

รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย
ประจำปี 2541



นาย ว้ดลภ สุระกำพลธร

Mr. Wanlop Surakamponorn

RCH

TK

๗๘๖๗

๖๔๔๗๘

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 40693

วัน, เดือน, ปี 19 ต.ค. 2544

b. 111086๗๘

i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรถานส์ลิเนียร์

Design of an arithmetical operations using characteristic of translinear circuits

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบวงจรทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรถานส์ลิเนียร์ วงจรที่ถูกสร้างขึ้นจะมีขนาดเล็ก การทำงานของวงจรไม่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิ กินกำลังงานต่ำและเนื่องจากวงจรมีการทำงานในโหมดของกระแสทำให้ต้องการศักดาจากภายนอกมีขนาดต่ำ เหมาะสมมากสำหรับการนำไปทำเป็นวงจรรวมและประยุกต์ใช้งานในการต่อร่วมกับวงจรอื่น ๆ ผลการทำงานของวงจรได้เปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎีกับการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE และการทดลองจริง ซึ่งปรากฏผลที่สอดคล้องกันและให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่ำ

This research presents the design of an arithmetical operations using characteristic of translinear circuit. The circuit requirements were based on PNP and NPN transistors. The conversion circuit exhibits the temperature-insensitive, low voltage and low power consumption due to its operation in current mode. The technique in this paper is suitable for implementing in bipolar integrated circuit form and it is easy to be modified to work with other circuits. The experiment results and the simulation results using PSPICE analogue simulation program analysis show that the properties of the circuit are in close agreement with the theoretical prediction.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่าในความต้องการที่จะสังเคราะห์วงจรทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เช่น วงจรคูณ วงจรหาร วงจรยกกำลัง หรือวงจรถอดราก วงจรดังกล่าวมักจะถูกสร้างขึ้นภายใต้การใช้งานของวงจรถอดการิทึม และวงจรถอดการิทึม (Logarithmic and Anti-logarithmic amplifiers) [1-2] ซึ่งพบว่าจากการออกแบบตามหลักการดังกล่าววงจรจะมีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีออปแอมป์เป็นส่วนประกอบ ใช้ศักดาจากภายนอกเพื่อไบอัสให้กับวงจรมีค่าสูง และที่สำคัญเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิถึงแม้จะมีวิธีการชดเชยผลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแล้วก็ตาม [1-2] วงจรก็ยังไม่สามารถลดผลของอุณหภูมิไปได้หมด อีกทั้งยังทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ขึ้นมากอีกด้วย ดังนั้นจากข้อเสียดังที่ได้กล่าวมาจึงได้นำเสนอแนวการออกแบบและสังเคราะห์วงจรทางคณิตศาสตร์แนวใหม่โดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรทรานส์ลิเนียร์ ซึ่งจะทำให้วงจรสามารถลดผลเสียต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาได้ทั้งสิ้นและวงจรยังมีขนาดเล็กมากซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เป็นแอคทีฟ (Active device) จำพวกไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (Bipolar transistor) เท่านั้น และปราศจากอุปกรณ์จำพวกพาสซีฟ (Passive device) ที่จะเกิดปัญหาทำให้วงจรไม่สามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้โดยง่าย ในการแสดงถึงการออกแบบและสังเคราะห์เป็นวงจรทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ได้แสดงการออกแบบเป็นวงจรถอดรากอันดับที่ n วงจรยกกำลังอันดับที่ n วงจรอินเวอร์ตสัญญาณ วงจรคูณและหาร และง่ายที่จะปรับปรุงเป็นรูปแบบวงจรทางคณิตอื่น ๆ ได้ตามต้องการโดยใช้การต่อลำดับ (Cascade) ของการสะท้อนกระแสที่เอาท์พุท (I_O) จากวงจรหนึ่งผ่านวงจรสะท้อนกระแส (Current mirror) ไปสู่กระแสอินพุท (I_{in}) อีกวงจรหนึ่งตามลำดับ ก็จะได้กระแสเอาท์พุท (I_O) ที่เกิดใหม่สอดคล้องกับรูปแบบวงจรทางคณิตศาสตร์ตามที่ต้องการ

2. วงจรทรานส์ลิเนียร์ (Translinear circuit) [3]

วงจรทรานส์ลิเนียร์เป็นวงจรที่ต้องการสัญญาณอินพุทและเอาท์พุทในรูปแบบของกระแสสัญญาณ ลักษณะสำคัญที่เห็นได้ชัดของวงจรประกอบไปด้วยกลุ่มของทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะถูกต่อเรียงกันเป็นลูป (Loop) ภายใต้รอยต่อสัปดาห์เบส-อิมิตเตอร์ (Base-emitter junction) จากรูปที่ 1 แสดงวงจรทรานส์ลิเนียร์ลูปที่ประกอบไปด้วยกลุ่มของทรานซิสเตอร์ NPN และ PNP

จากวงจรรูปที่ 1

$$V_{BE1} + V_{BE3} + \dots + V_{BE2n-1} = V_{BE2} + V_{BE4} + \dots + V_{BE2n} \quad (1)$$

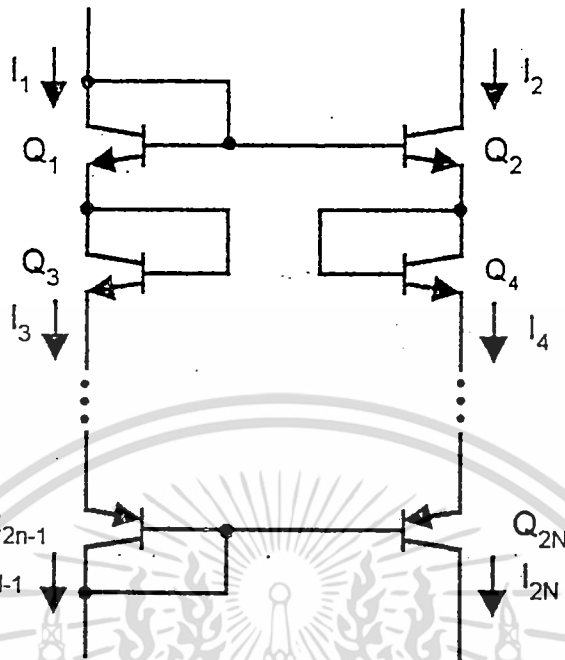
แต่ศักย์เบส-อิมิตเตอร์ (V_{BE}) ใด ๆ จะมีค่าเป็น

$$V_{BEi} = V_{Ti} \ln \frac{I_{Ci}}{I_{Si}} \quad (2)$$

เมื่อ V_T คือ เทอร์มอลโวลเตจ (Thermal Voltage) , I_C คือ กระแสคอลเลกเตอร์ (Collector current)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกานำไปใช้

และ I_s คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current)



รูปที่ 1 ลักษณะรูปแบบของวงจรทรานส์ลิเนียร์รูป

แทนสมการ (2) ใน (1) และกำหนดให้

$$V_{T1} = V_{T2} = V_{T3} = \dots = V_{Tn} = V_T$$

และ $I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = \dots = I_{Sn} = I_S$ จะได้

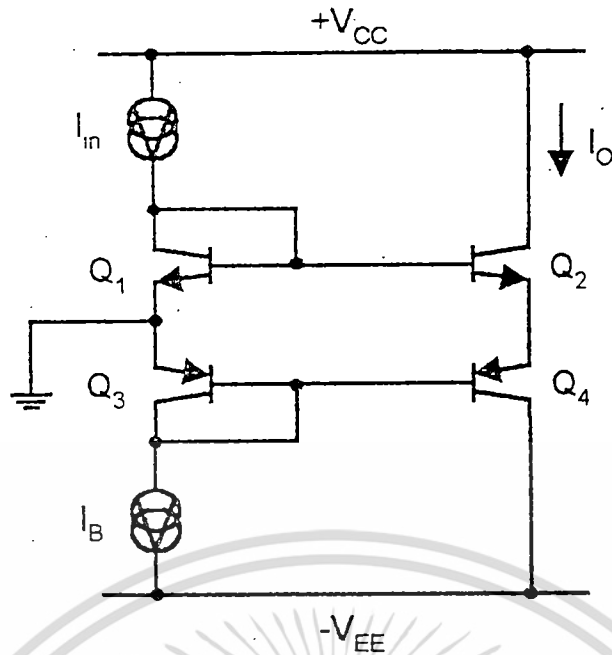
$$(I_{C1} I_{C3} I_{C5} = \dots I_{C2n-1}) = (I_{C2} I_{C4} I_{C6} \dots I_{C2n}) \quad (3)$$

จากสมการ (3) จะพบว่ารูปแบบของสมการที่เกิดขึ้น เป็นกลุ่มของผลคูณระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ที่เกิดจากคุณสมบัติของศักดาเบส-อิมิตเตอร์ซึ่งขวาวรวมกัน และค่าของสมการที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นกับผลของอุณหภูมิอีกด้วยซึ่งในการใช้งานของวงจรจะทำงานในรูปแบบของกระแสเท่านั้น (current-mode operation)

3. การประยุกต์ใช้งานวงจรทรานส์ลิเนียร์เพื่อออกแบบวงจรทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ

3.1 วงจรถอดรหัที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 วงจรออตครากที่ 2

จากรูปที่ 2 ถ้าป้อนกระแสอินพุตเข้ามายังขาคอลเลกเตอร์ของ Q_1 และกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสที่ I_B ณ กระแสคอลเลกเตอร์ของ Q_3 และกระแสเอาต์พุต I_o ที่เกิดขึ้นได้โดยเงื่อนไข $I_{C1} = I_{in}$, $I_{C3} = I_B$ และ $I_{C2} = I_{C4} = I_o$ และแทนค่าในสมการ (3) โดยพิจารณากระแสเฉพาะ I_{C1} ถึง I_{C4} เท่านั้นได้

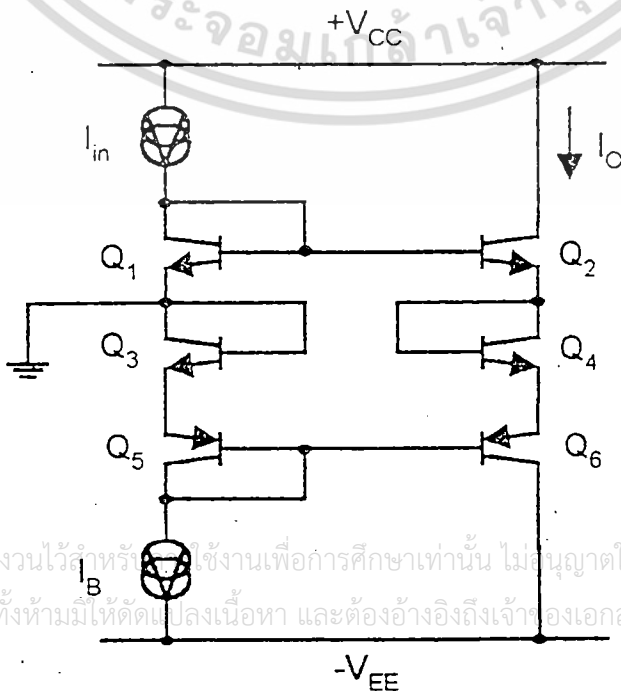
$$I_{in} \cdot I_B = I_o^2$$

หรือ

$$I_o = \sqrt{I_B \cdot I_{in}}$$

(4)

3.2 วงจรออตครากที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3 วงจรถอดรหักรายที่ 3

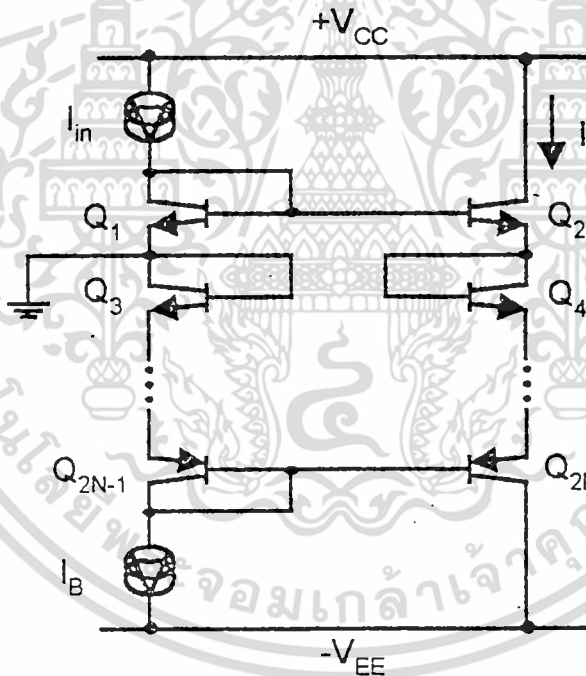
จากวงจรในรูปที่ 3 โดยใช้เงื่อนไขที่ว่า $I_{C1} = I_{in}$, $I_{C3} = I_{C5} = I_B$ และ $I_{C2} = I_{C4} = I_{C6} = I_O$ ทำการแทนลงในสมการ (3) โดยพิจารณากระแสเฉพาะ I_{C1} ถึง I_{C6} จะได้

$$I_{in} I_B^2 = I_O^3$$

หรือ

$$I_O = I_B^{2/3} \sqrt[3]{I_{in}} \tag{5}$$

3.3 วงจรถอดรหักรายที่ n



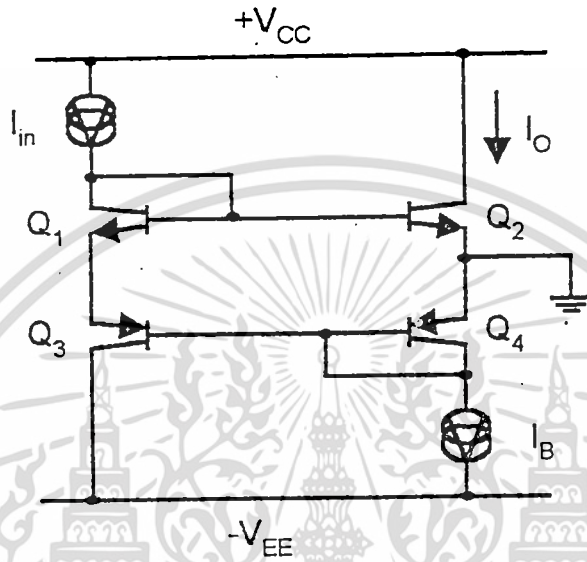
รูปที่ 4 วงจรถอดรหักรายที่ n

จากวงจรในรูปที่ 4 โดยใช้เงื่อนไขที่ว่า $I_{C1} = I_{in}$, $I_{C3} = I_{C5} = \dots = I_{C_{2n-1}} = I_B$ และ $I_{C2} = I_{C4} = \dots = I_{C_{2n}} = I_O$ ทำการแทนลงในสมการ (3) ได้

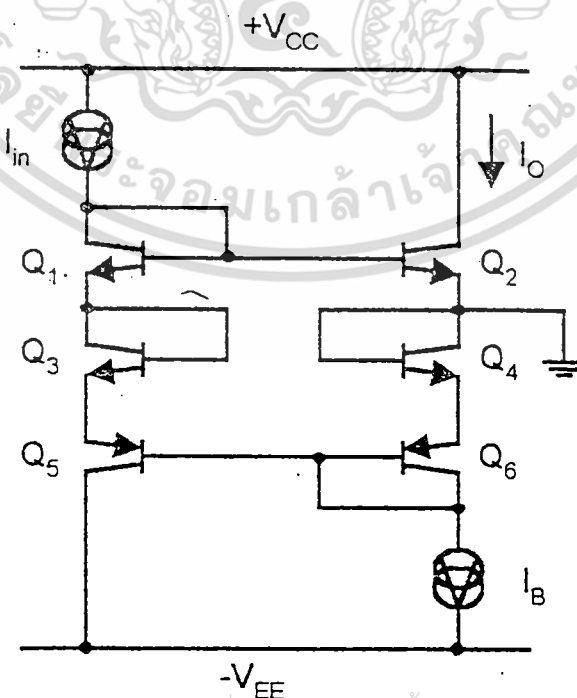
$$I_O = I_B^{(n-1)/n} \sqrt[n]{I_{in}} \tag{6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

3.4 วงจรยกกำลัง 2 และวงจรยกกำลัง 3



รูปที่ 5 วงจรยกกำลัง 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6 วงจรยกกำลัง 3

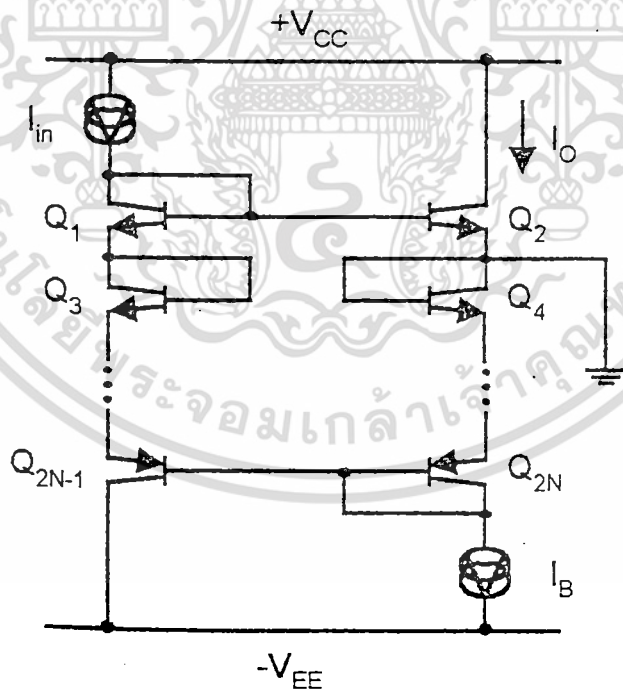
โดยอาศัยเงื่อนไข $I_{C1} = I_{C3} = I_{in}$, $I_{C4} = I_B$ และ $I_{C2} = I_O$ ในวงจรรูปที่ 5 และเงื่อนไขของ $I_{C1} = I_{C3} = I_{C5} = I_{in}$, $I_{C4} = I_{C6} = I_B$ และ $I_{C2} = I_O$ ในวงจรรูปที่ 6 แล้วแทนค่าลงในสมการ (3) จะได้วงจยกกำลังสองและวงจยกกำลังสาม ดังแสดงค่าสมการใน (7) และ (8) ตามลำดับ

$$I_O = \frac{2 I_{in}}{I_B} \quad (7)$$

และ

$$I_O = \frac{3 I_{in}}{2 I_B} \quad (8)$$

3.5 วงจยกกำลัง n



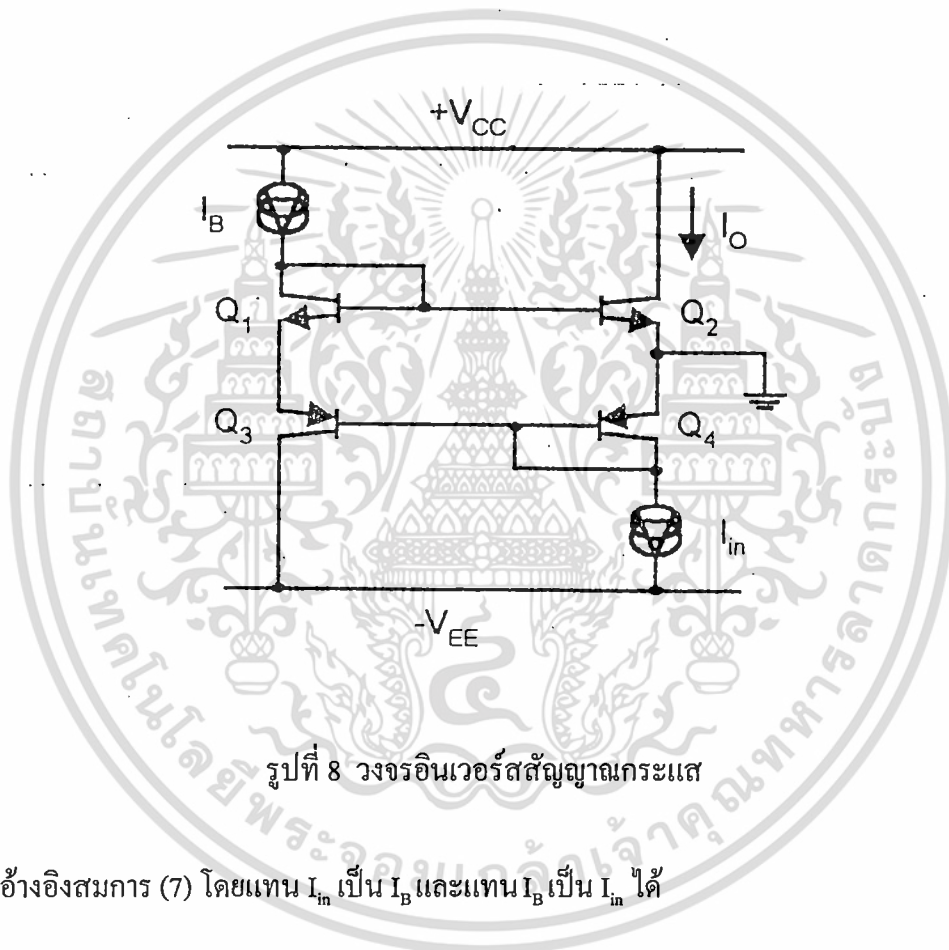
รูปที่ 7 วงจยกกำลัง n

จากวงจรในรูปที่ 7 โดยใช้เงื่อนไขที่ว่า $I_{C1} = I_{C3} = \dots = I_{C2n-1} = I_{in}$, $I_{C4} = I_{C6} = \dots = I_{C2n} = I_B$ และ $I_{C2} = I_O$ เอกสทำกัรแทนค่าลงในสมการ (3) ได้ ำรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_O = \frac{I_{in}^n}{I_B^{n-1}} \quad (9)$$

3.6 วงจรอินเวอร์ตสัญญาณกระแส

วงจรอินเวอร์ตสัญญาณนี้อาศัยหลักการทำงานจากวงจรกำลัง 2 จากรูปที่ 5 เพียงแต่จ่ายกระแส I_B เข้าไปแทน I_m และป้อนกระแส I_m เข้าที่ I_B ดังแสดงวงจรในรูปที่ 8



รูปที่ 8 วงจรอินเวอร์ตสัญญาณกระแส

ดังนั้นอ้างอิงสมการ (7) โดยแทน I_m เป็น I_B และแทน I_B เป็น I_m ได้

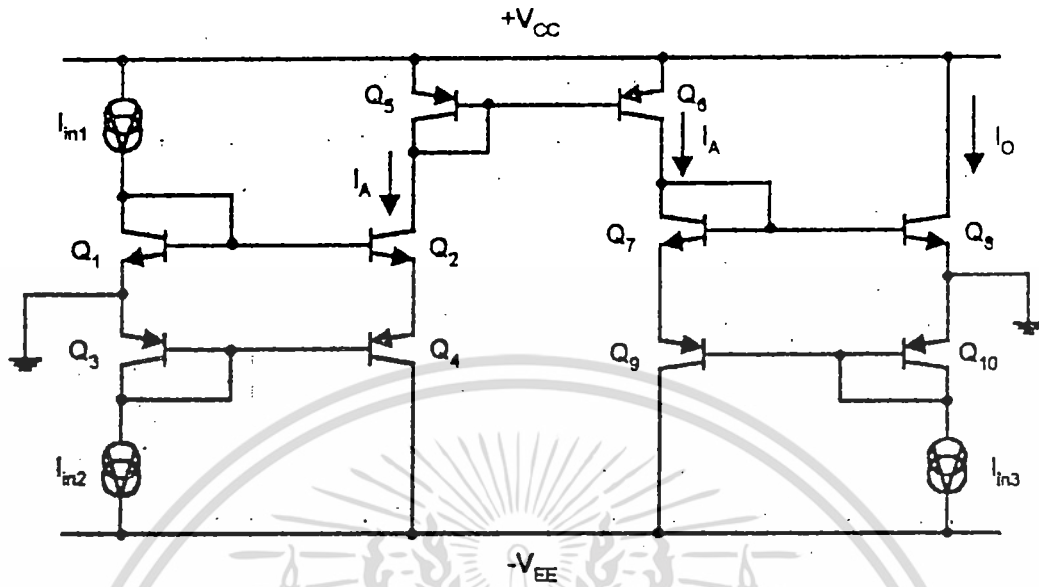
$$I_O = \frac{2 I_B}{I_{in}} \quad (10)$$

3.7 วงจรคูณและหารสัญญาณกระแส

การออกแบบวงจรทำได้โดยง่ายโดยที่ Q_1 ถึง Q_4 เป็นวงจรที่มีการทำงานเป็นวงจรถอดรอกที่ 2 ซึ่งมีรูปแบบเหมือนกับวงจรในรูปที่ 2 ดังนั้นอ้างอิงจากสมการ (4) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_A = \sqrt{I_{in1} I_{in2}} \quad (11)$$



รูปที่ 9 วงจรคูณและหารสัญญาณกระแส

จากนั้นกระแส I_A จะถูกสะท้อนกระแสผ่านวงจรสะท้อนกระแส Q_5 ถึง Q_6 เพื่อใช้เป็นกระแสอินพุทให้กับวงจร Q_7 ถึง Q_{10} ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรยกกำลัง 2 ซึ่งมีรูปแบบเช่นเดียวกับวงจรในรูปที่ 5 ดังนั้นอ้างอิงจากสมการ (7) จะได้ว่า

$$I_O = \frac{I_A^2}{I_{in3}} \quad (12)$$

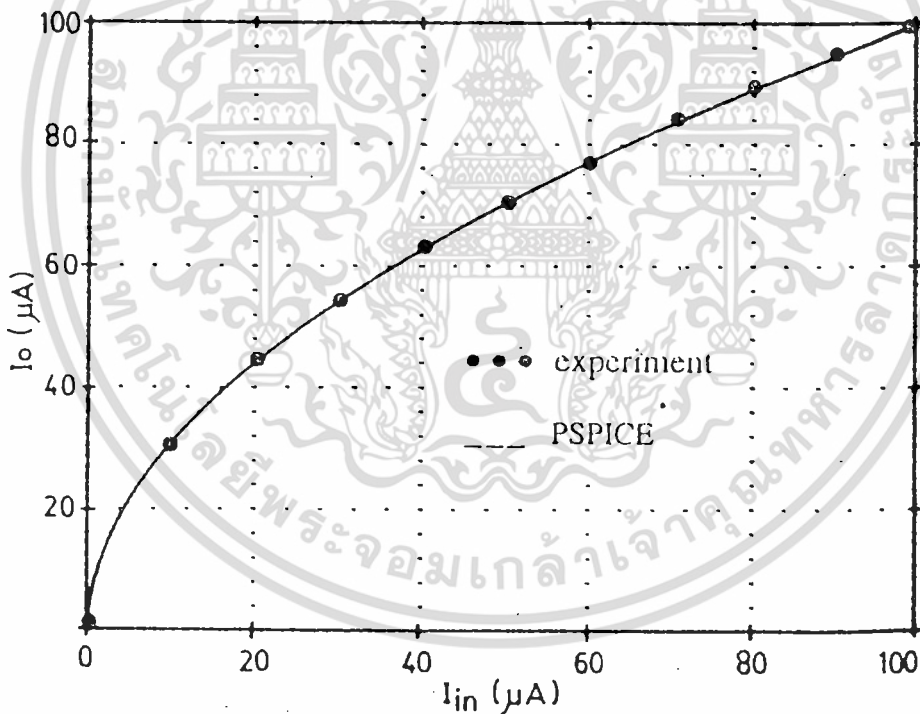
แทนสมการ (11) ใน (12) จะได้ว่า

$$I_O = \frac{I_{in1} \cdot I_{in2}}{I_{in3}} \quad (13)$$

4. ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม PSPICE และการทดลองต่อวงจรจริง

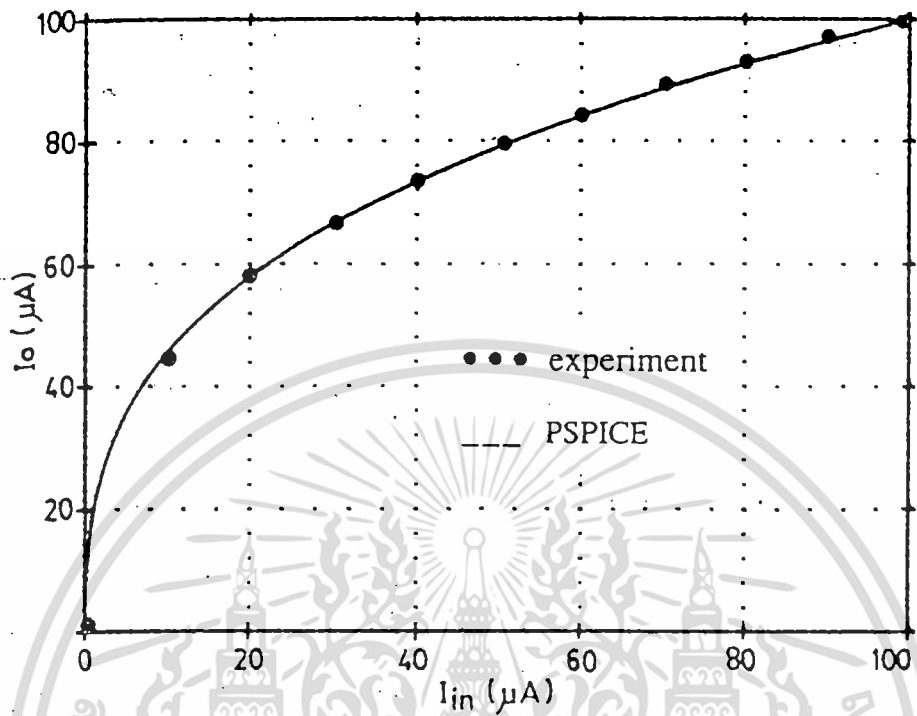
ในการเลียนแบบการทำงานของวงจรซึ่งจะพบว่าวงจรมีขนาดเล็กและประกอบด้วยอุปกรณ์จำพวกแอกทิฟที่เป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และชนิด PNP รวมอยู่กับแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_B ดังนั้นในการเลียนแบบการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN นั้นการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PNP จะใช้โมเดลของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 และ 2N3906 ที่มีอยู่ภายในไฟล์ QNOM.LIB ภายใน PSPICE อยู่แล้วและแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_B จะกำหนดให้เท่ากับ $100 \mu A$ เสมอ ส่วนในการต่อวงจรจริงไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP จะได้จาก IC # CA3096 ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วย NPN 3 ตัว และ PNP 2 ตัว ซึ่งง่ายมากในงานใช้งาน และยังคงมีความสมพียงกันอีกด้วย ดังนั้นในการเขียนแบบการทำงานโดยใช้ PSPICE และต่อวงจรจริงในวงจรรูปที่ 2, รูปที่ 3, รูปที่ 5, รูปที่ 6 และรูปที่ 8 จะใช้แหล่งจ่ายไฟตรง $+V_{CC}$ และ $-V_{EE}$ เท่ากับ $+1.5 V$ และ $-1.5 V$ ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 10, รูปที่ 11, รูปที่ 12, รูปที่ 13 และรูปที่ 14 ตามลำดับ ส่วนวงจรในรูปที่ 9 จะทดลองเขียนแบบวงจรและทดลองจริงโดยครั้งแรกให้ $I_{in2} = I_B, I_{in3} = I_B$ แล้วแปร I_{in1} จาก $0 \mu A$ จนถึง $100 \mu A$ ดังนั้น $I_o = I_{in1}$ และครั้งที่สองให้ $I_{in1} = I_{in2} = I_B$ แล้วแปร I_{in3} จาก $10 \mu A$ จนถึง $100 \mu A$ ดังนั้น $I_o = I_B^2 / I_{in3}$ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 15(a) และ 15(b) ตามลำดับ

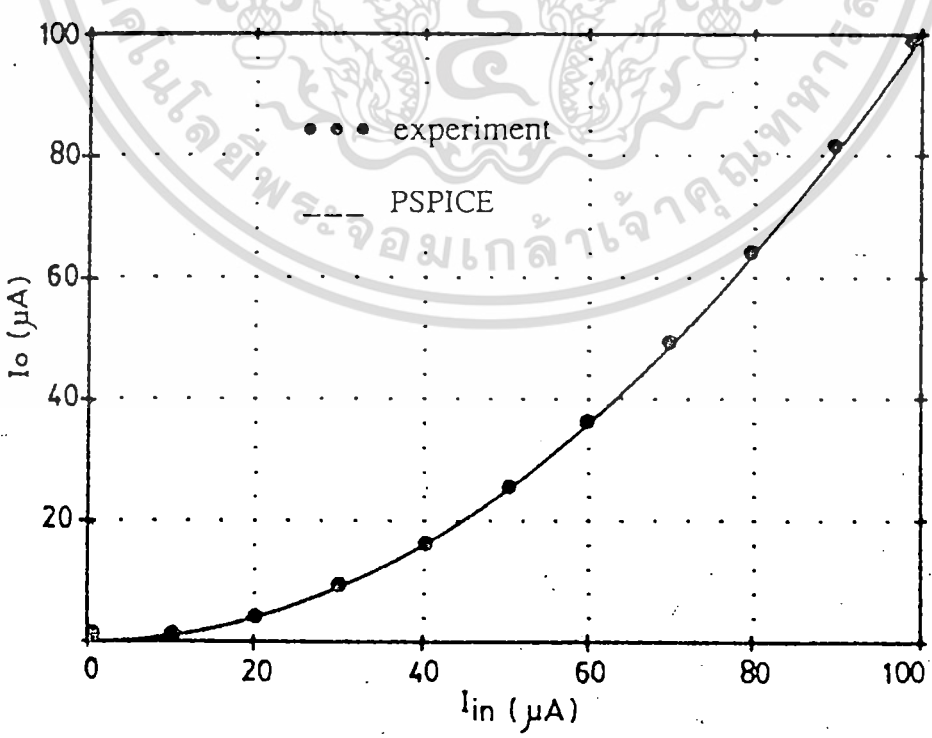


รูปที่ 10 ผลของวงจรถอดรหักรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

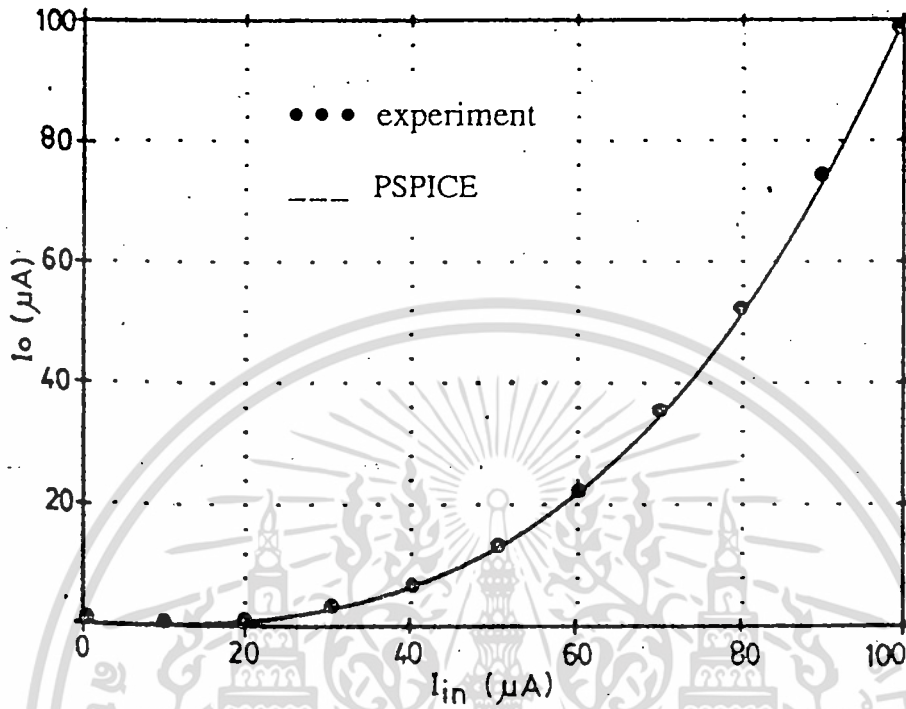


รูปที่ 11 ผลของวงจรถอดรอกที่ 3

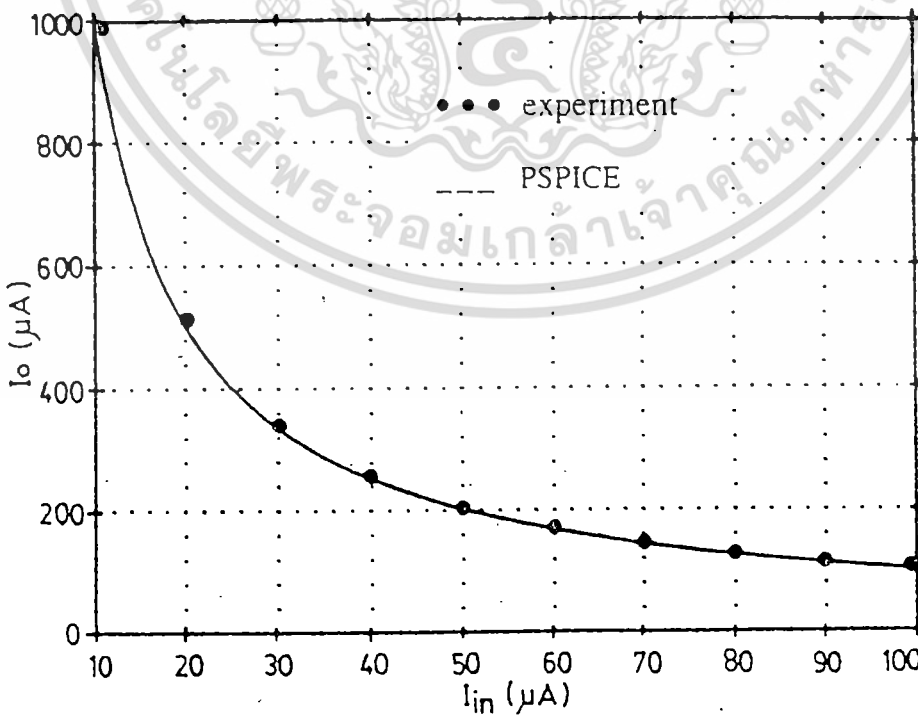


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 12 ผลของวงจรยกกำลัง 2

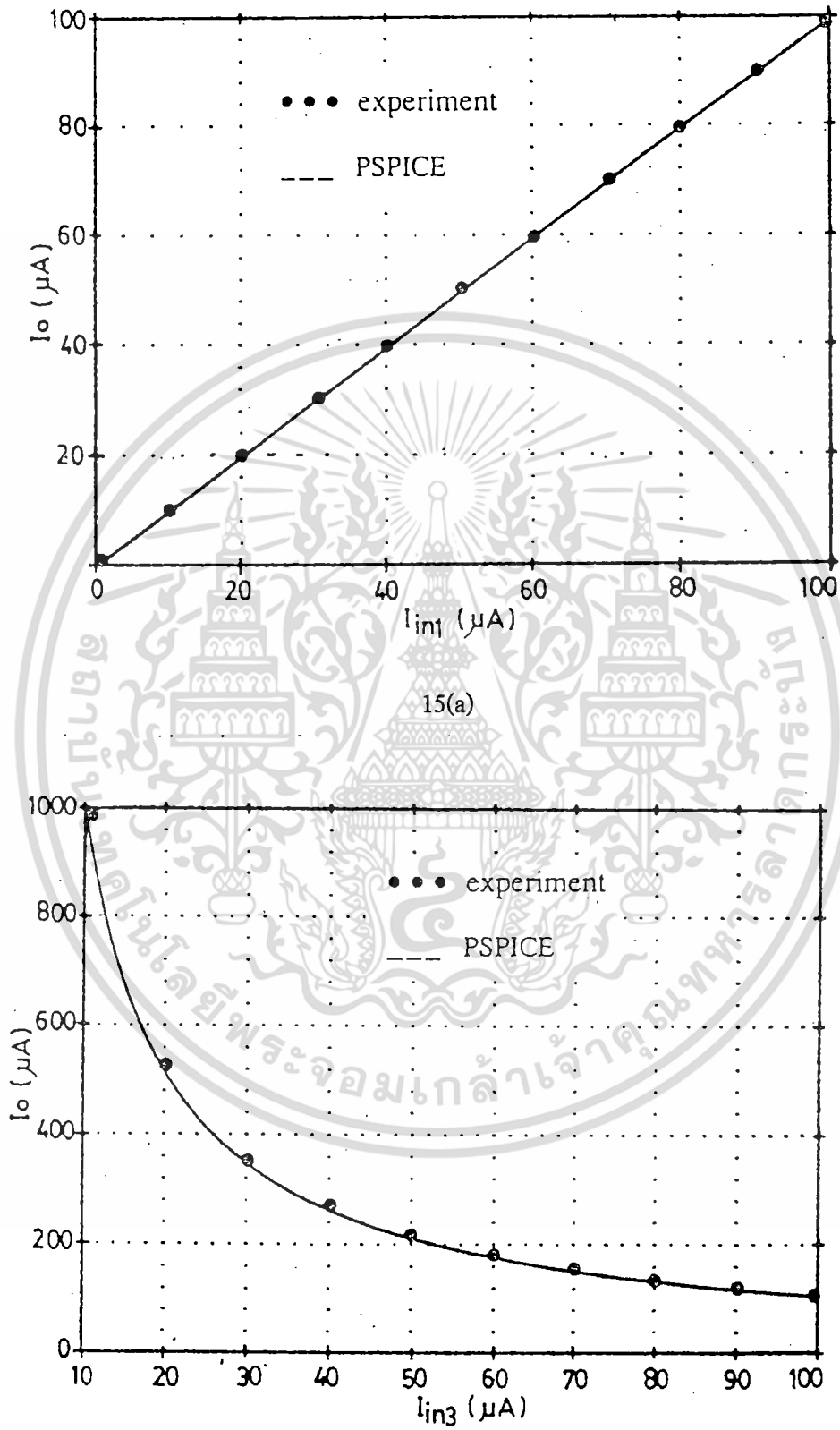


รูปที่ 13 ผลของวงจรยกกำลัง 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 14 ผลวงจรอินเวอร์ตสัญญาณกระแส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 15 ผลของวงจรถูกและหารสัญญาณกระแส

5. บทสรุป

จากหลักการของวงจรที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงการออกแบบและสังเคราะห์วงจรทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ โดยอาศัยคุณสมบัติของวงจรถานส์ลิเนียร์ วงจรมีความง่ายและขนาดเล็กสามารถที่จะปรับปรุงให้มีรูปแบบที่เป็นวงจรถานส์ลิเนียร์อื่น ๆ ได้อีกมากมายไม่จำกัด ดังตัวอย่างในหัวข้อ 3.7 เป็นต้นเป็นตัวอย่างหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์เอาวงจรถานส์ลิเนียร์ที่ 2 และวงจรถานส์ลิเนียร์ที่ 2 เพื่อมาประกอบรวมกันและออกแบบเป็นวงจรถูกและหารสัญญาณกระแสได้เป็นอย่างดี และสิ่งที่ได้กล่าวมาข้างต้นซึ่งวงจรประกอบไปด้วยกลุ่มของอุปกรณ์จำพวกแอมพลิฟิเคชันนั้น ใช้แหล่งจ่ายไฟตรง $+V_{CC}$ และ $-V_{EE}$ ค่า ตลอดจนการทำงานของวงจรไม่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังนั้นวงจรที่นำเสนอ น่าจะเป็นวงจรหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจและการนำไปประยุกต์ใช้งานมากขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. J. Plyton and Walsh ; Analog Electronics with Op - Amps, Source Book of Practical Circuits, Cambridge, U.K. ; Cambridge University Press, 1993.
- [2] S. Franco, Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, New York : Mc Graw-Hill, 1988.
- [3] B. Gilbert, " Translinear circuits : A Proposed classification," Electron. Lett., vol. 11, pp. 14-16, 1975.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้