

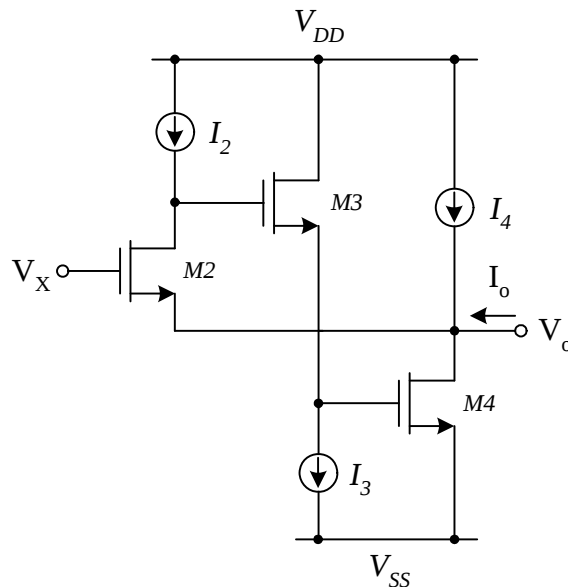
## บทที่ 5

### วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุด

#### 5.1. บทนำ

บทที่ 4 ที่ผ่านมามีได้นำเสนอวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดแบบหลายเอาต์พุต โดยใช้หลักการที่เหมือนกับที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดจึงสามารถนำเสนอในบทที่ 5 วงจรที่นำเสนอสร้างจากวงจรแบบ Winner Take All ดังนั้นจึงสามารถมีอินพุตได้  $n$  อินพุตโดยไม่เกิดการหน่วงสัญญาณเช่นเดียวกับวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด วงจรสร้างขึ้นจากวงจรเลื่อนระดับแรงดันและใช้การป้อนกลับกระแสทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำ วงจรเลื่อนระดับแรงดันที่ป้อนกลับกระแสเพื่อช่วยทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ต่ำนี้จะเรียกว่า วงจรกันชนป้อนกลับกระแส วงจรที่นำเสนอมีคุณสมบัติ มีความแม่นยำ โครงสร้างไม่ซับซ้อน มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมากและใช้แหล่งจ่ายแรงดันต่ำ

#### 5.2. หลักการและวงจรที่นำเสนอ



รูปที่ 5.1 วงจรกันชนป้อนกลับกระแส

รูปที่ 5.1 แสดงวงจรกันชนป้อนกลับกระแสที่จะใช้เป็นวงจรพื้นฐานเพื่อสร้างวงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุด วงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_2$   $I_3$   $I_4$  และทรานซิสเตอร์ M2 M3 M4

ทรานซิสเตอร์ M3 M4 และ  $I_3$  ทำงานเป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดันเพื่อกลับสถานะทางส่วนเอาต์พุต จากวงจรในรูปที่ 5.1 แรงดัน  $V_x$  ถูกป้อนเข้าที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์ M2 และเอาต์พุตออกที่ขาซอร์สของตัวมัน ถ้าสมมติว่ามอสทรานซิสเตอร์ M2 ทำงานในย่านอิ่มตัว สมการกระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์ M2 สามารถกำหนดได้คือ

$$I_{D2} = K_P (V_{GS2} - V_{T2})^2 \quad (5.1)$$

โดยที่  $K_P = 0.5\mu_p C_{OX}(W/L)$   $V_{TH2}$  คือค่าแรงดันเทรชโฮลด์ และ  $\mu_p$  คือค่าสภาพคล่องตัวของพาหะที่ผิวบริเวณแชนแนลของมอสทรานซิสเตอร์ M2 จากวงจรในรูปที่ 5.1 ค่า  $V_{GS2} = V_x - V_o$  และ  $I_{D2} = I_2$  ดังนั้นจากสมการที่ (5.1) แรงดันเอาต์พุตสามารถกำหนดได้คือ

$$V_o = V_x - \sqrt{\frac{I_2}{K_2}} - V_{T2} \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (5.2) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 5.1 มีค่าพจน์ที่เป็นแรงดัน DC ประกอบอยู่ซึ่งเป็นผลให้แรงดันเอาต์พุตไม่เท่ากับอินพุต ซึ่งค่าแรงดัน DC นี้สามารถหักล้างทิ้งไปด้วยวงจรเลื่อนระดับแรงดันที่แสดงดังรูปที่ 5.2 จากวงจรในรูปที่ 5.2 M1 เป็นมอสทรานซิสเตอร์ชนิด P ซึ่งสมการกำหนดได้คือ

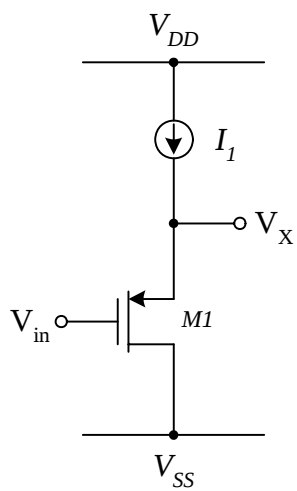
$$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - |V_{T1}|)^2 \quad (5.3)$$

เมื่อ  $V_{GS1} = V_x - V_{in}$  และ  $I_{D1} = I_1$  สมการที่ (5.4) เขียนใหม่ได้คือ

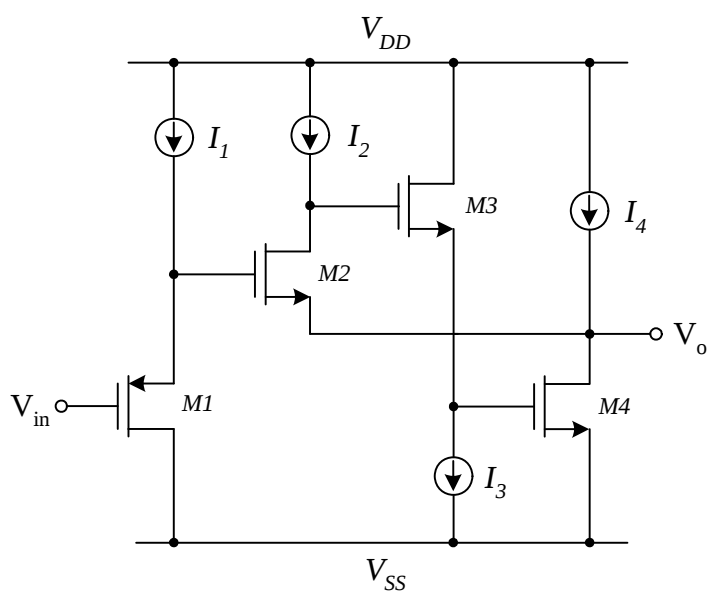
$$V_x = V_{in} + \sqrt{\frac{I_1}{K_1}} + |V_{T1}| \quad (5.4)$$

วงจรในรูปที่ 5.2 คือวงจรเลื่อนระดับแรงดันที่นำมาชดเชยแรงดันออฟเซตวงจรในรูปที่ 5.1 ดังนั้นเมื่อนำวงจรในรูปที่ 5.1 มาต่อที่เอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 5.2 จะได้วงจรวงจรดังรูปที่ 5.3 สมการแรงดันเอาต์พุตเขียนได้คือ

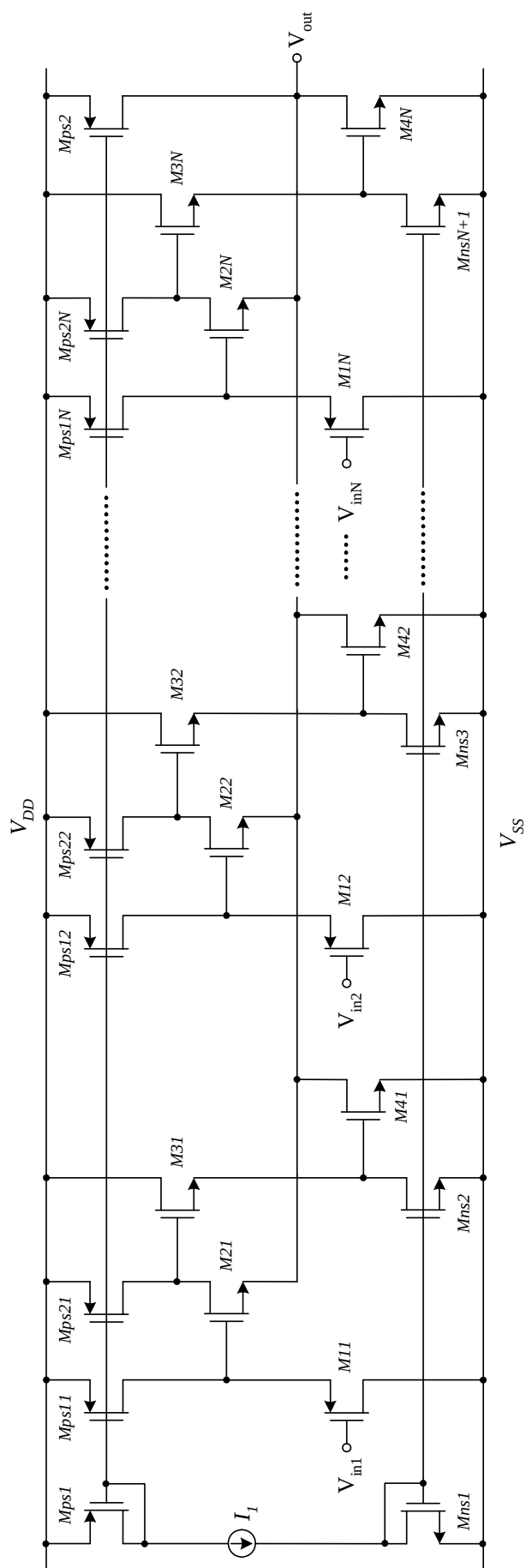
$$V_o = V_{S2} = V_{in} + \sqrt{\frac{I_1}{K_1}} + |V_{T1}| - \sqrt{\frac{I_2}{K_2}} - V_{T2} \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.2 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน



รูปที่ 5.3 วงจรกันชนป้อนกลับกระแสสำหรับวงจรตรวจับค่าแรงดันต่ำสุด



รูปที่ 5.4 วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดที่สมบูรณ์ที่นำเสนอ

ถ้ากำหนดให้

$$\sqrt{\frac{I_2}{K_2}} + V_{T2} = \sqrt{\frac{I_1}{K_1}} + |V_{T1}| \quad (5.6)$$

สมการที่ (5.5) จะมีค่าเท่ากับ

$$V_o = V_{in} \quad (5.7)$$

จากสมการที่ (5.7) สามารถแสดงได้ว่าวงจรในรูปที่ 5.3 คือวงจรกันชนที่ใช้การป้อนกลับกระแส เพื่อให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำ วงจรกันชนป้อนกลับกระแสใช้วงจรจลนระดับแรงมาทำการหักล้างค่าคงที่เช่น ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ ค่าแรงดันเทรชโฮลด์ ของมอสทรานซิสเตอร์ ดังนั้นจากสมการที่ (5.6) จึงสามารถแสดงได้ว่า  $V_o = V_{in}$  นอกจากนั้นสมการที่ (5.7) ยังสามารถแสดงได้ว่าวงจรในรูปที่ 5.3 ไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอีกด้วยเพราะปราศจากค่าทรานส์คอนดักแตนซ์และแรงดันเทรชโฮลด์ของมอสทรานซิสเตอร์รวมอยู่ในสมการ

เมื่อใช้วงจรกันชนป้อนกลับกระแสที่แสดงในรูปที่ 5.3 วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 วงจรที่นำเสนอสามารถมีอินพุตได้  $n$  อินพุตโดยใช้วงจรในรูปที่ 5.3 มาต่อในลักษณะขนานกัน ถ้าอินพุตใดมีค่าน้อยที่สุดทรานซิสเตอร์ M1 ของอินพุตชุดนั้นจะนำกระแส ทำให้แรงดันที่เอาต์พุต  $V_o$  มีค่าเท่ากับอินพุตที่น้อยที่สุด กระแส  $I_{out}$  จะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน M1 ของชุดที่นำกระแส จากวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 5.4 สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$V_{out} = \text{Min}(V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{inN}) \quad (5.8)$$

จากสมการที่ (5.8) จะสามารถสรุปได้ว่าวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 5.4 คือวงจรตรวจจับค่าต่ำสุดที่มี  $n$  อินพุต นอกจากนี้วงจรที่นำเสนอยังไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอีกด้วย

### 5.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจร

วงจรที่จะนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นวงจรกันชนป้อนกลับกระแสที่ใช้เป็นอินพุตของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่นำเสนอในรูปที่ 5.4 โดยเลือกเอาเพียง 1 ชุดอินพุตเท่านั้นมาวิเคราะห์ ถ้าสมมุติว่าทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในย่านอิ่มตัวและใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสามารถหาได้ดังนี้



$$g_{d4}=5.01\times 10^{-4}\text{ A/V}$$

$$g_{m2}=1.38\times 10^{-3}\text{ A/V}$$

$$g_{m5}=1.38\times 10^{-3}\text{ A/V}$$

$$g_{m12}=7.28\times 10^{-4}\text{ A/V}$$

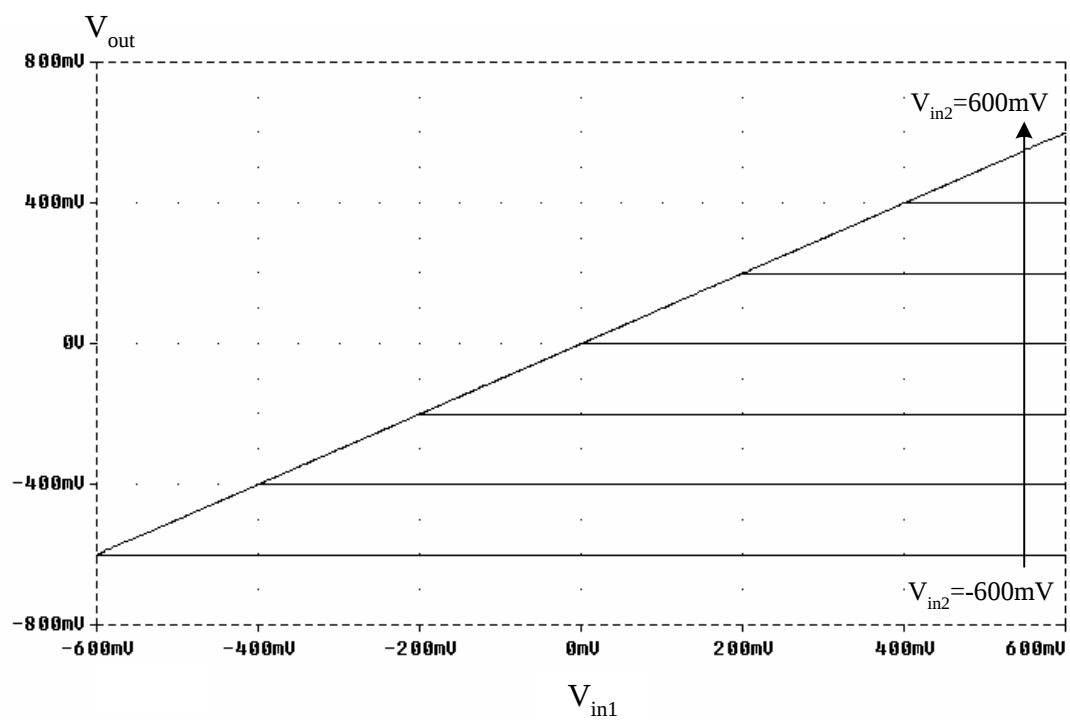
ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่ขั้วเอาต์พุตประมาณ  $40\Omega$

#### 5.4 ผลการเลียนแบบการทำงาน

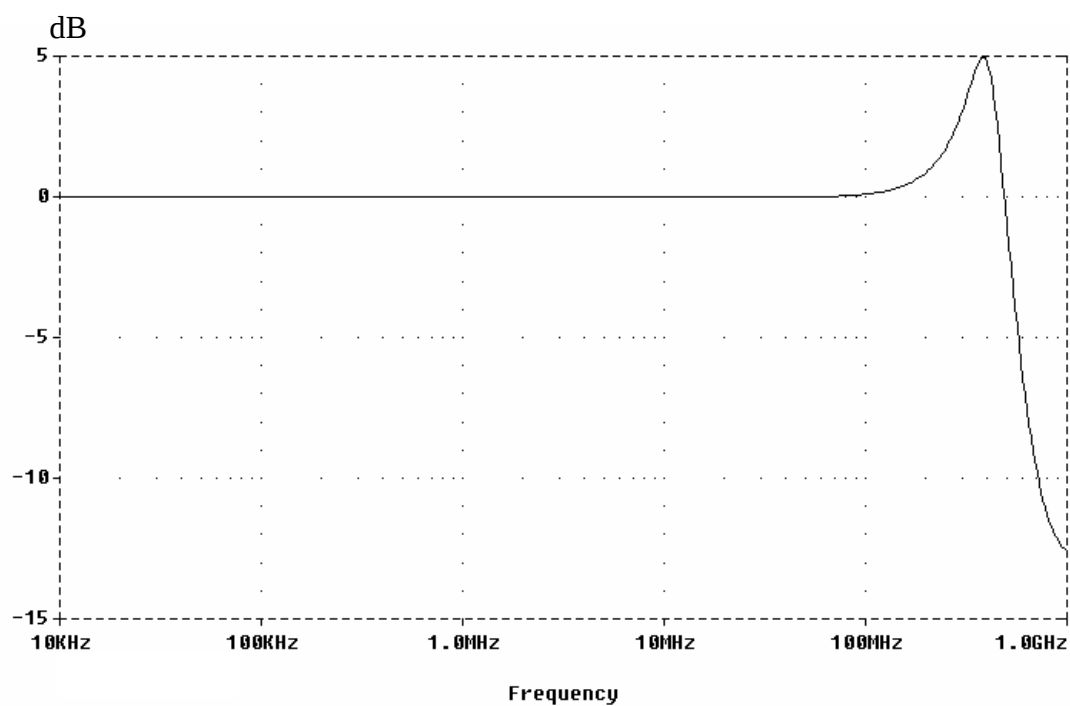
วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดที่นำเสนอในรูปที่ 5.4 จะถูกนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice เพื่อตรวจสอบการทำงานและประสิทธิภาพโดยใช้พารามิเตอร์ขนาด  $0.5\mu\text{m}$  ของ MIETEC กำหนดแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{DD}=-V_{SS}=1.5\text{V}$  แหล่งจ่ายกระแสคงที่  $I_1=60\mu\text{A}$  เนื่องจากวงจรในรูปที่ 5.4 ใช้วงจรในรูปที่ 5.3 มาต่อแบบขนานกัน ค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ของอินพุตชุดที่ 1 จะเหมือนกับชุดที่ 2 หรือชุดต่อไป ดังนั้นค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ชุดที่ 1 จะเหมือนกับชุดที่ 2 หรือชุดต่อไปด้วย ซึ่งค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ชุดที่ 1 ในวงจรที่ 5.4 กำหนดได้ดังตารางที่ 5.1 สำหรับวงจรตรวจจับค่าสูงสุด 2 อินพุตและ 3 อินพุต กำหนดค่า Mps2 เท่ากับ  $200\mu\text{m}/2\mu\text{m}$  และ  $300\mu\text{m}/2\mu\text{m}$  ตามลำดับ ทรานซิสเตอร์ Mps2 จะทำหน้าที่จ่ายกระแส ดังนั้นถ้าต้องการกระแสจำนวนมากเพื่อขับโหลดจึงสามารถทำได้โดยการเพิ่มค่า W/L ของ Mps2

ตารางที่ 5.1 ค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์

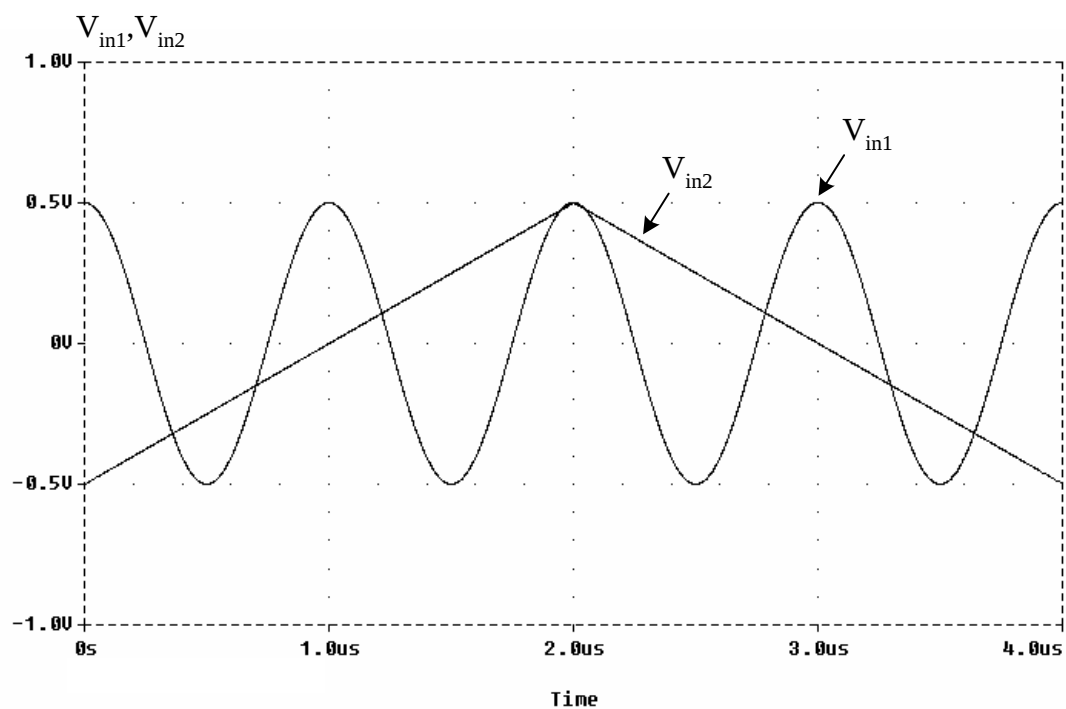
| มอสทรานซิสเตอร์ | ขนาด W/L( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ) |
|-----------------|---------------------------------------|
| M11, M21, M31   | 20/1                                  |
| M41             | 100/1                                 |
| Mns1            | 300/1                                 |
| Mns2            | 50/1                                  |
| Mps1            | 100/1                                 |
| Mps11           | 300/1                                 |
| Mps11           | 50/1                                  |



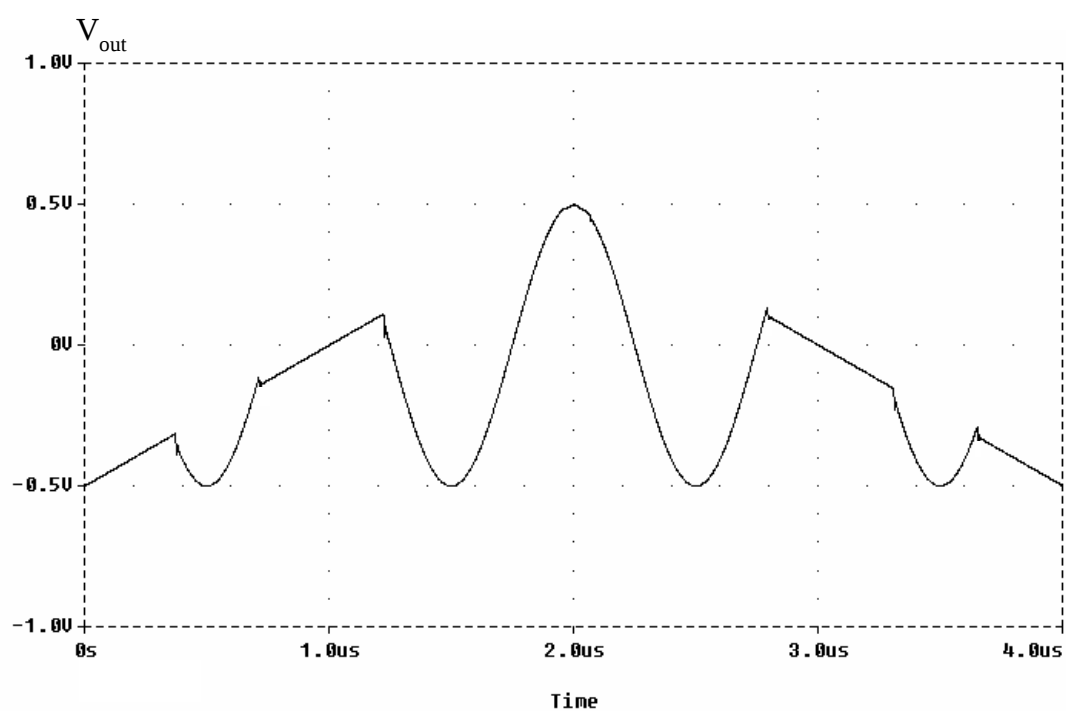
รูปที่ 5.6 คุณสมบัติทาง DC ของวงจรตรวจจับค่าต่ำสุด



รูปที่ 5.7 การตอบสนองความถี่ของวงจร

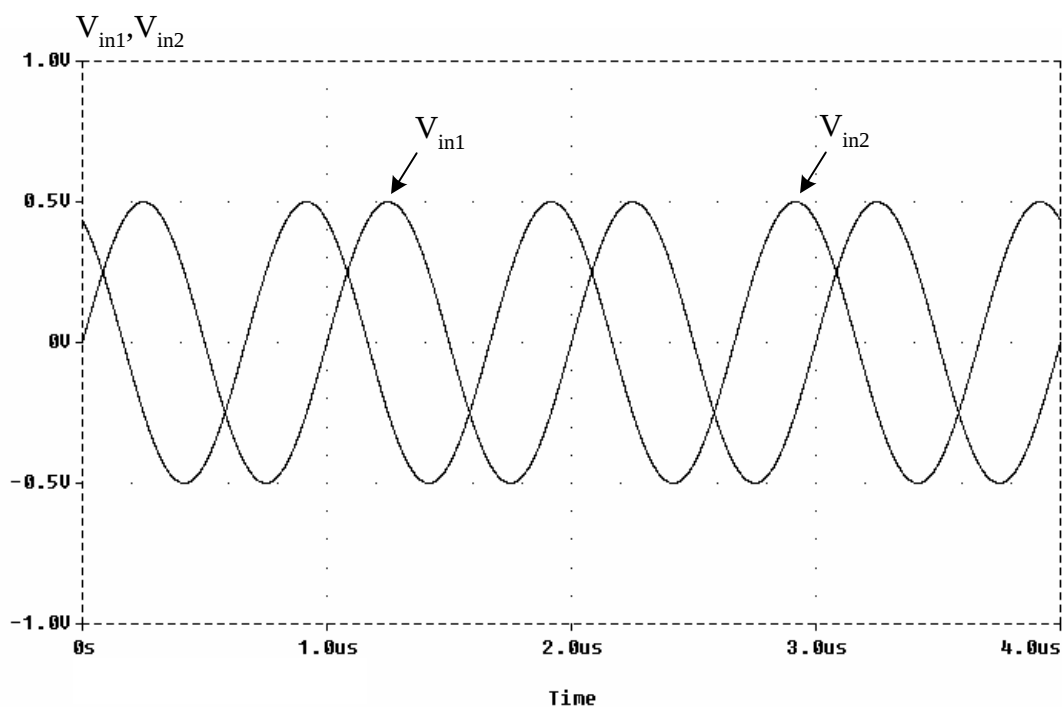


(ก)

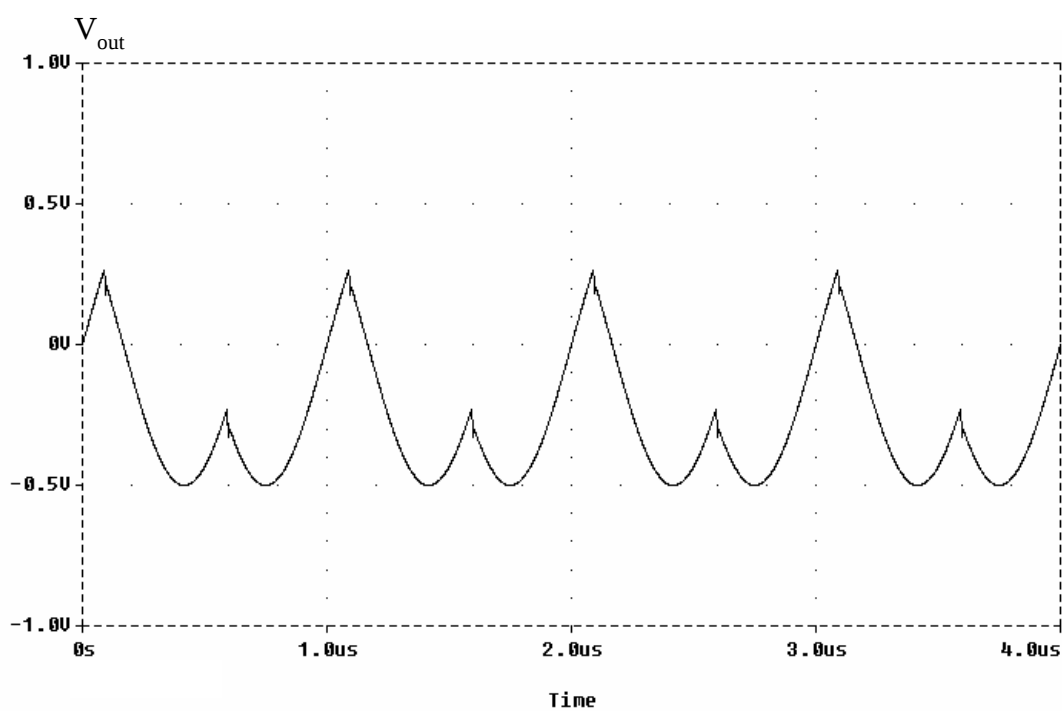


(ข)

รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุด 2 อินพุต (ก) อินพุต  $V_{in1}$  และ  $V_{in2}$  ขนาด  $1V_{p-p}$  ความถี่ 1MHz และ 250kHz ตามลำดับ (ข) เอาท์พุท

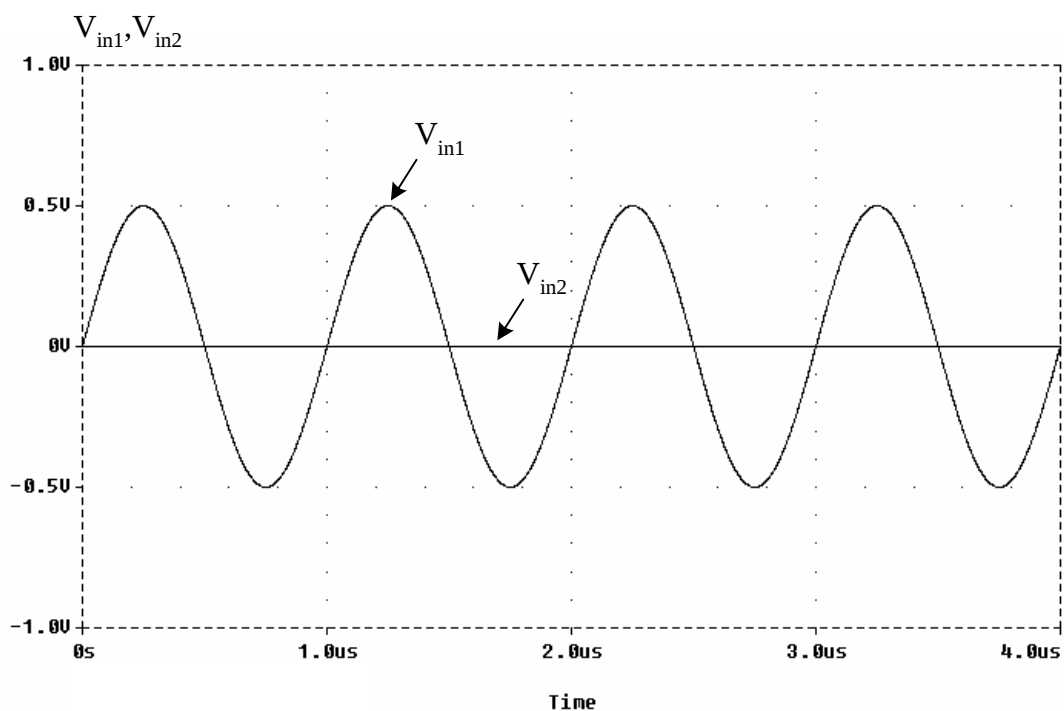


(ก)

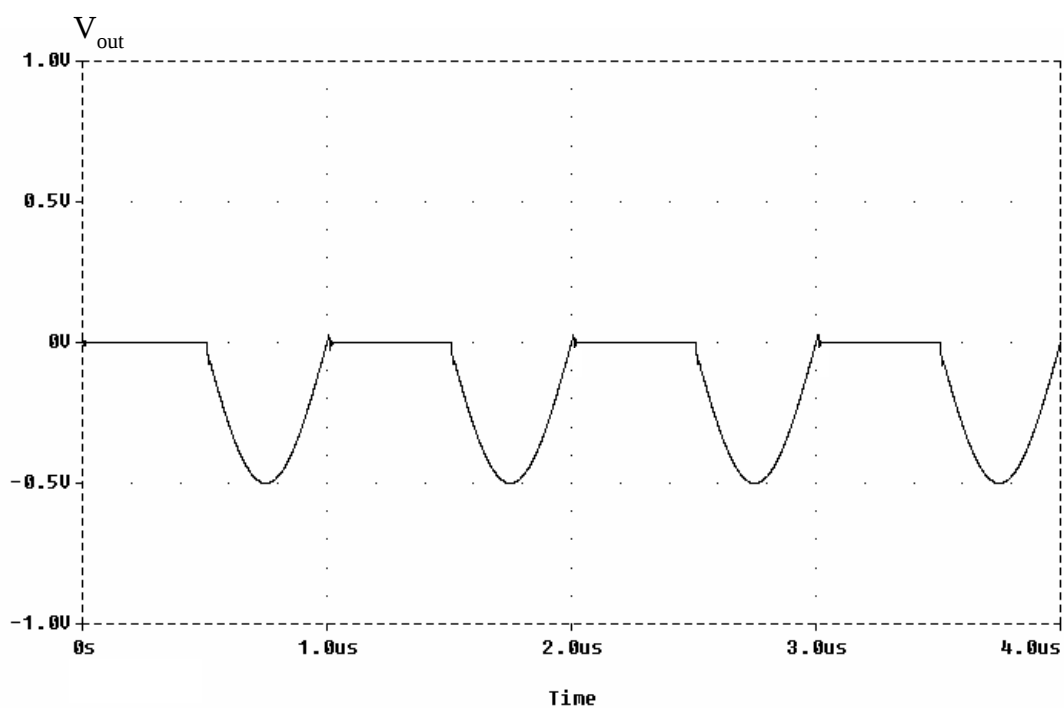


(ข)

รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการทำงานของวงจรจับค่าแรงดันต่ำสุด 2 อินพุตที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา (ก) อินพุต  $V_{in1}$  และ  $V_{in2}$  ขนาด  $1V_{p-p}$  ความถี่ 1MHz (ข) เอาท์พุท

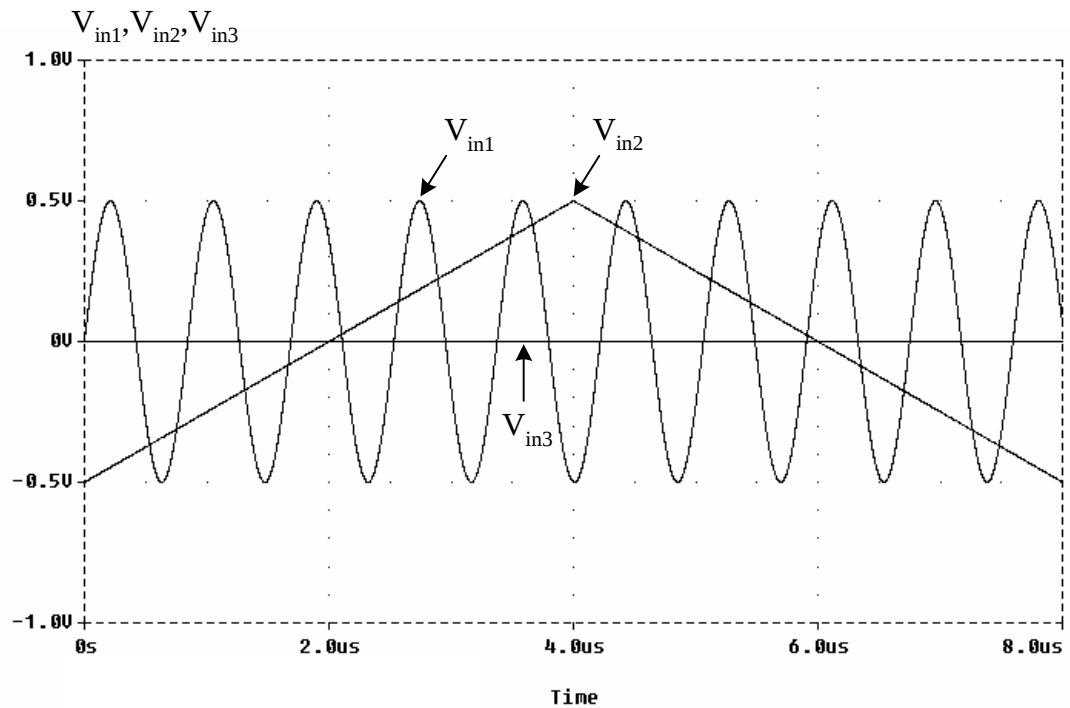


(ก)

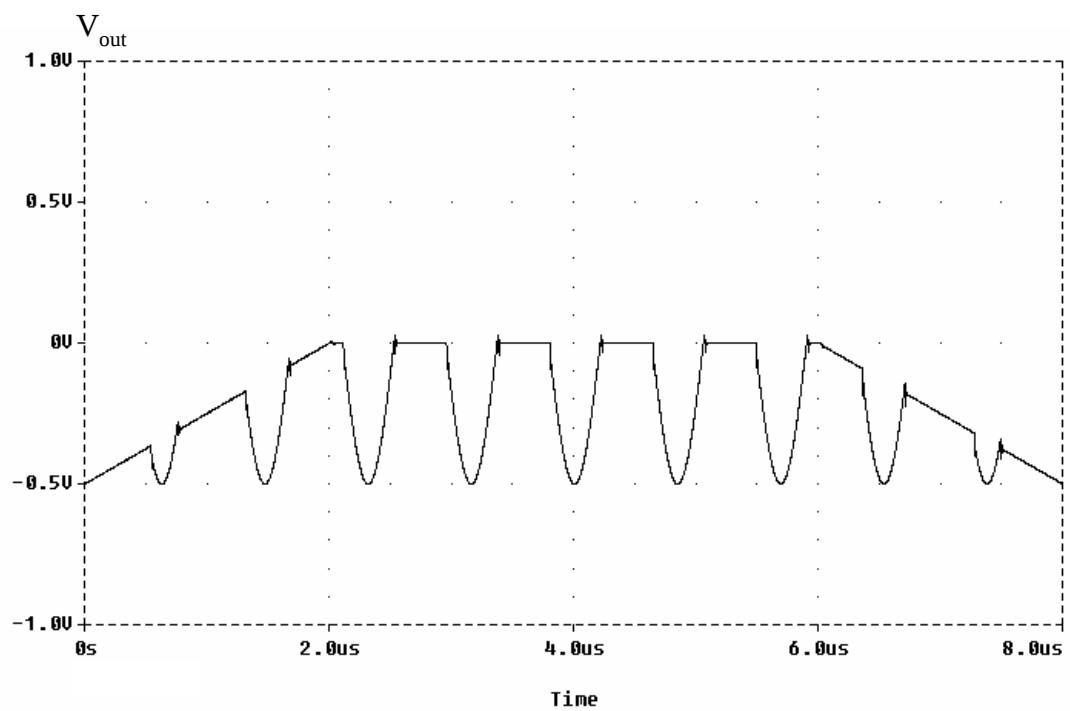


(ข)

รูปที่ 5.10 ผลการจำลองการทำงานของวงจรจับค่าแรงดันต่ำสุด 2 อินพุต สำหรับกรณีอินพุต  $V_{in1}$  ขนาด  $1V_{P-P}$  ความถี่ 1MHz และ  $V_{in2}=0$  (ก) อินพุต (ข) เอาท์พุต

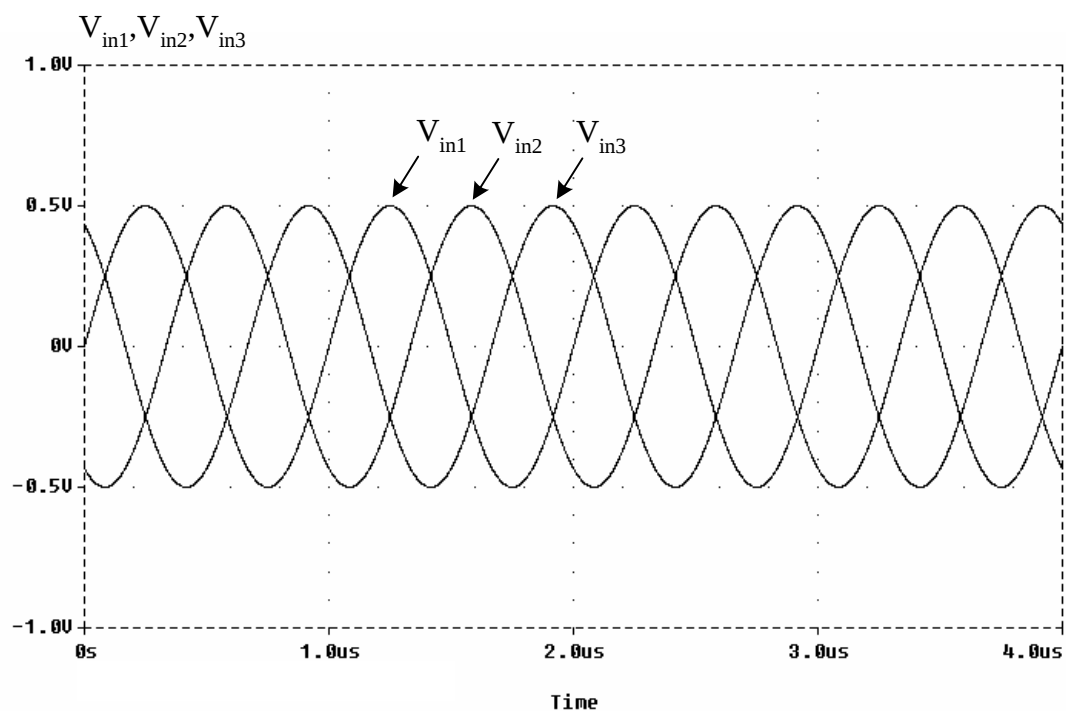


(ก)

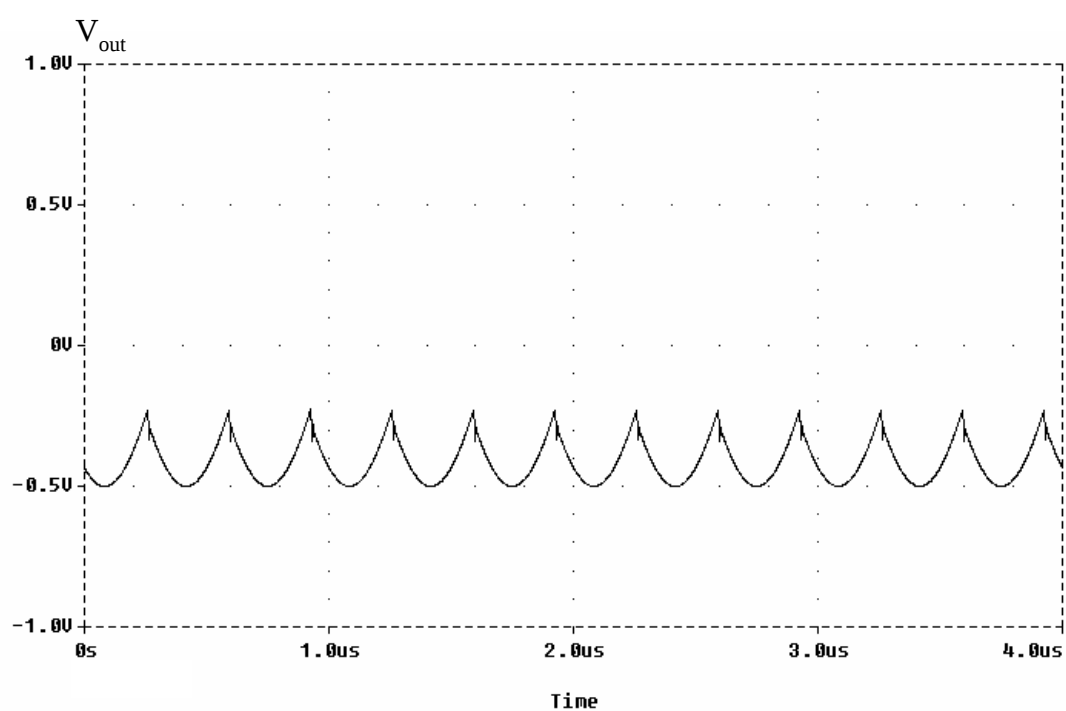


(ข)

รูปที่ 5.11 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุด 3 อินพุต สำหรับอินพุต  $V_{in1}$  และ  $V_{in2}$  ความถี่ 1MHz และ 250kHz ขนาด  $1V_{p-p}$  และ  $V_{in3}=0$  (ก) อินพุต (ข) เอาท์พุต

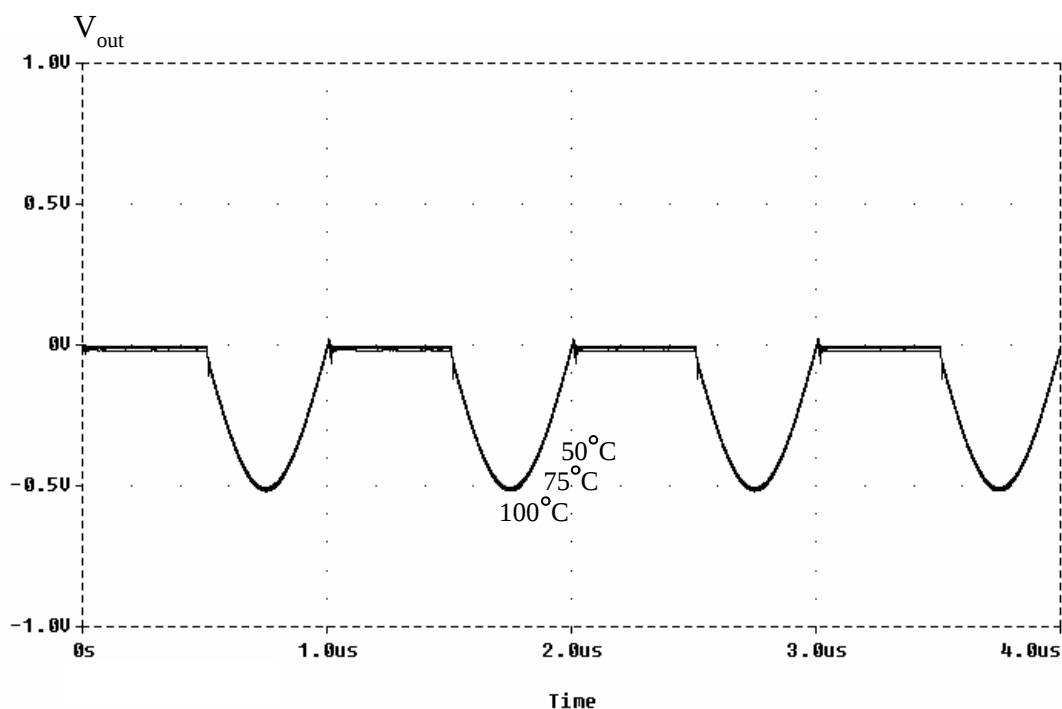


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.12 ผลการจำลองการทำงานของวงจรจับค่าแรงดันสูงสุด 3 อินพุตที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา (ก) อินพุต  $V_{in1}$ ,  $V_{in2}$  และ  $V_{in3}$  ขนาด  $1V_{P-P}$  ความถี่ 1MHz (ข) เอาท์พุท



รูปที่ 5.13 เอาต์พุตของแบบครึ่งคลื่นของวงจรที่นำเสนอที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

รูปที่ 5.6 แสดงคุณสมบัติทาง DC ของวงจรตรวจจับค่าสูงสุดแบบ 2 อินพุต จากผลการจำลองในรูปที่ 5.6 วงจรที่นำเสนอมีย่านอินพุตปฏิบัติงานกว้างประมาณ  $\pm 600$  mV รูปที่ 5.7 แสดงการตอบสนองทางความถี่ของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่นำเสนอ จากผลการจำลองแบนด์วิดท์ของวงจรมีค่า 500MHz รูปที่ 5.8 แสดงผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz เข้าที่อินพุต  $V_{in1}$  และสัญญาณรูปคลื่นสาม เหลี่ยมความถี่ 250kHz เข้าที่อินพุต  $V_{in2}$  รูปคลื่นทั้งสองมีขนาด  $1V_{P-P}$  จากผลการจำลองการทำงานแสดงได้ว่าวงจรสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 5.9 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 2 อินพุต โดยทั้งสองอินพุตป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz ขนาด  $1V_{P-P}$  สัญญาณทั้งสองมีเฟสต่างกัน 120 องศาแสดงในรูปที่ 5.9(ก) เอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 5.9(ข) จากเอาต์พุตจะเห็นว่าวงจรสามารถตรวจจับค่าสูงสุดของรูปคลื่นได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 5.10 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 2 อินพุต สำหรับกรณีอินพุต  $V_{in1}$  คือสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz ขนาด  $1V_{P-P}$  ความถี่ 1MHz และ  $V_{in2}$  มีค่า 0 โวลต์ รูปคลื่นทางเอาต์พุตของการทำงานกรณีดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10(ข) จากการทำงานในกรณีนี้วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นได้ จากผลการจำลองจะเห็นว่ารูปคลื่นทางเอาต์พุตมีความเที่ยงตรง นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดจุดตัดของรูปคลื่นได้ตามความต้องการได้อีกด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดค่าแรงดัน DC ได้ตามต้องการที่  $V_{in2}$

จากกรณีนี้ทำให้วงจรสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในวงจรไม่เป็นเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี รูปที่ 5.11 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 3 อินพุตสำหรับกรณีอินพุต  $V_{in1}$  เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz และ  $V_{in2}$  เป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่ 125kHz ทั้งคู่มีขนาด  $1V_{p-p}$  ส่วน  $V_{in3}$  มีค่า 0 โวลต์ รูปคลื่นทางเอาต์พุตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11(ข) จากผลการจำลองแสดงวงจรสามารถตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 5.12 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 3 อินพุต โดยแต่ละอินพุตเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz มีเฟสต่างกัน 120 องศา เอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 5.12(ข) การทำงานของวงจรตรวจจับแรงดันที่แสดงในรูปที่ 5.9 และ 5.12 สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์เพื่อควบคุมแอมพลิจูดของวงจรกำเนิดสัญญาณได้เช่นเดียวกับวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ เพื่อแสดงว่าวงจรตรวจจับค่าแรงดันที่นำเสนอมีเสถียรภาพดี เอาต์พุตแบบครึ่งคลื่นของวงจรที่นำเสนอที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$   $75^{\circ}\text{C}$  และ  $100^{\circ}\text{C}$  เมื่อป้อนอินพุต  $V_{in1}$  เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz ขนาด  $1V_{p-p}$  ความถี่ 1MHz และ  $V_{in2}=0$  โวลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 ผลการจำลองนี้เพื่อยืนยันสมการที่ (5.7)

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของวงจรตรวจจับค่าต่ำสุดที่นำเสนอ

| พารามิเตอร์               | ค่า                    |
|---------------------------|------------------------|
| เทคโนโลยี                 | 0.5 $\mu\text{m}$ CMOS |
| แหล่งจ่ายแรงดัน           | $\pm 1.5\text{V}$      |
| ช่วงปฏิบัติงานทางอินพุต   | $\pm 4000\text{mV}$    |
| แบนด์วิดท์ของวงจร         | 500MHz                 |
| การใช้กำลังงาน (2 อินพุต) | 0.669mW                |

## 5.5. สรุป

วงจรตรวจจับค่าแรงดันต่ำสุดที่นำเสนอในบทนี้เป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพดีคือ มีความเที่ยงตรง มีโครงสร้างวงจรที่ง่ายและสามารถมีอินพุตได้  $n$  อินพุต วงจรประกอบขึ้นจากวงจรเลื่อนระดับแรงดันและวงจรป้อนกลับกระแสซึ่งทำให้สามารถปรับค่าแรงดันออฟเซตได้ด้วยแหล่งจ่ายกระแส ผลการจำลองการทำงานของวงจรสามารถแสดงได้ว่าวงจรที่นำเสนอมีแบนด์วิดท์กว้าง มีความเร็วสูง มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิที่ดีและมีความเที่ยงตรง