

บทที่ 4

วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด

4.1 บทนำ

วงจรตรวจจับค่าแรงดันหรือกระแสสูงสุดคือวงจรบล็อกพื้นฐานที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้มากมาย เช่น ใช้งานในเครือข่ายประสาท การประมวลผลแบบดิจิทัลและฟิสิกส์โลจิก [16] ที่ผ่านมามีวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่ใช้อุปกรณ์แอ็กทิฟ เช่น ใช้งานจอร์ไอทีเอ ใช้งานทรานซิสเตอร์ กระแสต่อร่วมกับไดโอดและตัวต้านทานเพอร์ใน [2]-[4] ข้อเสียของวงจรมีค่าคือเนื่องจากใช้อุปกรณ์แอ็กทิฟต่อร่วมกับไดโอด ซึ่งไดโอดจะทำงานได้ต้องมีแรงดันตกคร่อมตัวมัน 0.6V จึงทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณค่อนข้างมากและเนื่องจากวงจรใช้งานจอร์แอ็กทิฟเป็นพื้นฐานจึงทำให้ไม่เหมาะกับการขยายเป็นวงจรที่มีหลายอินพุต นอกจากนี้วงจรที่ใช้ไอทีเอเป็นพื้นฐานจะมีช่วงปฏิบัติงานทางอินพุตที่แคบ โดยปกติแล้ววงจรตรวจจับค่าแรงดันหรือกระแสสูงสุดหลายอินพุตจะสร้างจากวงจร Winner Take All หรือจากวงจรคอมมอนอิมิตเตอร์หรือคอมมอนซอร์ส [5]-[14]

ในบทที่ 4 ของวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดหลายอินพุตแบบอนาล็อก โดยใช้เทคโนโลยีซีมอส วงจรที่นำเสนอมีคุณสมบัติ เป็นวงจรมีความง่าย มีความเร็วสูง มีความเที่ยงตรงและมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมาก โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย วงจรเลื่อนระดับแรงดัน วงจรกันชนป้องกันกลับกระแส จากโครงสร้างของวงจรที่นำเสนอเหมาะกับวงจรประเภทใช้แรงดันต่ำและเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม

4.2 วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่นำเสนอ

รูปที่ 4.1 แสดงวงจรกันชนป้องกันกลับกระแส วงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ I_2 และ I_3 และมอสทรานซิสเตอร์ M2 และ M3 ถ้ากำหนดให้มอสทรานซิสเตอร์ M2 และ M3 ทำงานในย่านอิ่มตัว มอสทรานซิสเตอร์ M3 ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสด้านบวก ส่วน I_3 เป็นตัวจ่ายกระแสด้านล่างหรืออีกนัยหนึ่งคือรักษาสภาพการเป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้คงที่ จากวงจรสมการกระแสเดรนของมอสทรานซิสเตอร์ M2 และ M3 สามารถกำหนดได้คือ

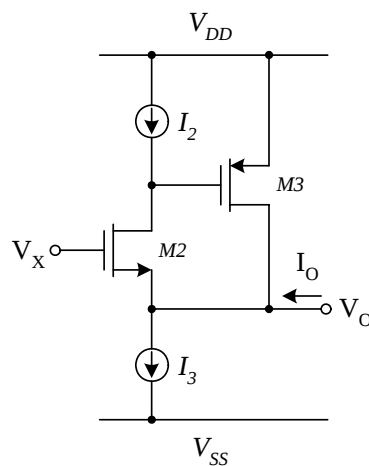
$$I_{D2} = K_2(V_{GS2} - V_{T2})^2 \quad (4.1.1)$$

และ

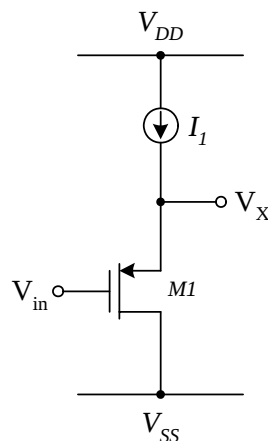
$$I_{D3} = K_3(V_{SG3} - |V_{T3}|)^2 \quad (4.1.2)$$

โดยที่ $K_3 = 0.5\mu_3 C_{ox}(W/L)$ $K_2 = 0.5\mu_2 C_{ox}(W/L)$ V_{T2} และ V_{T3} คือค่าแรงดันแธรชโฮลด์ และ μ_2 และ μ_3 คือค่าสภาพคล่องตัวของพาหะที่ผิวบริเวณแชนแนลของมอสทรานซิสเตอร์ M2 และ M3 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 แรงดัน V_X ถูกป้อนเข้าที่ขาเกตของมอสทรานซิสเตอร์ M2 และมีเอาต์พุตออกที่ขาซอร์สของตัวมัน จากวงจรในรูปที่ 4.1 สามารถกำหนดสมการแรงดันเอาต์พุตได้คือ

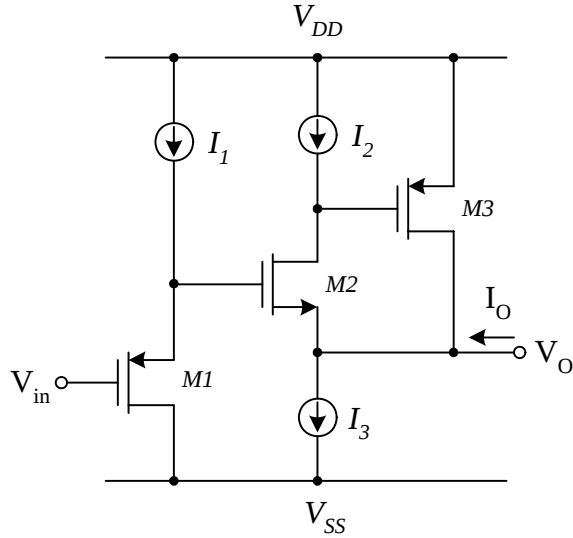
$$V_O = V_X - \sqrt{\frac{I_2}{K_2}} - V_{T2} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.1 วงจรกันชนป้อนกลับกระแส



รูปที่ 4.2 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน



รูปที่ 4.3 วงจรกันชนป้อนกลับกระแสที่สมบูรณ์

จากสมการที่ (4.2) จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตของรูปที่ 4.1 ประกอบด้วยแรงดัน V_x และค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นค่าแรงดันออฟเซต ซึ่งค่าแรงดันออฟเซตนี้ต้องกำจัดทิ้งไป ค่าแรงดันออฟเซตนี้สามารถหักล้างออกด้วยวงจรเลื่อนระดับแรงดันที่แสดงในรูปที่ 4.2 จากวงจรเลื่อนระดับแรงดันในรูปที่ 4.2 ค่าแรงดันเอาต์พุตสามารถกำหนดได้คือ

$$V_x = V_{in} + \sqrt{\frac{I_1}{K_1}} + |V_{T1}| \quad (4.3)$$

เมื่อนำวงจรในรูปที่ 4.1 และวงจรในรูปที่ 4.2 มารวมกัน วงจรกันชนป้อนกลับกระแสที่สมบูรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 แรงดันเอาต์พุตสามารถเขียนได้คือ

$$V_O = V_{S2} = V_{in} + \sqrt{\frac{I_1}{K_1}} + |V_{T1}| - \sqrt{\frac{I_2}{K_2}} - V_{T2} \quad (4.4)$$

และถ้ากำหนดให้

$$\sqrt{\frac{I_2}{K_2}} + V_{T2} = \sqrt{\frac{I_1}{K_1}} + |V_{T1}| \quad (4.5)$$

สมการที่ (4.4) จะมีค่าเป็น

$$V_O = V_{in} \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) สรุปได้ว่าวงจรในรูปที่ 4.3 คือวงจรกันชนที่ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับอินพุต ซึ่งวงจรดังกล่าวนี้จะใช้เป็นวงจรส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่จะนำเสนอต่อไป

โดยใช้วงจรในรูปที่ 4.3 วงจรตรวจจับค่าสูงสุดที่สมบูรณ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยนำวงจรรูปที่ 4.3 มาต่อในลักษณะขนาน ถ้าค่าแรงดันของอินพุตใดมีค่ามากที่สุด ทรานซิสเตอร์ Mi3 ของอินพุตชุดนั้นจะนำกระแสส่วนอินพุตที่มีค่าแรงดันน้อยกว่าจะหยุดนำกระแส ทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุต V_{out} เท่ากับแรงดันอินพุตของชุดอินพุตที่มีค่าแรงดันสูงสุด กระแสเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่าน Mi3 ของชุดอินพุตที่มีค่าแรงดันสูงสุด โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$ คือจำนวนชุดอินพุต จากการทำงานดังกล่าววงจรในรูปที่ 4.4 สามารถกำหนดเป็นสมการได้คือ

$$V_{out} = \text{Max}(V_{in1}, V_{in2}, \dots, V_{inN}) \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) แสดงได้ว่าวงจรในรูปที่ 4.4 คือวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่มีอินพุตได้ n อินพุต วงจรที่นำเสนอใช้วงจรกันชนป้อนกลับกระแสที่แสดงในรูปที่ 4.3 จากสมการที่ (4.6) ซึ่งแสดงคุณสมบัติของวงจรดังกล่าว จะเห็นว่าสมการไม่มีค่าพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบของอุณหภูมิรวมอยู่ ดังนั้นเมื่อวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดในรูปที่ 4.4 ใช้วงจรในรูปที่ 4.3 เป็นวงจรพื้นฐานวงจรที่นำเสนอจึงเป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิด้วย

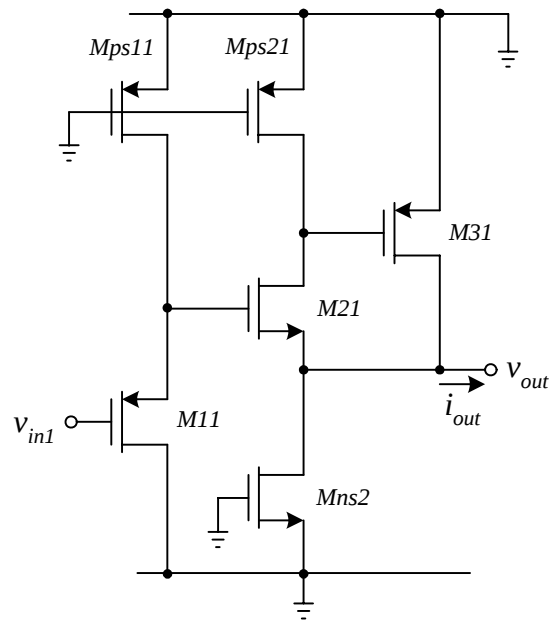
4.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวงจร

วงจรที่จะนำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นวงจรกันชนป้อนกลับกระแสที่ใช้เป็นอินพุตของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่นำเสนอในรูปที่ 4.4 โดยเลือกเอาเพียง 1 ชุดอินพุตเท่านั้นมาวิเคราะห์ ถ้าสมมุติว่าทรานซิสเตอร์ทุกตัวทำงานในย่านอิ่มตัวและใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสามารถหาได้ดังนี้

ค่าพารามิเตอร์แรกที่จะพิจารณาคือค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (r_{in}) เนื่องจากค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขาเกตของมอสทรานซิสเตอร์มีสูงมาก เมื่ออินพุตถูกป้อนเข้าที่ขาเกตจึงทำค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรที่นำเสนอมีค่าสูงมากตามไปด้วยซึ่งสามารถประมาณได้คือ

$$r_{in} \approx \infty \quad (4.8)$$

แต่ในทางปฏิบัติค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่ขาเกตของมอสทรานซิสเตอร์อาจจะไม่เป็นอนันต์แต่จะมีค่าสูงมากซึ่งอยู่ในย่าน $M\Omega$



รูปที่ 4.5 วงจรที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (r_o) ของวงจรในรูปที่ 4.5 มีค่าประมาณ

$$r_o = \frac{v_{out}}{i_{out}} \approx \frac{g_{d(Mps21)} + g_{d(M21)}}{g_{m(M31)}(g_{d(M21)} + g_{m(Mps21)}) + (g_{d(Mns2)} + g_{d(M21)})(g_{m(M21)} + g_{d(M21)} + g_{d(Mns2)} + g_{d(M31)})} \quad (4.9)$$

ถ้าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการที่ (4.9) กำหนดได้จากการจำลองการทำงานมีค่าคือ

$$g_{d(M21)} = 4.54 \times 10^{-5} \text{ A/V}$$

$$g_{d(M31)} = 4.48 \times 10^{-5} \text{ A/V}$$

$$g_{d(Mps21)} = 1.95 \times 10^{-5} \text{ A/V}$$

$$g_{d(Mns2)} = 1.31 \times 10^{-4} \text{ A/V}$$

$$g_{m(M21)} = 1.36 \times 10^{-3} \text{ A/V}$$

$$g_{m(M31)} = 1.71 \times 10^{-3} \text{ A/V}$$

$$g_{m(Mps21)} = 7.31 \times 10^{-4} \text{ A/V}$$

ดังนั้นค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าประมาณ 40Ω

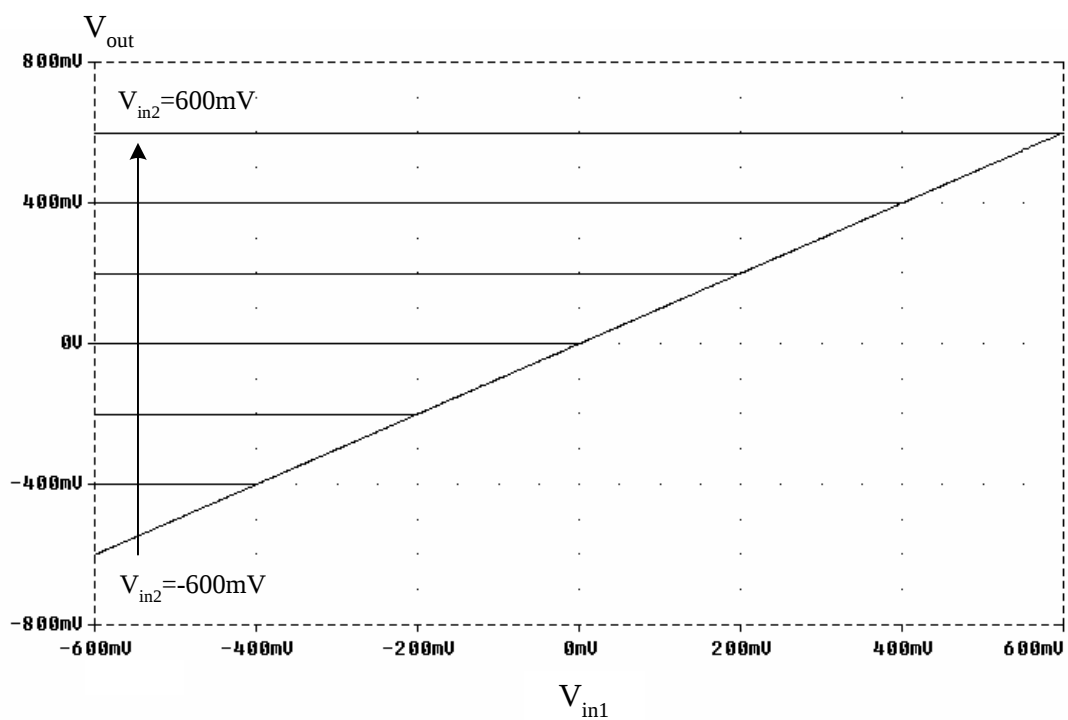
4.4 ผลการเลียนแบบการทำงาน

เพื่อตรวจสอบการทำงานและประสิทธิภาพของวงจรที่นำเสนอ วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่นำเสนอในรูปที่ 4.4 จะถูกนำมาจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice โดยใช้พารามิเตอร์ $0.5\mu\text{m}$ ของ MIETEC กำหนดแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{DD}=1.5$ โวลต์ และ $V_{SS}=-1.5$ โวลต์ แหล่งจ่ายกระแสที่ $I_1=60\mu\text{A}$ เนื่องจากวงจรในรูปที่ 4.4 ใช้วงจรในรูปที่ 4.3 มาต่อแบบขนานกัน ค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ของอินพุตชุดที่ 1 จะเหมือนกับชุดที่ 2 หรือชุดต่อไป ดังนั้นค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ชุดที่ 1 จะเหมือนกับชุดที่ 2 หรือชุดต่อไปด้วย ซึ่งค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์ชุดที่ 1 ในวงจรที่ 4.4 กำหนดได้ดังตารางที่ 4.1 สำหรับวงจรตรวจจับค่าสูงสุด 2 อินพุตและ 3 อินพุต กำหนดค่า Mns2 เท่ากับ $200\mu\text{m}/2\mu\text{m}$ และ $300\mu\text{m}/2\mu\text{m}$ ตามลำดับ ทรานซิสเตอร์ Mns2 จะทำหน้าที่จ่ายกระแส ดังนั้นถ้าต้องการกระแสจำนวนมากเพื่อขับโหลดจึงสามารถทำได้โดยการเพิ่มค่า W/L ของ Mns2

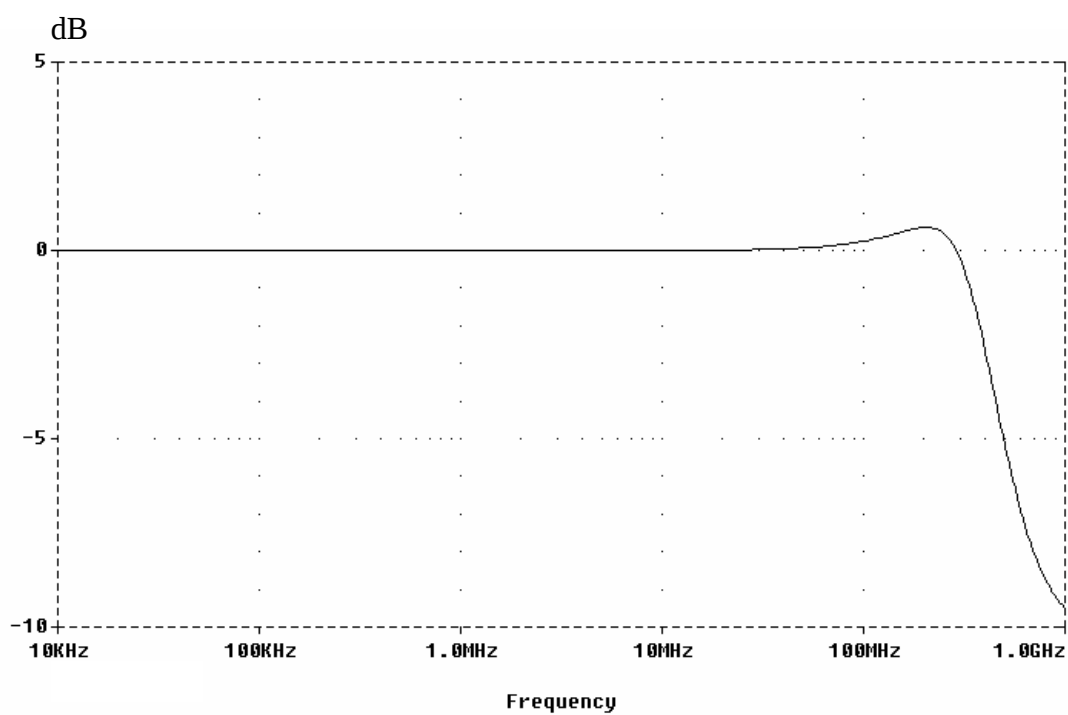
ตารางที่ 4.1 ค่า W/L ของมอสทรานซิสเตอร์

มอสทรานซิสเตอร์	ค่า W/L($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
M11, M12	20/1
M13	100/1
Mps1	500/2
Mps11	40/2
Mps21	100/2
Mns1	200/2

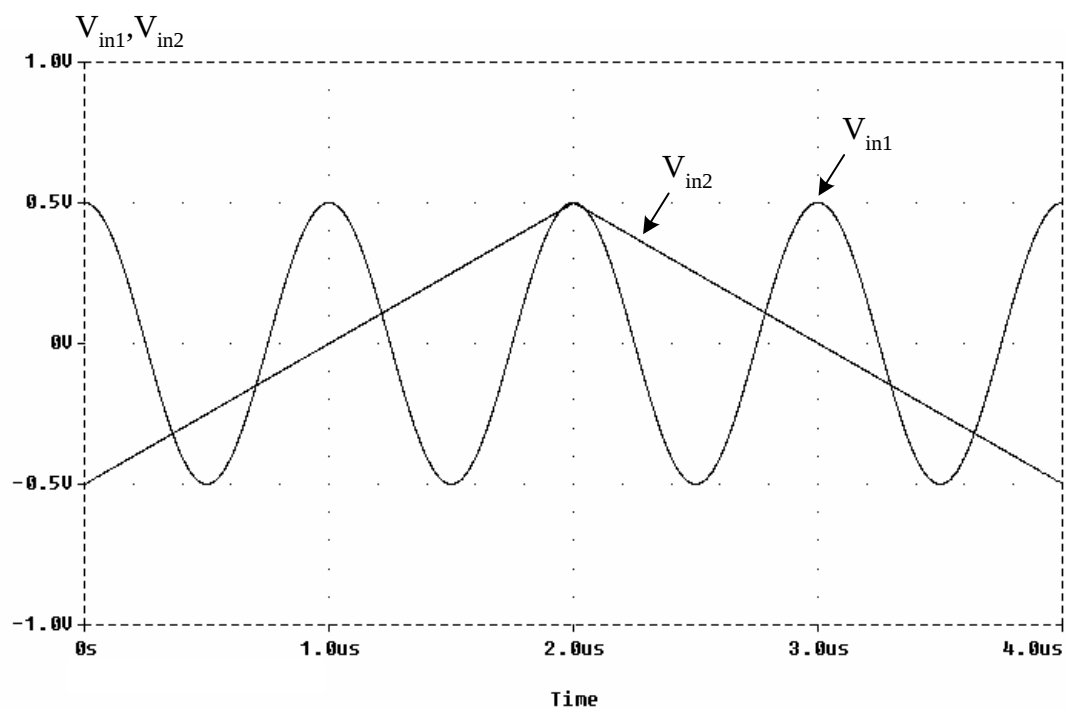
รูปที่ 4.6 แสดงคุณสมบัติทาง ไฟฟ้ากระแสตรง ของวงจรตรวจจับค่าสูงสุดแบบ 2 อินพุต ซึ่งแรงดันออฟเซตถูกปรับให้มีค่าจนใกล้กับ 0 จากรูปที่ 4.6 วงจรที่นำเสนอมีย่านอินพุตปฏิบัติงานกว้างประมาณ $\pm 600\text{ mV}$ รูปที่ 4.7 แสดงการตอบสนองทางความถี่ของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่นำเสนอ จากผลการจำลอง แบนด์วิดท์ของวงจรมีค่า 415MHz รูปที่ 4.8 แสดงผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz เข้าที่อินพุต V_{in1} และสัญญาณรูปคลื่นสาม เหลี่ยมความถี่ 250kHz เข้าที่อินพุต V_{in2} รูปคลื่นทั้งสองมีขนาด $1V_{p-p}$ จากผลการจำลองการทำงานแสดงได้ว่าวงจรสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและพบว่าความไวในช่วงการเปลี่ยนสถานะจากอินพุตหนึ่งไปยังอินพุตหนึ่งจะใช้เวลาไม่เกิน $0.5\mu\text{s}$



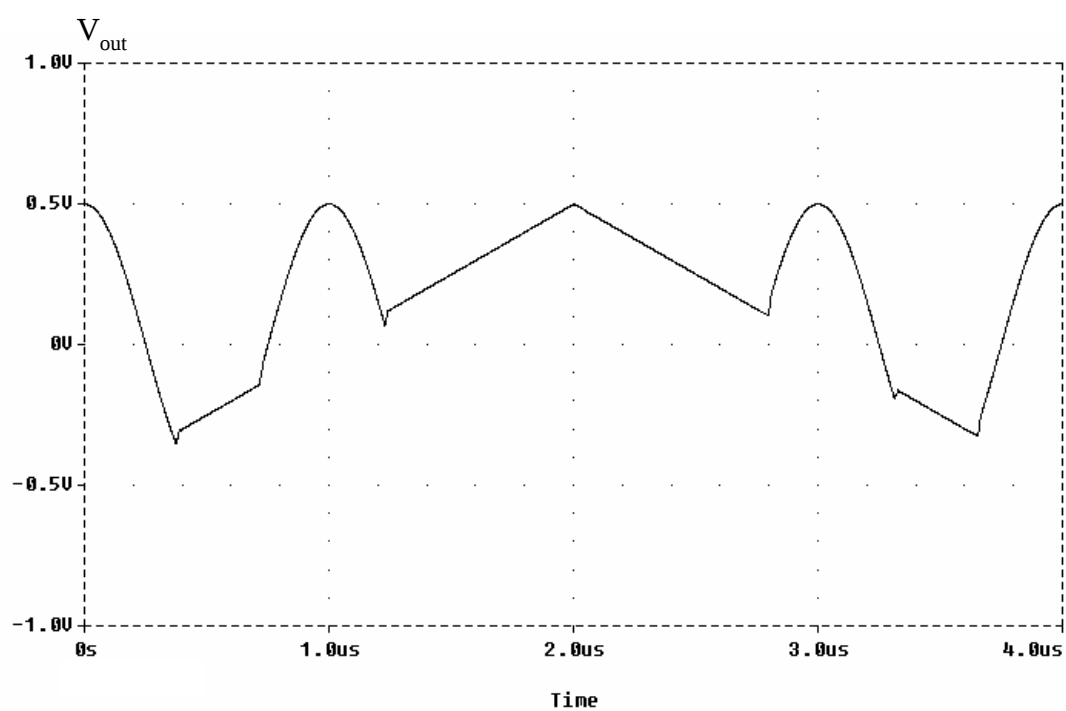
รูปที่ 4.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง ของวงจรตรวจจับค่าสูงสุด



รูปที่ 4.7 การตอบสนองความถี่ของวงจร

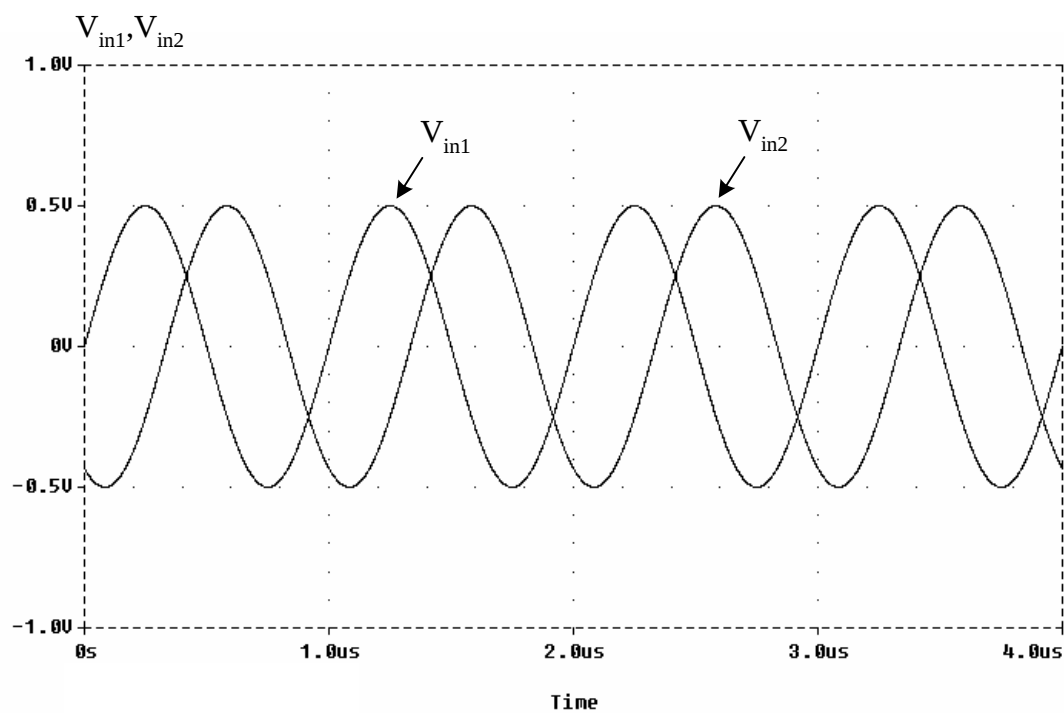


(ก)

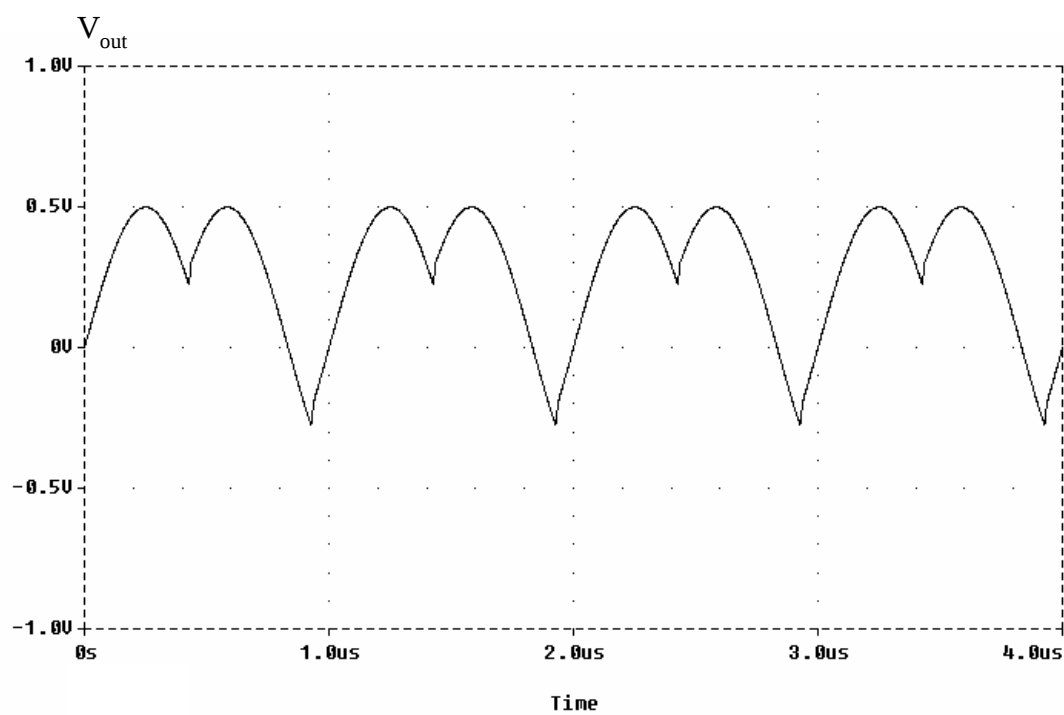


(ข)

รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 2 อินพุต (ก) อินพุต V_{in1} และ V_{in2} ขนาด $1V_{p-p}$ ความถี่ 1MHz และ 250kHz ตามลำดับ (ข) เอาท์พุท

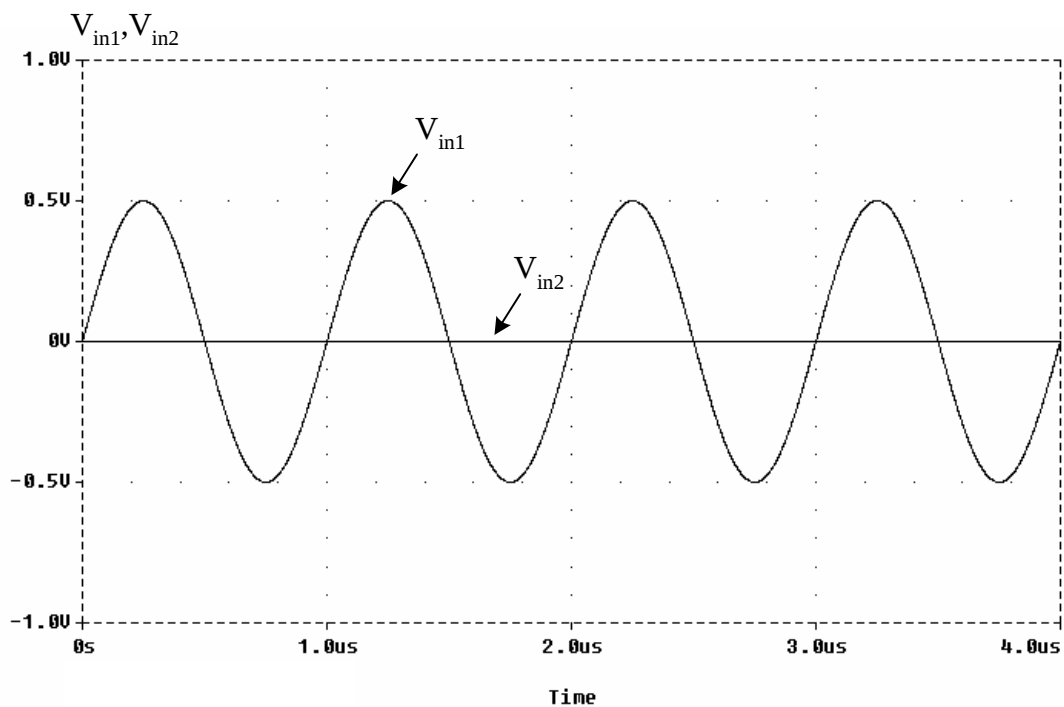


(ก)

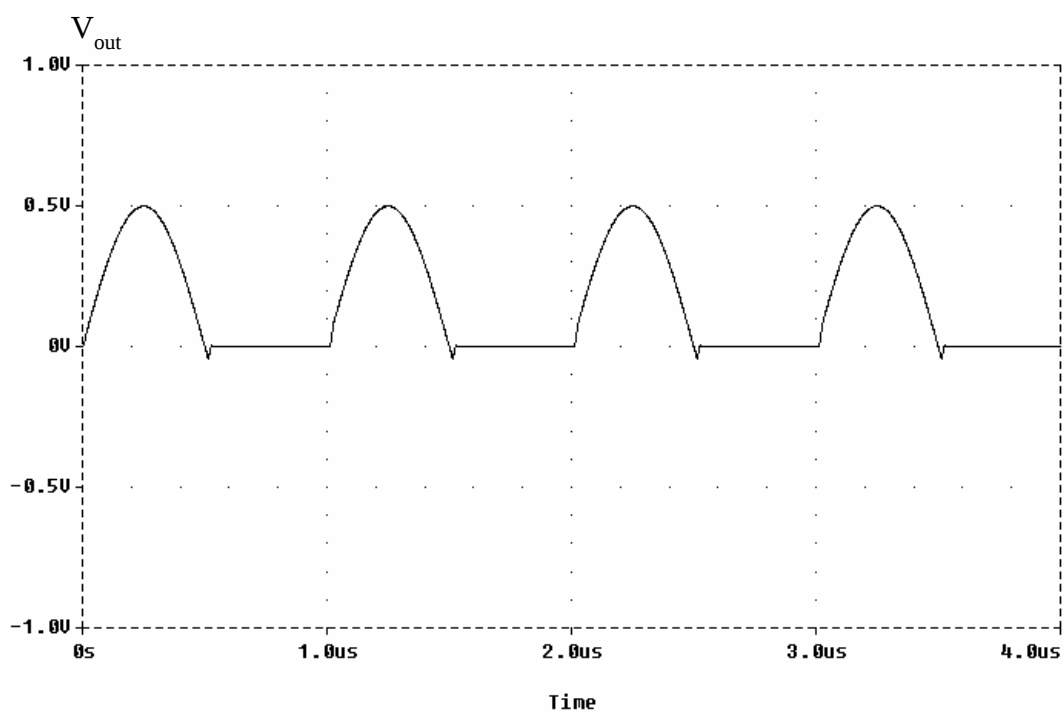


(ข)

รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการทำงานของวงจรจذبค่าแรงดันสูงสุด 2 อินพุตที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา (ก) อินพุต V_{in1} และ V_{in2} ขนาด $1V_{P-P}$ ความถี่ 1MHz (ข) เอาท์พุท

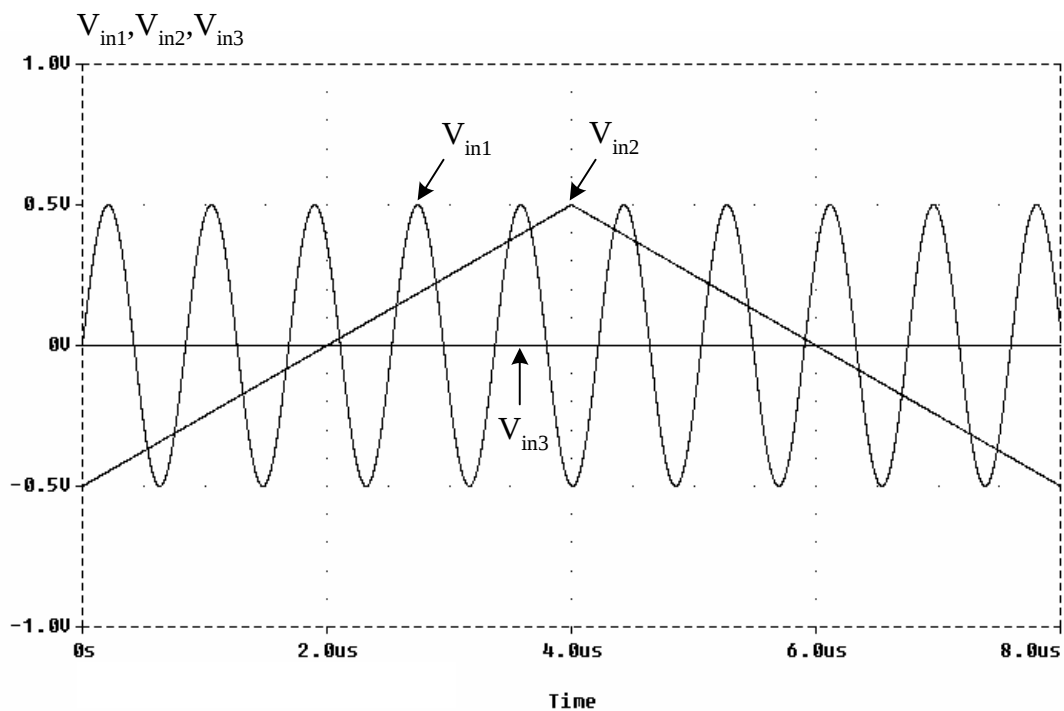


(ก)

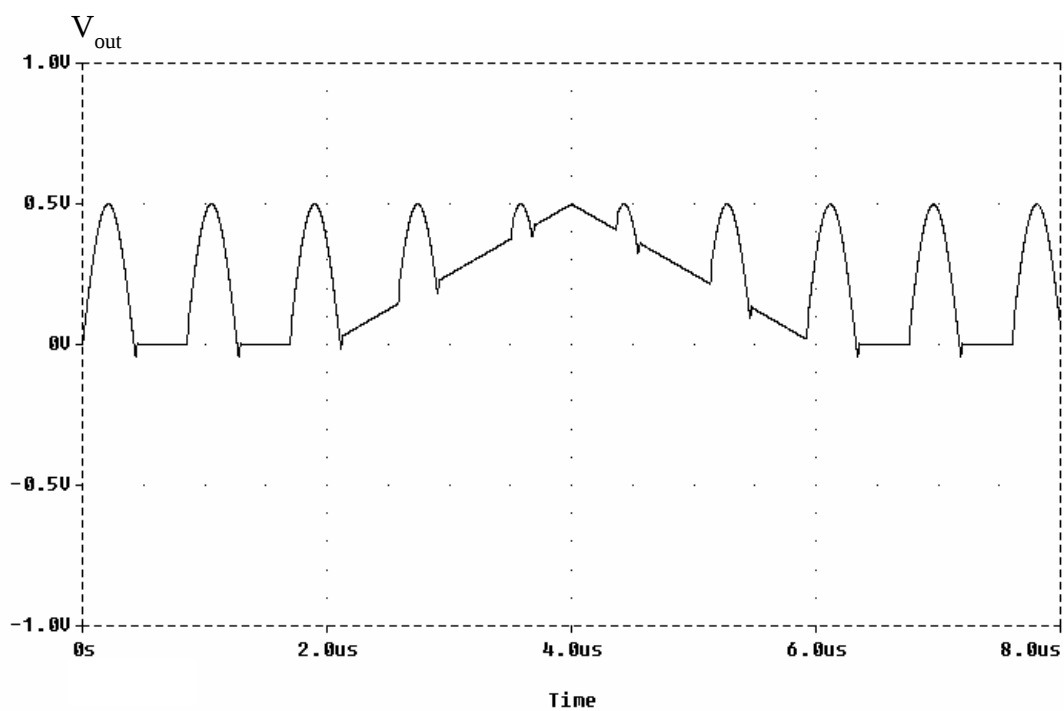


(ข)

รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 2 อินพุต สำหรับกรณีอินพุต V_{in1} ขนาด $1V_{p-p}$ ความถี่ 1MHz และ $V_{in2}=0$ (ก) อินพุต (ข) เอาท์พุต

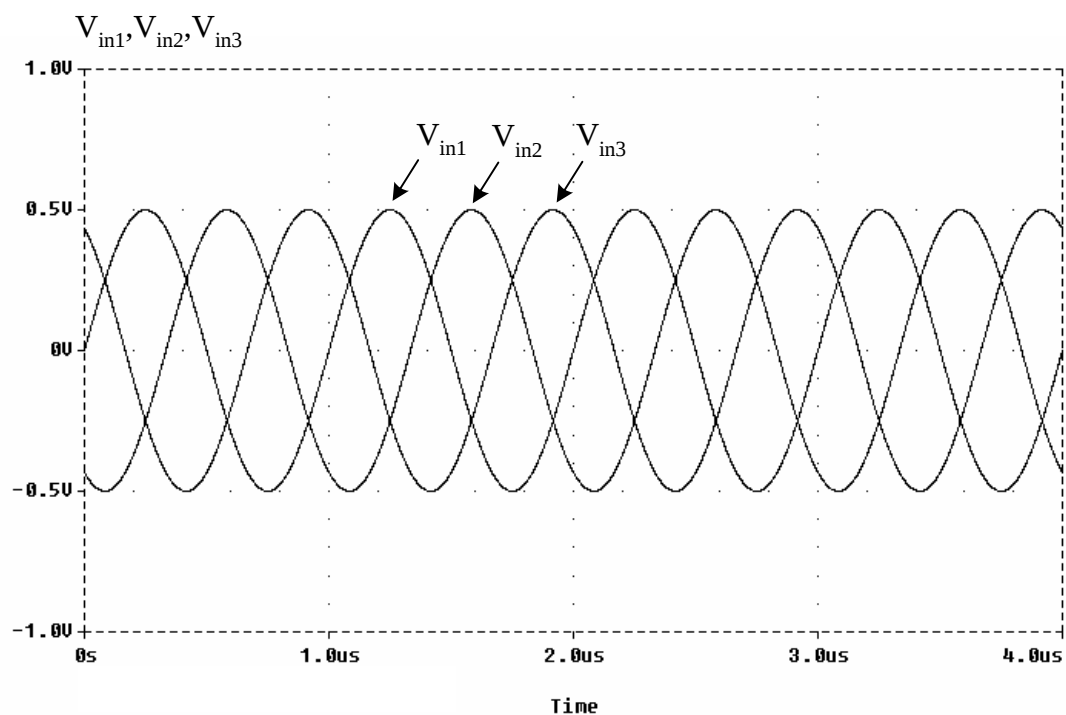


(ก)

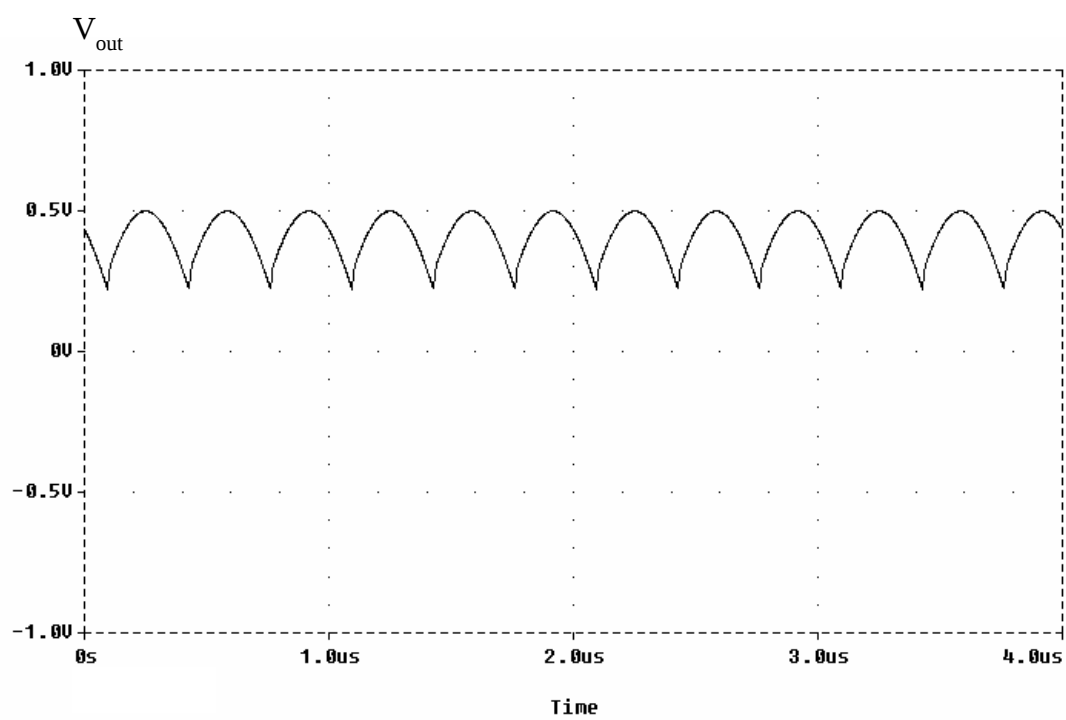


(ข)

รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 3 อินพุต สำหรับอินพุต V_{in1} และ V_{in2} ความถี่ 1MHz และ 125kHz ขนาด $1V_{p-p}$ และ $V_{in3}=0$ (ก) อินพุต (ข) เอาท์พุท

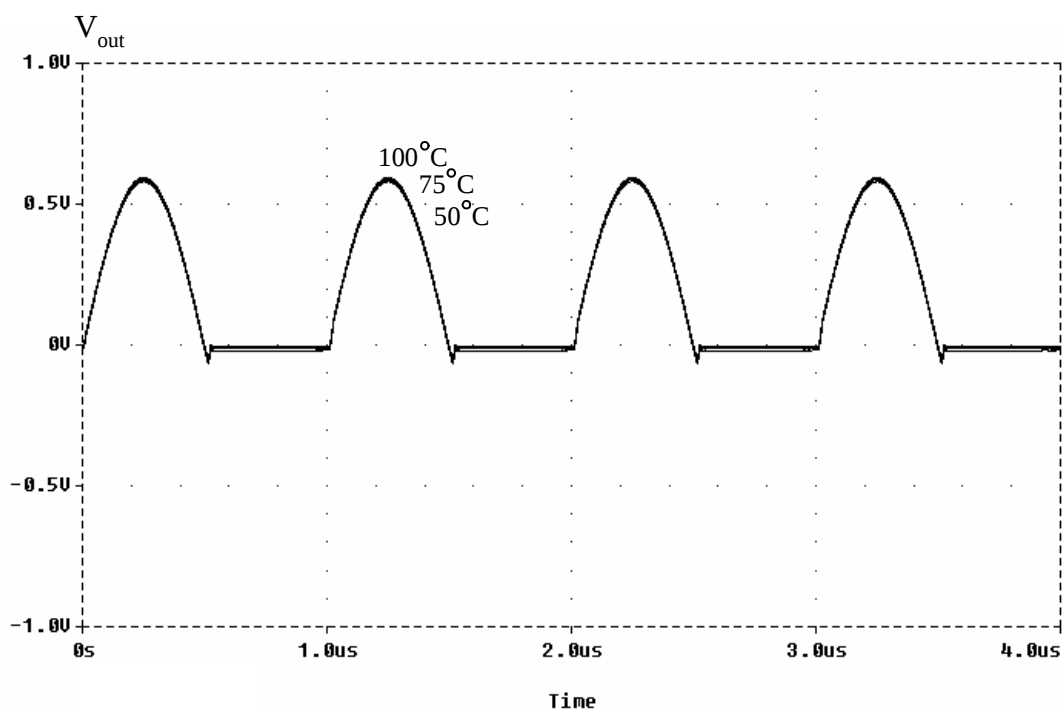


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 3 อินพุตที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา (ก) อินพุต V_{in1} , V_{in2} และ V_{in3} ขนาด $1V_{p-p}$ ความถี่ 1MHz (ข) เอาท์พุท



รูปที่ 4.13 เอาต์พุตแบบครึ่งคลื่นของวงจรที่นำเสนอที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

รูปที่ 4.9 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 2 อินพุต โดยทั้งสองอินพุตป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz ขนาด $1V_{p-p}$ สัญญาณทั้งสองมีเฟสต่างกัน 120 องศาแสดงในรูปที่ 4.9(ก) เอาต์พุตแสดงได้ดังรูปที่ 4.9(ข) จากเอาต์พุตจะเห็นว่าวงจรสามารถตรวจจับค่าสูงสุดของรูปคลื่นได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 4.10 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 2 อินพุต สำหรับกรณีอินพุต V_{in1} คือสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz ขนาด $1V_{p-p}$ ความถี่ 1MHz และ V_{in2} มีค่า 0 โวลต์ รูปคลื่นทางเอาต์พุตของการทำงานกรณีดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10(ข) จากการทำงานในกรณีนี้วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นได้ จากผลการจำลองจะเห็นว่ารูปคลื่นทางเอาต์พุตมีความเที่ยงตรง นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดจุดตัดของรูปคลื่นได้ตามความต้องการได้อีกด้วย ซึ่งสามารถทำได้โดยการกำหนดค่าแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง ได้ตามต้องการที่ V_{in2} จากกรณีนี้ทำให้วงจรสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในวงจรไม่เป็นเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี รูปที่ 4.11 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 3 อินพุตสำหรับกรณีอินพุต V_{in1} เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1MHz และ V_{in2} เป็นสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่ 125kHz ทั้งคู่มีขนาด $1V_{p-p}$ ส่วน V_{in3} มีค่า 0 โวลต์ รูปคลื่นทางเอาต์พุตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11(ข) จากผลการจำลองแสดงวงจรสามารถตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 4.12 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุด 3 อินพุต โดยแต่ละอินพุตเป็นสัญญาณ

รูปคลื่นชานซ์ความถี่ 1MHz มีเฟสต่างกัน 120 องศา เอาท์พุทแสดงได้ดังรูปที่ 4.12(ข) การทำงานของวงจรตรวจ จับแรงดันที่แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.12 สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้ไม่ว่าในวงจรกำเนิดสัญญาณแบบควอดราเจอร์ [17] เพื่อควบคุมแอมพลิจูดของวงจรกำเนิดสัญญาณ เพื่อแสดงว่าวงจรตรวจจับค่าแรงดันที่นำเสนอมีเสถียรภาพดี เอาท์พุทแบบครึ่งคลื่นของวงจรที่นำเสนอที่อุณหภูมิ 50°C 75°C และ 100°C เมื่อป้อนอินพุท V_{in1} เป็นสัญญาณรูปคลื่นชานซ์ความถี่ 1MHz ขนาด 1V_{P-P} ความถี่ 1MHz และ $V_{in2}=0$ โวลต์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 ผลการจำลองนี้เพื่อยืนยันสมการที่ (4.7)

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวงจรตรวจจับค่าสูงสุดที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	ค่า
เทคโนโลยี	0.5μm CMOS
แหล่งจ่ายแรงดัน	±1.5V
ช่วงปฏิบัติงานทางอินพุท	±6000mV
แบนด์วิดท์ของวงจร	415MHz
การใช้กำลังงาน (2 อินพุท)	0.64mW

4.5 สรุป

วงจรตรวจจับค่าแรงดันสูงสุดที่นำเสนอในบทนี้เป็นวงจรที่มีคุณสมบัติคือมีประสิทธิภาพดี มีโครงสร้างวงจรที่ง่าย วงจรที่นำเสนอสามารถมีอินพุทได้ n อินพุทโดยวงจรประกอบขึ้นจากวงจรเลื่อนระดับแรงดันและวงจรป้อนกลับกระแสซึ่งทำให้วงจรสามารถปรับค่าแรงดันออฟเซตได้โดยง่าย ผลการเลียนแบบการทำงานของวงจรแสดงว่าวงจรที่นำเสนอมีแบนด์วิดท์กว้าง มีความเที่ยงตรง ทำงานที่แรงดันต่ำและมีเสถียรภาพทางอุณหภูมิดีมาก