co., Inc., 1977

12. Coughlin, R.F. Principles and Applications of Semiconductors and Circuits. Prentice-Hall, 1971.
13. E.J. Kennedy. "Operational Amplifier Circuits Theory and Application" Holt, Rinehart and Winston, INC., 1988. chapt.1
- 14 Franklin, Gene F., Powell, David J., and Workman, Michael L. Digital Control of Dynamic Systems. Second Edition. The United States of America : Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1990
15. G.S. Moschytz, "Linear Integrated Network Fundamental.", Van Nostrand Reinhold Co., 1974 pp.278
16. Geiger, Randall L., Allen, Phillip E. and Strader, Noel R. VLSI Design techniques for analog and digital circuits, international edition. Singapore : McGraw-Hill, 1990
17. Ghausi, M.S. Principles and Design of Linear Active Circuit. McGraw-Hill, Inc., 1965.
18. Goldberg, Samuel. Introduction to Difference Equations with illustrative examples from Economics, Psychology, and Sociology. The United States of America : John Wiley & Sons, Inc., 1958
19. Graeme, J. G. and other. Operational Amplifier Design and Application. McGraw-Hill, Inc., 1977.
20. Gray, Paul R. and Meyer, Robert G. Analysis and Design of Analog Integrated Circuits. Third Edition. Singapore : John Wiley & Sons, Inc., 1993
21. Gregorian, Roubik. and Temes, Gabor C. Analog MOS Integrated Circuits for Signal Processing. The United States of America : John Wiley & Sons, Inc., 1986
22. Jung, Walter G. IC op-amp cookbook. Indiana : Howard W. Sams & Co., Inc., 1974
23. Marshall, J.E. Control of Time-Delay Systems. New York : Peter Peregrinus Ltd., 1979
24. Mohan, P.V. Ananda. Ramachandran, V. and Swamy, M.N.S. Switched Capacitor Filters. First Published. Hertfordshire : Prentice Hall International (UK) Ltd, 1995
25. Norris, Bryan. Digital-Integrated-circuit, Operational-Amplifier and Optoelectronic Circuit Design. The United States of America : McGraw-Hill, Inc., 1976.

26. Oppenheim, Alan V. and Schafer, Ronald W. Discrete-Time Signal Processing. The United States of America : Prentice-Hall, Inc., 1989
27. Saaty, Thomas L. and Bram, Joseph. Nonlinear Mathematics. First Published. New York : McGraw-Hill Book Company., 1981
28. Saaty, Thomas L. Modern Nonlinear Equations. First Published. New York : McGraw-Hill Book Company., 1981
29. Sedra, Adel S. and Smith, Kenneth C. Microelectronic Circuits. Japan : Holt, Rinehart and Winston, 1982
30. Seidman, Arthur H. Integrated Circuits Applications Handbook. John Wiley & Sons, Inc.
31. Sheingold, Daniel H. Nonlinear Circuits Handbook designing with analog function modules and IC's. Second Edition. The United States of America : Analog Devices, Inc., 1976
32. Stout, David F. and Kaufman, Milton. Handbook of Operational Amplifier Circuit Design. The United States of America : McGraw-Hill, Inc., 1976.
33. Taylor, Fred J. Principles of Signals and Systems. Singapore : McGraw-Hill, Inc., 1994
34. Thomatronik Brueckenstrasse 1, "Pspice Electrical circuit Simulator Evaluation Version 4.04 (July 1990)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



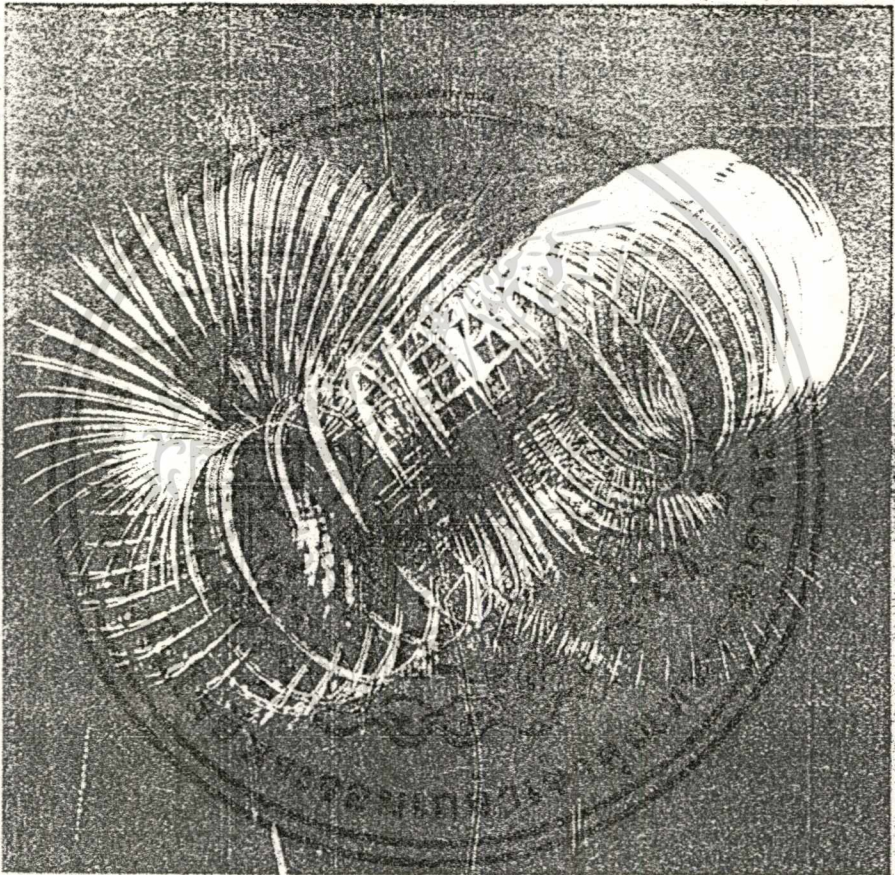
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การประชุมวิชาการ

ราชบัณฑิตยสถาน ประจำปี ๒๕๓๖

## ครั้งที่ 16



สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ

25-26 พฤษภาคม ๒๕๓๖

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16

The 16<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering



25 - 26 พฤศจิกายน 2536

ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### วงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน Transfer-Function Inverter

มานะชัย เหลืองจาวจร \*    ปราโมทย์ วาดเจียน \*\*    วิวัฒน์ กิรานนท์ \*\*\*

บทคัดย่อ - บทความนี้ได้เสนอวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน ที่ตามทฤษฎีแล้วมีความสมบูรณ์กว่าวงจรถansfer-function อินเวอร์ตแบบธรรมดา สามารถสร้างให้วงจรมีอัตราขยายในตัวเองได้ วงจรที่นำเสนอใช้คอนเดนเซอร์เพียง 2 ตัว และตัวต้านทานเพียง 1 ตัวถ้ามีความจำเป็น ผลการทดลองได้ใช้วงจรถansfer-function อินเวอร์ตของวงจรถansfer-function อินเวอร์ตเรเนอเลเตอร์ และวงจรถansfer-function อินเวอร์ตเรเนอเลเตอร์เป็นวงจรถansfer-function อินเวอร์ตเรเนอเลเตอร์ (BEF) ให้เป็นวงจรถansfer-function อินเวอร์ตเรเนอเลเตอร์ (BPF) ได้ผลดี เมื่อเทียบกับผลของการใช้วงจรถansfer-function อินเวอร์ตแบบธรรมดา

Abstract - This paper presents a theoretically perfect novel transfer function inverter which superior to the conventional one. The novel circuit possesses a self-amplification factor. The circuit is only composed of two op-amp's and one buffer circuit (if it is necessary). The experimental results from using the novel circuit to invert transfer function of an integrator circuit to be a differentiator circuit and band elimination filter (BEF) to be band pass filter (BPF) have been excellent when compare with that of the conventional one.

1) บทนำ

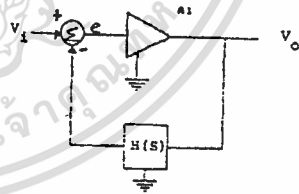
วงจรถansfer-function อินเวอร์ตในการกลับค่าหรืออินเวอร์ต (invert) ค่า transfer-function ของวงจรถansfer-function อินเวอร์ตได้มีประโยชน์มากในการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมอัตโนมัติได้อย่างกว้างขวาง [1-4] ยกตัวอย่าง เช่น ในการนำไปใช้ในการเปลี่ยนวงจรถansfer-function เรเนอเลเตอร์ (differentiator) ให้เป็นวงจรถansfer-function อินทิเกรเตอร์ (Integrator) [2] ใช้ในการเปลี่ยนวงจรถansfer-function เรเนอเลเตอร์ ให้เป็นวงจรถansfer-function เรเนอเลเตอร์ (1) ใช้สร้างวงจรถansfer-function วงจรถansfer-function สแควร์รูท (square rooter) จากวงจรถansfer-function (3-4) และใช้สร้างวงจรถansfer-function แบบแบนด์พาส (LTPF) สูงผ่าน (HPF) จากวงจรถansfer-function แบบแบนด์พาสความถี่ต่ำผ่าน (LPF) หรือใช้สร้างวงจรถansfer-function แบบจันแบนด์พาส (BEF) จากวงจรถansfer-function แบบแบนด์พาสความถี่ต่ำผ่าน (BPF) [1] เช่นนี้เป็นต้น วงจรถansfer-function อินเวอร์ตมีความสามารถกลับค่า transfer-function ฟังก์ชัน ได้ดังกล่าวนี้ต่อไป ในบทความนี้จะกำหนดนิยาม เรียกว่า "วงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน" (transfer function inverter) ซึ่งจะเขียนย่อว่า "วงจรถansfer-function อินเวอร์ต" หลักการสร้างวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน โดยทั่วไปนั้นเมื่อตัวคูณกับสองวิธี คือ วิธีการของ J.K.Stevenson ที่ใช้หลักการป้อนกระแสไฟ เลื่อนขออนุญาตให้วงจรไม่ป้อนถึงอินพุตของวงจรถansfer-function (two - port circuit) ที่ต้องการทำการกลับค่า transfer-function ฟังก์ชัน [1] และอีกวิธีหนึ่งเป็นวิธีการที่ใช้วงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน ฟังก์ชันอินเวอร์ต ฟังก์ชันเป็นทางป้อนกลับของวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน

ที่มีอัตราขยายสูงมาก [2-4] วิธีการหลังนี้เป็นที่นิยมใช้กันอยู่กว้างขวางกว่าวิธีการแรก เพราะมีหลักการและรูปแบบวงจรที่ง่ายกว่าวิธีแรก วิธีการแรก [1] นอกจากจะยุ่งยากแล้วยังมีความคิดเ็นที่สมารถเกิดกับวงจรได้ง่ายเมื่อมีอัตราขยายสูงค่า แต่วิธีการแบบจันแบนด์พาสสามารถทำได้ในกรณีที่สามารถได้เป็นสองทิศทาง (bidirectional) ในขณะที่วิธีการหลังใช้กรณีเดียวทิศทางเดียว (unidirectional) แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานโดยทั่วไปที่มักจะต้องจะเป็นการขนถ่ายสัญญาณในทิศทางเดียวเป็นหลัก ดังนั้นเมื่อต้องการจะทำการกลับค่า transfer-function ฟังก์ชันของสัญญาณจึงมักจะพบเห็นวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันมาใช้อยู่เสมอ [2-4]

อย่างไรก็ตามวิธีการสร้างวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันโดยใช้หลักการป้อนกลับกระแสไฟเป็นการกลับค่า transfer-function ฟังก์ชันโดยประมาณเท่านั้นจึงไม่เป็นวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันที่สมบูรณ์แบบ เพราะถ้าหากไม่เพิ่มเพิ่มในทางกลับกัน บทความนี้จึงได้เสนอวิธีการสร้างวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันเพื่อการสร้างวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน (double feed back) ผลการทดลองได้ใช้วงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันเปรียบเทียบกับวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันแบบธรรมดาเป็นวงจรถansfer-function เรเนอเลเตอร์ และวงจรถansfer-function เรเนอเลเตอร์ BPF เป็นวงจรถansfer-function BPF แสดงให้เห็นว่าวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันที่เสนอนี้ดีกว่าวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันแบบธรรมดา

2) หลักการ

โดยธรรมชาติทั่วไปเมื่อต้องการจะสร้างวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันที่มีความสมบูรณ์ดีคือได้ค่า transfer-function ฟังก์ชันของวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันที่แน่นอนโดยใช่วงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน ฟังก์ชันอินเวอร์ต ฟังก์ชันของวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชันแบบธรรมดา



รูป 1 วงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน แบบเดิม

หากพิจารณาที่ตัวคูณของวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน ฟังก์ชันอินเวอร์ต ฟังก์ชันของวงจรถansfer-function อินเวอร์ต ฟังก์ชัน

$$G(s) = V_0(s)/V_1(s) = A/(1+AH(s)) \quad \dots (1)$$

โดยที่ A คืออัตราขยายในทางตรง (forward path)

\* นักศึกษาทดลองวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
\*\* อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

$V_o/e$  และ  $H(s)$  คือค่าโวลเทจทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้น  $V_o/V_i$  ของระบบ เมื่อทำการสมมติค่า  $AH(s)$  มากกว่าหนึ่งมาก กล่าวคือ

$$|AH(s)| \gg 1 \quad \dots (2)$$

จะทำให้ได้ค่าของ (1) โดยประมาณคือ

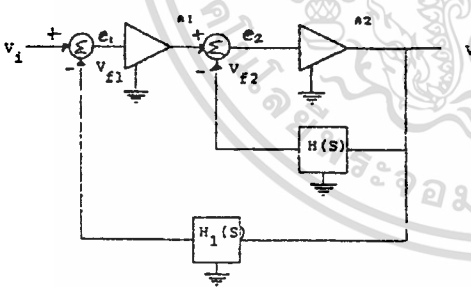
$$G(s) = 1/H(s) = [H(s)]^{-1} \quad \dots (3)$$

จะเห็นว่าค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นรวม  $G(s)$  ของระบบนี้มีค่าประมาณเท่ากับส่วนกลับของทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้น  $H(s)$  ของระบบในส่วนป้อนกลับตามต้องการ นั่นคือ วงจรตามรูป 1 สามารถประมาณใช้เป็นวงจรกลับค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นได้ตามต้องการ ซึ่งจะยกตัวอย่างประกอบให้เข้าใจได้ดังนี้ คือ ถ้าให้วงจรในส่วนป้อนกลับเป็นอินทิเกรเตอร์ในอุดมคติซึ่งมีค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้น  $H(s) = 1/s$  ดังนั้นค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นรวมของวงจรส่วนป้อนกลับตามรูป 1 ตาม (3) จะมีค่า  $G(s) = [H(s)]^{-1} = s$  ซึ่งเราเรียกว่า  $G(s) = s$  นั่นคือทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นของวงจรคือเฟอ์ริง์เรชเชอเคอร์ แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วค่าตาม (3) นี้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น เพราะ (3) จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อสมมติฐานใน (2) เป็นจริงและถ้า (2) ไม่เป็นจริง กล่าวคือเราจะไม่สามารถประมาณ (1) ด้วย (3) ได้ ดังเช่นในกรณีเมื่อสมมติค่า  $H(s) = 1/s$  ไปใน (1) เราจะพบว่า

$$G(s) = AS/(A+s)$$

จะเห็นว่าค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นของวงจรมีโพล (pole) อยู่ที่  $s=-A$  นั่นคือวงจรนี้จะถูกจำกัดให้ใช้งานเป็นวงจรคิมเฟอ์ริง์เรชเชอเคอร์อยู่ได้ก็เมื่อ  $|s| \ll |A|$  เท่านั้น

เมื่อที่จะปรับวงจรให้ได้อัตรา TFI ที่สมบูรณ์นั้น จะต้องทำการกำจัดค่าของ 1 ในส่วนของเทอมชวามีของ (1) ออกไปให้ได้ เนื่องการดังกล่าวบทความนี้ได้เสนอการจับวงจรใหม่โดยจัดหน่วยป้อนกลับในวงจรมีขึ้นสองแนว ดังแสดงในโคแชนแกรม (diagram) ตามรูป 2



รูป 2 วงจรป้อนกลับสองชั้นที่ใช้เป็นวงจร TFI แบบใหม่

ในรูปนี้  $H(s) = V_o(s)/V_{i2}(s)$  โดยการใช้เทร่าท่วงจรตามโคแชนแกรม ในรูป 2 จะได้ค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นรวมของวงจร  $G(s)$

ดังต่อไปนี้คือ

$$G(s) = V_o(s)/V_i(s) = A_1A_2/(1+A_1A_2H_1(s)+A_2H(s)) \quad \dots (4)$$

ดังนั้นเมื่อเลือกค่า  $A_1A_2H_1(s) = -1$  แล้วจะได้

$$G(s) = [H(s)]^{-1} \quad \dots (5)$$

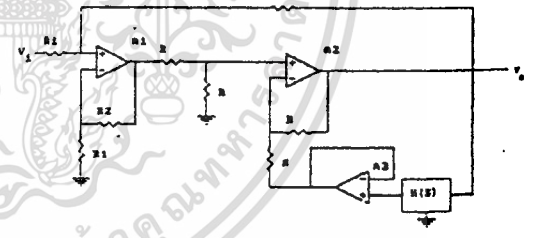
โดยไม่ได้มีการประมาณค่าใดเลยนั่นคือเราสามารถสร้างวงจรขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี ซึ่งไปกว่านั้นโดยการจับวงจรตามโคแชนแกรมในรูป 2 เราสามารถสร้างวงจร TFI ที่มีอัตราขยายอินพุตหรือมีอัตราขยายอินพุตได้ ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสถียรและความคล่องตัวในการประมวลผลสัญญาณได้มากกว่าการใช้วงจรแบบเดิม (ตามรูป 1) ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวอย่างเช่น ถ้าเลือกค่า  $A_1$  และ  $A_2$  เป็นบวก และเลือก  $H_1(s) = -1/A_1A_2$  จะได้ค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นรวม  $G(s)$  เป็นดังต่อไปนี้คือ

$$G(s) = A_2[H(s)]^{-1} \quad \dots (6)$$

ดังนั้นถ้าเราเลือกค่าให้  $A_2 > 1$  เราจะได้วงจร TFI ที่มีอัตราขยายอินพุต  $A_2$  เท่าตัว

### 3) วงจรที่ใช้งาน

จากบล็อกโคแชนแกรมตามรูป 2 ในกรณีที่  $A_1$  และ  $A_2$  มีค่าเป็นลบ แต่  $H_1(s)$  มีค่าเท่ากับ  $-1/A_1A_2$  เมื่ออาศัยความรู้พื้นฐานเรื่องวงจรขยายผลต่าง (differential amplifier) [5] จะสามารถสร้างวงจรแบบหนึ่งได้ดังแสดงในรูป 3



รูป 3 รูปวงจร TFI ที่สร้างขึ้นจากโครงสร้างตามรูป 2

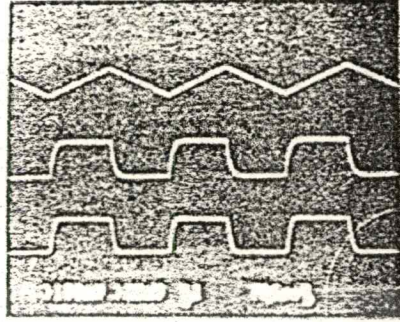
จึงวงจรในรูป 3 นี้จะมีค่าทรานส์เฟอ์ริง์ขึ้นรวมคือ

$$G(s) = V_o(s)/V_i(s) = (R_2/R_1)[H(s)]^{-1} \quad \dots (7)$$

จะเห็นว่า วงจรที่มีอัตราขยายอินพุตเท่ากับค่าอัตราส่วน  $R_2/R_1$  นั้นเฟอ์ริง์  $A_2$  ในวงจรจำเป็นจะต้องให้ ทั้งนี้เพื่อแยก (isolate) ไม่ให้มีความสัมพันธ์ของวงจรขยายผลต่าง  $A_2$  ไปเป็นการระ (load) ค่าเอาท์พุทของวงจร  $H(s)$  ในส่วนป้อนกลับ จึงการเป็นการระนี้อาจจะทำให้

2) Hiss เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ใช่สัญญาณที่ต้องการ ซึ่งมีความถี่ของสัญญาณ  $R_1 = R_2 = R$  และใช้วงจร TFI ที่มีลักษณะการทำงานดังนี้:

วงจรถ่ายรูป 3 นี้ใช้หลักการโดยที่เอาสัญญาณของวงจร TFI ไปใช้กับวงจรที่เรียกว่าวงจร  $R_1/R_2$  วงจรนี้ไม่ได้อยู่ในวงจรรูป 3 นี้ แต่มีความจำเป็นที่จะต้องมีเอาสัญญาณของวงจร Hiss และสัญญาณของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต้องการ (controlled voltage source) มาเอาสัญญาณเหล่านี้มาใช้



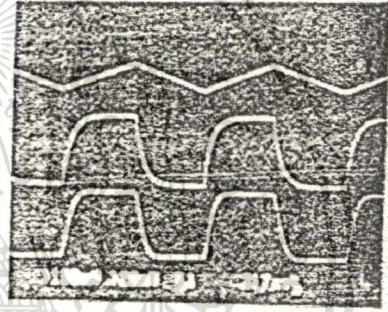
3) ลักษณะการทำงานของวงจร

เมื่อวงจรของ TFI รูปที่ 3 นี้จะจ่ายให้ใช้การที่แน่นอนแล้ว ก็ให้วงจรที่ความถี่สูงใช้เพื่อที่จะใช้สำหรับของวงจรที่ใช้กับวงจรที่เรียกว่าวงจร Hiss ซึ่งใช้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีเอาสัญญาณของวงจร Hiss มาเอาสัญญาณของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต้องการ (controlled voltage source) มาเอาสัญญาณเหล่านี้มาใช้

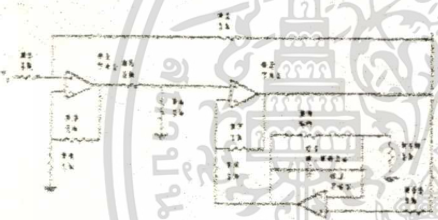
รูป 3. ลักษณะการทำงานของวงจร Hiss เป็นสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

4) ลักษณะของวงจร

เมื่อใช้การที่มีลักษณะการทำงานที่แน่นอนแล้ว ก็ให้วงจรที่ความถี่สูงใช้เพื่อที่จะใช้สำหรับของวงจรที่ใช้กับวงจรที่เรียกว่าวงจร Hiss ซึ่งใช้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีเอาสัญญาณของวงจร Hiss มาเอาสัญญาณของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต้องการ (controlled voltage source) มาเอาสัญญาณเหล่านี้มาใช้



รูป 4. ลักษณะการทำงานของวงจร Hiss เป็นสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ



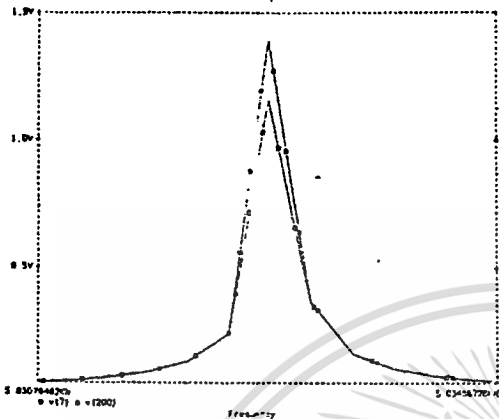
รูป 5. วงจรที่ใช้ในวงจรของรูปที่ 3 (Hiss) เป็นสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

ในลักษณะของสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ใช่สัญญาณที่ต้องการ ซึ่งมีความถี่ของสัญญาณ  $R_1 = R_2 = R$  และใช้วงจร TFI ที่มีลักษณะการทำงานดังนี้:

เมื่อใช้การที่มีลักษณะการทำงานที่แน่นอนแล้ว ก็ให้วงจรที่ความถี่สูงใช้เพื่อที่จะใช้สำหรับของวงจรที่ใช้กับวงจรที่เรียกว่าวงจร Hiss ซึ่งใช้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีเอาสัญญาณของวงจร Hiss มาเอาสัญญาณของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต้องการ (controlled voltage source) มาเอาสัญญาณเหล่านี้มาใช้

รูป 6. ลักษณะการทำงานของวงจร Hiss เป็นสัญญาณรบกวนที่มาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

จากผลของการเขียนแบบวงจร ได้ผลคอบสองเชิงความถี่ในรูป 9



รูป 9 ผลของการเขียนแบบวงจร TFI แบบใหม่  
เมื่อเห็นกับวงจรในลักษณะเดิมที่ใช้กันมา (ตามรูป 3)  
โดยมีวงจรมีเกณฑ์  $H(\omega)$  เป็นวงจรถ่าย BEP. ตามรูป 7

- ผลที่ได้จากวงจร TFI แบบใหม่
- ผลที่ได้จากวงจรในลักษณะเดิม

ซึ่งจะเห็นชัดเจนว่า ไบพอลิแคสสแบนด์ ของระบบวงจร TFI  
แบบใหม่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแตกต่างไปจากผลคอบสองที่ไดจากวงจร TFI  
แบบเก่ามาก

**6) สรุปและวิจารณ์**

บทความนี้ได้เสนอหลักการสร้างวงจร TFI ที่มีความคลาดเคลื่อน  
น้อยลงกว่าวงจร TFI แบบเดิมที่มีใช้กันอยู่รวมทั้งได้เสนอวงจร TFI  
รูปแบบหนึ่งที่สามารถขึ้นตามหลักการที่ได้เสนอนี้รวมทั้งวิธีที่จะทำให้อุปกรณ์  
มีเสถียรภาพในเวลาดำเนินงาน และทำการทดลองสร้างวงจร TFI

ทั้งแบบเดิมและแบบใหม่มาด้วยค่าวงจรอินทิเกรเตอร์ และเปรียบเทียบ  
ความแตกต่างของรูปคลื่นที่ได้รับ และอีกทั้งยังได้ใช้โปรแกรม PSpice  
เขียนแบบวงจรทั้งวงจรแบบเก่าและวงจรแบบใหม่ที่ใช้ในการถ่วง BEP  
ให้เป็น BPF ซึ่งผลจากการเขียนแบบวงจรและผลการทดลองแสดงให้เห็น  
ว่า วงจร TFI แบบนี้ได้มาเสนอใหม่มีคุณสมบัติที่ค่อนข้างดีจริง ดังนั้นจึง  
สรุปได้ว่าวงจรที่มีความน่าใช้เมื่อต้องการถ่วงค่าความถี่เพื่อที่จะขึ้น  
ตามนัย ซึ่งคุณสมบัติที่ค่อนข้างดีจริง มากกว่าค่าใช้จ่าย ในการเขียนโปรแกรม  
ที่ใช้ในการประกอบวงจรอื่นเพียงเล็กน้อยอย่างแน่นอน

**7) เอกสารอ้างอิง**

- [1] J.K.Stevenson, "Two - Way Circuits with Inverse  
Transmission Properties", Electronics letter, Nov. 1984  
pp. 965-967
- [2] M.A.Al - Alaoui, "A Novel approach to Designing  
a Noninverting Integrator with Built - In Low Frequency  
Stability, High Frequency Compensation and High Q.IEEE  
Trans. on Instrumentation and Measurement, Dec.1989  
pp.1116-1121
- [3] D. Ghosh and D. Patranabis, " A Simple Analog  
Divider Having Independent Control of Sensitivity  
Design Condition ", IEEE Trans. on Instrumentation and  
Measurement, Jun.1990, pp. 522-526
- [4] J.G. Graeme, G.E. Tobey and L.P. Huelsman.,  
"Operational Amplifiers Design and Application" McGraw  
-Hill, 1971, chapt 7
- [5] E.J. Kennedy, " Operational Amplifier Circuits  
Theory and Application "Holt, Rinehart and Winston,  
INC.,1988, chapt.1
- [6] G.S. Moschytz, " Linear Integrated Network  
Fundamental ", Van Nostrand Reinhold Co.,1974, pp 278.
- [7] Thomatronik Brueckenstrasse 1., "Pspice  
Electrical circuit Simulator Evaluation  
version 4.04 (July 1990)"

[8] อธิคม ฤกษ์เพชร, "คู่มือการใช้ SPICE เบื้องต้น  
พร้อมทั้งตัวอย่างโปรแกรมใช้งาน " ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยมหานคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 The 18th Conference of Electrical Engineering

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

พิมพ์ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2538  
สงวนลิขสิทธิ์ในประเทศไทยตาม พ.ร.บ.ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2521  
โดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร  
51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กทม. 10530  
โทร. 988-3655, 988-3666 โทรสาร 9883687

รับ เดือน ปี... ๒๕... ๒๕๓๘  
และทะเบียน... ๐๓๕๙๘๔  
เลขที่หนังสือ... TK. Lab N 2467

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๑๘

035984

### วงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียล

### Logarithmic and Exponential Amplifier

มานะชัย เหลืองจารุวรรณ, วิวัฒน์ กิรานนท์, ปราโมทย์ วาดเขื่อน, วิภา แสงทิสิทธิ์

**บทคัดย่อ**

บทความนี้ได้เสนอวงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียล โดยการใช้วิธีการคายประจุของตัวเก็บประจุ วงจรนี้มีข้อดีคือให้ความแม่นยำสูง เพราะอิทธิพลของอุณหภูมิจะมีผลต่อวงจรมีน้อย เมื่อเทียบกับวงจรแบบขั้วนำที่ใช้อิโอดหรือทรานซิสเตอร์ และสามารถที่จะทำเป็นวงจรมายขยายสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์

**Abstract**

In this paper, logarithmic and exponential amplifier using discharged rate of capacitors are proposed. They have high accuracy because of their less temperature sensitivities, in comparison with the conventional circuits which use diodes or transistors. The proposed amplifiers can be simply modified to the switched capacitive versions.

**1. บทนำ**

วงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงแอนติลอการิทึม (antilogarithmic amplifier) หรือแบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential amplifier) นั้นมีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้ร่วมประมวลสัญญาณ การใช้วงจรเหล่านี้ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยจะทำให้สามารถคูณ,หาร, ยกกำลัง,ถอดกรณฑ์ (root) และ บีบอัด (compress) หรือแผ่ขยาย (expand) สัญญาณได้ โดยทั่วไปจะใช้คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่รอยต่อของไดโอด กล่าวคือ

$$I = I_s(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \tag{1}$$

มาประยุกต์ใช้งาน[3,4] โดยสัญลักษณ์ต่างๆที่ใช้นั้น (1) เป็นที่คุ้นเคยกันอยู่แล้วจึงจะละทิ้งที่อธิบายความหมายในที่นี้เพื่อเป็นการประหยัด

นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หน้ากระดาษ จาก (1) จะเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  และ  $V$  มาก ดังนั้นวงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่สร้างขึ้นโดยอาศัยความสัมพันธ์ตาม (1) นั้นจึงมักขาดเสถียรภาพเมื่อต้องดำเนินการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพราะจะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปประมาณ  $-2 mV/^\circ C$  [5] ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความเหมาะสมมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรมายขยายที่ทำการชดเชยการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมินี้มาประกอบร่วมด้วยเสมอ ซึ่งนักวิจัยหลายคนและใช้ได้เฉพาะในช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จำกัดเท่านั้น เพื่อแก้ปัญหาในเบื้องต้น จึงได้มีการประดิษฐ์วงจรมายที่ใช้คุณสมบัติการเก็บประจุหรือการคายประจุของตัวเก็บประจุผ่านตัวความต้านทานแทนเป็นวงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม[1,2] วงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมเชิงซีรี่ย์พื้นฐานหรือหลักการนี้แม้จะมีผลตอบสนองที่ช้าลงบ้างเพราะใช้หลักการชดเชยด้วยสัญญาณมาเปรียบเทียบกับ แต่มีข้อดีในเรื่องการมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ จึงนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์เครื่องมือวัดได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามยังไม่พบวงจรมายขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลที่ใช้หลักการคายประจุของตัวเก็บประจุ ในเอกสารงานวิจัยทั่วไป

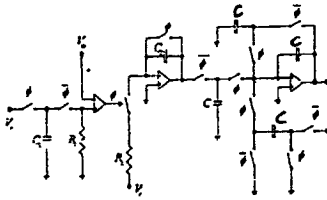
บทความนี้จะได้เสนอถึงวงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมซึ่งปรับปรุงจากวงจรแบบเดิมที่ได้เสนอไว้[1] วงจรแบบใหม่นี้ไม่ต้องใช้อินเวอร์เตอร์และสามารถคิดแปลงเป็นวงจรมายที่ใช้ตัวเก็บประจุกับประจูดังสมบูรณ์ได้เช่นกัน อีกทั้งโดยการเปลี่ยนแปลงวงจรมายเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้วงจรมายสามารถทำงานเป็นวงจรมายขยายสัญญาณเชิงเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วย

**2. วงจรและการทำงาน**

ส่วนหลักของวงจรมายขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่นำเสนอในที่นี้ แสดงในรูปที่ 1  $\phi$  และ  $\bar{\phi}$  เป็นสัญญาณนาฬิกาที่มีเฟสตรงกันข้ามเมื่อ  $\phi$  เป็นวงจรมาย (on) จะเกิดการประจุ  $C_1$  ด้วยแรงดัน  $V_1$  และเมื่อ  $\bar{\phi}$  เป็นวงจรมาย (off) จะเกิดการคายประจุของ  $C_1$  ผ่าน  $R_1$  ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่รอม  $R_1$  เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลคือ

$$V_{R_1} = V_1 e^{-\frac{t-t_0}{R_1 C_1}} \tag{2}$$

โดย  $t_0$  คือเวลาที่  $C_1$  เริ่มคายประจุ (เวลาที่  $\bar{\phi}$  เริ่มมี



รูปที่ 1 วงจรขยายสัญญาณเชิงอนุกรมที่มีที่ป้อนป้อนใหม่

วงจร) ออกแบบเป็น  $A_1$  จะทำหน้าที่เป็นอินทิเกรตแรงดันไฟฟ้าที่ก่อน  $R_1$  กับอินพุต  $V_{in}$  โดยให้เอาต์พุต  $\phi'$  ออกมาซึ่งค่ารวมเมื่อ  $V_{R_1} > V_m$  ดังนั้นถ้า  $V_r > V_m$  จะพบว่าช่วงเวลา  $T$  ที่  $\phi'$  มีค่าเป็นบวกจะมีค่า [1]

$$T = R_1 C_1 \ln V_m - k \quad (3)$$

โดย  $k = R_1 C_1 \ln V_r$  ซึ่งมีโดยธรรมชาติช่วงเวลา  $\phi'$  ปกติจะสั้นมีค่าน้อยกว่า  $T$  ดังนั้น เมื่อให้  $\phi'$  ไปควบคุมตัวทวีคูณ  $S_1$  ของตัวอินทิเกรต  $A_2$  ให้อินทิเกรตสัญญาณ  $V_r'$  เราจะได้คลื่นแรงดันเอาต์พุตของตัวอินทิเกรตที่ปลายช่วงเวลา  $\phi'$  ปกติจะคือ

$$\begin{aligned} V_{out}' &= -\frac{V_r T}{R_2 C_2} \\ &= -\alpha \ln V_m + \beta \end{aligned} \quad (4)$$

โดย  $\alpha = \frac{R_1 C_1 V_r'}{R_2 C_2}$  และ  $\beta = \frac{k V_r'}{R_2 C_2}$  ซึ่งคำนวณได้

ตาม (3) นี้จะทำให้เกิดประจุรวม  $C_3$  ที่เก็บ

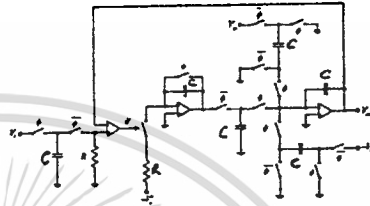
$$Q_3 = -\alpha C_3 \ln V_m + C_3 \beta \quad (5)$$

โดยการเลือกค่า  $C_4 = \frac{C_3 \beta}{V_r'}$  และ  $C_5 = C_6 = C$

โดยที่  $A_3$  จะทำหน้าที่เป็นวงจรรวมสัญญาณ (summing amplifier) ซึ่งจะรวมค่าประจุรวม  $C_3, C_4$  และ  $C_5$  ไปไว้ใน  $C_6$  ในช่วงเวลา  $\phi'$  ที่ จะปัดวงจรในจังหวะสัญญาณนาฬิกาต่อไปจาก  $\phi'$  ทำให้เกิดเอาต์พุต  $V_{out}$  คือ

$$V_{out} = \frac{\alpha C_3}{C} \ln V_m \quad (6)$$

ดังนั้นจะเห็นว่าวงจรนี้มีเอาต์พุตแปรผันกับค่าลอการิทึมของสัญญาณ  $V_m$  จึงปฏิบัติได้เป็นคั้งวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมนั่นเอง เพื่อที่จะทำให้อัตราส่วนรูปที่ 1 กลายเป็นวงจรรวมสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรอิด นั้นสามารถทำได้โดยทำการเปลี่ยนสัญญาณเอาต์พุตของอินพุตคิม และตัดทางป้อนกลับเดิมที่มีไปยัง  $C_6$  ให้เป็นจุดป้อนอินพุตใหม่พร้อมทั้งเปลี่ยนค่า  $V_r'$  เป็น  $-V_r'$  ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรอิด

โดยการพิจารณาเอาต์พุต  $V_{out}$  ในช่วงเวลา  $\phi'$  คือ  $V_{out}'$  ถูกป้อนกลับไปยัง  $V_m$  เดิม ก็จะทำให้ได้ประจุรวม  $C_3$  ที่เวลา  $\phi'$  มีค่าเป็น

$$Q_3' = \alpha C_3 \ln V_{out}' - C_3 \beta \quad (7)$$

และเมื่อพิจารณาที่เวลา  $\phi'$  นี้จะมีประจุรวมอยู่ใน  $C_4, C_5$  และ  $C_6$  เป็น

$$Q_4 = -C_4 V_r' = -C_3 \beta \quad (8)$$

$$Q_5 = C_5 V_{out}' \quad (9)$$

$$Q_6 = C_6 V_m \quad (10)$$

คำนวณแล้ว ซึ่งเมื่อถึงช่วงเวลา  $\phi'$  ใหม่ คือเริ่ม  $\phi'^{+1}$  ปัดวงจร เราจะได้

$$V_{out}^{+1} = V_{out}' + \frac{C_6}{C_5} V_m - \frac{\alpha C_3}{C_5} \ln V_{out}' \quad (11)$$

โดยการเลือก  $C_5 = C_6, C_3 = \frac{C_5}{\alpha}$  หรือทั้ง

$$C_4 = \frac{C_3 \beta}{V_r'} \text{ จะได้ (11) กลายเป็น}$$

การประจุมิตรทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18

$$V_{out}^{i+1} = V_{out}^i + V_{in} - \ln V_{out}^i \quad (12)$$

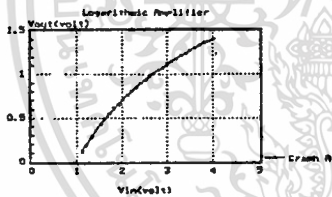
จะเห็นว่าสมการ (12) แสดงถึงสมการการป้อนกลับทางลบ ซึ่งจะเกิดการลู่เข้าสู่ค่า  $V_{out}^{i+1} = V_{in}$  ซึ่งจะให้  $V_{in} = \ln V_{out}$  อันเป็นเงื่อนไขที่แสดงว่าองค์ประกอบวงจรที่สถานะคงตัวจะได้

$$V_{out} = e^{V_{in}} \quad (13)$$

นี่ก็ตรงจะได้วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรียดคองการ

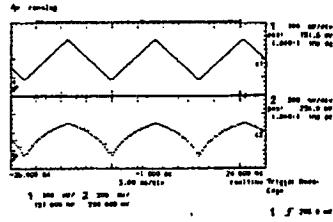
3. การทดลองและผล

ได้ทดลองวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมตามรูปที่ 1 โดยใช้ไอซีออปแอมป์อินเวอร์ LF351 สำหรับ  $A_1, A_2$  และ  $A_3$  ให้  $R_1 = 20k, R_2 = 20k, C_1 = 2200nF, C_2 = 220nF, C_3 = 0.1\mu F, C_4 = 0.0033\mu F, C_5 = 0.01\mu F, C_6 = 0.01\mu F, V_{cc} = 5V$  และ  $V_{ee} = 5V$  ให้สัญญาณเข้า  $\phi$  มีค่าความถี่ที่ต่ำ 1 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับการทดลองป้อนสัญญาณไฟตรงเข้าสู่การทดสอบหลอดสมรรถนะไฟตรงจะได้ผลการทดลองที่สามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตได้ดังรูปที่ 3 และเมื่อทำการทดลองป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ 60 เฮิรตซ์ที่มีการถ่วงระดับค่าสัญญาณให้เป็นกันทั่วทั้งความถี่จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 1 และสัญญาณในรูปที่ 2 เป็นสัญญาณที่มีอัตราส่วนและสัญญาณต่อความถี่ความถี่จากผลการทดลองจะพบว่ามีอัตราส่วนที่งานเป็นวงขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมได้จริงตามหลักการที่เสนอ

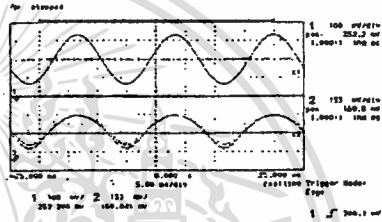


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม เส้นเส้นเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ จุด X เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในวงจร

เมื่อทำการทดลองด้วยวงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมตามรูปที่ 2 โดยมีการใช้ค่าอุปสรรคค่าจูนนิ่งที่ค่าเดิมเพียงแต่เปลี่ยนค่าของ  $V_{cc}$  ให้มีค่าเป็น -5 V แล้วทำการทดลองป้อนสัญญาณไฟตรงคือทำการทดสอบหลอดสมรรถนะไฟตรงจะได้ผลการทดลองที่สามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจากการทดลองจะพบว่ามีอัตราส่วนที่งานเป็นวงขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรียดคองการตามหลักการที่เสนอ

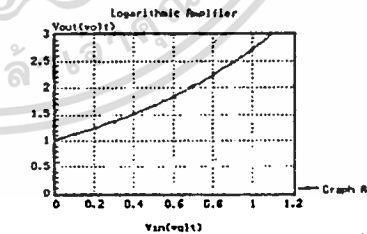


รูปที่ 4 ผลที่ได้จากการทดลองป้อนสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม ช่องบนเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากทเอาต์พุตของวงจร



รูปที่ 5 ผลที่ได้จากการทดลองป้อนสัญญาณรูปไซน์เข้าสู่วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึม ช่องบนเป็นสัญญาณที่ป้อนเข้าอินพุต ช่องล่างเป็นรูปสัญญาณที่ได้จากทเอาต์พุตของวงจร

จากการทดลองทั้งสองวงจรจะพบว่ามีวงจรถึงสามารถทำงานได้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าทางทฤษฎีไม่มากนัก ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีระดับค่าสัญญาณที่สูง และหลอดสมรรถนะของวงขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมที่คิดขึ้นได้เร็วแม้สัญญาณที่ป้อนเข้าจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ก็ตาม แต่ทั้งวงขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมแบบเรียดคองการและหลอดสมรรถนะที่ค่อนข้างช้าเพราะใช้อัตการป้อนกลับที่ค่อนข้างช้ากว่าการเข้าสัญญาณที่ตรงต่อ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับเอาต์พุต เส้นเส้นเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ จุด X เป็นค่าที่ได้จากการทดลองในวงจร

4. ขาปและวงรีพม

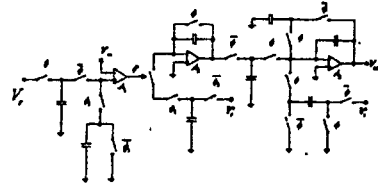
บทความนี้ได้เสนอหลักการสร้างวงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิม และวงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิมหรือ ซึ่งใช้หลักการของประจุของกา-ปาริตเตอร์ วงรีพมส่วนนี้ได้ใช้ส่วนความถี่ไม่สูงนัก เช่นในส่วนความถี่เสียง เป็นต้น วงรีพมที่อธิบายที่กล่าวมานี้ ในทางปฏิบัติควรเลือกค่าขาสวมรีชอกกีทิม  $R_C$  ให้มีค่ามากกว่าช่วงเวลาที่เป็น  $\phi$  ปริมาณมาก วงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิมที่เสนอใหม่นี้มีข้อดีที่ความถี่ไม่สูงนัก จึงทำให้วงรีพมมีส่วนประกอบที่ง่ายขึ้น ข้อดีอีกประการหนึ่งของวงรีพมที่ได้มีเสนอขึ้นนี้คือสามารถใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบปฏิบัติกรจําการประยุกต์ใช้ ซึ่งให้เรขาคณิตของรูปวงรีพมไปเป็นวงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิมหรือได้ นอกจากนี้วงรีพมที่เสนอขึ้นนี้ยังเหมาะที่จะใช้กับขาสวมรีชอกกีทิมที่มีค่าขาสวมรีชอกกีทิมที่ต่างกันด้วย

ในรูปที่ 7 โดเมนค่า  $R_1$  และ  $R_2$  คือขาสวมรีชอกกีทิมและค่าปาริตเตอร์ที่ให้ความถี่ของขาสวมรีชอกกีทิม  $\phi$  ขาสวมรีชอกกีทิมของ  $\phi$  มาก ค่า  $R$  จะสัมพันธ์กับค่า  $C$  และความถี่  $f_{\phi 1}$  ของขาสวมรีชอกกีทิม ดังนี้คือ

$$R = \frac{1}{Cf_{\phi 1}} \quad (14)$$

ทั้งนี้วงจรที่เสนอขึ้นด้วยหลักการนี้เหมาะกับการที่จะนำไปใช้ป้อนเป็นวงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิม

ควรพิจารณาด้วยว่า วงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิมหรือที่เสนอขึ้นนี้สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี และมีความถี่สูงได้ เพราะใช้หลักการป้อนกลับแบบปฏิบัติกรจํา จึงได้ใช้กับขาสวมรีชอกกีทิมที่มีค่าขาสวมรีชอกกีทิมที่ต่างกัน



รูปที่ 7 วงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิมเป็นวงรีพมของขาสวมรีชอกกีทิม

6. เอกสารอ้างอิง

1. วิวัฒน์ ภิรมานนท์, ปราโมทย์ วาดเขียน และ จิรายุ ติงวณิชชานนท์, "ขาสวมรีชอกกีทิมที่มีขาสวมรีชอกกีทิมแบบอินทิเกรตใหม่" บทความประกอบการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 12 ณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, หน้า 149-156.
2. วิวัฒน์ ภิรมานนท์, "ขาสวมรีชอกกีทิมที่มีขาสวมรีชอกกีทิมแบบอินทิเกรตใหม่", วิศวกรรมสารฉบับที่ 4, ฉบับที่ 1, กันยายน 2526, หน้า 84-91.
3. Graeme, J.G. et al., "Operational Amplifier Design and Applications", McGraw-Hill, 1977, pp. 253-266.
4. Norris, B., "Digital Integrated Circuit and Operational Amplifier and Optoelectronic Circuit Design", McGraw-Hill, pp. 153-158.
5. Ghani, M.S., "Principles and Design of Linear Active Circuit", McGraw-Hill, 1965, pp. 159-163.
6. Coyle, R.F., "Principles and Applications of Semiconductors and Circuits", Prentice-Hall, 1971, pp. 111.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายมานะชัย เหลืองจากรุร
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 13 กันยายน 2511
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2533
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	<p>1. วงจรกลับค่าทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function inverter) การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง</p> <p>2. วงจรขยายสัญญาณเชิงลอการิทึมและเชิงเอ็กซ์โพเนนเชียล (Logarithmic and Exponential Amplifier) การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร</p>
รางวัลหรือทุนที่เคยได้รับ	มูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร (C&C)
ประสบการณ์การทำงาน	2534-2535 วิศวกรไฟฟ้า 4 แผนกวางแผนการจ่ายไฟฟ้า กองวิจัยและวางแผนการจ่ายไฟฟ้า ฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง 2535-ปัจจุบัน เจ้าหน้าที่วิจัย ศูนย์บริการและพัฒนาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้