

การทดสอบวงจรไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป (P-Spice) Experiment of Electric Circuits Using P-Spice Program.

ฤทธิศักดิ์ จริตงาม¹, ประสิทธิ์ สกนธวุฒิ², มารินา มะหนี³
ธนรัฐ ศรีวีระกุล⁴, ทรงธรรม ทุมดี⁵, วีระเชษฐ เจริญฤทธิ์⁶

บทคัดย่อ

ในการศึกษาและวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะเริ่มจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของชิ้นส่วนในวงจร ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้อธิบายได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการสร้างสมการของวงจรแล้วทำการหาผลเฉลยของสมการ แต่การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ทำได้ยากเมื่อต้องวิเคราะห์วงจรที่ซับซ้อนและในการวิเคราะห์วงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนนั้นพบว่าในบางวงจรที่ใช้ทดลองยังเป็นการต่อวงจรแบบลองผิดลองถูกหรือเป็นวงจรที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งผู้วิเคราะห์อาจเจอปัญหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาต่อเป็นวงจรในโปรโตบอร์ดนั้นเกิดความเสียหายอยู่ก่อนหน้านี้ ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์วงจร จึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น

ดังนั้นการประยุกต์ใช้โปรแกรม P-Spice ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับใช้วิเคราะห์วงจรไฟฟ้ามาทำการทดสอบวงจรต้นแบบ เป็นการลดปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว ซึ่งพบว่าจากการทดลองวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าด้วยโปรแกรม P-Spice ให้ผลตรงกับผลที่ได้จากวงจรต้นแบบจริง

^{1,2} อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
(ช่วยราชการ ณ. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.)

⁴ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

^{5,6} นิสิตภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ.

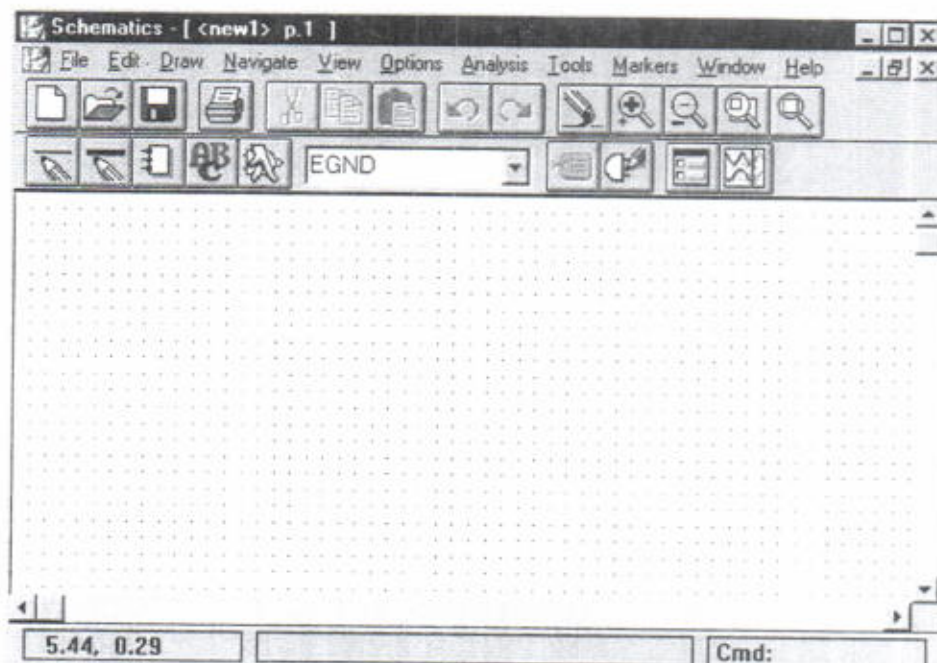
Abstract

Electric circuit characteristics were analyzed via mathematical modeling. The solution of those equations were compared to constructed circuits. Some slightly different will be found caused by the physical value of their parts and circuitry.

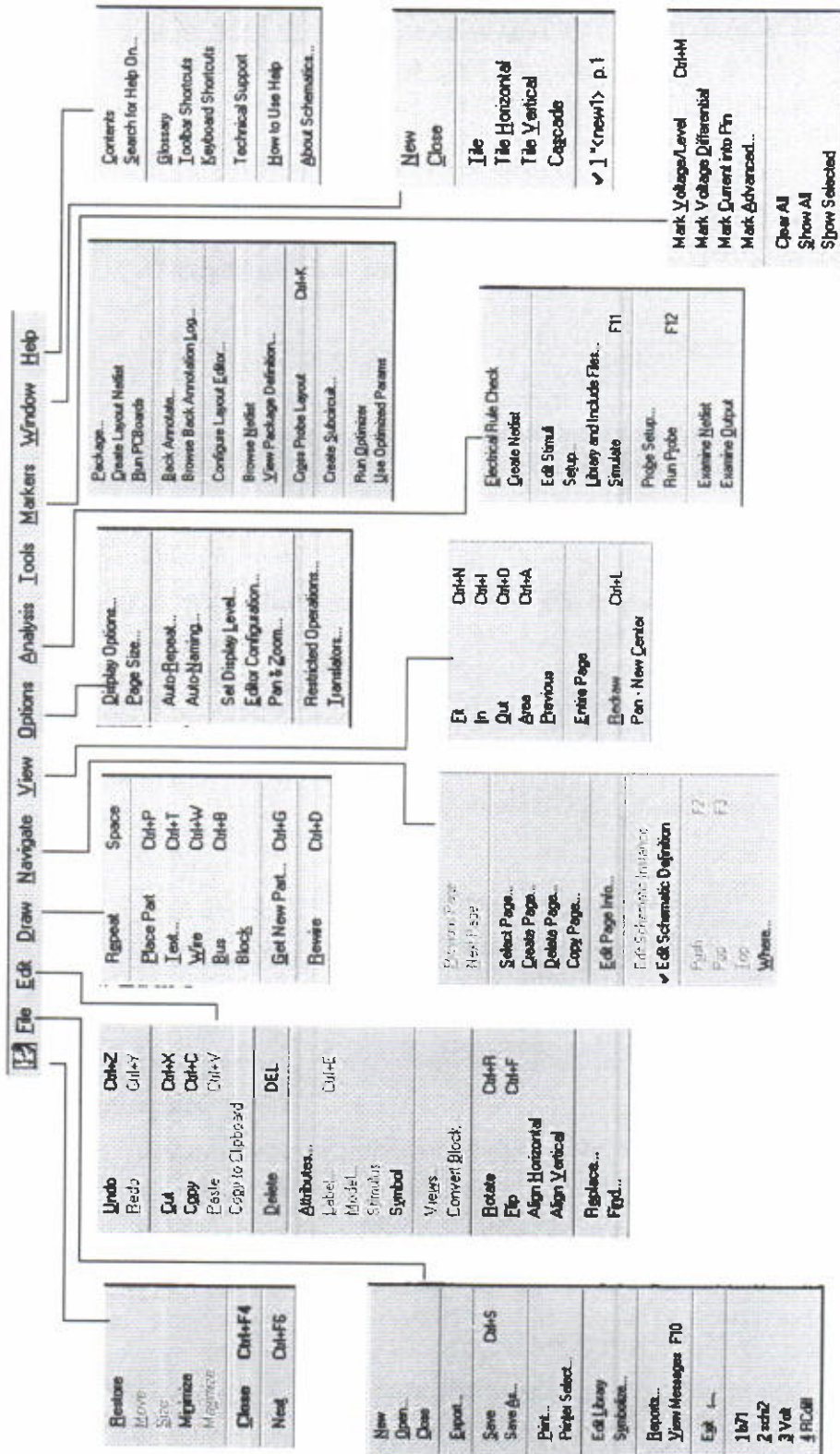
P-Spice program was used to simulate of some simple circuits and compare the result to physical circuits constructed. The comparison shown acceptable result.

1. การใช้งานโปรแกรม Schematics

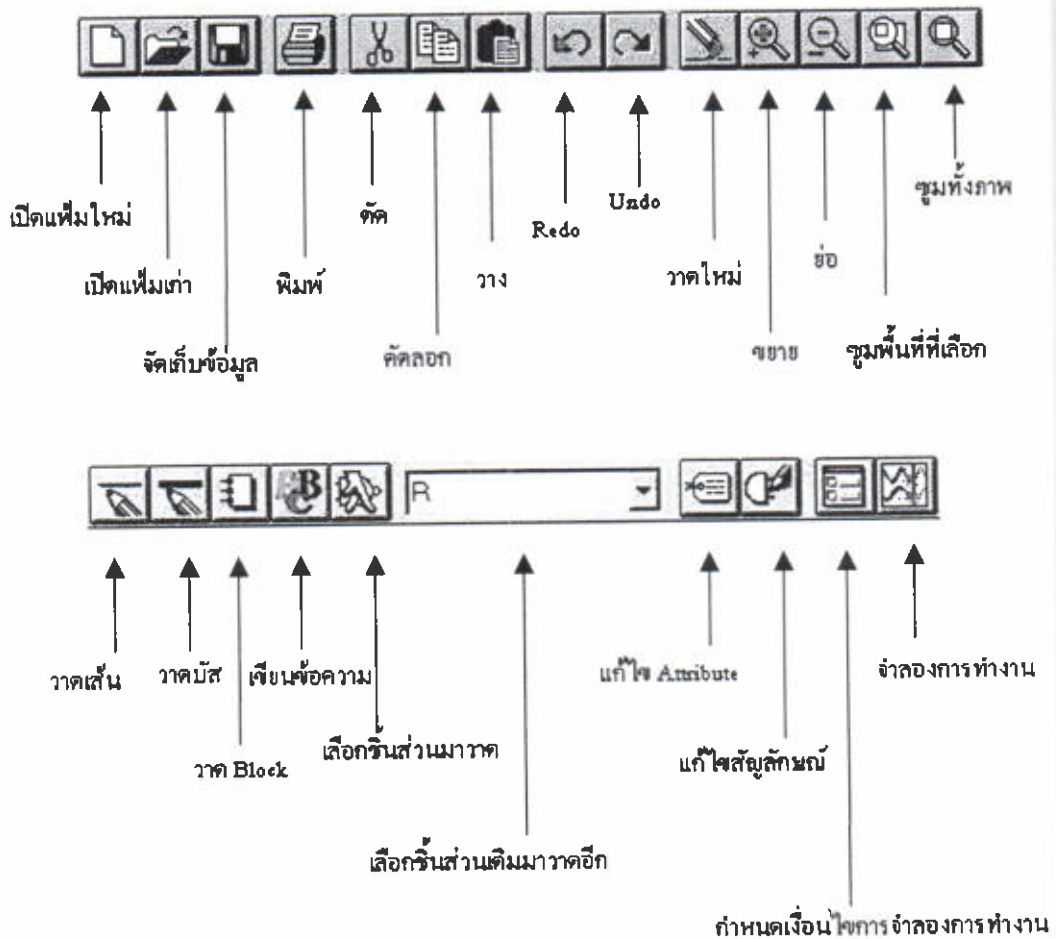
โปรแกรม Schematics สามารถเรียกใช้ได้จากแถบเมนูของ Windows โดยมีรูปแบบของโปรแกรมดังรูปที่ 1 ขณะเริ่มต้นใช้งาน โปรแกรมจะเปิดแฟ้มข้อมูลใหม่ให้โดยอัตโนมัติ ดังแสดงใน Title Bar ว่า <new1> ซึ่งหมายเลข 1 หมายถึงแฟ้มข้อมูลใหม่แฟ้มที่ 1 (สามารถเปิดแฟ้มข้อมูลใหม่ได้หลายแฟ้ม) และในขณะนี้โปรแกรมอยู่ในสถานะพร้อมจะทำงาน โดยการใช้งานในลำดับถัดไปนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ว่าต้องการเปิดแฟ้มข้อมูลเก่าหรือต้องการสร้างแผนภาพวงจรใหม่ต่อไป รายการเมนูหลักและเมนูย่อยของโปรแกรม Schematics แสดงได้ดังรูปที่ 2 และความหมายของไอคอนใช้งานอธิบายไว้ดังรูปที่ 3 (ปกติแล้วถ้าเลื่อนเมาส์ไปยังตำแหน่งไอคอนที่ใช้สั่งงานได้จะมีข้อความบ่งบอกถึงการใช้งานที่ Status Line ด้วย)



รูปที่ 1 ภาพหน้าจอของโปรแกรม Schematics



รูปที่ 2 รายการเมนูหลักและเมนูย่อยของโปรแกรม Schematics



รูปที่ 3 การใช้แถบเครื่องมือของโปรแกรม Schematics

2. ขั้นตอนการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงาน (หรือการวิเคราะห์วงจร) ด้วยโปรแกรม P-Spice for Windows ขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

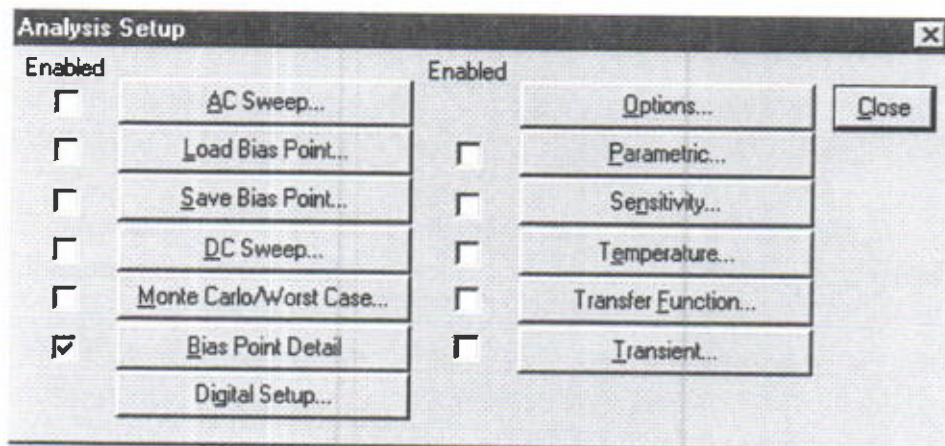
1. สร้างแผนภาพวงจรด้วยโปรแกรม Schematic โดยทำการวางอุปกรณ์ตามรูปแบบที่ต้องการ แล้วทำการเดินสายเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ให้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้สามารถทำได้โดยทำการเลือกอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่ต้องการจากคลังข้อมูล (Libraries) มาวางบนแปลนแล้วลากสายเชื่อมต่อให้ถูกต้อง
2. กำหนดจุดร่วมสำหรับใช้อ้างอิง (Reference Node) ในที่นี้หมายถึงการต่อลงดิน (Ground) ซึ่งแหล่งจ่ายอุปกรณ์ หรือชิ้นส่วนทุกตัวจะต้องลอยๆ ไม่ได้ หากไม่ต่ออยู่ระหว่างจุดร่วม (Node) ใดๆ ในวงจรแล้วจะต้องต่อลงดิน เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ครบวงจร และใช้เป็นจุดกราวด์ของวงจรไฟฟ้า

3. กำหนดเงื่อนไขการจำลองการทำงาน ชนิดหรือวิธีของการวิเคราะห์ กำหนดเงื่อนไขการแสดงผลสัญญาณเพื่อดูผลด้วยโปรแกรม Probe และอาจจะกำหนดจุดสังเกตสัญญาณในวงจร เพื่อให้โปรแกรม Probe แสดงลักษณะสัญญาณที่จุดสังเกตนั้นอย่างอัตโนมัติ
4. ทำการจัดเก็บ(Save) ข้อมูลเป็นแฟ้มข้อมูลที่มีนามสกุลเป็น.sch (Schematic File)
5. สั่งจำลองการทำงาน
6. ตรวจวัดสัญญาณ ตรวจดูผลข้อมูลเพิ่มเติมหรือใช้เครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ผล

3. วิธีการวิเคราะห์วงจร

ในการจำลองการทำงาน ผู้ใช้สามารถกำหนดวิธีการวิเคราะห์วงจรได้หลายวิธีเพื่อให้วิเคราะห์วงจรได้ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น ให้วิเคราะห์เฉพาะจุดทำงาน (Bias Point) ตามค่าต่างๆ ที่ระบุไว้ในแผนภาพวงจร, ให้วิเคราะห์ตามแผนภาพวงจร และให้ทำการกวาดค่า (Sweep) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง, ให้วิเคราะห์ตามแผนภาพวงจร และให้ทำการกวาดค่าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับหรือให้วิเคราะห์เพื่อดูสภาวะชั่วคราว (Transient) ในวงจร เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์แต่ละวิธี ผู้ใช้จะต้องกำหนดเงื่อนไขให้เหมาะสมกับแต่ละวิธี ยกเว้นกรณีการวิเคราะห์เฉพาะจุดทำงาน (Bias Point) เท่านั้น ซึ่งเป็นการให้โปรแกรมคำนวณคำตอบจากค่าของชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ระบุไว้ในแผนภาพวงจร (ไม่ต้องทำการกวาดค่าของแหล่งจ่าย) จึงถือเป็นการคำนวณขั้นพื้นฐานที่ไม่ต้องระบุเงื่อนไขใดๆ เพิ่มเติม

การเข้าสู่เมนูกำหนดวิธีการวิเคราะห์วงจรผู้ใช้สามารถเรียกได้จากเมนูย่อย Setup ภายใต้เมนูหลัก Analysis โดยเมนูย่อย Setup มีภาพหน้าจอตั้งรูปที่ 4 และในการเลือกวิธีการวิเคราะห์วิธีต่างๆ สามารถเลือกได้โดยการใช้เมาส์คลิกที่ช่องสี่เหลี่ยมหน้าชื่อวิธีการวิเคราะห์ ถ้ามีเครื่องหมาย ✓ อยู่หน้าวิธีการใด ก็เป็นการกำหนดให้ทำการวิเคราะห์วิธีการนั้น ถ้าทำการคลิกที่ช่องสี่เหลี่ยมนั้นซ้ำ เครื่องหมาย ✓ ก็จะหายไป ในการนี้ผู้ใช้สามารถกำหนดวิธีการวิเคราะห์ได้พร้อมกันหลายวิธี (แต่ต้องสอดคล้องกับรายละเอียดในแผนภาพวงจรด้วย) สำหรับการวิเคราะห์เฉพาะจุดทำงานปกติแล้วโปรแกรมจะกำหนดให้เองโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 4 ภาพหน้าจอเมนูย่อย Setup

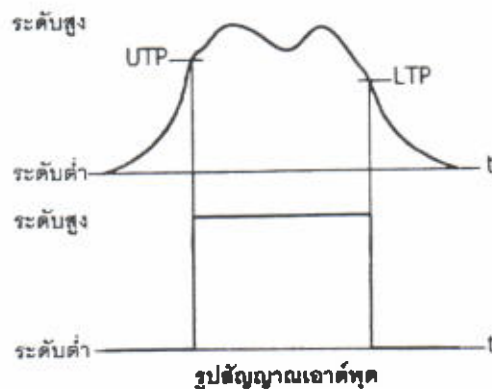
อนึ่งการใช้เมาส์คลิกที่ชื่อของวิธีการวิเคราะห์ จะเป็นการเปิดหน้าต่างสำหรับกำหนดรายละเอียดหรือเงื่อนไขของการวิเคราะห์ หลังจากใส่ข้อมูลเสร็จแล้วโปรแกรมจะเลือกวิธีวิเคราะห์ให้เองโดยอัตโนมัติ (จะมีเครื่องหมาย ✓ อยู่หน้าชื่อของวิธีการวิเคราะห์)

กรณีศึกษาที่ 1 วงจรสมิตต์ทริกเกอร์

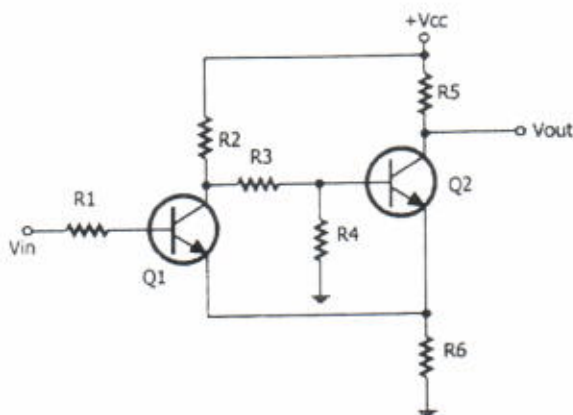
ทฤษฎีและหลักการ

วงจรสมิตต์ทริกเกอร์ (schmitt trigger) เป็นวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากสัญญาณรูปใดๆ ไม่ว่าจะเป็นไซน์, สามเหลี่ยม หรือกระแสปันเลื้อย (sawtooth) แม้กระทั่งรูปสัญญาณสี่เหลี่ยมเองที่เกิดความเพี้ยนหรือถูกรบกวน เมื่อผ่านวงจรนี้แล้ว จะได้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่สมบูรณ์ชัดเจนเหมือนเดิม

จุดสำคัญของวงจรสมิตต์ทริกเกอร์คือ จุดพิจารณาว่าจะเกิดเป็นสัญญาณซิกบวกลบและซิกกลับ ซึ่งเรียกว่าจุดทริกบน (Upper Trigger Point : UTP) และจุดทริกล่าง (Lower trigger Point : LTP) ซึ่งค่าของแรงดันทั้ง 2 จุดจะไม่เท่ากัน โดย UTP ต้องมากกว่า LTP



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของจุด UTP และ LTP ในการทำให้สัญญาณเอาต์พุตกลายเป็นรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 6 วงจรสมิตต์ทริกเกอร์
(ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก)

จากรูปที่ 5 เป็นสัญญาณอินพุตที่มีความผันผวนมากเมื่อต้องการให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมก็ต้องใช้วงจรมิตต์ทริกเกอร์ ซึ่งก็คือจะต้องกำหนดจุดทริก UTP และ LTP เมื่อแรงดันอินพุตมีค่าถึงจุด UTP วงจรจะทำงานเปลี่ยนระดับจากต่ำมาสูงแล้วคงสภาวะไว้ จนกระทั่งแรงดันอินพุตมีระดับมากจนถึงจุด LTP วงจรจะทำการเปลี่ยนระดับสัญญาณจากสูงลงมามากขึ้นที่ ทำให้ได้รูปสัญญาณออกมาเป็นสี่เหลี่ยม

- วงจรมิตต์ทริกเกอร์(แบบใช้ทรานซิสเตอร์)

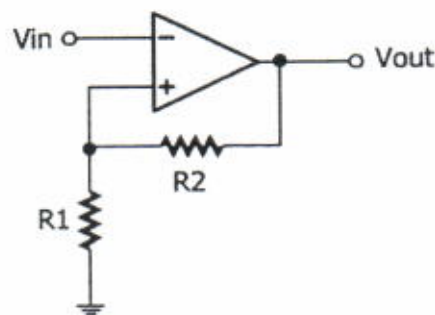
จากวงจรในรูปที่ 6 ในสภาวะเริ่มต้น $V_{out} = 0V$ เนื่องจาก Q_1 ยังไม่ทำงาน ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_3 และ R_4 กระตุ้นให้ Q_2 ทำงานจนถึงจุดอิ่มตัว เมื่อมี V_{in} เข้ามาที่เบสของ Q_1 จนถึงระดับแรงดันหนึ่งจะทำให้ Q_1 ทำงานจนถึงจุดอิ่มตัว ระดับแรงดันนี้คือจุด UTP เมื่อ Q_1 ทำงานจะทำให้กระแสไหลผ่าน Q_1 มายัง R_4 ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน R_3 และ R_4 ทรานซิสเตอร์ Q_2 จึงหยุดทำงานทันที ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ $+V_{CC}$

จากนั้น V_{in} จะค่อยๆ ลดลงตามธรรมชาติสัญญาณไฟฟ้า จนถึงจุดที่ทำให้ Q_1 หยุดทำงานอีกครั้ง ก็จะทำให้ Q_2 กลับมาทำงาน V_{out} จึงลดลงมาเป็น $0V$ ทันที จุดที่ทำให้ Q_1 หยุดทำงานเรียกว่า LTP และจะสลับไปมาเช่นนี้จนกระทั่งไม่มีสัญญาณอินพุต

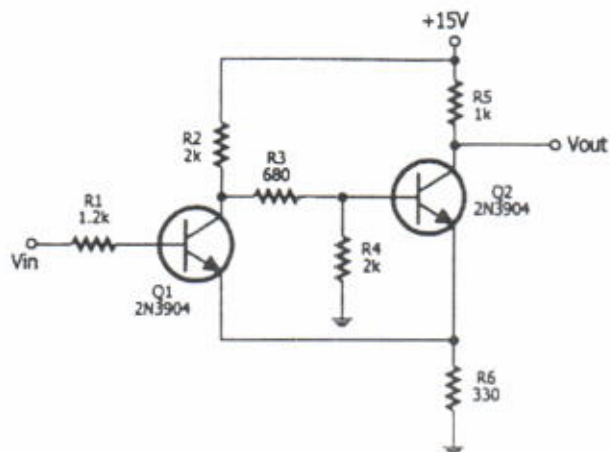
- วงจรมิตต์ทริกเกอร์(แบบใช้ไอซีออปแอมป์)

จากวงจรในรูปที่ 7 เมื่อจ่ายไฟเลี้ยง $V_{in} = 0V$ IC_1 จะได้รับการป้อนกลับแบบบวกจากเอาต์พุตผ่านทาง R_2 ทำให้ IC_1 ทำงานจนถึงจุดอิ่มตัว แรงดัน $V_{out} = +V_{CC}$ เมื่อ V_{in} เข้ามา IC_1 จะทำการเปรียบเทียบแรงดันที่ขาอินพุตทั้งสองคืออินพุตกลับเฟส(-)และอินพุตไม่กลับเฟส(+) เมื่อถึงจุดๆ หนึ่งแรงดันที่อินพุตกลับเฟสจะเท่ากับอินพุตไม่กลับเฟสทำให้ IC_1 ทำงานสลับขั้วของ V_{out} ให้มีค่าเท่ากับ $-V_{EE}$ และเมื่อ V_{in} มีค่าลดลงจนถึงจุดที่ทำให้แรงดันที่ขาอินพุตกลับเฟสมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขาอินพุตไม่กลับเฟส IC_1 ก็จะทำให้ V_{out} กลับมาเป็นบวก มีค่าเท่ากับ V_{CC} อีกครั้ง

จุดที่ทำให้ V_{out} กลายเป็นลบในวงจรมิตต์ทริกเกอร์แบบกลับสัญญาณคือจุด UPT และจุดที่ทำให้ V_{out} กลายเป็นบวกคือจุด LTP แต่ถ้ากำหนดเป็นวงจรมิตต์ทริกเกอร์แบบไม่กลับสัญญาณจะให้ผลตรงกับข้าม



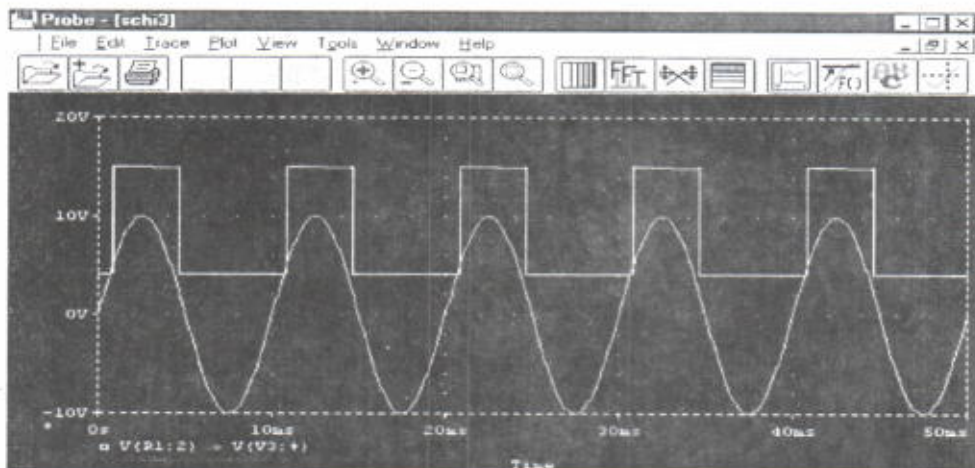
รูปที่ 7 วงจรมิตต์ทริกเกอร์(ที่ใช้ไอซีออปแอมป์)



รูปที่ 8 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

วิเคราะห์ผลการทดลอง

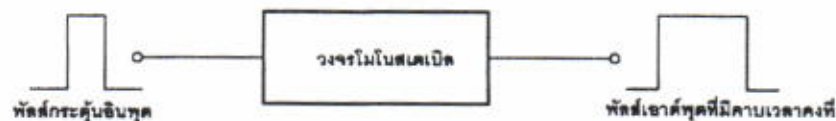
ต่อวงจรดังรูปที่ 8 แล้วป้อนสัญญาณไซน์เป็นสัญญาณ V_{in} ขนาด 10 V_{p-p} ความถี่ 1 kHz บันทึกรูปสัญญาณดังรูปที่ 9



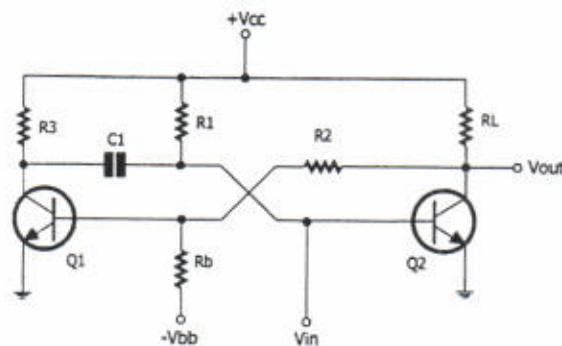
รูปที่ 9 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการประมวลผล
จากโปรแกรม P-Spice ของวงจรสมิตต์ทริกเกอร์

กรณีศึกษาที่ 2 วงจรโมโนสเตเบิล

วงจรโมโนสเตเบิล (monostable) เป็นวงจรที่ให้สัญญาณพัลส์เพียง 1 ลูก เมื่อมีการกระตุ้นหรือทริก 1 ครั้ง และจะคงสถานะของสัญญาณพัลส์นั้นจนกว่าจะหมดคาบเวลาจึงมีชื่อเรียกอีก 1 ชื่อคือ วันชอต (one shot) ในรูปที่ 10 แสดงไดอะแกรมการทำงานเบื้องต้นของวงจรโมโนสเตเบิล

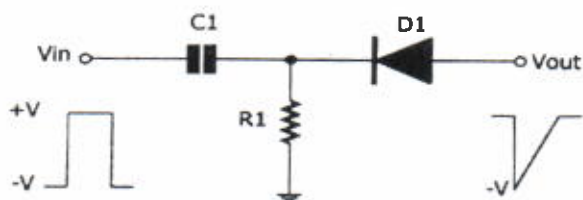


รูปที่ 10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิล



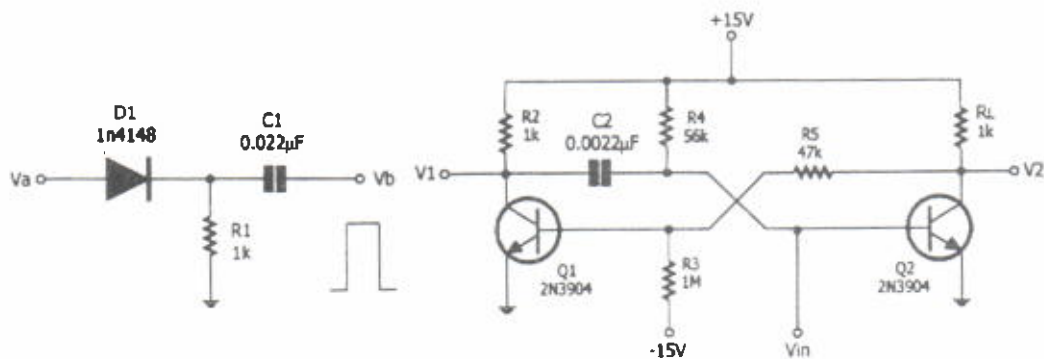
รูปที่ 11 วงจรโมโนสเตเบิลพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก

วงจรสมบูรณโมโนสเตเบิลแสดงในรูปที่ 11 เมื่อยังไม่มีสัญญาณกระตุ้นเข้าที่ V_{in} จะไม่ทำงาน เนื่องจากขาเบสของ Q_1 ได้รับไบแอสด้วยแรงดันลบผ่าน R_b มา ส่วน Q_2 จะทำงานจนถึงจุดอิ่มตัวเนื่องจากได้รับไบแอสตรงผ่านทาง R_1 ทำให้ $V_{out} = 0\text{ V}$ เมื่อสัญญาณกระตุ้นเข้ามาทาง V_{in} จะทำให้ Q_2 หยุดทำงาน จึงเกิดแรงดันไบแอสให้แก่ Q_1 ผ่านทาง R_2 ทำให้ Q_1 ทำงาน V_{out} จึงสวิงขึ้นไปถึงค่าเท่ากับ $+V_{cc}$ และจะอยู่ที่ค่านี้ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งถูกกำหนดโดยค่า R_1 และ C_1 จากความสัมพันธ์ $t = 0.69 R_1 C_1$



รูปที่ 12 วงจรกำเนิดสัญญาณกระตุ้นสำหรับวงจรโมโนสเตเบิล

ในช่วงเวลานี้แม้ว่าจะมีสัญญาณกระตุ้นเข้ามาทาง V_{in} อีก วงจรจะไม่มี การตอบสนองอย่างใด ๆ จนกว่าจะถึงกำหนดเวลา เมื่อถึงกำหนดเวลา Q_1 ก็จะได้รับโฟลบบมาไบแอสเช่นเดิมทำให้ Q_1 หยุดทำงาน และ Q_2 กลับมาทำงาน V_{out} จึงตกกลับเป็น 0 V อีกครั้ง และคงที่อยู่ที่ค่านี้นจนกว่าจะมีการกระตุ้นใหม่ จากการทำงานดังกล่าวสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจึงเป็นพัลส์เพียง 1 ลูกที่มีความกว้างเท่ากับ $0.6901R_1C_1$



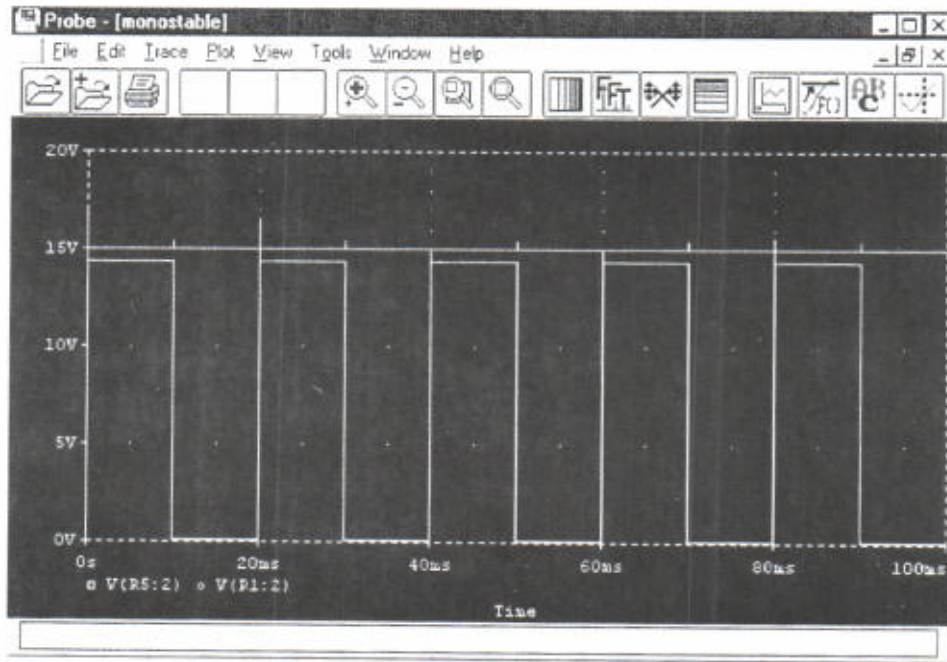
รูปที่ 13 วงจรโมโนสเตเบิล

วงจรกำเนิดสัญญาณกระตุ้น

สัญญาณที่ใช้ในการกระตุ้นให้วงจรโมโนสเตเบิลทำงาน สามารถเป็นได้ทั้งสัญญาณบวกและลบขึ้นอยู่กับวงจรโมโนสเตเบิลในรูปที่ 12 ต้องการสัญญาณกระตุ้นลบ ตัวอย่างวงจรกำเนิดสัญญาณแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งก็คือวงจร RC ดิฟเฟอเรนเชียลเออร์นั่นเอง แล้วใช้ไดโอดทำการตัดสัญญาณซิกบวกลงได้เป็นสัญญาณกระตุ้นแบบลบ

วิเคราะห์ผลการทดลอง

ต่อวงจรตามรูป 14 และจ่ายไฟเลี้ยง ± 15 V ป้อนสัญญาณสี่เหลี่ยมขนาด $2 V_{p-p}$ ความถี่ 2 kHz เข้าที่อินพุตของวงจรทำการวัดและบันทึกสัญญาณเอาต์พุตของวงจร



รูปที่ 14 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิล
ที่ได้จากการเขียนวงจรในโปรแกรม P-Spice แล้วทำการประมวลผล

ข้อสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในการเขียนวงจรลงในโปรแกรม P-Spice แล้วทำการประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองหรือสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรแล้วเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการต่อวงจรลงบนโปรโตบอร์ด ซึ่งผู้เขียนได้ยกรณีกฎสำหรับการวิเคราะห์วงจรโดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวคือ

1. วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ ผลการทดลองที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม P-Spice เราสามารถนำไปวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อวงจรดังกล่าวได้ไม่แตกต่างจากผลการทดลองที่ได้จากวงจรต้นแบบ เช่น จุดสำคัญของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์คือ จุดพิจารณาว่าจะให้เกิดเป็นสัญญาณซิกบวกลบและซิกลบซึ่งเรียกว่า จุกทริกบน (Upper Trigger Point : UTP) และจุกทริกล่าง (Lower Trigger Point : LTP) ซึ่งค่าของแรงดันทั้งสองจุดจะไม่เท่ากันโดย UTP ต้องมากกว่า LTP

2. วงจรโมโนสเตเบิล ผลการทดลองที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม P-Spice เราสามารถนำไปวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อวงจรดังกล่าวได้ไม่แตกต่างจากผลการทดลองที่ได้จากวงจรต้นแบบ เช่น หากเรากระตุ้นหรือทริกสัญญาณ 1 ครั้ง จะได้สัญญาณพัลส์ 1 ลูก และจะคงสถานะของสัญญาณพัลส์นั้นจนกว่าจะหมดคาบเวลา

เอกสารอ้างอิง

1. ธวัชชัย ชยวานิช. Easy Pspice For Windows. กรุงเทพฯ:เพียร์สัน ซีเอ็ดยูเคชั่น อินโดไชน่า, 2542, 207 หน้า.
2. ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. ปฏิบัติการวงจรพัลส์และออสซิลเลเตอร์. กรุงเทพฯ : อินโนเวติฟอิเล็กทรอนิกส์, ม.ป.ป., 117 หน้า.
3. นภัทร วัฒนเทนิทร์. วงจรไฟฟ้ากระแสตรง(ภาคปฏิบัติ). กรุงเทพฯ : สกายบุ๊ก, 2538, 208 หน้า.
4. ROBERT L. BOYLESTED. 1997. Introductory Circuit Analysis 8th edition. Prentice-Hall.
5. ROBERT L. BOYLESTED AND LOUIS NASHESKY. 1992. Electronic Devices & Circuit Theory 5th Edition. Prentice-Hall.
6. MUHAMMAD H. RASHID. 1995. P-Spice for Electronics and Electric Power. Prince-Hall.