

การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่มีเสถียรภาพสูง
ในเทคโนโลยีซีมอส

Design of a highly – stable CMOS ring oscillator

ฉัตรชัย ทันโทศักดิ์
Chatchai Tanhosak

ฉัตรชัย พลจันทร์
Chatchai Ponchun

ปฏิพล วงศ์สน
Patipon Wongson

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่มีเสถียรภาพสูง
ในเทคโนโลยีซีมอส

Design of a highly – stable CMOS ring oscillator

โดย

นายฉัตรชัย	ทันโศศักดิ์
นายฉัตรชัย	ผลจันทร์
นายปฏิพล	วงศ์สน

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.อภินันท์ ธนชยานนท์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2556

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา2556

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่มีเสถียรภาพสูงในเทคโนโลยีซีมอส

Design of a highly-stable CMOS ring oscillator

ผู้จัดทำ นายฉัตรชัย ทันโศศักดิ์ รหัสประจำตัว 53010267

นายฉัตรชัย ผลจันทร์ รหัสประจำตัว 53010268

นายปฏิพล วงศ์สน รหัสประจำตัว 53010900

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.อภิวัฒน์ ชนชยานนท์)

วันที่ 12.../.../57...

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่มีเสถียรภาพสูง ในเทคโนโลยีซิมอส		
นักศึกษา	นายฉัตรชัย	ทันโศศักดิ์	รหัสประจำตัว 53010267
	นายฉัตรชัย	ผลจันทร์	รหัสประจำตัว 53010268
	นายปฏิพล	วงศ์สน	รหัสประจำตัว 53010900
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์		
ปีการศึกษา	2556		
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.อภิรักษ์ ธนชยานนท์		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ อธิบายการออกแบบวงจรซิมอสริงออสซิลเลเตอร์หรือวงจรถ้าเนิดความถี่แบบวงแหวนโดยใช้ซิมอสในการสร้าง เพื่อให้อยู่ในวงจรรวมได้ ความถี่ที่สร้าง คือ 10 เมกะเฮิร์ต การออกแบบวงจรสร้างความถี่ด้วยซิมอสที่มีเสถียรภาพสูงจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ วงจรชดเชยความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ วงจรแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ และวงจรริงออสซิลเลเตอร์ 5 ภาค วงจรชดเชยจะทำให้ซิมอสริงออสซิลเลเตอร์มีเสถียรภาพสูง แปรผันกับความคลาดเคลื่อนเนื่องจากกระบวนการผลิตและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปน้อยลง การออกแบบจะรวมไปถึงการสร้างเลย์เอาต์ของวงจรด้วย สำหรับการออกแบบเลย์เอาต์พวกเขาจะมุ่งเน้นไปที่พื้นฐานการออกแบบซิมอสทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่นำไปสู่การสร้างวงจรรวม

Thesis Title	Design of a highly – stable CMOS ring oscillator		
Student	Mr.Chatchai	Tanhosak	Student ID.53010267
	Mr.Chatchai	Ponchun	Student ID.53010268
	Mr.Patipon	Wongson	Student ID.53010900
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Electronic Engineering		
Year	2013		
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Apinunt Thanachayanont		

Abstract

This research report describes the design of a highly – stable ring oscillator in CMOS technology. The circuit was designed of provide 10 – MHz output frequency. The oscillator circuit consists of three main blocks, including a temperature/process compensation circuit, a bandgap reference, and a 5 – stage current – starved inverter ring oscillator. Simulation results using LTSPICE showed that the output frequency variations are within $\pm 10\%$ over temperature range of $-40 - +80$ °C . Layout of the oscillator was also carried out.

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการนี้ขึ้นมา ถ้าหากผู้จัดทำกระทำการใดๆ โดยลำพังแล้วอาจจะต้องใช้เวลาในการศึกษาค้นคว้า เพื่อหาข้อมูลเป็นระยะเวลานาน แต่เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่านจึงทำให้ปัญหาต่างๆที่ประสบ สำเร็จลุล่วงไปได้มาก ถึงแม้จะไม่สามารถแก้ปัญหาเหล่านั้นได้หมดก็ตาม แต่ก็สามารถทำให้มีวิธี หรือแนวความคิดในการดำเนินโครงการให้ก้าวหน้าไปได้ตั้งนั้นแล้ว

ผู้จัดทำโครงการจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความร่วมมือให้คำปรึกษาตลอดจนความคิดเห็น หรือแม้กระทั่งข้อมูลเล็กๆน้อยๆ ที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินโครงการ ไม่ว่าจะเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รุ่นพี่ เพื่อนๆ ตลอดจนท่านที่แต่งตำราหนังสือทุกท่าน ที่ผู้จัดทำโครงการได้นำข้อมูลที่ท่านได้เรียบเรียงมา เพื่อให้ความรู้กับผู้อ่านมาอ้างอิงในโครงการนี้ รวมทั้งพ่อแม่พี่น้องที่เป็นกำลังใจ และช่วยเหลือหลายๆด้าน

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำโครงการ ขอกล่าวคำขอบคุณอย่างยิ่งที่ได้รับความช่วยเหลือจากทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ฉัตรชัย	ทันโศศักดิ์
ฉัตรชัย	ผลจันทร์
ปฏิพล	วงศ์สน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	iii
กิตติกรรมประกาศ.....	iv
สารบัญ.....	v
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 หลักการของวงจรกำเนิดความถี่คงที่.....	3
2.1 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิง (Voltage reference).....	3
2.1.1 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้ VBE (VBE – based voltage reference)	3
2.1.2 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้ VTH (Thermal voltage based voltage reference).....	4
2.1.3 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป	5
2.1.4 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโค้ด....	6
2.2 วงจรขยายเชิงปฏิบัติการ (Operational amplifier)	7
2.2.1 ออปแอมป์หนึ่งภาค (Single stage OpAmp)	7
2.2.2 ออปแอมป์สองภาค (Two stage Op Amp)	8
2.3 ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator)	8
2.3.1 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคริสตัล (Crystal oscillator)	9
2.3.2 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน (Ring oscillator)	10
2.4 การชดเชยอุณหภูมิ และกระบวนการผลิต (Temperature/Process Compensation)..	12
2.5 โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (LTSPICE IV)	14
บทที่ 3 การออกแบบวงจรซีมอสริงออสซิลเลเตอร์ที่มีเสถียรภาพสูง	18
3.1 การออกแบบวงจรซีมอสริงออสซิลเลเตอร์ที่มีเสถียรภาพสูง.....	18
3.1.1 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป.....	18
3.1.2 วงจรชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ.....	19
3.1.3 ออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน	20

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการ SIMULATION ด้วยโปรแกรม LTSPICE ของวงจร	21
4.1 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจร Ring Oscillator ที่ V_{CTRL} กับ Temperature ค่า ต่างๆ	21
4.2 ผลการสร้างวงจรแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป	25
4.3 ผลลัพธ์การทดลองวงจรออปแอมป์.....	35
4.4 ผลลัพธ์การทดลองวงจรชดเชยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิจากการ สร้างเลย์เอาต์ (Layout)	36
4.5 การออกแบบเลย์เอาต์ (Layout) ของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน	38
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง อุปสรรค ปัญหา และข้อเสนอแนะ	39
5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	39
5.2 อุปสรรคและปัญหา.....	40
5.3 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1.1 ผลระหว่างการไม่ชดเชยและชดเชยผลของกระบวนการและอุณหภูมิ	22
4.1.2 การตอบสนองความถี่เมื่อมีการชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิ	23
4.1.3 แรงดันควบคุมเมื่อมีการชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิ	24
4.2.1 แรงดันอ้างอิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า และอุณหภูมิที่กระบวนการผลิตแบบ TT	25
4.2.2 แรงดันอ้างอิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า และอุณหภูมิที่กระบวนการผลิตแบบ SS	26
4.2.3 แรงดันอ้างอิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า และอุณหภูมิที่กระบวนการผลิตแบบ FF	27
4.2.4 แรงดันด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้าและอุณหภูมิที่กระบวนการผลิตแบบ TT ...	29
4.2.5 แรงดันด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้าและอุณหภูมิที่กระบวนการผลิตแบบ SS....	30
4.2.6 แรงดันด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้าและอุณหภูมิที่กระบวนการผลิตแบบ FF....	31
4.2.7 แรงดันด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า และอุณหภูมิ ที่กระบวนการผลิตแบบ FF เมื่อเทียบกับโหลดความต้านทานอุณหภูมิ 25 °C	32
4.2.8 แรงดันด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า และอุณหภูมิ ที่กระบวนการผลิตแบบ SS เมื่อเทียบกับโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C	33
4.2.9 แรงดันด้านออกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า และอุณหภูมิ ที่กระบวนการผลิตแบบ TT เมื่อเทียบกับโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C.....	34

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพวงจรกำเนิดความถี่คงที่	2
2.1 แหล่งแรงดันอ้างอิงโดยใช้ VBE	4
2.2 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้แรงดันอุณหภูมิ (Thermal voltage)	5
2.3 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป	5
2.4 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคด	6
2.5 ออปแอมป์หนึ่งภาค	7
2.6 ออปแอมป์สองภาคเอาต์พุตเดี่ยว	8
2.7 ก) สัญลักษณ์	9
2.7 ข) วงจรเสมือนของ PZ	9
2.8 ค่ารีแอคแตนซ์	9
2.9 วงจรคริสตัลอสซิลเลเตอร์	10
2.10 โครงสร้างของวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน	10
2.11 การต่อวงจรแบบวงแหวนที่ใช้วงจรขยายสองภาค	11
2.12 วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่ใช้วงจรขยายซอร์สร่วมห้วงจรต่ออนุกรม	12
2.13 วงจรสร้างแรงดัน V_{CTRL} สำหรับชดเชยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ	13
2.14 ตัวอย่างโปรแกรม LTSPICE IV	14
2.15 ขั้นตอนที่ 1	14
2.16 แถบเครื่องมือพื้นฐานของ LTSPICE IV	15
2.17 ขั้นตอนที่ 2	15
2.18 ขั้นตอนที่ 3	15
2.19 ขั้นตอนที่ 4	16
2.20 ขั้นตอนที่ 5	16
2.21 ขั้นตอนที่ 6	16
2.22 ขั้นตอนที่ 7	17
2.23 ขั้นตอนที่ 8	17
4.1 วงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่มี Current – Starved	21
4.2 กราฟผลระหว่างการผลิตและชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ	22
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency กับ Temperature ที่ process ต่างๆ หลังจากชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิแล้ว	23
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{ctrl} กับ Temperature ที่ process ต่างๆ หลังจากชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิแล้ว	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคดที่ใช้ทดลอง	25
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดัน ด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ TT	26
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดัน ด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ SS	27
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดัน ด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ FF	28
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดัน ด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ TT	28
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดัน ด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ SS.....	29
4.11 วงจรสร้างแรงดัน V_{out}	30
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดัน ด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ FF	31
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ FF เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C.....	32
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ SS เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C.....	33
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านออกกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันด้านเข้า 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ TT เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C	34
4.16 กราฟแสดงส่วนเผื่อเฟส และอัตราขยายเดซิเบล ของออปแอมป์	35
4.17 วงจรออปแอมป์สองภาคเอาต์พุตเดี่ยว ต่อแบบ AC Analysis เพื่อหาส่วนเผื่อเฟส.....	35
4.18 กราฟแสดงผลพีธีการทดลองวงจรชดเชยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิจากการสร้าง เลย์เอาต์ (Layout) ด้วยโปรแกรม LT SPICE IV	36
4.19 กราฟแสดงผลพีธีการทดลองวงจรชดเชยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิจากการสร้าง เลย์เอาต์ (Layout) ด้วยโปรแกรม Electric VLSI.....	37
4.20 เลย์เอาต์ (Layout) วงจรชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ	37
4.21 เลย์เอาต์วงจรจริงออสซิลเลเตอร์ 5 ภาค.....	38

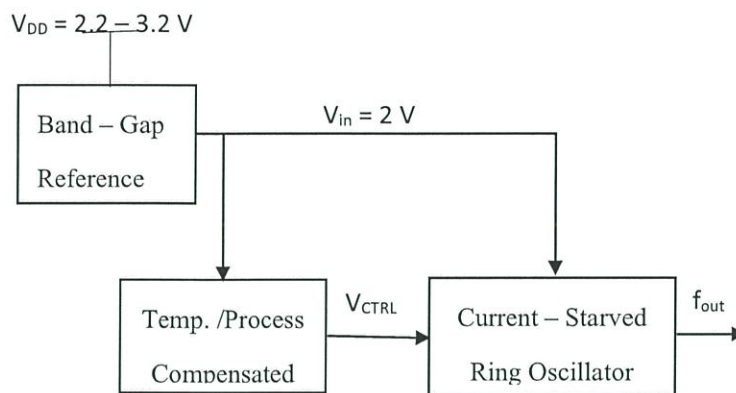
บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความต้องการให้วงจรโดยรวมมีขนาดเล็กลง แต่มีฟังก์ชันการใช้งานมากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อการพัฒนาเทคโนโลยีที่ก้าวหน้า เช่น โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แบบพกพา เป็นต้น แนวทางในการลดขนาดวงจรโดยรวมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือใช้เทคโนโลยีซีมอส (CMOS) สำหรับการออกแบบวงจรรวมที่มีขนาดเล็ก และลดอุปกรณ์ภายนอกชิป (Chip) กล่าวคือ ออกแบบวงจรทั้งหมดให้อยู่ภายในชิปเดียว อย่างไรก็ตาม การสร้างอุปกรณ์ให้อยู่ภายในชิปเดียวยังมีข้อจำกัด เนื่องจากอุปกรณ์บางอย่างสร้างลงในวงจรรวมร่วมกันได้ยาก หรือไม่สามารสร้างรวมในชิปเดียวด้วยเทคโนโลยีซีมอสได้ เช่น อุปกรณ์ที่ต้องใช้กำลังงานสูงจำพวกทรานซิสเตอร์กำลัง และอุปกรณ์ที่ต้องการความแม่นยำมากจำพวก ตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาหรือกำเนิดความถี่ที่ใช้คริสตอล-ออสซิลเลเตอร์ (Crystal-oscillator) ดังนั้นถ้าสามารถสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวได้ภายในชิปเดียวจะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เล็กลงมาก จะเห็นได้ว่าวงจรกำเนิดความถี่ที่ใช้คริสตอล-ออสซิลเลเตอร์จะมีขนาดใหญ่กว่าอุปกรณ์อื่นๆ อีกทั้งการนำไปใช้งานอาจต้องต่อตัวเก็บประจุเพิ่มและมีวงจรเฟสล็อกลูป (Phase-locked-loop) เพื่อควบคุมความถี่ให้สูงขึ้นด้วย ดังนั้นการสร้างวงจรกำเนิดความถี่บนวงจรรวมแทนการใช้คริสตอล-ออสซิลเลเตอร์จากภายนอก จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดขนาดโดยรวมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คริสตอล-ออสซิลเลเตอร์มีความสำคัญในด้านการสร้างความถี่ หรือสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งในวงจรแอนะล็อกและวงจรดิจิทัล เช่น ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดความถี่อ้างอิงของภาครับ-ส่งเพื่อสร้างเป็นความถี่พาหะต่อไป และเป็นตัวกำเนิดสัญญาณนาฬิกาสำหรับวงจรดิจิทัลในการโอนถ่ายข้อมูลผ่านสายหรือเชื่อมต่อระหว่างวงจรดิจิทัลอื่นๆ ร่วมกัน เป็นต้นโดยทั่วไปคริสตอล-ออสซิลเลเตอร์ถูกใช้สำหรับกำเนิดความถี่อ้างอิงที่มีเสถียรภาพสูง โดยมีความแม่นยำน้อยกว่า 100 ppm/°C ในบางการประยุกต์การใช้งาน เช่น ในภาครับ-ส่ง สำหรับระบบโครงข่ายไร้สาย (Wireless sensor net หรือ WSN), ในไมโครคอนโทรลเลอร์ และการเชื่อมต่อแบบใช้สาย มีความต้องการความแม่นยำทางความถี่ที่ไม่สูงมากนักประมาณระดับเปอร์เซ็นต์ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่สามารถสร้างวงจรกำเนิดความถี่ภายในชิปเดียว นอกจากลดขนาดวงจรลงได้แล้ว ยังสามารถลดต้นทุนการผลิตและการสูญเสียกำลังงานได้อีกด้วย

แม้ว่าในการประยุกต์การใช้งานดังกล่าวต้องการความแม่นยำของความถี่ไม่สูงมากนักแต่ในการออกแบบวงจรโดยใช้เทคโนโลยีซีมอสมีข้อจำกัด คือวงจรที่ออกแบบมีพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต, อุณหภูมิ, แรงดันไฟเลี้ยง และอายุการใช้งาน ทำให้การพิจารณาในส่วนนี้มีความท้าทายอยู่มากสำหรับการชดเชยให้วงจรสามารถทำงานได้ในทุกๆ เงื่อนไข



รูปที่ 1.1 แผนภาพวงจรกำเนิดความถี่

รูปที่ 1.1 เป็นขั้นตอนการออกแบบวงจรกำเนิดความถี่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยาก และซับซ้อนเกินไป แต่ต้องอาศัยความเข้าใจในเรื่องของทฤษฎีในการสร้าง ดังนั้นเราจึงกล่าวได้ว่าวงจรถูกกำเนิดความถี่ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาสามารถนำไปใช้งานได้จริงแน่นอน ตรงตามเป้าหมายที่เรา กำหนดขึ้นอย่างชัดเจน

บทที่ 2

หลักการของวงจรถ้าเนิตความถี่คงที่

วงจรถ้าเนิตความถี่คงที่ เป็นวงจรถ้าเนิตที่ใช้สร้างความถี่คงที่ตามที่เราต้องการ โดยประกอบด้วย ภาคการทำงานหลาย ๆ ภาคส่วนด้วยกันดังนี้

2.1 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิง (Voltage reference)

แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงเป็นวงจรถ้าเนิตที่สำคัญอีกวงจรถ้าเนิตหนึ่งโดยมักถูกใช้ไบแอส MOSFET และ อุปกรณ์อื่นๆ คุณสมบัติที่สำคัญของแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงคือ แรงดันอ้างอิง (V_{REF}) ควรมีค่าคงที่ โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไฟเลี้ยง V_{DD} และอุณหภูมิรอบข้าง

2.1.1 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้ V_{BE} (V_{BE} – based voltage reference)

เราสามารถสร้างแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิง (V_{REF}) โดยใช้ความต่างศักย์ระหว่างขาเบสและขาอีมีตเตอร์ (V_{BE}) ดังรูปที่ 2.1 จากรูปวงจรถ้าเนิตประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสอ้างอิงที่ใช้ V_{BE} แรงดันอ้างอิง V_{REF} ได้จากการสะท้อนกระแสไปยัง M_5 ทำให้เกิดกระแส I_{D5} ซึ่งไหลผ่านตัวต้านทาน kR จากรูปเนื่องจาก I_{D5} มีค่าเท่ากับ

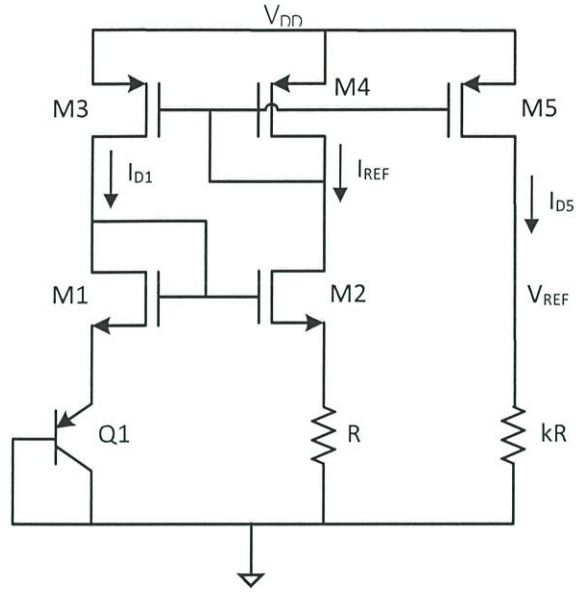
$$I_{D5} = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} I_{REF} = \frac{(W/L)_5 V_{BE}}{(W/L)_4 R} \quad (2.1.1)$$

ดังนั้นแรงดันอ้างอิงมีค่าเป็น

$$V_{REF} = kR I_{D5} = k \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} V_{BE} \quad (2.1.2)$$

จากสมการที่ (2.1.2) แรงดันอ้างอิง V_{REF} มีค่าขึ้นกับ V_{BE} , อัตราส่วนระหว่าง M_5 และ M_4 และ อัตราส่วนระหว่างค่าตัวต้านทานที่ขาเดรนของ M_5 และที่ขาซอร์สของ M_2 อย่างไรก็ตามเนื่องจาก V_{BE} มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิแบบลบเช่นเดียวกันโดยมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial V_{REF}}{\partial T} = \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} = -1.5 \frac{mV}{K} \quad (2.1.3)$$



รูปที่ 2.1 แหล่งแรงดันอ้างอิงโดยใช้ V_{BE}

2.1.2 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้ V_{TH} (Thermal voltage based voltage reference)

เราสามารถสร้างแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงให้มีค่าขึ้นกับแรงดันอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 2.2 จากรูปวงจรรออาศัยแหล่งกำเนิดกระแสอ้างอิง (I_{REF}) ที่ขึ้นกับแรงดันอุณหภูมิ กระแส I_{REF} ที่ถูกสร้างถูกสะท้อนไปที่ M_5 ทำให้เกิดกระแส I_{D5} มีค่าเท่ากับ

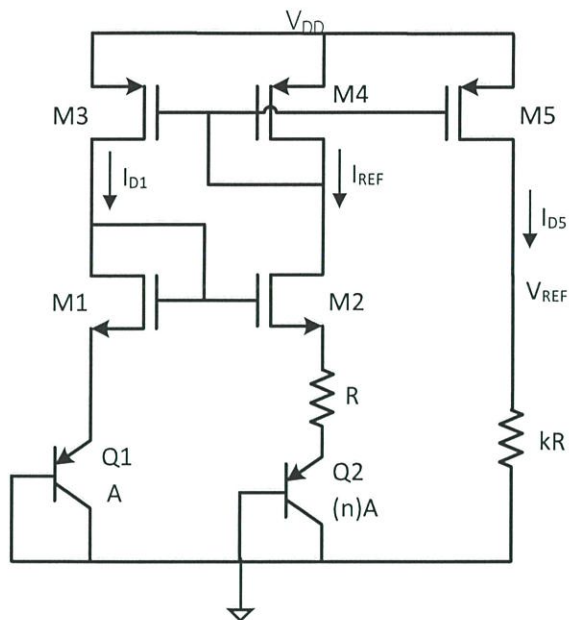
$$I_{D5} = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} I_{REF} = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} \frac{V_T \ln(n)}{R} \quad (2.1.4)$$

กระแส I_{D5} ไหลผ่านตัวต้านทาน kR ทำให้เกิดแรงดันอ้างอิงมีค่าเป็น

$$V_{REF} = kR I_{D5} = k \ln(n) \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} V_{TH} \quad (2.1.5)$$

จากสมการที่ (2.1.5) V_{REF} มีค่าขึ้นอยู่กั V_{TH} , อัตราส่วนระหว่างขนาดของ M_5 และ M_4 อัตราส่วนระหว่าง Q_2 และ Q_1 (หรือ n) และอัตราส่วนระหว่างความต้านทาน (หรือ k) เนื่องจาก V_{TH} มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงบวก ดังนั้นแรงดันอ้างอิง V_{REF} ในสมการที่ (2.1.5) จึงมีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิเป็นบวกเช่นกัน โดยที่ค่าเท่ากับ

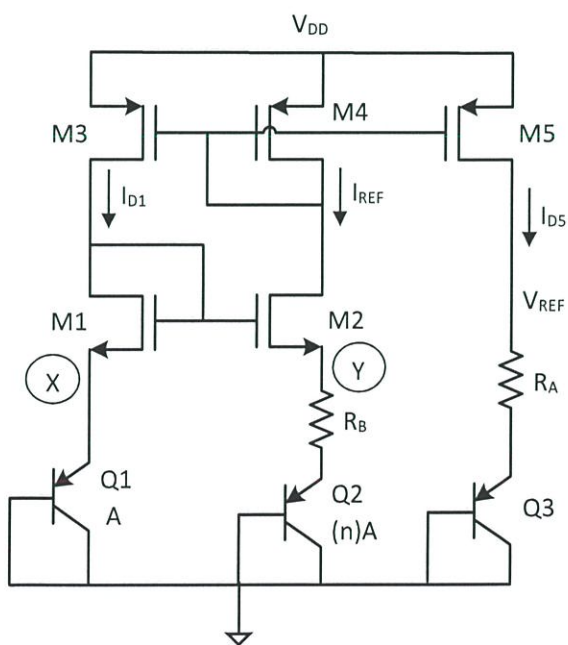
$$\frac{\partial V_{REF}}{\partial T} = \frac{\partial V_{TH}}{\partial T} = 0.087 \frac{mV}{K} \quad (2.1.6)$$



รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้แรงดันอุณหภูมิ (Thermal voltage)

2.1.3 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป

แม้ว่าแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้จะสร้างแรงดันอ้างอิง V_{REF} ที่ไม่ขึ้นกับ V_{DD} อย่างไรก็ตามแรงดันอ้างอิง V_{REF} ที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิรอบข้าง เป็นที่ทราบกันว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในวงจรรวมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งวงจรบนชิป และกิจกรรมที่วงจรส่วนนั้นๆ ดำเนินการอยู่ หากแต่ว่าการทำงานของแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป (Bandgap reference) โดยแรงดันอ้างอิงที่ได้ไม่ขึ้นกับ V_{DD} และ ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ



รูปที่ 2.3 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป

จากรูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของวงจรที่ใช้สร้าง V_{REF} จากรูป M_3 และ M_4 ต่อในลักษณะของวงจรสะท้อนกระแสพื้นฐาน และมีความสมพงษ์กัน ดังนั้น $I_{D3} = I_{D4}$ ในทำนองเดียวกัน M_1 และ M_2 ถูกออกแบบให้สมพงษ์เช่นกันส่งผลในแรงดันที่โหนด X มีค่าเท่ากับแรงดันที่โหนด Y นอกจากนี้พื้นที่ของ Q_2 มีขนาดใหญ่เป็น n เท่าของ Q_1 ดังนั้นเราสามารถหากระแสไหลผ่าน R_B มีค่าเท่ากับ

$$I_{RB} = \frac{\ln(n)}{R_B} V_{TH} \quad (2.1.7)$$

กระแส I_{RB} ดังกล่าวถูกสะท้อนไปที่ M_5 ทำให้ $I_{D5} = I_{RB}$ กระแสดังกล่าวจะไหลผ่าน R_A และ Q_3 ทำให้เกิดแรงดันอ้างอิง V_{REF} มีค่าเท่ากับ

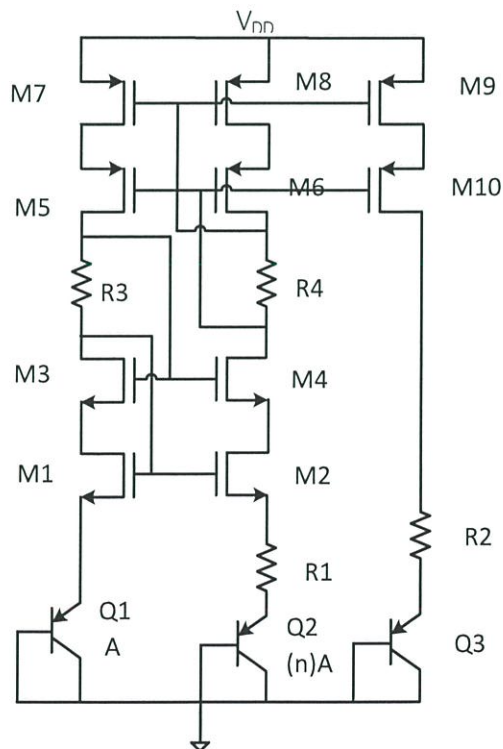
$$V_{REF} = \frac{\ln(n)V_{TH}}{R_B} R_A + V_{BE3} \quad (2.1.8)$$

$$V_{BE} = V_{TH} \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) \quad (2.1.9)$$

ดังนั้นเพื่อให้สัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของ V_{REF} มีค่าเท่ากับศูนย์ เราต้องออกแบบให้

$$\frac{R_A}{R_B} \ln(n) = 17.24 \quad (2.1.10)$$

2.1.4 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคด



รูปที่ 2.4 แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคด

วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคดช่วยลดปัญหาแรงดัน V_{REF} ที่มีค่าขึ้นกับ V_{DD} ที่เป็นผลมาจากการมอดูเลตความยาวของช่องนำกระแสของ MOSFET โดยแรงดันอ้างอิง V_{BG} หาได้จากสมการ

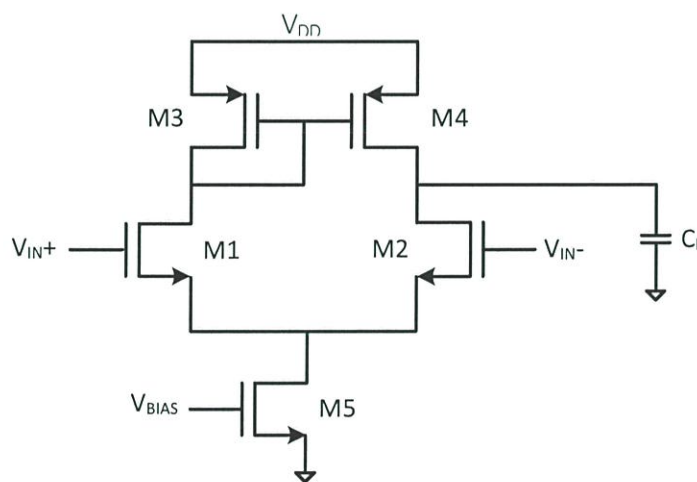
$$V_{BG} = V_{BE3} + I_{PTAT}R_2 = V_{BE3} + \frac{V_T R_2}{R_1} \ln(n) \quad (2.1.11)$$

2.2 วงจรขยายเชิงปฏิบัติการ (Operational amplifier)

วงจขยายเชิงปฏิบัติการ หรือ ออปแอมป์ (Op Amp) เป็นวงจรที่ได้รับความนิยมมากที่สุดวงจรหนึ่ง สาเหตุที่ออปแอมป์ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเพราะว่าออปแอมป์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้งานเป็นวงจขยายสัญญาณ วงจรบวกลบสัญญาณ วงจรดิฟเฟอเรนเชียล วงจรกรองความถี่ เป็นต้น

2.2.1 ออปแอมป์หนึ่งภาค (Single stage OpAmp)

ออปแอมป์หนึ่งภาค หรือออปแอมป์ที่สร้างจากวงจขยายภาคเดียว ออปแอมป์ชนิดชนิดนี้มีอัตราขยายไม่สูงมากนัก รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างออปแอมป์ที่สร้างจากวงจขยายผลต่าง ออปแอมป์ประกอบด้วย $M_1 - M_2$ ซึ่งเป็นคู่ทรานซิสเตอร์ (Differential pair) ที่มีความสมพงษ์กัน และ $M_3 - M_4$ ทำหน้าที่เป็นวงจรสะท้อนกระแสที่มีความสมพงษ์เช่นกัน M_5 ทำหน้าที่กำเนิดกระแสไบแอสให้กับวงจร



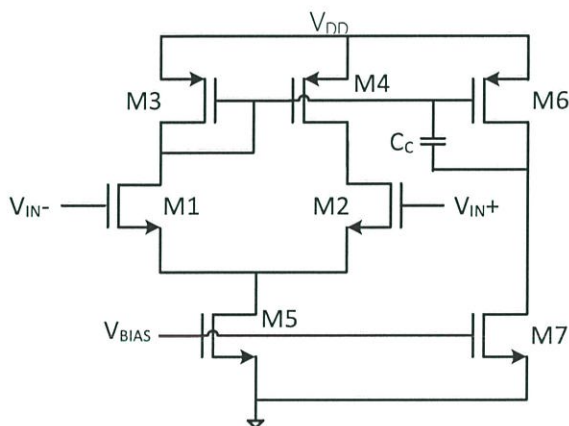
รูปที่ 2.5 ออปแอมป์หนึ่งภาค

อัตราขยายแรงดัน (A_V) ของออปแอมป์สามารถหาได้จาก $A_V = -G_{ms}R_{out}$ โดยที่ G_m คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของออปแอมป์ และ R_{out} คือความต้านทานเสมือนทางด้านเอาต์พุตของออปแอมป์ ซึ่งอัตราขยายของออปแอมป์มีค่าเท่ากับ

$$A_V = -G_{ms}R_{out} \quad (2.2.1)$$

2.2.2 ออปแอมป์สองภาค (Two stage Op Amp)

ออปแอมป์สองภาคจะมีอัตราขยายแรงดันที่มากกว่าออปแอมป์หนึ่งภาค และมีช่วงที่สวิงสัญญาณเอาต์พุตที่กว้างกว่าของออปแอมป์หนึ่งภาค อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องของออปแอมป์สองภาคคือ กำลังงานสูญเสียที่มากกว่า และปัญหาของความไม่เสถียรภาพ เราสามารถสร้างออปแอมป์สองภาคเอาต์พุตเดี่ยว (Single ended output) ได้ดังรูปที่ 2.6 จากรูปตัวเก็บประจุ C_c ในรูปที่ 2.6 ทำหน้าที่ชดเชยความถี่ (Frequency compensation) เพื่อให้ออปแอมป์ทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพเมื่อมีการป้อนกลับ



รูปที่ 2.6 ออปแอมป์สองภาคเอาต์พุตเดี่ยว

ค่าความนำ (g_m) ของออปแอมป์สองภาคเอาต์พุตเดี่ยวมีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{2\mu_{n,p}Cox \frac{w}{L} Id} \quad (2.2.2)$$

อัตราขยายของออปแอมป์ภาคที่ 1 เท่ากับ

$$A_{v1} = \frac{-g_m}{gds_2 - gds_4} = \frac{-2g_m}{I_5(\lambda_2 + \lambda_4)} \quad (2.2.3)$$

อัตราขยายของออปแอมป์ภาคที่ 2 เท่ากับ

$$A_{v2} = \frac{-g_m}{gds_6 - gds_7} = \frac{-g_m6}{I_6(\lambda_6 + \lambda_7)} \quad (2.2.4)$$

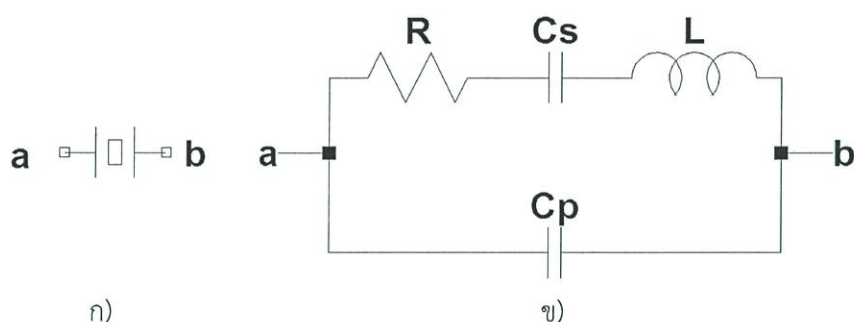
2.3 ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator)

วงจรออสซิลเลเตอร์เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีความสำคัญโดยถูกนำไปใช้งานในระบบประมวลผลสัญญาณทั้งแบบดิจิทัล และแบบแอนะล็อก วงจรออสซิลเลเตอร์ที่มีคุณภาพสูงเป็นสิ่งจำเป็นสิ่งจำเป็นในปัจจุบัน

2.3.1 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคริสตัล (Crystal oscillator)

วัสดุคริสตัลเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric crystal, PZ) เป็นวัสดุพิเศษที่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) กล่าวคือเมื่อเราป้อนพลังงานกลให้กับ PZ (เช่น โดยการสั่น) PZ จะให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าออกมา ในทางกลับกันถ้าเราป้อนพลังงานไฟฟ้า (เช่น ป้อนแรงดันไฟฟ้า) ให้กับ PZ เราจะพบว่า PZ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และท้ายที่สุดจะให้พลังงานกลออกมา (เช่น รูปแบบของการสั่น) แรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก PZ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ทำ PZ และรูปร่างผลึกของ PZ โดยปกติแล้ว ควอตซ์ (Quartz) มักถูกใช้สร้าง PZ

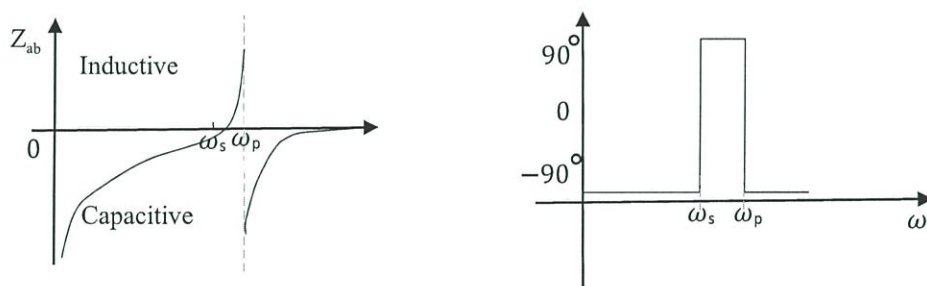
PZ เป็นวัสดุที่มีการกำทอน (Resonance behavior) ที่มีเสถียรภาพมาก นอกจากนั้นตัวประกอบคุณภาพของ PZ มีค่าสูงมาก ทำให้ PZ ถูกนำมาใช้งานเพื่อสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณที่มีความแม่นยำสูง รูปที่ 7 ก) และ ข) แสดงสัญลักษณ์ และวงจรเสมือนทางไฟฟ้าของ PZ



รูปที่ 2.7 ก) สัญลักษณ์ และ ข) วงจรเสมือนของ PZ

เราสามารถหาอิมพีแดนซ์ของ PZ ในรูปที่ 8 ก) ได้เท่ากับ

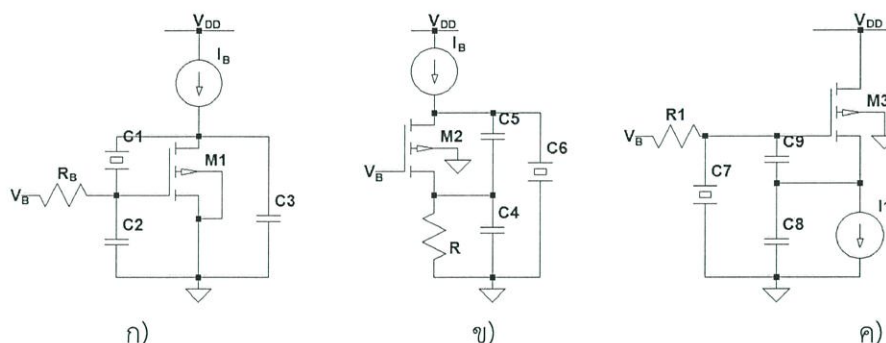
$$Z_{ab} = \frac{1}{sC_p} \frac{s^2 + \frac{sR}{L} + \frac{1}{LC_s}}{s^2 + \frac{sR}{L} + \frac{1}{LC_T}} \quad (2.2.5)$$



รูปที่ 2.8 คาร์เรแอกแตนซ์

จากรูปที่ 2.8 วัสดุ PZ จะแสดงตัวเหมือนเป็นตัวเก็บประจุถ้า $\omega < \omega_s$ และ $\omega > \omega_p$ อย่างไรก็ตามในช่วงความถี่ระหว่าง ω_s และ ω_p วัสดุ PZ จะแสดงตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำที่ใกล้เคียงอุดมคติมาก ดังนั้นหากเรานำ PZ ไปใช้งานแทนตัวเหนี่ยวนำเพื่อสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณ เราจะได้

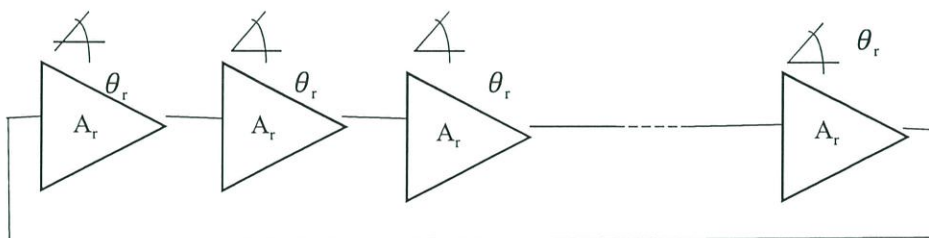
วงจรออสซิลเลเตอร์แบบคริสตัลดังรูปที่ 2.9 รูปที่ 2.9 ก) ข) และ ค) แสดง วงจรคริสตัล ออสซิลเลเตอร์แบบเพียซ แบบโคลพตส์ และ แบบชานโตส



รูปที่ 2.9 วงจรคริสตัลอสซิลเลเตอร์

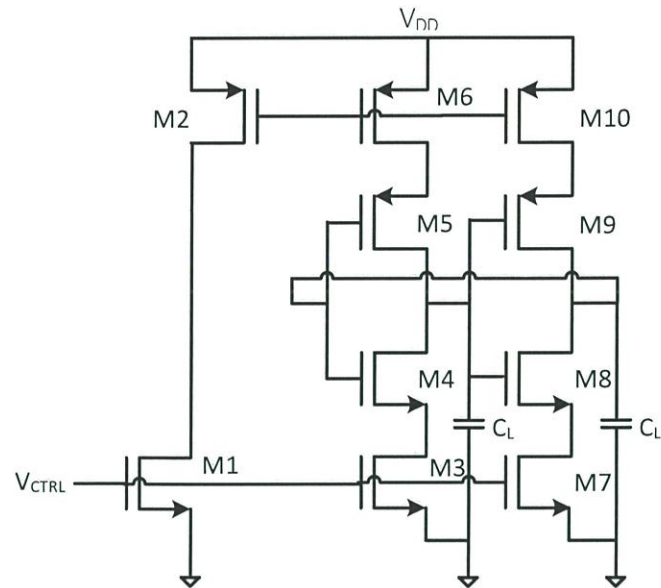
2.3.2 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน (Ring oscillator)

วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนเป็นวงจรออสซิลเลเตอร์อีกชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความนิยม รูปที่ 2.10 แสดงวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนซึ่งประกอบด้วยวงจรขยายที่มี อัตราขยายเท่ากับ A_r ต่ออนุกรมกันเป็นวงแหวน โดยที่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายภาคสุดท้าย ถูกป้อนกลับมายังอินพุตของวงจรขยายภาคแรก โดย N จะต้องเป็นเลขคี่ตั้งแต่ 3 ขึ้นไป ($N = 3, 4, 5, \dots$) จึงจะทำงานเป็นออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน

ในรูปที่ 2.11 แสดงวงจรที่ประกอบด้วยวงจรขยาย CS สองวงจร ($N = 2$) ต่ออนุกรมกันเป็น วงแหวนในกรณีนี้เฟสที่เลื่อนไปของสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตที่ความถี่ต่ำ (เช่นสัญญาณไฟตรง) มี ค่าเท่ากับ $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$ นอกจากนี้ เนื่องจากวงจรขยายชอนส์รวมแต่ละชุดมีโพลหลัก เพียงโพลเดียว ดังนั้นเฟสที่เลื่อนไประหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่สูงจึงมีค่า เท่ากับ $360^\circ - 90^\circ - 90^\circ = 180^\circ$ ลักษณะเช่นนี้ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่าวงจรทำงานเป็นออสซิลเลเตอร์ แบบวงแหวนได้ในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณมีค่าเท่าศูนย์



รูปที่ 2.11 การต่อวงจรแบบวงแหวนที่ใช้วงจรขยายสองภาค

ในรูปที่ 2.12 แสดงวงจรที่ประกอบด้วยวงจขยาย CS จำนวนห้าวงจ (N = 5) ต่ออนุกรมกัน เฟสที่เลื่อนไประหว่างสัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาต์พุต ณ ที่ความถี่ต่ำ (สัญญาณไฟตรง) ที่ค่าเท่ากับ $180^\circ \times 5 = 900^\circ$ นอกจากนี้วงจขยายซอร์สร่วมมีโพลหลักหนึ่งโพล ดังนั้นเฟสที่เลื่อนไประหว่างสัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่สูงจึงมีค่าเท่ากับ $900^\circ - 5(90^\circ) = 450^\circ$ เมื่อเราพิจารณาเงื่อนไขทางเฟส ณ ที่ ω_{OSC} เฟสที่เลื่อนไปจะมีค่าเท่ากับ 360° ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขทางเฟสของ Barkhausen ซึ่งวงจนี้จะทำงานเป็นออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนได้

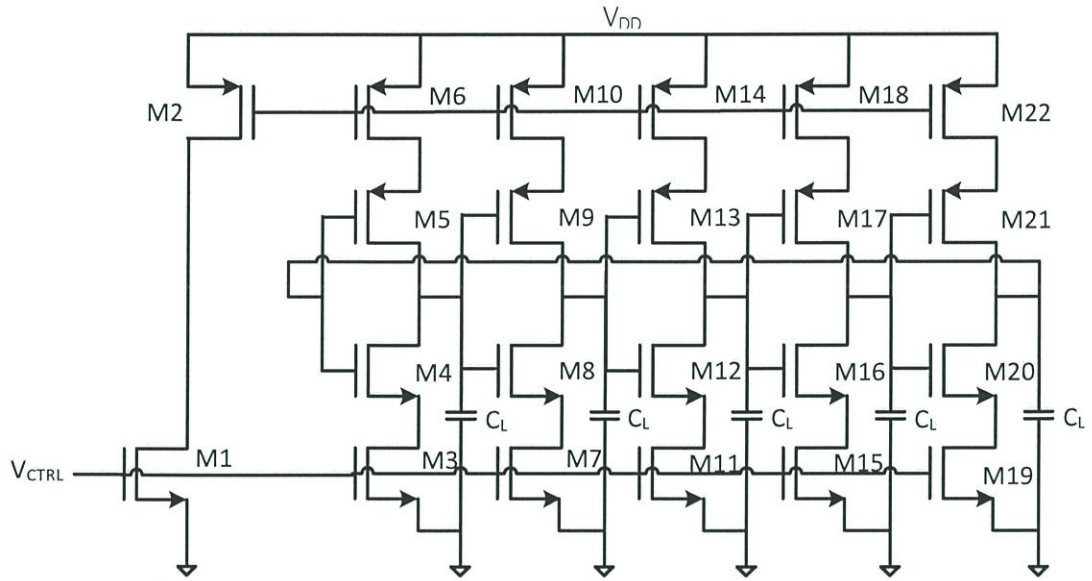
การคำนวณหาค่าต่างๆ ของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่ใช้วงจขยายซอร์สร่วมห้าวงจต่ออนุกรมหามีดังนี้

การหาคาบเวลารวมของวงจรมีค่าเท่ากับ

$$T = 2NT_D \quad (2.3.1)$$

โดยที่

$$T_D = \frac{t_{PHL} + t_{PLH}}{2} \quad (2.3.2)$$



รูปที่ 2.12 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่ใช้วงจรขยายขั้วร่วมหัววงจรต่ออนุกรม

ซึ่ง

$$t_{PLH} = \frac{CV_{DD}}{I_{DP}} \quad (2.3.3)$$

$$t_{PHL} = \frac{CV_{DD}}{I_{DN}} \quad (2.3.4)$$

$$T = 2Nt_d \quad (2.3.5)$$

$$t_d = \frac{t_{PLH} + t_{PHL}}{2} \quad (2.3.6)$$

$$I_{DLinear} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}] \quad \text{สมมติ } I_{DP} = I_{DN} = I_D \quad (2.3.7)$$

$$t_d = \frac{2CV_{DD}}{I_D} \quad (2.3.8)$$

$$T = \frac{2NCV_{DD}}{I_D} \quad (2.3.9)$$

$$f = \frac{I_D}{2NCV_{DD}} \quad (2.3.10)$$

2.4 การชดเชยอุณหภูมิ และกระบวนการผลิต (Temperature / Process Compensation)

ความถี่ของออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกระบวนการผลิต เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ K_N , V_T และ C_L เพื่อชดเชยผลของเงื่อนไชดังกล่าว ต้องทำการปรับค่าแรงดันไบอัส

ควบคุม V_{CTRL} ให้เปลี่ยนแปลงตามสถานะพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไป เพื่อให้ความถี่ออสซิลเลเตอร์คงที่

กระบวนการผลิตของวงจรแบบซ้ำ ปกติและเร็วตามลำดับ ทำให้ความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนแปลง จึงต้องทำการชดเชยกระบวนการผลิต ทำได้โดยการต่อมอสเฟต M5 เป็นเสมือนความต้านทาน แต่เปลี่ยนแปลงตามกระบวนการผลิต หากกระบวนการผลิตเปลี่ยนแปลง M5 ก็จะเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ทำให้แรงดันควบคุมชดเชยผลของกระบวนการผลิตได้

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -40 ถึง 80 องศาเซลเซียส ทำให้การนำกระแสของมอสเฟตเปลี่ยนแปลง ผลของอุณหภูมิต่อแหล่งจ่ายกระแสที่ทำงานอยู่ในย่านไทรโอด และซีมอสอินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านอิ่มตัว ทำให้กระแสไม่คงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สามารถชดเชยด้วยการสร้างวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้ V_{TH} (Thermal voltage based voltage reference) มีค่าขึ้นกับแรงดันอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ สามารถหากระแสอ้างอิง (I_{REF}) และกระแสที่สะท้อนมาที่ M5 เท่ากับ

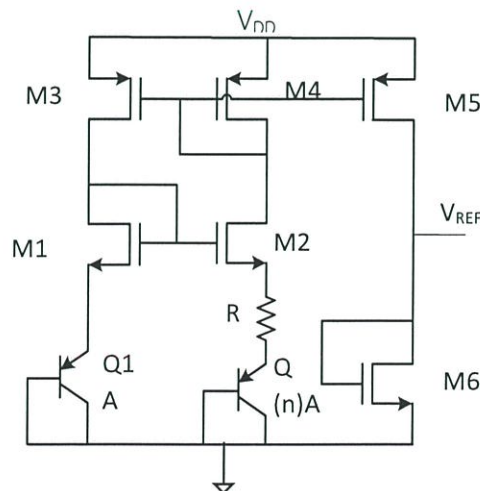
$$I_{D5} = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} I_{REF} = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} \frac{V_{TH} \ln(n)}{R} \quad (2.4.1)$$

กระแส I_{D5} ไหลผ่านมอสเฟตเสมือนความต้านทาน kR ทำให้เกิดแรงดันอ้างอิงมีค่าเป็น

$$V_{REF} = I_{D5}(kR) = k \ln(n) \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} V_{TH} \quad (2.4.2)$$

V_{REF} มีค่าขึ้นอยู่กับ V_{TH} อัตราส่วนระหว่างขนาด M5 และ M4 อัตราส่วนระหว่างขนาด Q_2 และ Q_1 (หรือ n) และอัตราส่วนระหว่างความต้านทาน (หรือ k) เนื่องจาก V_{TH} มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิแบบบวก ดังนั้นแรงดันอ้างอิง V_{REF} ในสมการ (2.4.2) จึงมีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิแบบบวกเช่นกันโดยมีค่าเท่ากับ

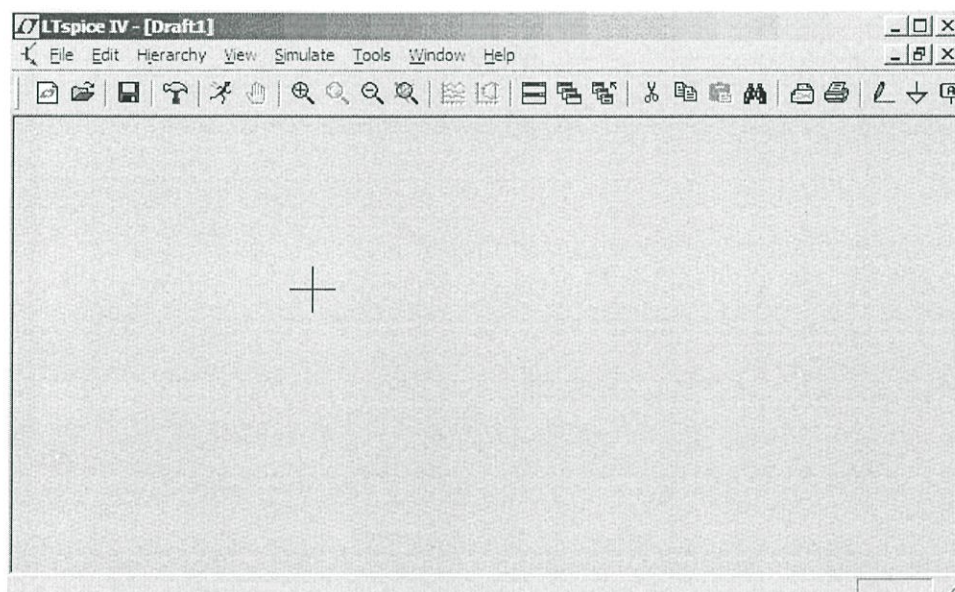
$$\frac{\partial V_{REF}}{\partial T} = \frac{\partial V_{TH}}{\partial T} = 0.087 \text{ mV/K} \quad (2.4.3)$$



รูปที่ 2.13 วงจรสร้างแรงดัน V_{CTRL} สำหรับชดเชยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ

2.5 โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (LTSPICE IV)

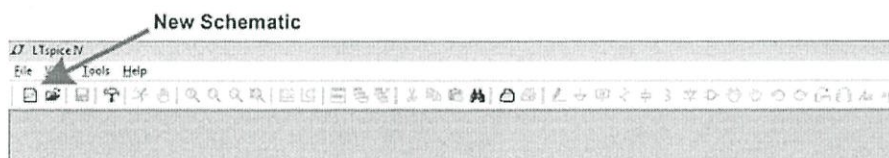
LTSPICE IV เป็นโปรแกรมประเภท SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) ใช้จำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถดาวน์โหลดมาใช้กันฟรีๆ ซึ่งเป็นของ บริษัท ลินีเยร์เทคโนโลยี ซึ่งเป็นหนึ่งในบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ประเภทไอซีออกสู่ท้องตลาดที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นไลบรารีส่วนใหญ่ที่อยู่ในโปรแกรมนี้จะสนับสนุนอุปกรณ์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท ลินีเยร์เทคโนโลยี ะเป็นส่วนใหญ่ แต่ตัวซอฟต์แวร์นี้ยังมีอุปกรณ์พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์มาให้เราครบ สามารถนำมาใช้งานพื้นฐานทั่วไปได้ในการสร้างวงจรง่ายๆ พร้อมทั้งจำลองการทำงานและแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟ สามารถอ่านค่าได้ง่าย เหมาะอย่างยิ่งในการทดลองและวิเคราะห์ห้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างโปรแกรม LTSPICE IV

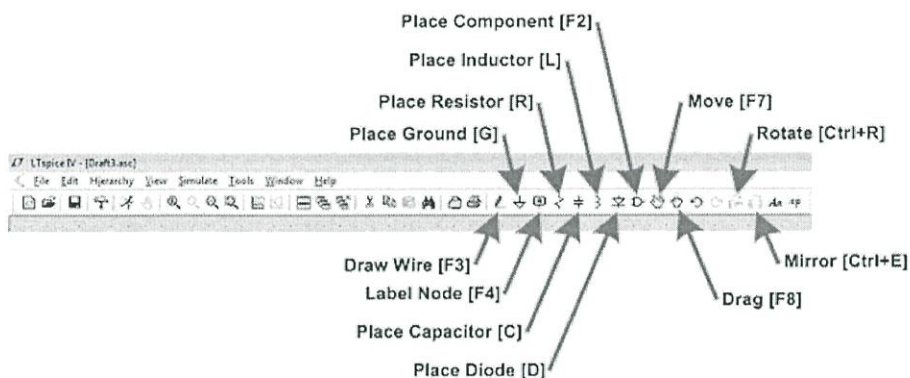
เราสามารถเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม LTSPICE IV ได้ดังนี้

1. คลิกที่ New Schematic เพื่อสร้างพื้นที่สำหรับวาดวงจรใหม่



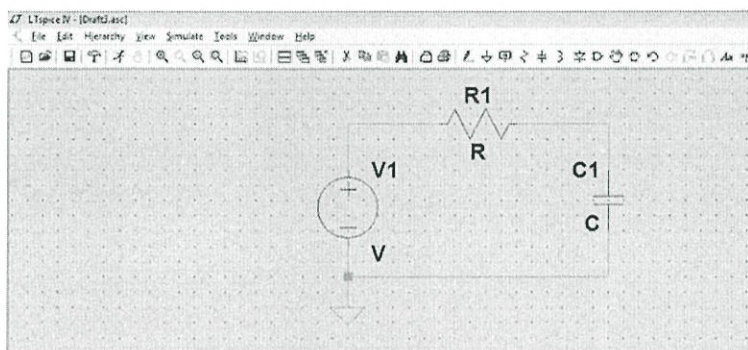
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนที่ 1

โดยที่ตัวโปรแกรมจะมีแถบเครื่องมือพื้นฐานสำหรับวาดวงจรดังนี้



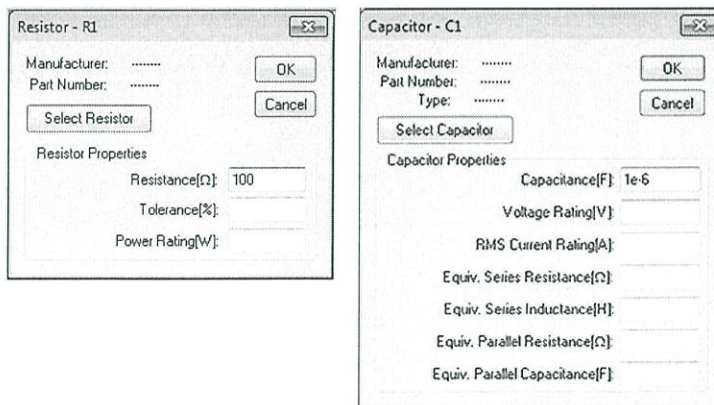
รูปที่ 2.16 แถบเครื่องมือพื้นฐานของLTSPICE IV

2. ทำการวาดวงจรที่ต้องการจำลองการทำงาน



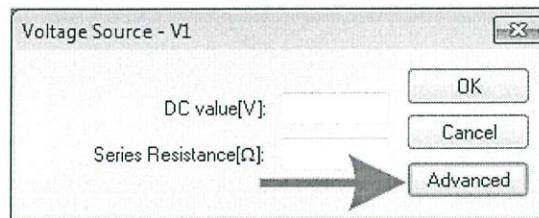
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนที่ 2

3. คลิกขวาที่ตัวอุปกรณ์เพื่อกำหนดค่าของอุปกรณ์ R และ C โดยที่ค่าของตัวเก็บประจุจะกำหนดเป็นเลขยกกำลัง ($1e-6$ มีค่าเท่ากับ 1×10^{-6} หรือมีค่าเท่ากับ 1 ไมโคร)



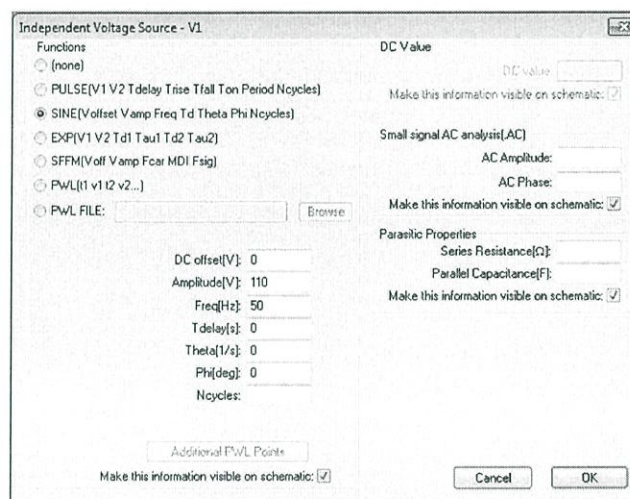
รูปที่ 2.18 ขั้นตอนที่ 3

4. คลิกขวาที่แหล่งจ่ายแรงดัน จากนั้นเลือก Advanced



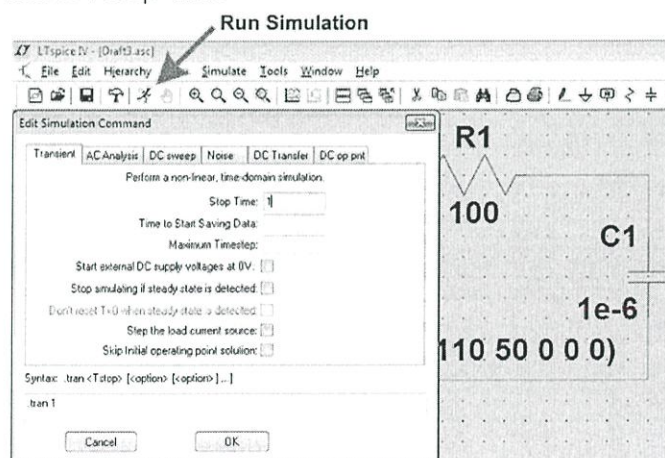
รูปที่ 2.19 ขั้นตอนที่ 4

5. เลือก SINE เพื่อกำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นกำหนดค่าต่างๆของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



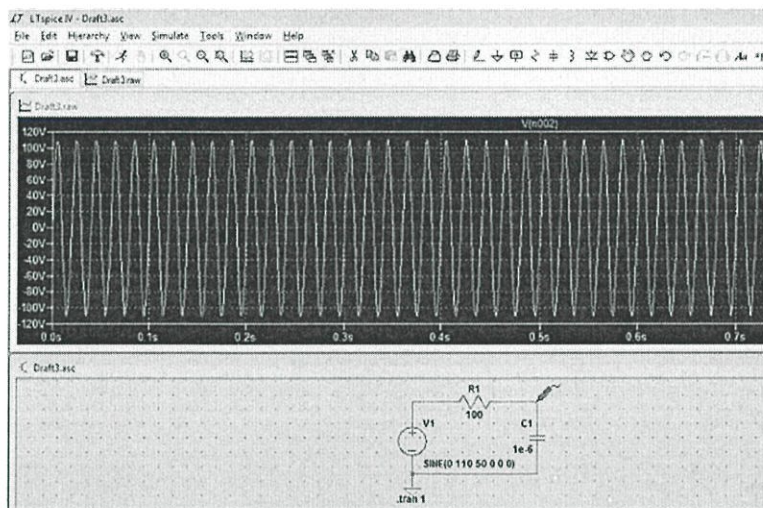
รูปที่ 2.20 ขั้นตอนที่ 5

6. คลิกที่ Run Simulation เพื่อเริ่มการจำลองการทำงาน และกำหนดช่วงเวลาในการจำลองการทำงานในช่อง Stop Time



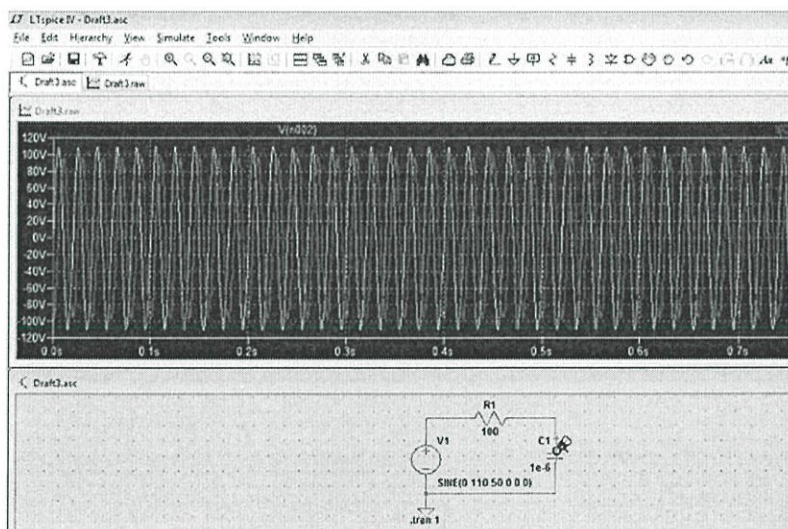
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนที่ 6

7. นำเมาส์ไปคลิกในจุดที่ต้องการจะวัดสัญญาณแรงดันดังรูป จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏรูปคลื่นของแรงดันที่จุดนั้น



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนที่ 7

8. นำเมาส์ไปคลิกอุปกรณ์ที่ต้องการจะวัดสัญญาณกระแสที่ไหลผ่านดังรูป จากนั้นโปรแกรมจะปรากฏรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์นั้น



รูปที่ 2.23 ขั้นตอนที่ 8

บทที่ 3

การออกแบบวงจรซีมอสริงออสซิลเลเตอร์ที่มีเสถียรภาพสูง

วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนมีเสถียรภาพทางความถี่ที่ต่ำกว่าออสซิลเลเตอร์แบบ LC แต่มีการสูญเสียกำลังงานที่น้อยกว่า ด้วยข้อดีนี้เมื่อสามารถพัฒนาวงจรให้มีความสามารถด้านการชดเชยความถี่สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางความถี่ต่ำประสิทธิภาพสูงได้ จะส่งผลให้สามารถนำออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนนี้ไปสร้างบนวงจรรวม สำหรับกำเนิดความถี่ให้กับวงจรที่ต้องการอื่นๆ แทนการใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก ซึ่งเป็นการเพิ่มคุณสมบัติการใช้งานของวงจรรวมเมื่อนำไปต่อใช้งานจริง คือ ใช้อุปกรณ์ภายนอกชิปน้อยลง และประหยัดพลังงานมากขึ้น

ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบซีมอสริงออสซิลเลเตอร์ที่มีเสถียรภาพสูง ด้วยการชดเชยผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ผ่านแรงดันไบอัสควบคุม โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงความคลาดเคลื่อนเนื่องจากกระบวนการผลิตและการสร้างแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงเพื่อให้วงจรมีเสถียรภาพ

3.1 การออกแบบวงจรซีมอสริงออสซิลเลเตอร์ที่มีเสถียรภาพสูง

วงจรซีมอสริงออสซิลเลเตอร์ประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญ คือ

1. วงจรแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง
2. วงจรชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ
3. วงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน

ทั้งสามส่วนนี้จะทำให้ซีมอสริงออสซิลเลเตอร์มีเสถียรภาพสูง

3.1.1 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป

แหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกป (Bandgap reference) แรงดันอ้างอิงที่ได้ไม่ขึ้นกับ V_{DD} และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิรอบข้าง หลักการทำงานของแหล่งกำเนิดแรงดันแบบนี้ อาศัยวงจรที่มีสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิเป็นบวก และวงจรที่มีสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิเป็นลบมาต่อกัน ในลักษณะที่ทำให้เอาต์พุตของวงจรที่เกิดการชดเชยอุณหภูมิพอดีจนมีสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิเป็นศูนย์ ตัวอย่างเทอมที่มีสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิเป็นบวกได้แก่ แรงดันอุณหภูมิ (โดย $\frac{\partial V_{TH}}{\partial T} \cong 0.087 \text{ mV/K}$) และตัวอย่างเทอมที่มีสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิเป็นลบได้แก่ ความต่างศักย์ระหว่างขาเบส และขาอีมีตเตอร์ (เนื่องจาก $\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \cong -1.5 \text{ mV/K}$)

เราสามารถเขียน V_{BE} ให้อยู่ในรูปของ I_C โดยดูจากสมการ ได้เท่ากับ

$$V_{BE} = V_{TH} \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) \quad (2.1.9)$$

จากโมเดลทรานซิสเตอร์ ค่า $I_C = 0.273 \mu\text{A}$, $I_S = 10^{-18}$ หากคิดที่อุณหภูมิห้องคือ 300 K จะได้ค่า

$$V_{TH} = 0.087 \text{ mV} \times 300 = 26.1 \text{ mV}$$

หาค่า V_{BE} จากสมการ (2.1.9) จะได้ว่า

$$V_{BE} = 26.1 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{0.273 \times 10^{-6}}{10^{-18}}\right)$$

$$V_{BE} = 0.678 \text{ V}$$

พื้นที่ของ Q_2 มีขนาดใหญ่เป็น n เท่าของ Q_1 สามารถหากระแสที่ไหลผ่าน R_B จากสมการ

$$I_{RB} = \frac{\ln(n)}{R_B} V_{TH} \quad (2.1.7)$$

กำหนดให้ $n = 10$, $R_B = 10k\Omega$ แทนค่าลงในสมการ (2.1.7)

$$\begin{aligned} I_{RB} &= \frac{\ln(10)}{10 \times 10^3} \times 26.1 \times 10^{-3} \\ I_{RB} &= 6 \mu A \end{aligned}$$

เพื่อให้สัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิมีค่าเป็นศูนย์ ต้องออกแบบให้ $\beta_1 = 17.24\beta_2$ หรือ

$$\frac{R_A}{R_B} \ln(n) = 17.24 \quad (2.1.10)$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{17.24 \times 10^4}{\ln(10)} \\ &= 74.87 k \end{aligned}$$

และจะได้แรงดันอ้างอิง V_{BG} เมื่อ $R_A = R_2$ และ $R_B = R_1$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{BG} &= V_{BE3} + I_{PTAT} R_2 = V_{BE3} + \frac{V_T R_2}{R_1} \ln(n) \\ V_{BG} &= \frac{\ln(10) \times 24.511 \times 10^{-3}}{10^4} \times 74.87 \times 10^3 + 0.678 \\ &= 1.101 V \end{aligned} \quad (2.1.11)$$

3.1.2 วงจรชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ

ความถี่ของออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกระบวนการผลิต เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ K_N , V_T และ C_L เพื่อชดเชยผลของเงื่อนไขดังกล่าว ต้องทำการปรับค่าแรงดันไบอัสควบคุม V_{CTRL} ให้เปลี่ยนแปลงตามสถานะพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไป เพื่อให้ความถี่ออสซิลเลเตอร์คงที่

กระบวนการผลิตของวงจรแบบซ้ำ ปกติและเร็วตามลำดับ ทำให้ความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนแปลง จึงต้องทำการชดเชยกระบวนการผลิต ทำได้โดยการต่อมอสเฟต M6 เป็นเสมือนความต้านทาน แต่เปลี่ยนแปลงตามกระบวนการผลิต หากกระบวนการผลิตเปลี่ยนแปลง M6 ก็เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ทำให้แรงดันควบคุมชดเชยผลของกระบวนการผลิตได้

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -40 ถึง 80 องศาเซลเซียส ทำให้การนำกระแสของมอสเฟตเปลี่ยนแปลง ผลของอุณหภูมิต่อแหล่งจ่ายกระแสที่ทำงานอยู่ในย่านไทรโอด และซิมอสอินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านอิ่มตัว ทำให้กระแสไม่คงที่เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง สามารถชดเชยด้วยการสร้างวงจรแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงโดยใช้ V_{TH} (Thermal voltage based voltage reference) มีค่าขึ้นกับแรงดันอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ สามารถหากระแสอ้างอิง (I_{REF}) และกระแสที่สะท้อนมาที่ M5 เท่ากับ

$$\begin{aligned}
I_{D5} &= \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} I_{REF} & (2.4.1) \\
&= \frac{(16/1)_5}{(10/1)_4} \frac{(24.5\text{mV})\ln(5)}{5k} \\
V_T &= \frac{kT}{q} = \frac{(1.381 \times 10^{-23})(300)}{1.69 \times 10^{-19}} \\
I_{D5} &= 12.6 \text{ uA}
\end{aligned}$$

กระแส I_{D5} ไหลผ่านมอสเฟตเสมือนความต้านทาน kR ทำให้เกิดแรงดันอ้างอิงมีค่าเป็น

$$V_{REF} = I_{D5}(kR) \quad (2.4.2)$$

ค่า k เป็นอัตราส่วนของความต้านทานเสมือนของมอสเฟตต่อความต้านทาน V_{REF} มีค่าขึ้นอยู่กับ V_{TH} อัตราส่วนระหว่างขนาด $M5$ และ $M4$ อัตราส่วนระหว่างขนาด Q_2 และ Q_1 (หรือ n) และอัตราส่วนระหว่างความต้านทาน (หรือ k) เนื่องจาก V_{TH} มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิแบบบวก ดังนั้นแรงดันอ้างอิง V_{REF} ในสมการ (2.4.3) จึงมีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงเชิงอุณหภูมิแบบบวกเช่นกันโดยมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\partial V_{REF}}{\partial T} = \frac{\partial V_{TH}}{\partial T} = 0.191 \text{ mV/K}$$

3.1.3 ออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน

วงจรรอสซิลเลเตอร์แบบวงแหวนที่ออกแบบมีความถี่ 10 MHz เป็นการต่อ Inverter จำนวน 5 สเตจ และมีวงจร Current-starved เพื่อควบคุมการไหลของกระแส สามารถคำนวณหาค่ากระแสได้จาก

$$f = \frac{I_D}{2NCV_{DD}} \quad (2.3.10)$$

กำหนดให้ $f = 10 \text{ MHz}$, $N = 5$, $C = 1 \text{ pF}$, $V_{DD} = 2 \text{ V}$
จะได้

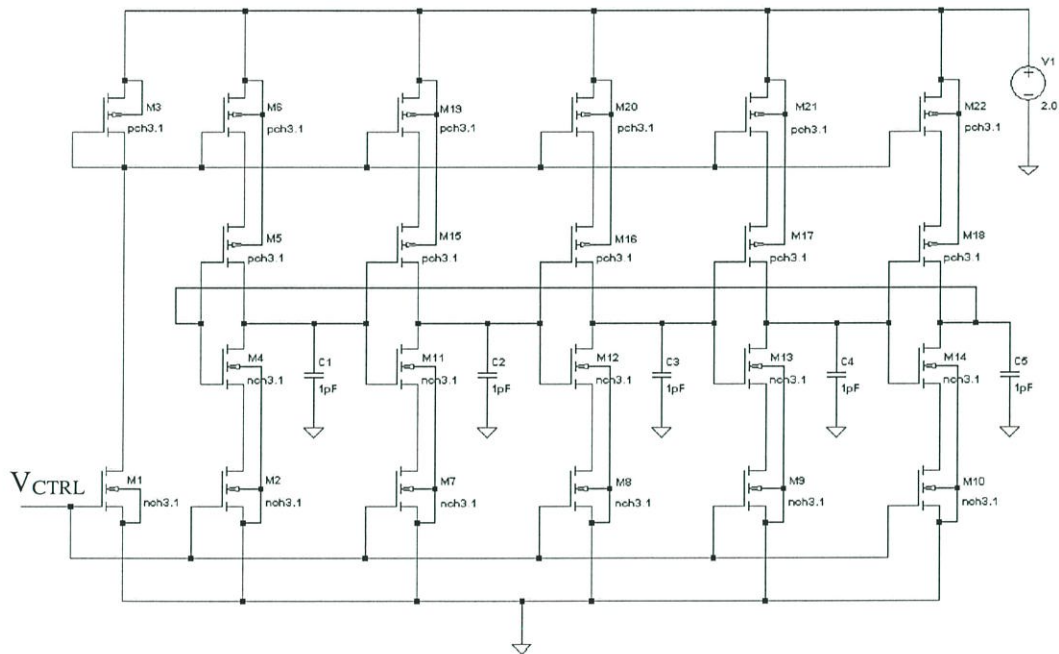
$$\begin{aligned}
I_D &= (10 \times 10^6)(10)(1 \times 10^{-12})(2) \\
I_D &= 200 \text{ uA}
\end{aligned}$$

บทที่ 4

ผลการ SIMULATION ด้วยโปรแกรม LTSPICE IV ของวงจร

โปรแกรม LTSPICE IV เป็นโปรแกรม simulation วงจรไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไป สามารถจำลองวงจรไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์ต่างๆให้ครบถ้วน โปรแกรมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในตัวโปรแกรมสามารถพลอตกราฟการตอบสนองทั้งไฟตรงและไฟสลับ เพิ่มอณูหภูมิที่ต้องการได้ มีความแม่นยำสูง เพราะ ลำดับการแบ่งสามารถปรับความละเอียดได้ และยังสามารถทำ FFT เพื่อดูค่าสเปกตรัมได้อีกด้วย

4.1 ผลการตอบสนองความถี่ของวงจร Ring Oscillator ที่ V_{CTRL} และ Process Temperature ค่าต่างๆ

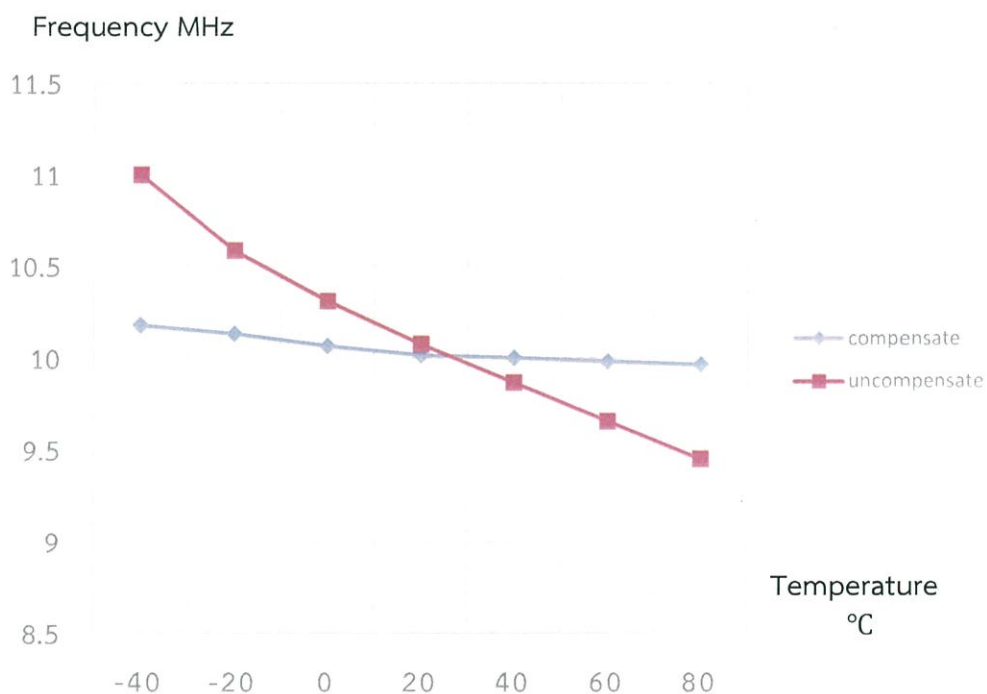


รูปที่ 4.1 วงจรริงออสซิลเลเตอร์ที่มี Current – Starve

ตารางที่ 4.1.1 ผลระหว่างการไม่ชดเชยและชดเชยผลของกระบวนและอุณหภูมิ

Temperature °C	Compensate (MHz)	Uncompensated (MHz)
-40	10.178	11
-20	10.132	10.586
0	10.066	10.311
20	10.017	10.078
40	10.002	9.868
60	9.982	9.657
80	9.963	9.451

กราฟผลระหว่างการไม่ชดเชยและชดเชยผลของ



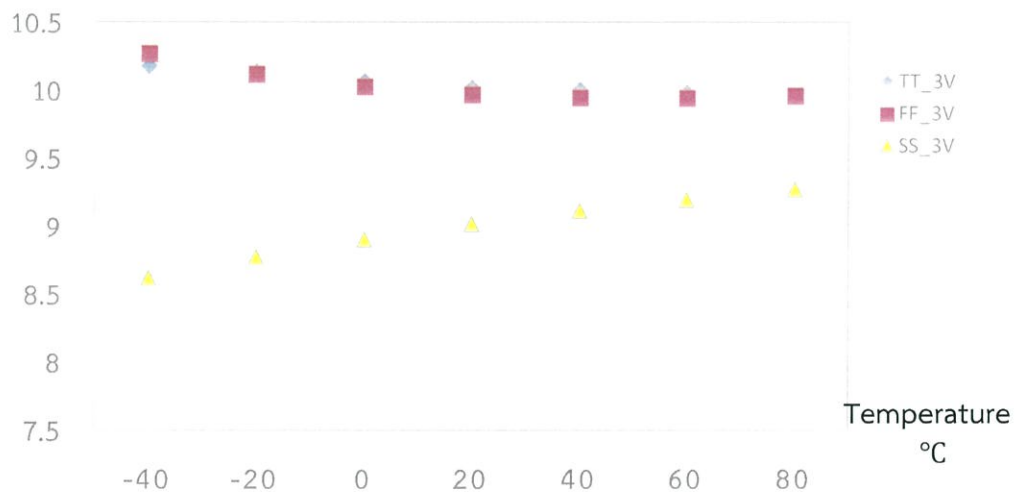
รูปที่ 4.2 กราฟผลระหว่างการไม่ชดเชยและชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ

กราฟแสดงผลระหว่างวงจรที่ไม่มีการชดเชยและชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าหากไม่มีการชดเชยผลดังกล่าวแล้ว ความถี่ที่เกิดขึ้นมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่กว้างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยผลกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.1.2 การตอบสนองความถี่เมื่อมีการชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิ

Temp °C \ process	TT_3V	FF_3V	SS_3V
	ความถี่ที่ทดลองได้ (MHz)		
-40	10.178	10.271	8.618
-20	10.132	10.118	8.769
0	10.066	10.027	8.901
20	10.017	9.97	9.015
40	10.002	9.947	9.112
60	9.982	9.946	9.196
80	9.963	9.963	9.271

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency กับ Temperature เมื่อถูกชดเชยแล้ว
Frequency MHz

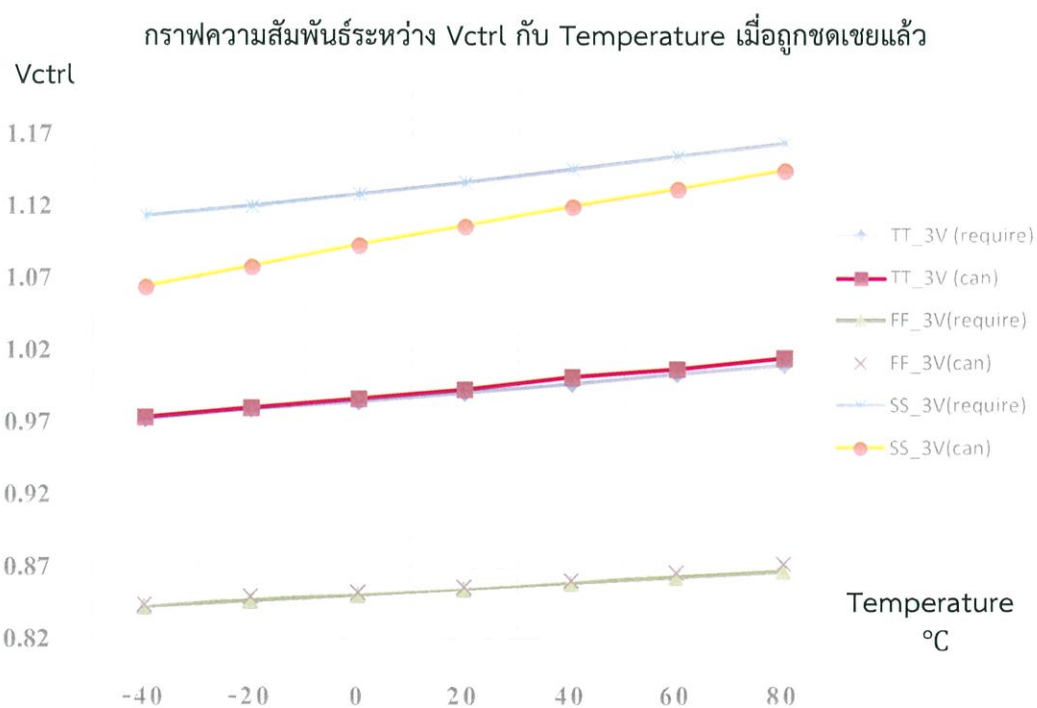


รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency กับ Temperature ที่ process ต่างๆ หลังจากชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิแล้ว

ผลของการสร้างความถี่ด้วยวงจรรีจอสซิลเลเตอร์ที่มีการชดเชยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิด้วยการสร้างแรงดันควบคุมจากวงจร PTAT ผ่านออปแอมป์เพื่อขยายแรงดัน พบว่าสามารถชดเชยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิได้พร้อมกัน

ตารางที่ 4.1.3 แรงดันควบคุมเมื่อมีการชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิ

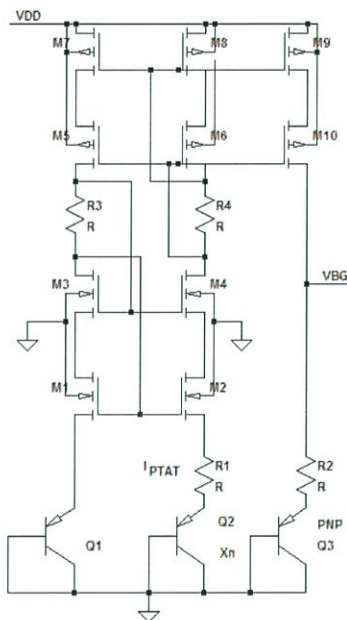
process Temp °C	TT_3V	TT_3V	FF_3V	FF_3V	SS_3V	SS_3V
	ต้องการ	ทำได้	ต้องการ	ทำได้	ต้องการ	ทำได้
	แรงดันควบคุม					
-40	0.973	0.974505	0.843	0.844851	1.114	1.06482
-20	0.98	0.980959	0.847	0.850579	1.121	1.07882
0	0.985	0.987161	0.851	0.853231	1.129	1.09361
20	0.991	0.993489	0.855	0.856792	1.137	1.10676
40	0.997	1.0021	0.859	0.861237	1.146	1.12003
60	1.004	1.00749	0.863	0.866536	1.155	1.132184
80	1.01	1.0154	0.867	0.872662	1.164	1.14532



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vctrl กับ Temperature ที่ process ต่างๆ หลังจากชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิแล้ว

4.2 ผลการสร้างวงจรแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคด

4.2.1 ผลลัพธ์แรงดันอ้างอิงของการจำลองการทำงาน

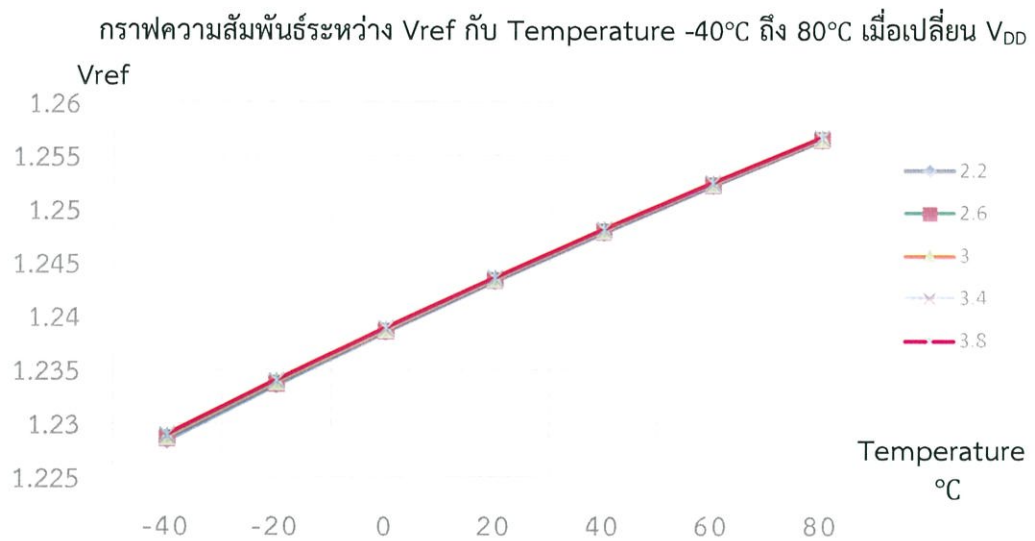


รูปที่ 4.5 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคดที่ใช้ทดลอง

รูปที่ 4.5 เป็นวงจรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการทดลองแรงดันอ้างอิงที่ได้โดยเปลี่ยนกระบวนการผลิต MOSFET เป็นกระบวนการผลิตแบบ TT, FF และ SS ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.2.1 แรงดันอ้างอิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุท และอุณหภูมิที่กระบวนการผลิตแบบ TT

VDD / Temp °C	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vref				
-40	1.22844	1.22867	1.2288	1.22893	1.22908
-20	1.23359	1.23379	1.23391	1.23402	1.23414
0	1.23852	1.23869	1.2388	1.23891	1.23902
20	1.24325	1.2434	1.2435	1.2436	1.2437
40	1.24779	1.24793	1.24802	1.24812	1.24821
60	1.25218	1.25231	1.2524	1.25248	1.25257
80	1.256421	1.25654	1.25662	1.2567	1.25679



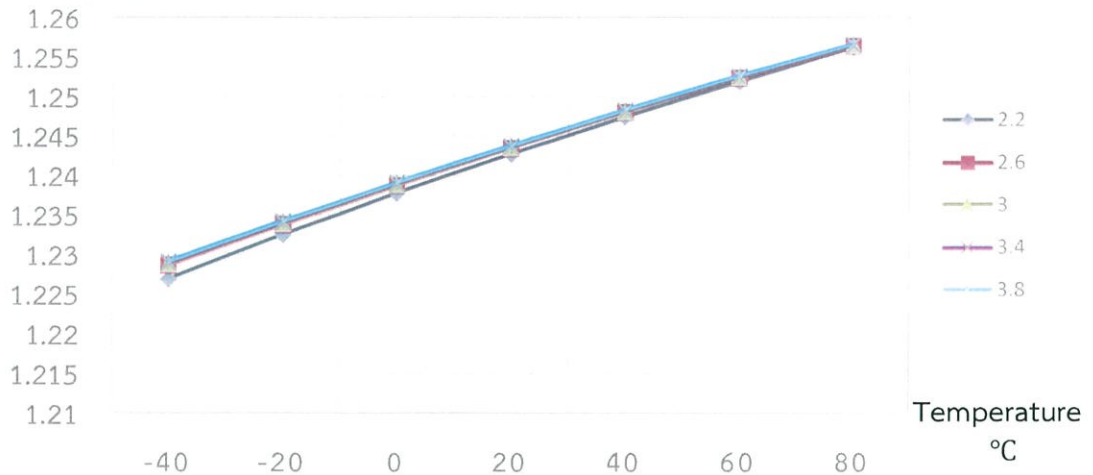
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุท 2.2-3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ TT

รูปที่ 4.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุทเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ซึ่งใช้กระบวนการผลิตแบบ TT ซึ่งจะเห็นว่าความสามารถของวงจรในรูปที่ 4.5 สามารถสร้างแรงดันอ้างอิงได้เหมาะสม โดยแรงดันอ้างอิงที่ได้จะใกล้เคียงกัน แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุท

ตารางที่ 4.2.2 แรงดันอ้างอิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุท และอุณหภูมิ ที่กระบวนการผลิตแบบ SS

VDD \ Temp °C	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vref				
-40	1.22691	1.22877	1.22893	1.22906	1.2292
-20	1.23254	1.23389	1.23403	1.23415	1.23428
0	1.23778	1.23879	1.23892	1.23903	1.23914
20	1.24272	1.2435	1.24361	1.24372	1.24382
40	1.24742	1.24803	1.24813	1.24823	1.24833
60	1.25191	1.2524	1.2525	1.25259	1.25268
80	1.25622	1.25645	1.25653	1.2566	1.25669

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vref กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน V_{DD}
Vref



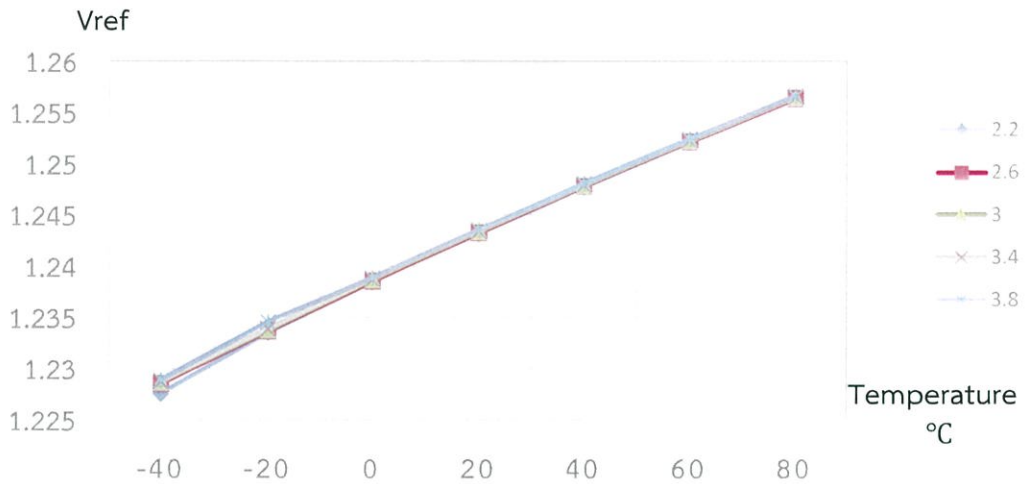
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุท
2.2 -3.8 โวลต์ ภาระวนการผลิตแบบ SS

รูปที่ 4.7 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุทเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ซึ่งใช้ภาระวนการผลิตแบบ SS ซึ่งจะเห็นว่าความสามารถของวงจรในรูปที่ 4.5 สามารถสร้างแรงดันอ้างอิงได้เหมาะสม โดยแรงดันอ้างอิงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่แรงดันอินพุท 2.2 โวลต์ แรงดันอ้างอิงที่ได้จะตกลงมาเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันอินพุทที่ 2.6 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์

ตารางที่ 4.2.3 แรงดันอ้างอิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า และอุณหภูมิ
ที่ภาระวนการผลิตแบบ FF

VDD \ Temp °C	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vref				
-40	1.2276	1.22855	1.22868	1.22879	1.22892
-20	1.23354	1.23368	1.23379	1.2339	1.23461
0	1.23846	1.23858	1.23869	1.23878	1.23889
20	1.24318	1.2433	1.24339	1.24348	1.24358
40	1.24773	1.24783	1.24792	1.248	1.2481
60	1.25211	1.25221	1.25229	1.25237	1.25247
80	1.25635	1.25645	1.25653	1.2566	1.25669

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vref กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน VDD

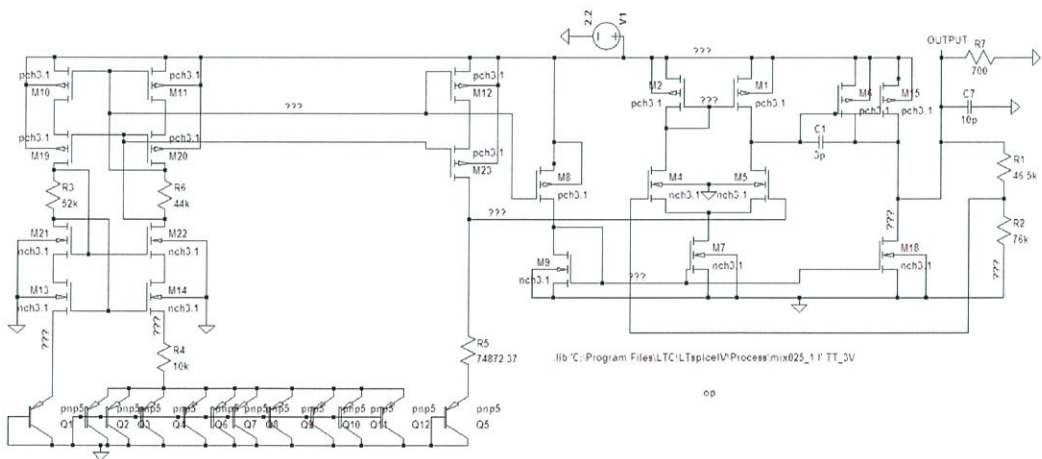


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 -3.8 โวลต์ ภาระการผลิตแบบ FF

รูปที่ 4.8 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอ้างอิงกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ซึ่งใช้ภาระการผลิตแบบ FF ซึ่งจะเห็นว่าความสามารถของวงจรในรูปที่ 4.5 สามารถสร้างแรงดันอ้างอิงที่เหมาะสม และแรงดันอ้างอิงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไป

จะเห็นว่าวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปทั้ง 3 รูปแบบภาระการผลิต ทั้งยังมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอีกด้วย แต่วงจรสามารถสร้างแรงดันอ้างอิงได้ใกล้เคียงกัน

4.2.2 ผลลัพธ์แรงดันเอาต์พุตที่ได้ของการจำลองการทำงาน



รูปที่ 4.9 วงจรสร้างแรงดัน V_{out}

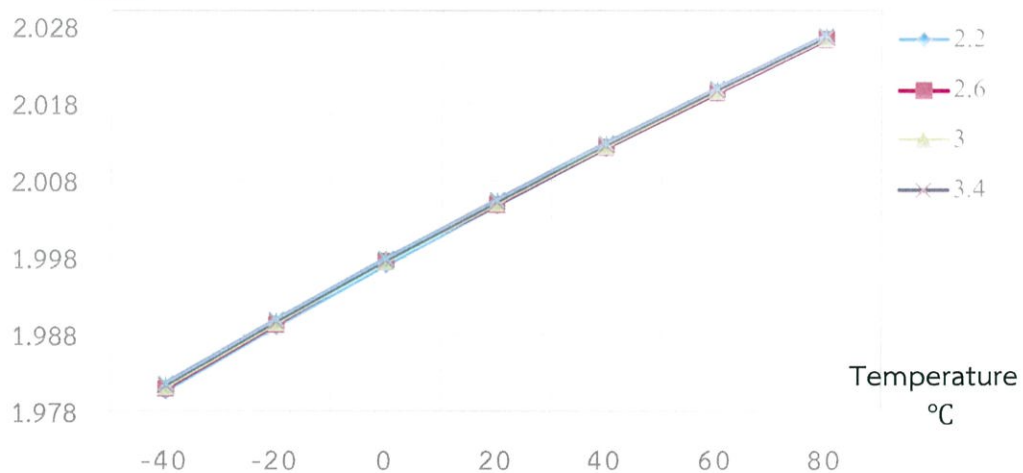
จากรูปที่ 4.9 เป็นวงจรสร้างแรงดัน V_{out} เพื่อนำไปใช้กับวงจรชดเชยภาระการผลิตและอุณหภูมิ และวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน ซึ่งวงจรในรูปที่ 4.8 จะประกอบไปด้วยวงจรอยู่ 2 ส่วน

คือ วงจรแรกส่วนที่เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปที่ใช้ทรานซิสเตอร์ต่อแบบแคสโคด และ ออปแอมป์สองภาคเอาต์พุตเดี่ยว

ตารางที่ 4.2.4 แรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และอุณหภูมิ ที่กระบวนการผลิตแบบ TT

VDD \ Temp °C	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vout				
-40	1.98067	1.98102	1.98124	1.98147	1.98174
-20	1.98905	1.98934	1.98954	1.98975	1.99001
0	1.99707	1.99762	1.9975	1.99768	1.99794
20	2.00477	2.00496	2.00514	2.00532	2.00557
40	2.01218	2.01236	2.01251	2.01267	2.01292
60	2.01934	2.01949	2.01963	2.01978	2.02003
80	2.02627	2.02639	2.02652	2.02667	2.02692

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน VDD Vout



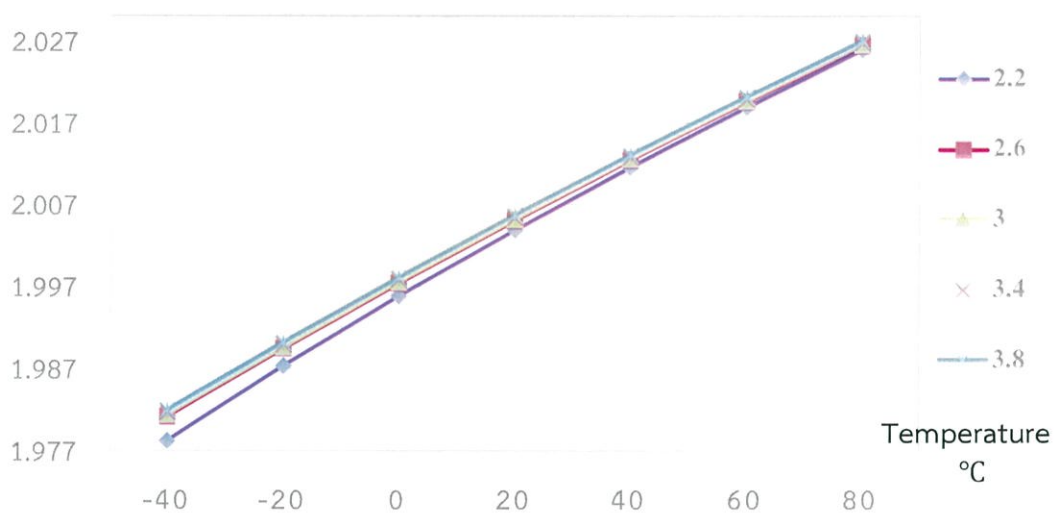
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ TT

รูปที่ 4.10 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ที่กระบวนการผลิตแบบ TT ซึ่งไม่มีการต่อโหลดตัวต้านทาน โดยแรงดันที่เราต้องการใช้อยู่ 2 โวลต์ จากการพล็อตจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้อยู่ในช่วง 1.97 โวลต์ ถึง 2.026 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียง 2 โวลต์มาก แรงดันเอาต์พุตที่ได้จึงสามารถนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.2.5 แรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และอุณหภูมิ ที่กระบวนการผลิตแบบ SS

VDD Temp °C	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vout				
-40	1.97822	1.9812	1.98144	1.98168	1.98195
-20	1.98737	1.98952	1.9897	1.98995	1.99021
0	1.9959	1.99749	1.99768	1.99788	1.99813
20	2.00395	2.00515	2.00532	2.0055	2.00575
40	2.01161	2.01252	2.01268	2.01285	2.01309
60	2.01894	2.01965	2.0198	2.01995	2.02019
80	2.026	2.02655	2.02668	2.02683	2.02706

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน VDD



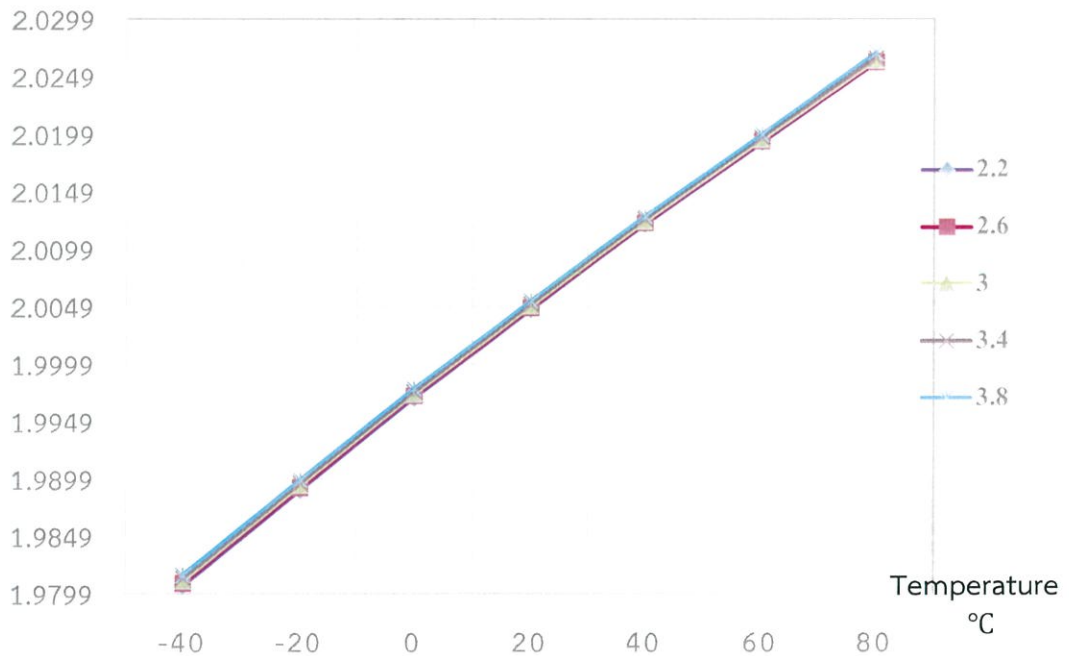
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ SS

รูปที่ 4.11 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ที่กระบวนการผลิตแบบ SS ซึ่งไม่มีการต่อโหลดตัวต้านทาน โดยแรงดันที่เราต้องการใช้อยู่ 2 โวลต์ จากการพล็อตจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้อยู่ในช่วง 1.977 โวลต์ ถึง 2.027 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียง 2 โวลต์มาก แรงดันเอาต์พุตที่ได้จึงสามารถนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.2.6 แรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และอุณหภูมิ ที่กระบวนการผลิตแบบ FF

VDD \ Temp °C	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vout				
-40	1.9806	1.98084	1.98104	1.98126	1.98154
-20	1.98895	1.98914	1.98935	1.98955	1.98982
0	1.99695	1.99714	1.9973	1.99749	1.99777
20	2.00464	2.0048	2.00496	2.00513	2.00541
40	2.01205	2.01219	2.01233	2.0125	2.01277
60	2.01921	2.01933	2.01946	2.01962	2.0199
80	2.02614	2.02624	2.02638	2.02652	2.02697

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน V_{DD} Vout



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ FF

รูปที่ 4.12 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ที่กระบวนการผลิตแบบ FF ซึ่งไม่มีการต่อโหลดตัวต้านทาน โดยแรงดันที่เราต้องการใช้อยู่ 2 โวลต์ จากการพล็อตจะเห็นว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้อยู่ในช่วง 1.98 โวลต์ ถึง 2.03 โวลต์ ซึ่งใกล้เคียง 2 โวลต์มาก แรงดันเอาต์พุตที่ได้จึงสามารถนำไปใช้งานได้

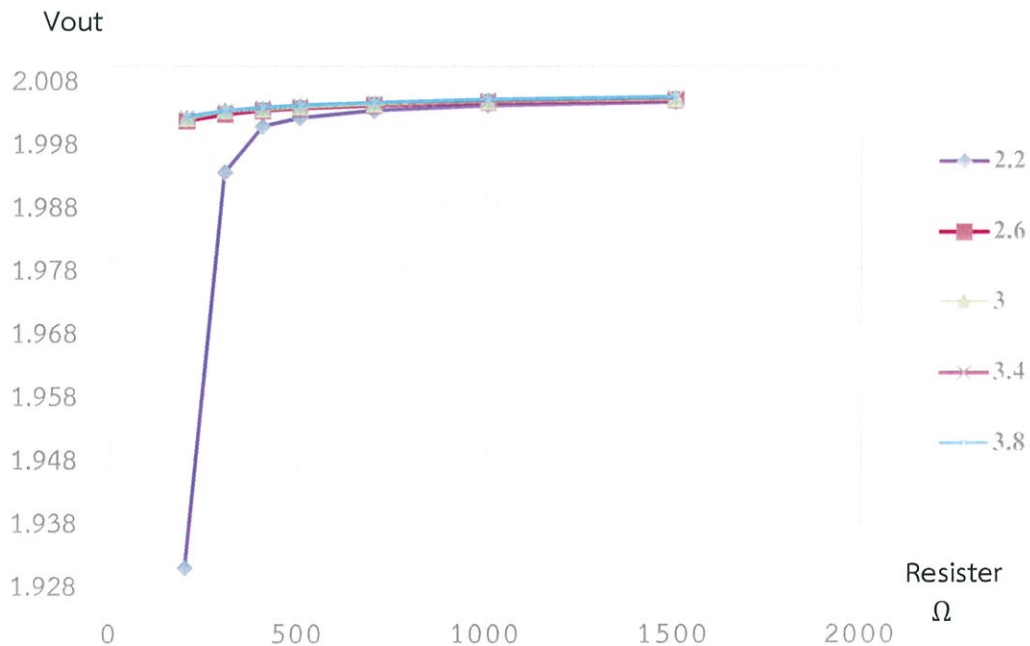
จากกราฟแรงดันเอาต์พุตทั้ง 3 กราฟที่ได้ เมื่อเปลี่ยนกระบวนการผลิต และเปลี่ยนอุณหภูมิพบว่าแรงดันที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่กระบวนการผลิตแบบ SS จะมีที่แรงดันอินพุต 2.2 โวลต์ที่แรงดันเอาต์พุตตกลงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.2.7 แรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และอุณหภูมิที่

กระบวนการผลิตแบบ FF เมื่อต่อกับโหลดความต้านทานอุณหภูมิ 25 °C

VDD R (Ω)	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vout				
200	1.9307	2.00145	2.00192	2.00213	2.00213
300	1.99335	2.00249	2.00313	2.003	2.00301
400	2.00055	2.00307	2.00336	2.00352	2.00354
500	2.00193	2.00346	2.00371	2.00387	2.0039
700	2.00308	2.00395	2.00418	2.00433	2.00433
1000	2.00384	2.00439	2.0046	2.00475	2.00482
1500	2.00442	2.0048	2.00499	2.00514	2.00524

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน V_{DD} และต่อโหลดความต้านทานที่



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 -3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ FF เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C

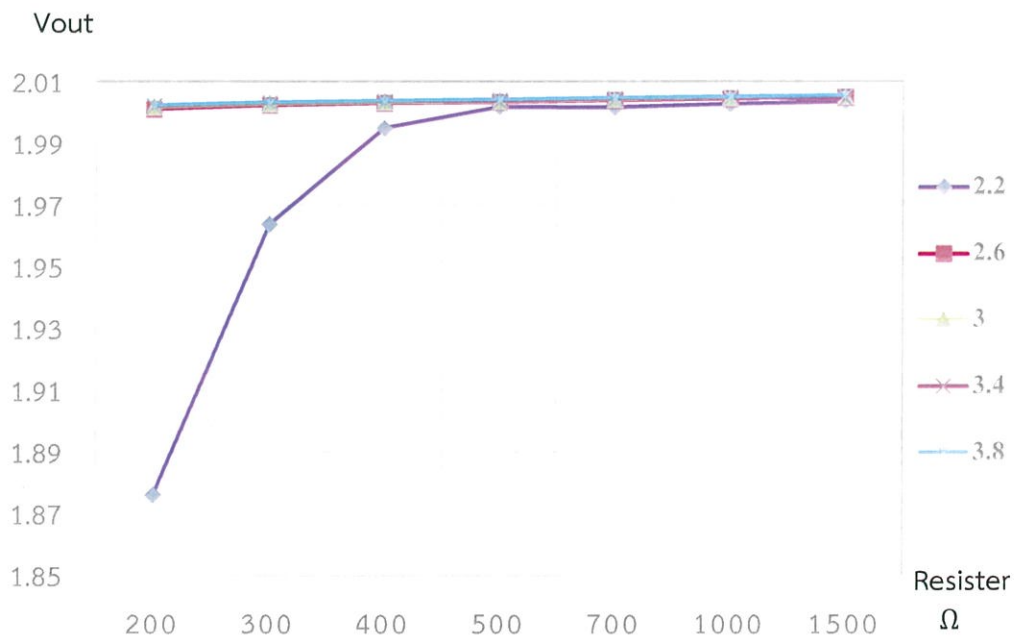
จากรูปที่ 4.13 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ภาระการผลิตแบบ FF เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อดูจากกราฟพบว่าหากแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้ามีค่า 2.6 โวลต์ ขึ้นไปแรงดันเอาต์พุตจะยังอยู่ที่ 1.998 โวลต์แม้ว่าจะต่อความต้านทาน 200 โอห์ม แต่ถ้าแรงดันอินพุตเป็น 2.2 โวลต์แรงดันเอาต์พุตจะตกลงอย่างรุนแรง ดังนั้นจุดที่แรงดันเอาต์พุตสามารถนำไปใช้งานได้ โดยควรต่อตัวต้านทานตั้งแต่ 700 โอห์มขึ้นไป

ตารางที่ 4.2.8 แรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และอุณหภูมิที่

ภาระการผลิตแบบ SS เมื่อต่อกับโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C

VDD R (Ω)	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vout				
200	1.87614	2.00111	2.0019	2.00222	2.00235
300	1.96387	2.00241	2.00291	2.00317	2.00329
400	1.99496	2.00309	2.00349	2.00373	2.00384
500	2.00193	2.00346	2.00371	2.00387	2.00422
700	2.0017	2.00409	2.0044	2.0046	2.00472
1000	2.00278	2.00457	2.00485	2.00504	2.00517
1500	2.00353	2.00502	2.00527	2.00456	2.0056

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน V_{DD} และต่อโหลดความต้านทานที่



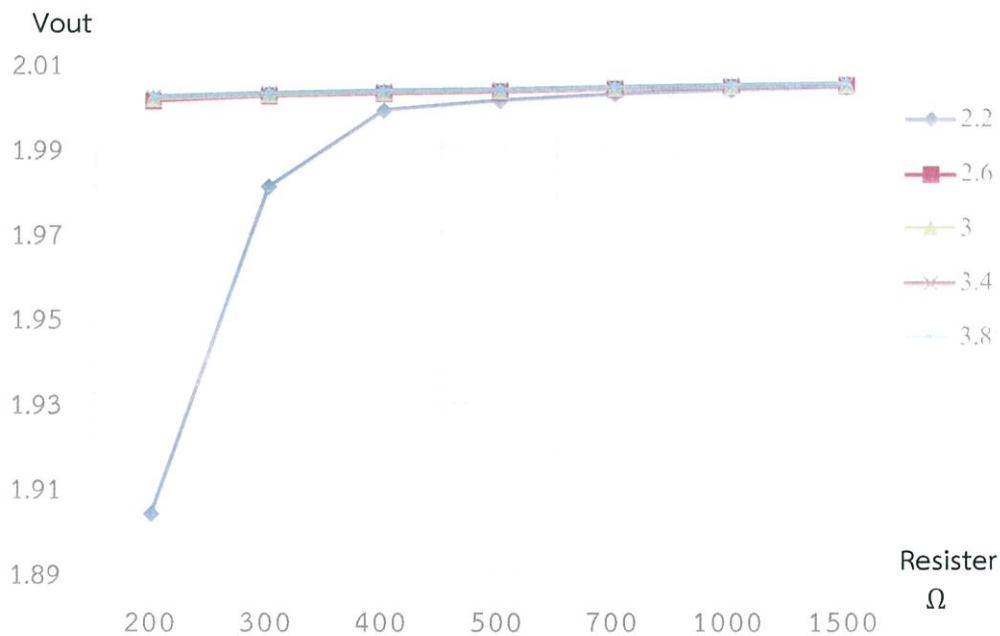
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 -3.8 โวลต์ ภาระการผลิตแบบ SS เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.14 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ ภาระการผลิตแบบ SS เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อดูจากกราฟพบว่าหากแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้ามีค่า 2.6 โวลต์ ขึ้นไปแรงดันเอาต์พุตจะยังอยู่ที่ 2.0 โวลต์แม้ว่าจะต่อความต้านทาน 200 โอห์ม แต่ถ้าแรงดันอินพุตเป็น 2.2 โวลต์แรงดันเอาต์พุตจะตกลงอย่างรุนแรง ดังนั้นจุดที่แรงดันเอาต์พุตสามารถนำไปใช้งานได้ โดยควรต่อตัวต้านทานตั้งแต่ 700 โอห์มขึ้นไป

ตารางที่ 4.2.9 แรงดันเอาต์พุตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอินพุต และอุณหภูมิที่ภาระการผลิตแบบ TT เมื่อต่อกับโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C

VDD R (Ω)	2.2	2.6	3	3.4	3.8
	Vout				
200	1.90407	2.0013	2.00191	2.00217	2.00225
300	1.98108	2.00248	2.00287	2.00308	2.00315
400	1.99905	2.00308	2.00342	2.00362	2.00369
500	2.00136	2.0035	2.0038	2.00399	2.00406
700	2.00286	2.00402	2.00429	2.00447	2.00455
1000	2.00376	2.00448	2.00472	2.0049	2.005
1500	2.00442	2.00491	2.00513	2.0053	2.00542

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ Temperature -40°C ถึง 80°C เมื่อเปลี่ยน V_{DD} และต่อโหลดความต้านทานที่



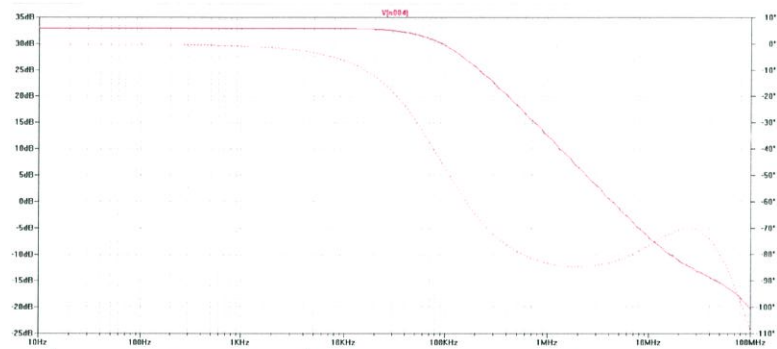
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 -3.8 โวลต์ ภาระการผลิตแบบ TT เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิ ที่แหล่งจ่ายแรงดันอินพุต 2.2 โวลต์ ถึง 3.8 โวลต์ กระบวนการผลิตแบบ TT เมื่อต่อโหลดความต้านทานที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อดูจากกราฟพบว่าหากแรงดันอินพุตที่ป้อนเข้ามีค่า 2.6 โวลต์ ขึ้นไปแรงดันเอาต์พุตจะยังอยู่ที่ 2.0 โวลต์แม้ว่าจะต่อความต้านทาน 200 โอห์ม แต่ถ้าแรงดันอินพุตเป็น 2.2 โวลต์แรงดันเอาต์พุตจะตกลงอย่างรุนแรง ดังนั้นจุดที่แรงดันเอาต์พุตสามารถนำไปใช้งานได้ โดยควรต่อตัวต้านทานตั้งแต่ 700 โอห์มขึ้นไป

จากกราฟแรงดันเอาต์พุตเมื่อต่อโหลดต้านทานทั้ง 3 กราฟแล้ว แม้ว่าหากเปลี่ยนกระบวนการผลิต และเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงวงจรก็ยังสามารถจ่ายแรงดันเอาต์พุตได้คงที่ โดยจะวงจรจะจ่ายแรงดันเอาต์พุตได้คงที่เมื่อต่อตัวต้านทานตั้งแต่ 700 โอห์มขึ้นไป

4.3 ผลลัพธ์การทดลองวงจรออปแอมป์

วงจรออปแอมป์ใช้ในส่วนของการขยายแรงดันแบบอ้างอิง



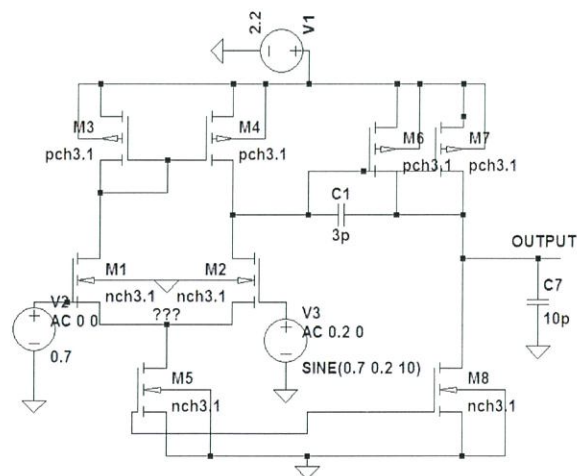
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงส่วนเฟื่อเฟส และอัตราขยายเดซิเบล ของออปแอมป์

$$\text{Gain} = 33.078 \text{ dB}$$

$$\omega_{-3\text{db}} = 96.255 \text{ KHz}$$

$$\text{Phase margin} = 82.669$$

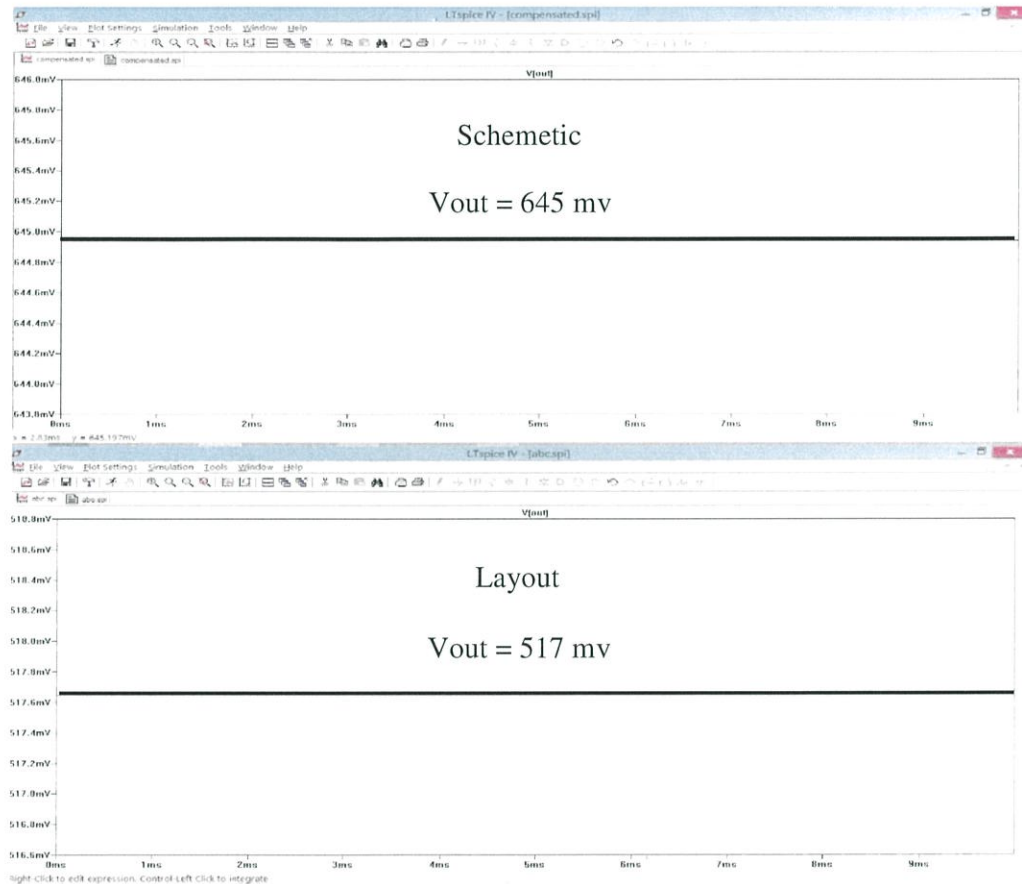
$$\omega_{\text{UGB}} = 4.319 \text{ MHz}$$



รูปที่ 4.17 วงจรออปแอมป์สองภาคเอาต์พุตเดี่ยว ต่อแบบ AC Analysis เพื่อหาส่วนเฟื่อเฟส

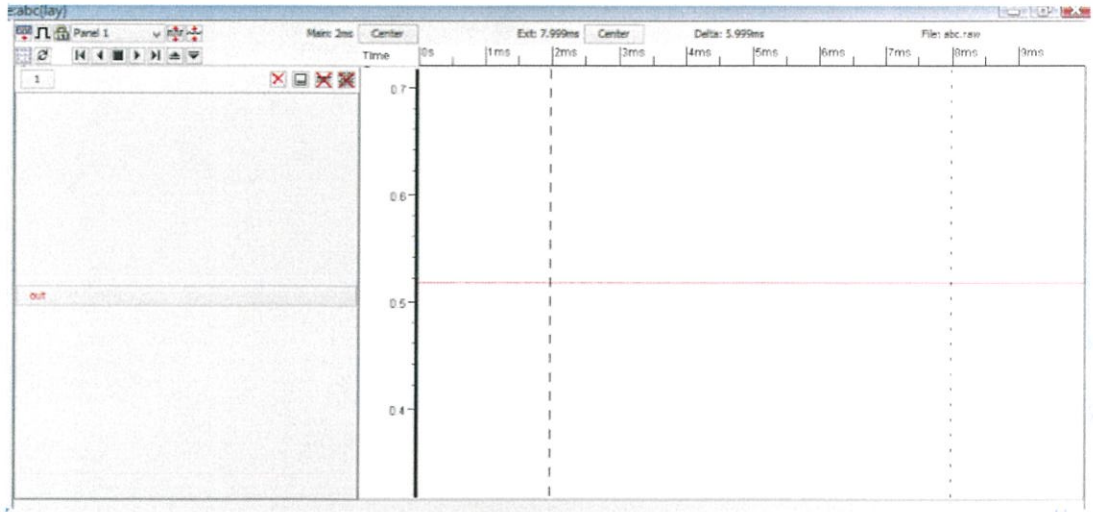
4.4 ผลลัพธ์การทดลองวงจรชุดเขยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิจากการสร้างเลย์เอาต์ (Layout)

ผลการทดลองแรงดันด้านออกที่ได้ของวงจรชุดเขยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบจาก Schematic และ Layout ด้วยการจำลองด้วยโปรแกรม LT Spice IV พบว่าผลลัพธ์จากการต่อวงจรบน Schematic ได้แรงดันด้านออก 645 mV และผลลัพธ์จากการออกแบบวงจรโดยวิธี Layout ได้แรงดันด้านออก 517.6 mV



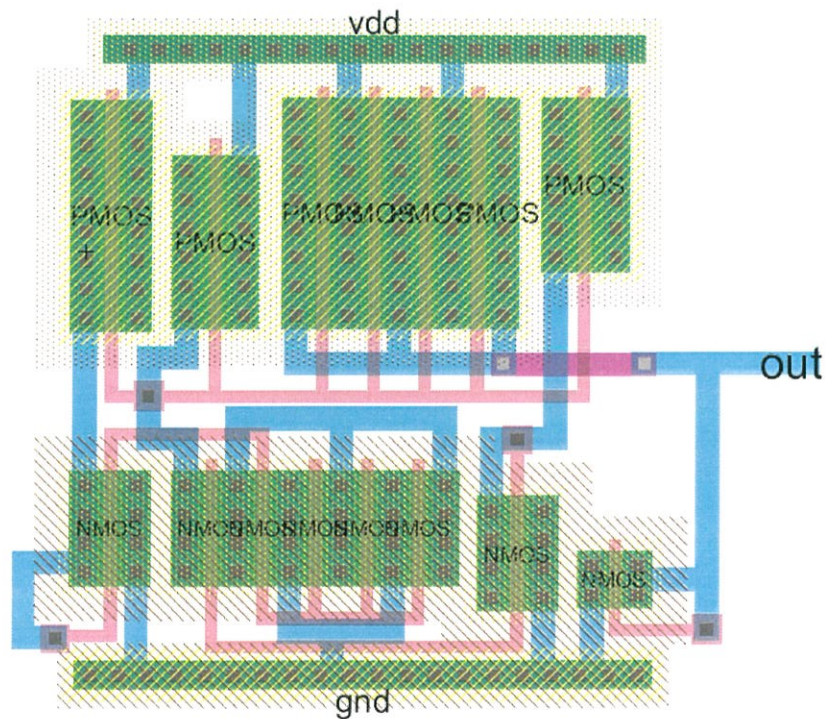
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการทดลองวงจรชุดเขยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิจากการสร้างเลย์เอาต์ (Layout) ด้วยโปรแกรม LT SPICE IV

ผลลัพธ์แรงดันด้านออกด้วยโปรแกรม Electric VLSI ได้ 517.6 mV



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลลัพธ์การทดลองวงจรชุดเซยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิจากการสร้างเลย์เอาต์ (Layout) ด้วยโปรแกรม Electric VLSI

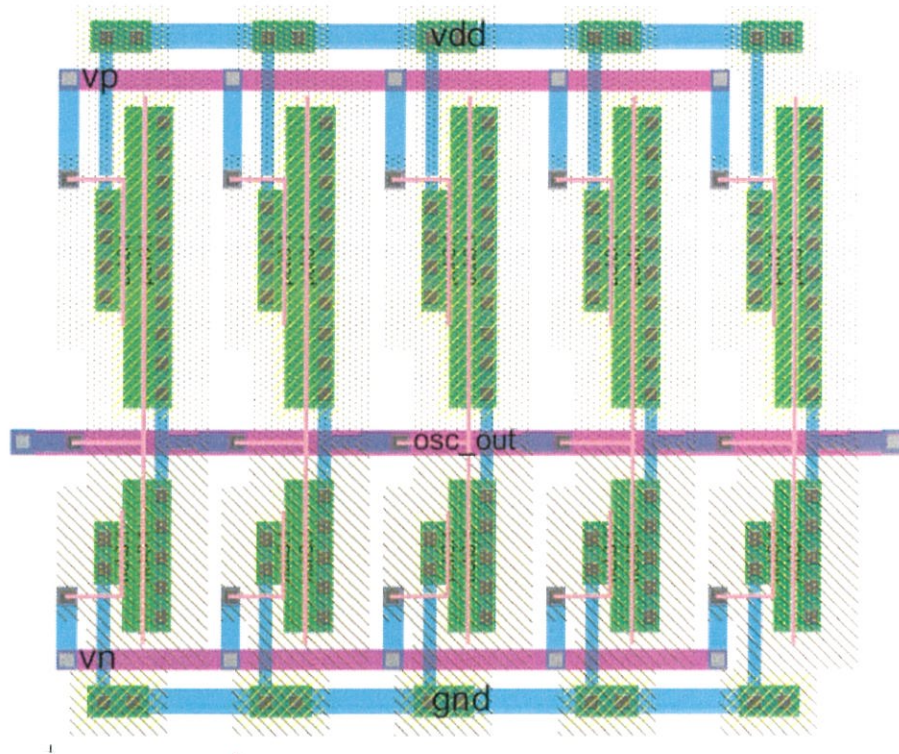
การออกแบบวงจรชุดเซยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบแบบเซ้นทรอยด์ (Centroid) เข้ามาใช้เพื่อช่วยในการแบ่งตัว PMOS ให้มีขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.20 เลย์เอาต์ (Layout) วงจรชุดเซยผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ

4.5 การออกแบบเลย์เอาต์ (Layout) ของวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน

วงจรรอสซิลเลเตอร์ประกอบด้วยส่วนวงจร Current Starved , ส่วนของ Inverter 5 stage , Capacitor , แรงดันไฟเลี้ยงบวกและกราวด์ การเชื่อมต่อกันระหว่างขา D ของ PMOS ที่ทำหน้าที่เป็น current source กับขา S ของ PMOS inverter สามารถเขียนเลย์เอาต์ให้เชื่อมกันได้โดยใช้พื้นที่ขา D และ S ร่วมกัน และทำเช่นเดียวกันกับ NMOS ในส่วนของแรงดันไฟเลี้ยงบวกเชื่อมต่อด้วย Nwell และกราวด์เชื่อมต่อด้วย Pwell ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 เลย์เอาต์วงจรรอสซิลเลเตอร์ 5 ภาค

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง อุปสรรค ปัญหา และข้อเสนอแนะ

5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน และผลการจำลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันคงที่แบบแบนด์แกป (Bandgapvoltage regulator)

จากการทดสอบผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม และผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการ ในส่วนของแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง โดยค่าที่ได้จากการคำนวณของแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกปมีค่า 1.101 โวลต์และค่าที่ได้จากโปรแกรม LTSPICE IV มีค่า 1.248 โวลต์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างคิดเป็น $\frac{1.248-1.101}{0.5(1.248+1.101)} \times 100\%$ เท่ากับ 12.51 % ซึ่งส่งผลให้แรงดันด้านออกของวงจรมีค่าแตกต่างกันโดยค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่า 1.7746 โวลต์ และค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม LTSPICE IV มีค่า 2.0055 โวลต์ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างคิดเป็น $\frac{2.0055-1.7746}{0.5(2.0055+1.7746)} \times 100\%$ เท่ากับ 12.22 % ซึ่งแตกต่างกันอยู่มาก อาจเป็นผลมาจากการคำนวณจากทางโปรแกรมมีวิธีการคำนวณที่ละเอียดมากกว่า

ส่วนชดเชยกระบวนการผลิต และอุณหภูมิ (Process/ Temperature Compensation)

การชดเชยกระบวนการผลิตขึ้นอยู่กับแรงดัน V_{TN} ของมอสเฟตที่ต่อแบบตัวด้านทานเสมือนเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการผลิต สามารถสร้างแรงดันควบคุมกระแสไอส์ให้วงจรออสซิลเลเตอร์ให้ค่อนข้างคงที่เมื่อกระบวนการผลิตเปลี่ยนแปลง ในส่วนของกระบวนการผลิตแบบปกติ TT ที่อุณหภูมิ 27 °c มีความถี่เท่ากับ 10 MHz โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความถี่สูงสุด ณ อุณหภูมิ 80 °c และ ความถี่ต่ำสุด ณ อุณหภูมิ -40 °c มีค่า $\frac{10.178-9.963}{10.178} \times 100\% = 2.11\%$ เมื่อกระบวนการผลิตเปลี่ยนเป็นแบบเร็ว FF (FastNmos, FastPmos) มอสเฟตชดเชยกระบวนการผลิตเปลี่ยนเป็นแบบ FF ด้วย สร้างความถี่ได้เท่ากับ 9.97 MHz โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความถี่สูงสุด ณ อุณหภูมิ 80 °c และ ความถี่ต่ำสุด ณ อุณหภูมิ -40 °c มีค่า $\frac{10.271-9.963}{10.271} \times 100\% = 3.00\%$ และแบบช้า SS (SlowNmos, SlowPmos) ได้เท่ากับ 9.015MHz โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความถี่สูงสุด ณ อุณหภูมิ 80 °c และ ความถี่ต่ำสุด ณ อุณหภูมิ -40 °c มีค่า $\frac{9.271-8.618}{9.271} \times 100\% = 2.11\%$ ซึ่งปรับแรงดันควบคุมใกล้เคียงกับที่ต้องการเพื่อสร้างความถี่คงที่

การชดเชยอุณหภูมิเพื่อเสถียรภาพของวงจรออสซิลเลเตอร์ให้ความถี่คงที่ ผลจากวงจรแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง V_{TH} ที่มีสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิเป็นบวกและแรงดันควบคุมที่ต้องการมีความชันเป็นบวก จึงสามารถชดเชยผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ -40 °c ถึง 80 °c ได้ค่อนข้างมีเสถียรภาพ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถปรับความชันของแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงให้ใกล้เคียงกับแรงดันควบคุมที่ต้องการได้ เมื่อเปลี่ยนกระบวนการผลิต แรงดันอ้างอิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความชันอาจจะเปลี่ยนแปลงไป แต่ยังสามารถชดเชยผลของอุณหภูมิในกระบวนการผลิตแบบ FF และ SS ได้

ส่วนของวงจรรอสซิลเลเตอร์แบบวงแหวน (Ring Oscillator)

วงจรรอสซิลเลเตอร์ 5 ภาค ในแต่ละภาคเอาต์พุตกลับเฟสมากกว่า 180° ทำให้เกิดการอสซิลเลชันเกิดขึ้น ความถี่ขึ้นอยู่กับ delay time ในแต่ละภาค วงจรประกอบด้วยแรงดันควบคุมแหล่งจ่ายกระแส (Current starved) คงที่ ทำงานในโหมดเชิงเส้น ซึ่งพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อกระแสคือ V_{GS} , $V_{TN,TP}$, V_{DS} การควบคุมกระแสให้เปลี่ยนแปลงตามผลของอุณหภูมิและกระบวนการผลิต ต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์เหล่านี้ ส่วนของวงจรรอสซิลเลเตอร์ CMOS Inverter ที่ทำงานในโหมดอิมิตัวพารามิเตอร์ในสมการกระแสอิมิตัว ล้วนมีผลต่อสมการกระแสเชิงเส้นของแหล่งจ่ายกระแสคงที่ทั้งสี่ ทั้ง $\frac{W}{L}$, V_{GS} , $V_{TN,TP}$ พารามิเตอร์เหล่านี้เปลี่ยนแปลงตามผลของกระบวนการผลิตและอุณหภูมิเช่นเดียวกัน ผลของ simulation พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -40°C ถึง 80°C กระแสแหล่งจ่ายมีค่าลดลงเนื่องจากผลของ V_{DS} ในสมการกระแสเชิงเส้น จึงทำการชดเชยด้วยการปรับแรงดันควบคุมให้มีสัมประสิทธิ์เชิงบวกต่ออุณหภูมิ ในส่วนของกระบวนการผลิตพบว่า เมื่อเปลี่ยนกระบวนการผลิตเป็น FF กระแสแหล่งจ่ายเพิ่มขึ้นมาก จึงต้องทำการชดเชยด้วยการปรับแรงดันควบคุมให้มีค่าลดลงด้วยการต่อมอสเฟตชดเชยกระบวนการผลิต ทำให้ค่าแรงดันควบคุมลดลงใกล้เคียงกับที่ต้องการ และเป็นเช่นเดียวกันกับกระบวนการผลิตแบบซ้ำ SS

ส่วนของเลย์เอาต์วงจรรอสซิลเลเตอร์

การเขียนเลย์เอาต์วงจรรอสซิลเลเตอร์นั้นยังมีอุปสรรคหลายประการ เช่น โมเดลที่ใช้ในการ simulation ไม่สอดคล้องกับโปรแกรมเขียนเลย์เอาต์ Electric VLSI ทำให้เกิดปัญหาในการสร้างตัว MOS, Resistor, Capacitor และ BJT ไม่สามารถรันได้ แต่ก็ได้สร้างเป็นแบบจำลองขึ้นมา คือ เลย์เอาต์ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ ต้องแก้ปัญหานี้ต่อไป

5.2 อุปสรรคและปัญหา

- ในการ simulation วงจรรอสซิลเลเตอร์ พบปัญหาในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระแส เนื่องจากสูตรที่ใช้กันไม่สามารถคำนวณได้อย่างละเอียดกับวงจรรอสซิลเลเตอร์ จึงได้เป็นค่าที่ใกล้เคียงแทน
- เนื่องจากเป็นวงจรรอสซิลเลเตอร์ ทำให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงเกิดความถี่แทรกซ้อน ผลการคำนวณแรงดันไฟตรงจึงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย
- การชดเชยกระบวนการผลิตและอุณหภูมิ เป็นผลมาจากพารามิเตอร์ในโมเดล จึงไม่สามารถคำนวณอย่างละเอียดได้ ต้องอาศัยการ simulation เป็นดูแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้น
- การเขียนเลย์เอาต์วงจรรอสซิลเลเตอร์ยังไม่สามารถอ่านโมเดลได้ ต้องทำการแก้ไขโมเดลก่อน

5.3 ข้อเสนอแนะ

- ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสมการมีความสัมพันธ์กัน ถ้าไม่สามารถคำนวณละเอียดได้ ควรคำนึงถึงพารามิเตอร์ในสมการนั้นๆด้วย
- ควรจดบันทึกผลที่ได้ในแต่ละครั้งที่ simulation เพื่อนำมาเปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการชดเชยเสถียรภาพของวงจรรอสซิลเลเตอร์
- ควรศึกษาทฤษฎีพื้นฐานหรืองานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1.] รศ.ดร.วรากร เกษมสุวรรณ. (2553). การวิเคราะห์วงจรรวมซีมอสแบบแอนะล็อก. กรุงเทพมหานคร: มินิ เซอร์วิส ซัพพลาย
- [2.] <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp> , search “Process and temperature compensation in a 7- MHz CMOS clock oscillator”