

ใบบางที่ 2 — วงจรเปรียบเทียบแรงดันและฮิสเทอรีซิส

RBE2001 เซนเซอร์และอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Sensor and Actuator) · อาจารย์ ดร.อภิรักษ์ อธิณณูมิต	
โปรแกรม Proteus 8 (เสริม: NI Multisim ข้อ 5.7)	
เวลาปฏิบัติ 3 ชั่วโมง คะแนน 6 คะแนน	
ชื่อ-สกุล	รหัสนักศึกษา กลุ่ม วันที่

ใบบางก่อนหน้าที่ต้องผ่านมาแล้ว ใบบางที่ 1 — ค่า R_1 ที่เลือกไว้จะนำมาใช้ต่อในใบบางนี้

1. จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อปฏิบัติตามใบบางนี้จบแล้ว นักศึกษาสามารถ

- อธิบายการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดันแบบเอาต์พุตตัวเก็บเปิด และบอกเหตุผลที่ต้องมีตัวต้านทานพูลอัพได้
- ต่อวงจร LM393 พร้อมตัวต้านทานพูลอัพและวงจรแสดงสถานะได้ถูกต้องตามหลักเอาต์พุตตัวเก็บเปิด
- คำนวณจุดสลับสถานะทั้งขาขึ้นและขาลงเมื่อใส่วงจรป้อนกลับบวก แล้วเทียบกับผลจำลองได้
- อธิบายผลของแถบฮิสเทอรีซิสต่อเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุตเมื่อมีสัญญาณรบกวนได้
- เลือกค่าตัวต้านทานป้อนกลับให้เหมาะสมกับระดับสัญญาณรบกวนที่วัดได้จริงได้
- ตัดสินใจได้ว่างานใดควรเปรียบเทียบในฮาร์ดแวร์ และงานใดควรส่งค่าดิบเข้าไปเทียบในซอฟต์แวร์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน LM393

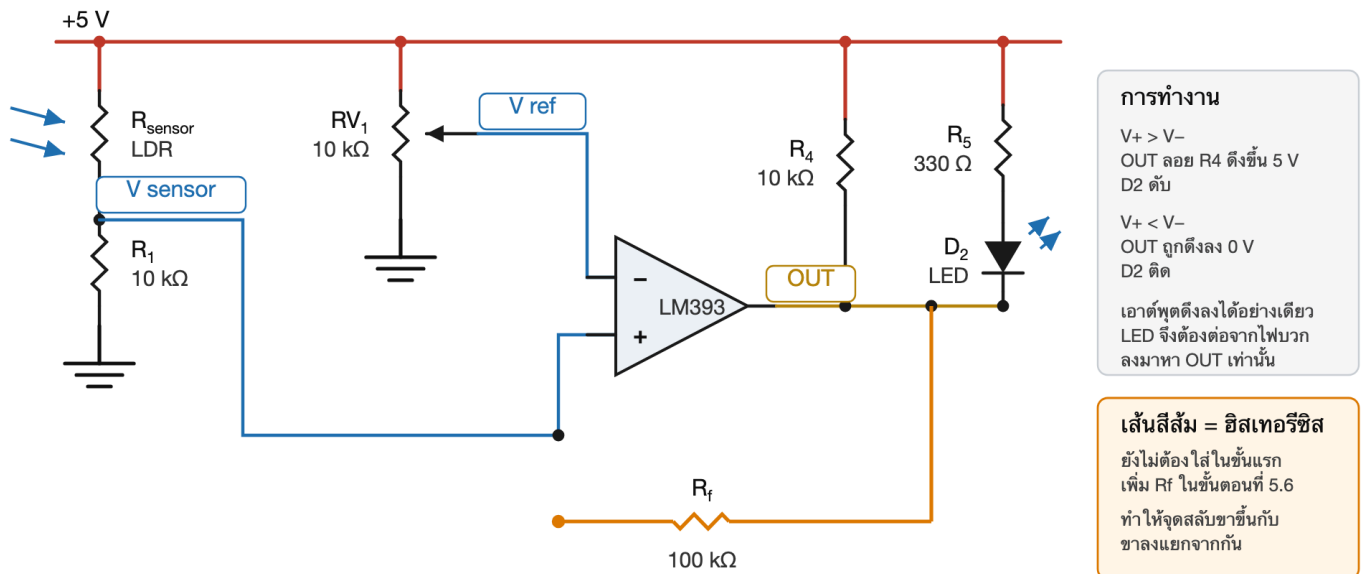
LM393 เป็นวงจรเปรียบเทียบสองชุดในตัวถัง DIP-8 หลักการทำงานง่ายมาก

เงื่อนไข	เอาต์พุต
$V_{IN+} > V_{IN-}$	ทรานซิสเตอร์ขาออกหยุดนำ เอาต์พุตลอย
$V_{IN+} < V_{IN-}$	ทรานซิสเตอร์ขาออกนำ ดึงเอาต์พุตลงกราวด์

จุดที่นักศึกษาพลาดบ่อยที่สุดคือลืมนำเอาต์พุตของ LM393 เป็นแบบ **ตัวเก็บเปิด (open collector)** ตัวมันดึงลงกราวด์ได้อย่างเดียว ดึงขึ้นไม่ได้ ถ้าไม่ใส่ตัวต้านทานพูลอัพจากขาเอาต์พุตไป V_{CC} วงจรจะไม่ทำงานเลย และเป็นความผิดพลาดที่มองไม่เห็นจากผังวงจร เพราะทุกอย่างดู "ต่อครบ" ดี

ผลที่ตามมาอีกอย่างคือ **วงจรแสดงสถานะต้องต่อจากไฟบวกลงมาหาขาเอาต์พุต ไม่ใช่จากเอาต์พุตลงกราวด์** เพราะตัวไอซีทำหน้าที่เป็นทางไหลกลับ ไม่ใช่แหล่งจ่าย

รูปที่ 2.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน LM393 พร้อมฮิสเทอรีซิส



รูปที่ 2.1 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน LM393 พร้อมวงจรป้อนกลับบวกสร้างฮิสเทอรีซิส สังเกตทิศทางของวงจรแสดงสถานะ D2 ที่ต่อจากไฟบวกลงมาหาเอาต์พุต

ค่าพูลอัพที่ใช้ทั่วไปอยู่ระหว่าง 4.7 k Ω ถึง 10 k Ω ค่าน้อยลงทำให้สลับสถานะเร็วขึ้นเพราะประจุความจุปรสิตได้เร็วกว่า แต่กินกระแสมากขึ้นตอนเอาต์พุตอยู่สถานะต่ำ

$$I_{pullup} = \frac{V_{CC}}{R_{pullup}}$$

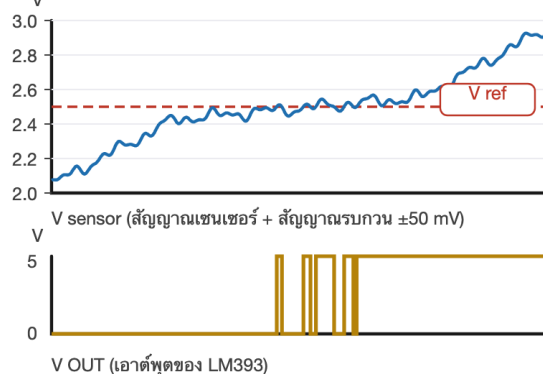
2.2 ปัญหาเอาต์พุตกระพริบ

ถ้าแรงดันจากเซนเซอร์ค่อย ๆ ใต้ผ่านจุดเกณฑ์พอดี ๆ เอาต์พุตจะสลับไปมาถี่ ๆ ตามสัญญาณรบกวนเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์ หุ่นยนต์เดินตามเส้นที่เจออาการนี้จะสั่นและหลุดเส้นทันที

รูปที่ 2.2 ผลของฮิสเทอรีซิสต่อเสถียรภาพของสัญญาณเอาต์พุต

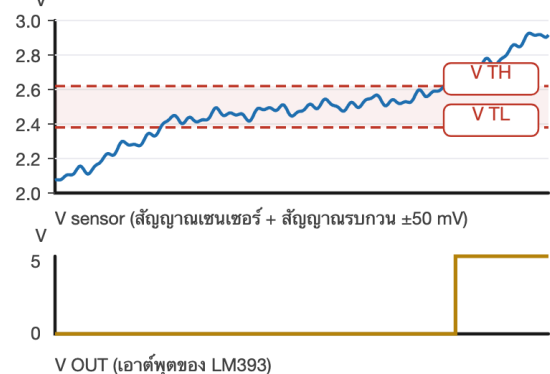
แกนตั้งขยายเฉพาะช่วง 2.0–3.0 V เพื่อให้เห็นสัญญาณรบกวนบนสัญญาณเซนเซอร์

(ก) ไม่มีฮิสเทอรีซิส — เกณฑ์เดียว 2.50 V



สลับสถานะ 9 ครั้ง — เอาต์พุตกระพริบตามสัญญาณรบกวน

(ข) มีฮิสเทอรีซิส — V_{TH} 2.62 V / V_{TL} 2.38 V



สลับสถานะ 1 ครั้ง — เอาต์พุตนิ่ง ใช้งานได้

แถบสีชมพูในแผง (ข) คือแถบฮิสเทอรีซิส กว้าง 240 mV สัญญาณรบกวนที่เล็กกว่าแถบนี้จึงทำให้เอาต์พุตสลับไม่ได้ แถบยิ่งกว้างเอาต์พุตยิ่งนิ่ง แต่ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเล็ก ๆ ยิ่งลดลง งานออกแบบคือการหาจุดสมดุลของสองอย่างนี้

รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบพฤติกรรมเอาต์พุตเมื่อไม่มีและมีฮิสเทอรีซิส สัญญาณรบกวนขนาดเท่ากันทำให้เอาต์พุตสลับ 9 ครั้งในกรณีแรก แต่สลับเพียงครั้งเดียวในกรณีที่สอง

2.3 การคำนวณฮิสเทอรีซิส

ทางแก็คือป้อนกลับบวกด้วยตัวต้านทาน R_f จากเอาต์พุตกลับไปขา V_{IN+} ทำให้จุดเกณฑ์แยกเป็นสองค่า ขาขึ้นใช้ค่าหนึ่ง ขาลงใช้อีกค่าหนึ่ง

เมื่อเอาต์พุตอยู่สถานะสูง (ถูกพูลอัปขึ้นหา V_{CC}) วงจร R_f กับ R_{pullup} จะดึงขา V_{IN+} ขึ้นเล็กน้อย ทำให้ต้องใช้แรงดันขาเข้าที่ต่ำกว่าปกติจึงจะสลับได้ และในทางกลับกันเมื่อเอาต์พุตอยู่สถานะต่ำ

ประมาณค่าได้จาก

$$V_{TH} \approx V_{ref} + \frac{V_{ref} \cdot R_{eq}}{R_f} \quad V_{TL} \approx V_{ref} - \frac{(V_{CC} - V_{ref}) \cdot R_{eq}}{R_f}$$

โดย R_{eq} คือความต้านทานสมมูลที่มองจากขา V_{IN+} กลับไปทางวงจรแบ่งแรงดันของเซนเซอร์ นั่นคือ R_{sensor} ขนานกับ R_1

ที่มาของแต่ละพจน์ — ขณะเอาต์พุตอยู่สถานะต่ำ (0 V) R_f ดึงขา V_{IN+} ลง สัญญาณเซนเซอร์จึงต้องสูงกว่า V_{ref} อยู่ $V_{ref} \cdot R_{eq}/R_f$ ก่อนจะสลับขึ้น ส่วนขณะเอาต์พุตอยู่สถานะสูง R_f ดึงขึ้นหา V_{CC} สัญญาณจึงต้องต่ำกว่า V_{ref} อยู่ $(V_{CC} - V_{ref}) \cdot R_{eq}/R_f$ ก่อนจะสลับลง

ถ้าตั้ง V_{ref} ไว้ที่ครึ่งหนึ่งของ V_{CC} พอดี สองพจน์นี้จะมีขนาดเท่ากัน แลบบิสเทอรีซิสจึงสมมาตรรอบ V_{ref} แต่ถ้า V_{ref} อยู่ที่ค่าอื่น แลบบจะเบี้ยวไปข้างหนึ่ง ซึ่งต้องคิดตอนตั้งเกณฑ์ในใบบงานที่ 6

พจน์ V_{CC} ในสูตร จริง ๆ คือแรงดันที่ขาเอาต์พุตถูกพูลอัปขึ้นไปถึง ซึ่งต่ำกว่า V_{CC} เล็กน้อยเพราะกระแสผ่าน R_f ต้องไหลผ่าน R_{pullup} ด้วย เมื่อ $R_f \gg R_{pullup}$ ความต่างนี้เล็กน้อยจะละได้

ผลต่างระหว่างสองค่านี้เรียกว่า **แลบบิสเทอรีซิส**

$$V_{hyst} = V_{TH} - V_{TL} \approx \frac{V_{CC} \cdot R_{eq}}{R_f}$$

ยิ่ง R_f น้อยแลบบยิ่งกว้าง วงจรยิ่งนิ่ง แต่ความไวก็ยิ่งลดลง งานออกแบบจึงเป็นการหาจุดสมดุลระหว่างความนิ่งกับความไว ไม่ใช่การหาค่าที่ "ถูกต้อง" ค่าเดียว

กฎที่ใช้ได้จริง ตั้งแลบบิสเทอรีซิสให้กว้างประมาณ 3–5 เท่าของสัญญาณรบกวนที่วัดได้จริงจากยอถึงยอด

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

รายการ	จำนวน
คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้ง Proteus 8	1 เครื่อง/คน

รายการ	จำนวน
แผ่นข้อมูล LM393	1 ชุด
ผลการคำนวณจากใบงานที่ 1	1 ชุด
เครื่องคิดเลขวิทยาศาสตร์	1 เครื่อง

4. โจทย์

ต่อยอดจากวงจรใบงานที่ 1 ให้เพิ่ม วงจรเปรียบเทียบแรงดันพร้อมฮิสเทอรีซิส เพื่อให้ได้เอาต์พุตดิจิทัลที่นิ่ง

ข้อกำหนด	ค่า
แรงดันจ่าย	5 V
เกนท์เปรียบเทียบ	ปรับได้ด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ 10 k Ω
แถบฮิสเทอรีซิส	อย่างน้อย 150 mV
การแสดงสถานะ	LED ติดเมื่อเอาต์พุตอยู่สถานะต่ำ
กระแสรวมของวงจร	ไม่เกิน 15 mA

รายการอุปกรณ์

Ref	อุปกรณ์	ค่า
LDR1	TORCH_LDR	–
R1	ตัวต้านทานวงจรแบ่งแรงดัน	ค่าจากใบงานที่ 1
RV1	ตัวต้านทานปรับค่าได้	10 k Ω
U1	วงจรเปรียบเทียบแรงดัน	LM393
R4	ตัวต้านทานพูลอัพ	10 k Ω
R5	ตัวต้านทานจำกัดกระแส LED	330 Ω
D2	LED สีแดง	–
Rf	ตัวต้านทานป้อนกลับ	100 k Ω และ 47 k Ω

5. ลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงาน

5.1 เตรียมโครงการ

1. เปิดโครงการจากใบงานที่ 1 แล้วเลือก File → Save Project As... ตั้งชื่อใหม่เป็น RBE2001_Lab02_รหัส
นักศึกษา_ชื่อเล่น

2. การทำเช่นนี้เก็บงานเดิมไว้ครบและได้จุดตั้งต้นที่ถูกต้องแล้ว — เป็นนิสัยเดียวกับการตกกึ่งในระบบควบคุมเวอร์ชัน

5.2 เพิ่มวงจรเปรียบเทียบ

3. กดปุ่ม P แล้วค้นหา LM393 วางลงในผัง
4. ค้นหาและวาง POT-HG (ตัวต้านทานปรับค่าได้), LED-RED และ RES เพิ่มอีกสองตัว
5. ต่อวงจรตามรูปที่ 2.1 โดยเรียงลำดับดังนี้
 1. ต่อ Vsensor จากวงจรแบ่งแรงดันเข้าขา IN+ ของ LM393
 2. ต่อขาบนของ RV1 เข้า +5 V ขาล่างเข้ากราวด์ และขากลาง (ตัวปรับ) เข้าขา IN-
 3. ต่อ R4 จากขาเอาต์พุตขึ้นไป +5 V — ขั้นตอนนี้ห้ามลืม
 4. ต่อ R5 อนุกรมกับ D2 จาก +5 V ลงมาหาขาเอาต์พุต ให้แอมป์ของ D2 อยู่ทางฝั่งไฟบวก
 5. ต่อขา 8 ของ LM393 เข้า +5 V และขา 4 เข้ากราวด์

จุดที่มักพลาดสองข้อ ข้อแรก ลืม R4 แล้ววงจรค้างที่ 0 V ตลอด ข้อสอง ต่อ LED จากเอาต์พุตลงกราวด์ แล้ว LED สว่างจาง ๆ เพราะได้กระแสจากพูลอัพ 10 kΩ เพียง 0.3 mA

5.3 ติดตั้งเครื่องมือวัด

6. วาง DC VOLTMETER สองตัว คร่อม Vsensor และ Vref เทียบกราวด์
7. วาง OSCILLOSCOPE หนึ่งตัว ต่อช่อง A เข้า Vsensor และช่อง B เข้า OUT
8. วาง DC AMMETER อนุกรมที่ขา +5 V หลักเพื่อวัดกระแสรวมของวงจร

5.4 จำลองโดยยังไม่ใส่ฮิสเทอรีซิส

9. กด Play เริ่มการจำลอง
10. เลื่อนตัวปรับค่าของ RV1 จนอ่าน Vref ได้ประมาณ 2.50 V บันทึกค่าจริงลงตารางที่ 6.1
11. บันทึกกระแสรวมทั้งขณะเอาต์พุตสูงและขณะเอาต์พุตต่ำ
12. เลื่อนแถบเลื่อนของ LDR จากสว่างไปมืดอย่างช้า ๆ หาจุดที่ LED เพิ่งเปลี่ยนสถานะ บันทึก Vsensor ณ จุดนั้นเป็น V_{TH}
13. เลื่อนย้อนกลับทิศทางเดิม หาจุดเปลี่ยนสถานะอีกครั้ง บันทึกเป็น V_{TL}
14. คำนวณผลต่าง ควรได้ใกล้เคียงศูนย์



ช่องสำหรับภาพจับหน้าจอ

การจำลองแบบโต้ตอบขณะ LED ติดและขณะดับ

วิธีเก็บภาพ: จับสองภาพคู่กัน ให้เห็นค่าบน DC Voltmeter ทั้งสองสถานะ

photos/lab02-a.png

5.5 เพิ่มฮิสเทอรีซิส

15. หยุดการจำลอง แล้วเพิ่มตัวต้านทาน R_f ค่า **100 k Ω** ต่อจากขาเอาต์พุตกลับไปขา **IN+**
16. คำนวณ R_{eq} , V_{TH} และ V_{TL} ทางทฤษฎีตามสมการในหัวข้อ 2.3 แล้วเติมลงตารางที่ 6.2
17. รันการจำลองซ้ำ ทำตามข้อ 12–14 อีกรอบ
18. เปลี่ยน R_f เป็น **47 k Ω** แล้วทำซ้ำ สังเกตว่าแถบฮิสเทอรีซิสเปลี่ยนไปทางไหน



ช่องสำหรับภาพจับหน้าจอ

หน้าต่างผลการวัดจุดสลับขาขึ้นและขาลงหลังใส่ R_f

วิธีเก็บภาพ: จับภาพขณะเลื่อน LDR ผ่านจุดสลับพอดิ ทั้งสองทิศทาง

photos/lab02-c.png

5.6 ทดสอบภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวน

19. เพิ่มแหล่งจ่ายสัญญาณรบกวนเข้าไปในวงจร — วาง SINE generator ตั้งแอมพลิจูด **50 mV** ความถี่ **500 Hz** แล้วต่ออนุกรมเข้ากับเส้น **Vsensor** ผ่านตัวต้านทาน **100 Ω**
20. ตั้ง **Vref** ให้อยู่ตรงกลางย่านที่สัญญาณเซนเซอร์ผ่านพอดี
21. ดูรูปคลื่นเอาต์พุตบนออสซิลโลสโคป นับจำนวนครั้งที่เอาต์พุตสลับสถานะในหนึ่งช่วงเวลา
22. ทำซ้ำสามกรณี — ไม่มี R_f , $R_f = 100 \text{ k}\Omega$, $R_f = 47 \text{ k}\Omega$ บันทึกผลตารางที่ 6.3



5.7 ทางเลือกเสริม — จำลองซ้ำด้วย NI Multisim (ไม่บังคับ ไม่มีคะแนน)

เงื่อนไขเดียวกับใบงานที่ 1 ข้อ 5.9 — ทำได้เฉพาะเครื่อง Windows ที่มีสิทธิ์ใช้ NI Multisim รุ่นเดสก์ท็อป และ Proteus ยังเป็นโปรแกรมหลัก

23. เปิดไฟล์ Multisim จากใบงานที่ 1 แล้ว File → Save as... เป็นชื่อของใบงานที่ 2
24. Place → Component... (Ctrl+W) ตั้ง Group = <All groups> แล้วพิมพ์ชื่อในช่อง Component:

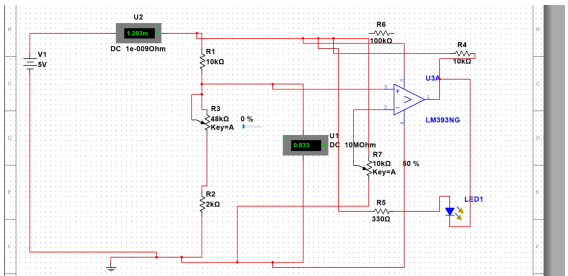
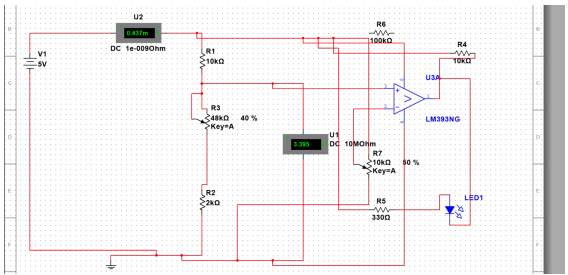
พิมพ์ในช่อง Component	เลือก	หมายเหตุ
lm393	LM393NG	ตัวถัง PDIP-8 (ON Semiconductor, "2-36 V Dual Comparator") ตรงกับตัวจริงบนบอร์ด — รุ่น LM393DG / LM393DR2G / LM393DMR2G เป็น SOIC-8 ใช้จำลองได้ผลเหมือนกัน

พิมพ์ในช่อง Component	เลือก	หมายเหตุ
potentio	POTENTIOMETER ตั้ง 10 k Ω , Key = B	RV1 (ใช้คนละปุ่มกับ LDR จำลองที่ตั้ง A ไว้)
led	LED_red	D2
resistor	10k Ω , 330 Ω , 100k Ω , 47k Ω	R4, R5 และ Rf ทั้งสองค่า

25. สัญลักษณ์ LM393 ใน Multisim แสดงทีละครึ่งตัว (ส่วน A หรือ B) ตอนวางโปรแกรมจะถามว่าใช้ส่วนใด ให้เลือก **A** — ขาไฟเลี้ยงอยู่ด้านบนและล่างของสัญลักษณ์ **ต้องต่อ +5 V และ GROUND ให้ครบ** ไม่เช่นนั้นเอาต์พุตค้าง
26. ต่อยังตามข้อ 5 ทุกข้อย่อย **รวมถึง R4 พูลอัพ** — โมเดล LM393 ของ Multisim เป็นเอาต์พุตแบบ open-collector เหมือนตัวจริง ลิม R4 แล้วเอาต์พุตจะอ่านได้ 0 V ตลอด เช่นเดียวกับใน Proteus
27. เครื่องมือวัดของ Multisim อยู่ที่ **แถบ Instruments ทางขวาของหน้าจอ** ไม่ได้อยู่ในหน้าต่างเลือกอุปกรณ์ — วาง Oscilloscope (XSC1) ต่อช่อง A เข้า Vsensor และช่อง B เข้า OUT ดับเบิลคลิกที่ตัวเครื่องมือเพื่อเปิดหน้าต่าง
28. สัญญาณรบกวนของข้อ 19 ใช้ Function generator (XFG1) จากแถบเดียวกัน ตั้ง Waveform = Sine, Frequency = 500 Hz, Amplitude = 50 mVp แล้วต่อผ่านตัวต้านทาน 100 Ω เช่นเดิม
29. รัน (F5) แล้วทำซ้ำข้อ 10–14 และ 19–22 เทียบ V_{TH} , V_{TL} และจำนวนครั้งที่เอาต์พุตสลับสถานะกับผลของ Proteus ในตารางที่ 6.1–6.3 — ทั้งสองโปรแกรมควรให้เกณฑ์ต่างกันไม่เกินไม่กี่มิลลิโวลต์ เพราะสมการฮิสเทอรีซิสในหัวข้อ 2.3 ขึ้นกับค่าตัวต้านทานเท่านั้น ไม่ขึ้นกับโมเดลของโปรแกรม

ตัวอย่างผลจริงจาก NI Multisim 14.1 — ขั้นตอนใส่ฮิสเทอรีซิส (ต่อยอดจากไฟล์ใบบางที่ 1: LM393NG, RV1 = R7 10 k Ω ตั้ง 50 % $\rightarrow V_{ref} = 2.50$ V, R4 = 10 k Ω พูลอัพ, R5 = 330 Ω , LED_red; R6 100 k Ω วางไว้แล้วแต่ยังไม่ต่อเข้าวงจร ตามลำดับขั้นตอน 5.4 $\rightarrow$ 5.5)

ตัวอย่างนี้สืบทอดการต่อจากใบบางที่ 1 ข้อ 5.9 คือ **R1 อยู่บน LDR จำลองอยู่ล่าง V_{sensor}** จึงต่ำเมื่อสว่างและสูงเมื่อมืด $\rightarrow$ "สว่าง = เอาต์พุตต่ำ = LED ติด" ตรงข้ามกับผังรูปที่ 2.1 ที่ LED ติดเมื่อมืด ตรรกะของตัวเปรียบเทียบเหมือนกันทุกประการ ต่างกันแค่ทิศของสัญญาณขาเข้า ถ้าต่อตามรูปที่ 2.1 ให้สลับคำว่า "สว่าง/มืด" ในสองตารางถัดไป

สถานะ	ตำแหน่ง LDR จำลอง	V_{sensor} (V)	เอาต์พุต LM393	LED	รูป
สว่าง	0 %	0.833	ต่ำ (0 V, ทรานซิสเตอร์ นำ)	ติด — กระแสไหล +5 V → R5 → LED → OUT	
มืด	40 %	3.395	สูง (ถูก R4 ดึง ขึ้น 5 V)	ดับ	

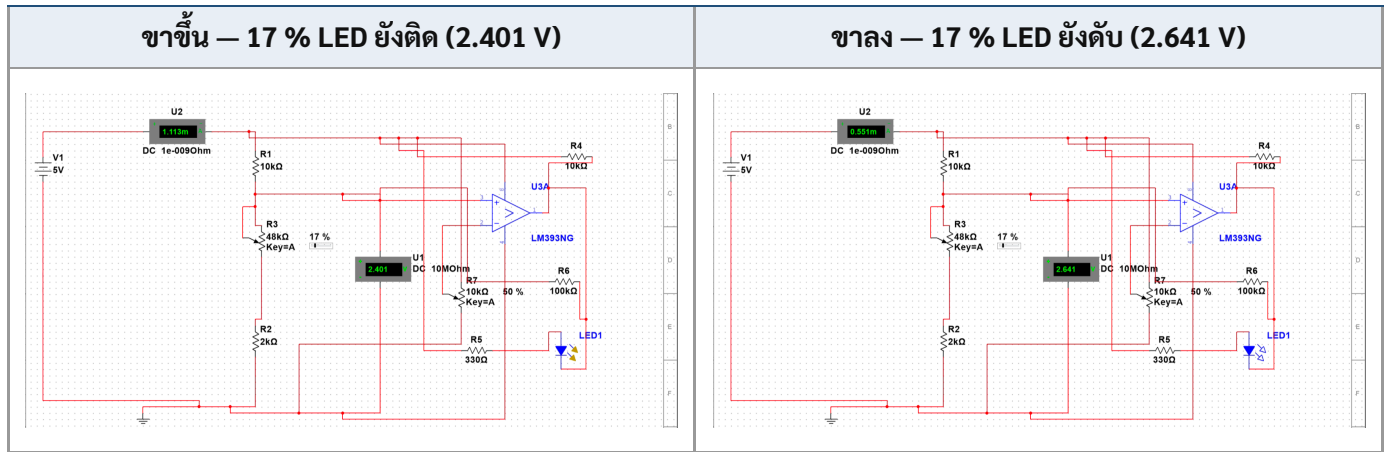
การกวาดหาจุดสลับสถานะทีละ 1 % (ตั้ง Increment = 1 % ที่ R3):

ทิศทาง	13 % (2.258 V)	14 % (2.328 V)	16 % (2.458 V)	18 % (2.576 V)	20 % (2.684 V)
สว่าง → มืด (ขาขึ้น)	ติด	ติด	—	ดับ	ดับ
มืด → สว่าง (ขาลง)	ติด	ติด	ดับ	ดับ	ดับ

จุดสลับทั้งสองทิศทางอยู่ระหว่าง 2.33 V กับ 2.58 V และไม่แยกจากกัน — ตรงกับทฤษฎีของวงจรเปรียบเทียบที่**ไม่มีฮิสเทอรีซิส** ซึ่งสลับที่ $V_{ref} = 2.50$ V พอดี นี่คือค่าอ้างอิงสำหรับตารางที่ 6.1

ตัวอย่างผลจริง — หลังต่อ $R_f = R_6$ 100 kΩ จาก OUT กลับไป $IN+$ (ค่าอ้างอิงสำหรับตารางที่ 6.2)

ตำแหน่ง R3	V_{IN+} ขาขึ้น (สว่าง→มืด)	LED	V_{IN+} ขาลง (มืด→สว่าง)	LED
12 %	2.095	ติด	2.095	ติด
16 %	2.346	ติด	2.581	ดับ
17 %	2.401	ติด	2.641	ดับ
19 %	2.754	ดับ	2.754	ดับ
22 %	2.903	ดับ	2.903	ดับ



สิ่งที่ต้องสังเกตให้ได้จากตารางนี้

1. ที่ตำแหน่ง LDR เดียวกัน (16 % และ 17 %) วงจรอยู่ได้สองสถานะ — มาจากทิศไหนก็ค้างสถานะนั้นไว้ นี่คือความจำ (memory) ที่ฮิสเทอรีซิสสร้างขึ้น และเป็นเหตุผลที่สัญญาณรบกวนเล็ก ๆ ทำให้เอาต์พุตกระพริบไม่ได้อีก
2. โวลต์มิเตอร์ที่ขา IN+ อ่านค่าต่างกันตามสถานะเอาต์พุต แม้ตัวแบ่งแรงดันจะอยู่ที่เดิม — เพราะ R_f ดึงจุด IN+ ขึ้นเมื่อเอาต์พุตสูง และดึงลงเมื่อเอาต์พุตต่ำ ผลต่างที่ 16 % คือ $2.581 - 2.346 = 0.235 \text{ V}$ ตรงกับความกว้างแถบตามหัวข้อ 2.3: $V_{cc} \cdot R_{eq}/R_f = 5 \times (10 \text{ k} \parallel 9.68 \text{ k})/100 \text{ k} = 5 \times 4.92 \text{ k}/100 \text{ k} = 0.246 \text{ V}$ (ต่างกัน 4 % จากโหลด 10 MΩ ของมิเตอร์และการปัดเศษตำแหน่ง %)
3. ตัวเปรียบเทียบยังสลับเมื่อ V_{IN+} ตัด $V_{ref} = 2.50 \text{ V}$ เหมือนเดิม — ฮิสเทอรีซิสไม่ได้ "ย้ายเกณฑ์ของ IC" แต่ป้อนกลับมาขยับสัญญาณที่ขาอินพุตให้กระโดดข้ามเกณฑ์ไปทันทีที่สลับสถานะ

ถ้ากวาดแล้วยังได้จุดสลับเดียวที่ 2.5 V และค่ามิเตอร์ที่ % เดียวกันเท่ากันทั้งสองทิศ แสดงว่าปลายด้านใดด้านหนึ่งของ R_f ยังไม่ต่อติด — ให้ซูมดูจุดเชื่อม (junction dot) ที่ปลายขาทั้งสองก่อนสงสัยโมเดล (ในการทำจริงครั้งนี้พลาดแบบนี้ 2 ครั้งก่อนจะต่อติด)

ข้อสังเกตจากการทำจริง — Multisim ต่อสายด้วยการ "คลิกปลายขา → คลิกปลายทาง" และจะยอมรับปลายทางที่เป็นสายเส้นอื่นได้เฉพาะเมื่อคลิกลงบนเส้นพอดี ถ้าคลิกเลยไปแม้เพียงกริดเดียว สายจะค้างเป็นปลายลอยโดยไม่มีค่าเตือน — จึงควรใช้ Simulate → Run แล้วดูค่าโวลต์มิเตอร์ทุกครั้งที่ต้องสายเสร็จหนึ่งกลุ่ม แทนการต่อให้ครบก่อนแล้วค่อยรัน

6. ตารางบันทึกผล

6.1 ผลก่อนใส่ฮิสเทอรีซิส

รายการ	ค่า
V_{ref} ที่ตั้งไว้ (V)	
กระแสรวมขณะเอาต์พุตสูง (mA)	
กระแสรวมขณะเอาต์พุตต่ำ (mA)	

รายการ	ค่า
จุดสลับขาขึ้น V_{TH} (V)	
จุดสลับขาลง V_{TL} (V)	
แถบฮิสเทอรีซิส (mV)	

6.2 ผลหลังใส่ฮิสเทอรีซิส

R_{eq} ที่ใช้คำนวณ = k Ω (มาจาก R_{sensor} ขนาน R_1 ที่จุดสลับ)

R_f	V_{TH} ทฤษฎี	V_{TH} จำลอง	V_{TL} ทฤษฎี	V_{TL} จำลอง	แถบ (mV)	คลาดเคลื่อน (%)
100 k Ω						
47 k Ω						

6.3 ภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวน 50 mV

กรณี	แถบฮิสเทอรีซิส (mV)	จำนวนครั้งที่สลับสถานะ	ผลการประเมิน
ไม่มี R_f			
$R_f = 100$ k Ω			
$R_f = 47$ k Ω			

ค่า R_f ที่เหมาะสมที่สุดคือ เพราะ

7. คำถามท้ายใบบาง

- เอาต์พุตของ LM393 เป็นแบบตัวเก็บเปิด การออกแบบเช่นนี้มีข้อดีอย่างไรเมื่อต้องต่อวงจรเปรียบเทียบหลายตัวเข้าด้วยกันบนสายเดี่ยว (ค้นคำว่า *wired-AND* ประกอบ) และมีข้อเสียอะไร
- ถ้าเปลี่ยนตัวต้านทานพูลอัพจาก 10 k Ω เป็น 1 k Ω จะเกิดผลอย่างไรกับความเร็วในการสลับสถานะและกระแสที่กินไป แสดงการคำนวณกระแสประกอบ
- จากตารางที่ 6.2 ค่าที่จำลองได้กับค่าที่คำนวณต่างกันกี่เปอร์เซ็นต์ ระบุสาเหตุที่เป็นไปได้อย่างน้อยสองข้อ
- ถ้าหุ่นยนต์เดินตามเส้นวิ่งด้วยความเร็ว 0.5 m/s และเส้นกว้าง 20 mm แถบฮิสเทอรีซิสที่กว้างเกินไปจะทำให้เกิดอะไรขึ้นตอนเลี้ยว คิดออกมาเป็นระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนไปก่อนระบบจะรู้ตัว
- เปรียบเทียบสองแนวทางนี้ในบริบทของหุ่นยนต์เดินตามเส้น — (ก) ส่ง V_{sensor} เข้า ADC แล้วเทียบค่าในซอฟต์แวร์ กับ (ข) ใช้ LM393 เทียบในฮาร์ดแวร์แล้วส่งสัญญาณดิจิทัลเข้าไปให้ระบุข้อดีข้อเสียอย่างน้อยด้านละสองข้อ พร้อมเลือกหนึ่งแนวทางและให้เหตุผล
- ฮิสเทอรีซิสในซอฟต์แวร์ทำได้เช่นกัน โดยเก็บสถานะก่อนหน้าไว้แล้วใช้เกณฑ์ต่างกันสองค่า ให้เขียนเป็นรหัสจำลอง (pseudocode) และอธิบายว่ามีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบอะไรเมื่อเทียบกับการทำในฮาร์ดแวร์

8. สรุปผลการปฏิบัติงาน

เขียนสรุปความยาว 10–15 บรรทัด ครอบคลุมประเด็นต่อไปนี้

- ผลของการเปลี่ยนค่า R_f ต่อพฤติกรรมวงจร ทั้งในแง่แถบฮิสเทอรีซิสและความไว
- ผลการทดสอบภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวน และข้อสรุปที่ได้
- ค่าอุปกรณ์ชุดสุดท้ายที่จะนำไปใช้ในใ้งานที่ 6

9. เกณฑ์การให้คะแนน

รายการประเมิน	คะแนน
ผังวงจรถูกต้อง มีพูลอัป และต่อ LED ตามหลักตัวเก็บเปิด	1.5
การคำนวณจุดสลับทั้งสองค่าพร้อมที่มาของ R_{eq}	1.0
ผลจำลองครบทั้งสามกรณีของ R_f พร้อมภาพประกอบ	1.0
การทดสอบภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวนและการนับจำนวนครั้งที่สลับ	1.0
ข้อสรุปการเลือกค่าที่มีเหตุผลรองรับด้วยตัวเลข	0.5
คำถามท้ายใ้งาน	1.0
รวม	6

10. เอกสารอ้างอิง

- Texas Instruments. *LM393 Dual Differential Comparators Datasheet*. SLCS005
- Texas Instruments. *AN-74 LM139/LM239/LM339 — A Quad of Independently Functioning Comparators*. Application Note
- Labcenter Electronics. *Proteus Design Suite Help — Virtual Instruments*.
- National Instruments. *NI Multisim Help — Instruments (Oscilloscope, Function Generator)*. <https://www.ni.com/multisim> (ใช้ในข้อ 5.7)
- ON Semiconductor. *LM393 Datasheet* — โมเดล LM393NG ที่ใช้ใน Multisim
- ประภาส สุวรรณเพชร. บอร์ดการเรียนรู้การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยคอมพิวเตอร์. <https://www.praphas.com/forum/index.php?board=3.0>

แหล่งค้นคว้าเพิ่มเติม

- Analog Devices. *MT-083 Tutorial — Comparators*.
- Texas Instruments. *Comparator with Hysteresis Reference Design* (TI Precision Designs)
- Horowitz, P. & Hill, W. *The Art of Electronics*, 3rd ed. บทที่ 12 — Logic Interfacing หัวข้อ Comparators

- All About Circuits. *Lessons in Electric Circuits* เล่ม III หัวข้อ Positive Feedback / Schmitt Trigger
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/>
-

สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา