บทที่ 8
วงจรมัลติไวเบรเตอร์
(Multivibrator Circuit)

5.1 วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ แบบคอลเล็กเตอร์คัปเปิล

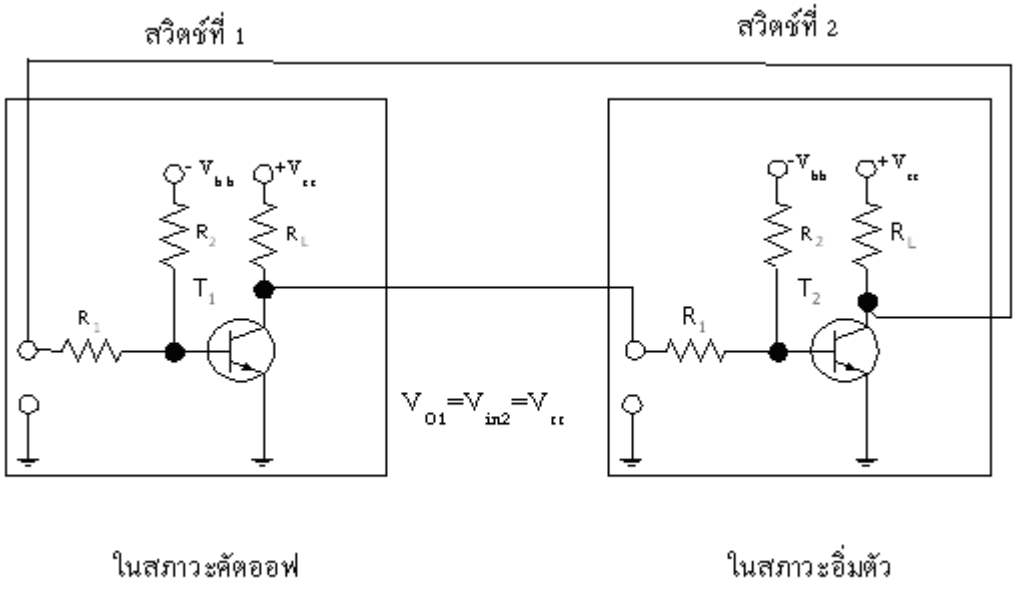
5.1.1 ชนิดของวงจรมัลติไวเบรเตอร์

วงจรมัลติไวเบรเตอร์ (Multivibrator) จัดได้ว่าเป็นวงจรสวิตช์แบบหนึ่งซึ่งสามารถผลิตพัลส์ ความถี่ต่างๆ ออกมาได้ ซึ่งสามารถจัดแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่ วงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable Multivibrator) วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Bistable multivibrator) และวงจร อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (astable Multivibrator) และนอกจากนี้ในแต่ละประเภทของวงจรมัลติไวเบเตอร์ยังสามารถจัดเป็นชนิดย่อยได้เป็นสองชนิดคือวงจรชนิดอิ่มตัว (Saturated) และชนิดไม่อิ่มตัว (Nonsaturated) วงจรมัลติไวเบรเตอร์เหล่านี้เมื่อพิจารณาดูให้ดีจะเห็นว่าประกอบขึ้นมาจากวงจรง่ายๆ สองวงจรต่อร่วมกันโดยที่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรหนึ่ง จะถูกนำมาเป็นสัญญาณอินพุตป้อนให้แก่วงจรสวิตช์วงจรหนึ่ง และสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่สองนี้จะถูกป้อนกลับไปใช้เป็นอินพุตของวงจรแรก การคัปปลิ้ง (Coupling) สัญญาณวงจรหนึ่งไปยังวงจรหนึ่งอาจทำได้ในลักษณะต่างๆกัน ดังนั้นจึงทำให้มีการแบ่งวงจรมัลติไวเบรเตอร์ออกเป็นประเภทต่างๆได้ แต่วิธีที่ใช้กันมากคือ วิธีคอลเล็กเตอร์คัปเปิล (Collector couple) และอิมิตเตอร์คัปเปิล (Emitter couple) ในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวงจรไบสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ สำหรับวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ และวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

5.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของวงจรมัลติไวเบรเตอร์

วงจรไบสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ คือวงจรมัลติไวเบรเตอร์ประเภทหนึ่ง ซึ่งมีสถานะการทำงานที่แน่นอนได้ สอง ลักษณะ วงจรนี้นิยมเรียกง่ายๆว่า “วงจรฟลิบ-ฟลอบ” (Flip-flop circuit) และในปกติในวงจรพื้นฐานจะประกอบด้วยสิ่งประดิษฐ์ประเภทแอคทีฟ (active element) 2 ตัว สิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวนี้อาจจะเป็นทันเนลไดโอด(tunnel diodes) หรือทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อ(junction transistor) ก็ได้

เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาการทำงานของวงจรไบสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ เราจะพิจารณาวงจรพื้นฐานง่ายๆ ของวงจรนี้โดยใช้วงจรทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อสองตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

กล่าวคือ ประกอบด้วยวงจรสวิตช์สองวงจร วงจรที่ 1 มีทรานซิสเตอร์ T_1 เป็นสิ่งประดิษฐ์ประเภทแอคทีฟ และในวงจรที่ 2 มีทรานซิสเตอร์ T_2 เป็นสิ่งประดิษฐ์ประเภทแอคทีฟเช่นเดียวกัน

วงจรสวิตช์ทั้งสองนี้ต่อร่วมกันอยู่ โดยที่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่ หนึ่งจะถูกนำมาใช้เป็นสัญญาณอินพุตป้อนเข้าวงจรสวิตอีกวงจรหนึ่ง หลักการทำงานของวงจรนี้ก็คือ เมื่อมีแรงดันอินพุตจากภายนอกป้อนเข้าที่อินพุตของวงจรสวิตช์วงจรหนึ่งวงจรใด จะทำให้วงจรสวิตช์ทั้งสองทำงานในสภาวะตรงกันข้าม (ON และ OFF) และจะคงสภาพนี้ตลอดไป กระทั่งเมื่อได้รับสัญญาณอินพุตใหม่เข้ามาที่อินพุตของวงจรสวิตช์ที่อยู่ในสภาวะ OFF การทำงานของวงจรสวิตช์ทั้งสอง ก็จะกลับเป็นตรงกันข้าม กล่าวคือจากสภาวะ ON เป็นสภาวะ OFF และจากสภาวะ OFF เป็นสภาวะ ON และจะคงสภาพเช่นนี้ต่อไปอีกจนกระทั่งมีสัญญาณอินพุตใหม่เข้ามาจึงจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

5.1.3 การทำงานของวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ แบบคอลเล็กเตอร์คัปเปิล

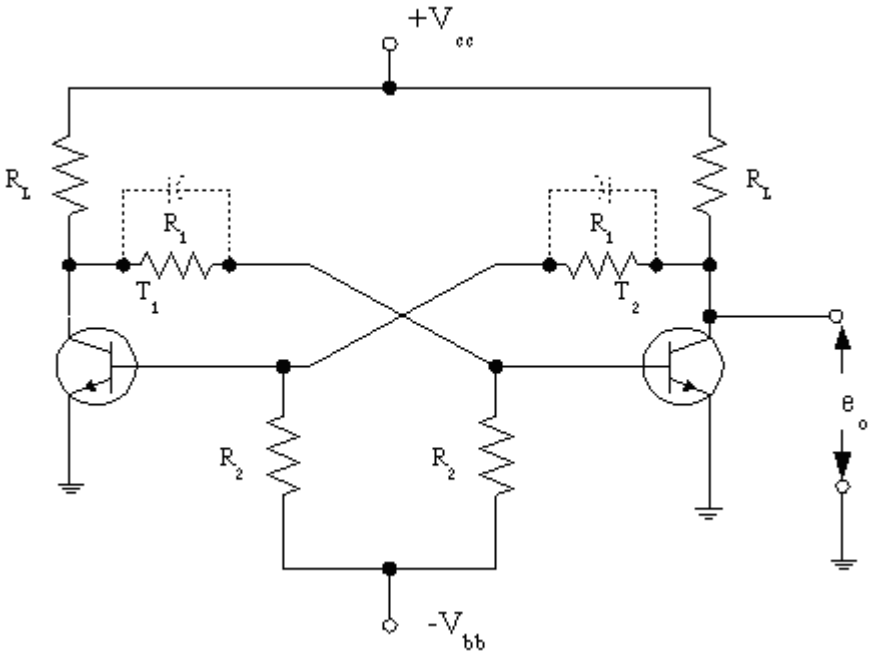
โดยการพิจารณาวงจรจากรูปที่ 5.1 วงจรสวิตช์ที่ 1 และวงสวิตช์ที่ 2 ก็คือวงจรกลับสัญญาณ (Inverter circuit) ที่เหมือนกันทุกประการ สมมติว่าวงจรสวิตช์ที่ 1 อยู่ในสภาวะ OFF และวงจรสวิตช์ที่ 2อยู่ในสภาวะ ON ดังนั้นทรานซิสเตอร์ T_1 จะคัตออฟ (Cut off)

แรงดันระหว่างคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ T_1 คือ $+V_{CC}$ ซึ่งแรงดัน $+ V_{CC}$ นี้จะเป็นสัญญาณอินพุตของวงจรสวิตที่ 2 อันจะทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 ได้รับไบแอสตรง จึงทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 ทำงานได้ในสภาวะ ON และสมมติว่า ขนาดของแรงดัน $+ V_{CC}$ มีค่ามากพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 อยู่ในสภาวะอิ่มตัว ได้ทำให้แรงดันสวิตช์ของวงจรสวิตช์วงจรที่ 2 มีค่าเป็น 0 และเนื่องจากแรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์และ อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ T_2 ซึ่งเป็นแรงดันอินพุตของวงจรสวิตช์ที่ 2 ถูกป้อนกลับไปเป็นสัญญาณอินพุตของ วงจรสวิตช์วงจรที่ 1 ดังนั้นในกรณีที่ไม่มีสัญญาณอินพุตใดๆป้อนให้แก่วงจรสวิตช์ที่ 1 แล้ว แรงดันลบ คือ $-V_{bb}$ ที่เบสของ T_1 ก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์ T_1 คัตออฟ และวงจรสวิตช์ทั้งสองก็จะคงสภาพเช่นนี้ตลอดไป แรงดันไฟฟ้าลบที่ปรากฏที่เบสของทรานซิสเตอร์ T_1 ได้รับแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 ซึ่งมาจากแหล่งจ่ายแรงดัน –Vbb

ดังนั้นในขณะนี้วงจรสวิตช์วงจรที่ 1 จะคงสถานะ OFF และวงจรสวิตช์ที่ 1 จะคงสถานะ ON ต่อไปและสถานะของวงจรสวิตช์ทั้งสองนี้จะเปลี่ยนแปลงไปได้ก็ต่อเมื่อมีแรงดันภายนอกถูกป้อนเข้ามาที่อินพุตของวงจรสวิตช์ซึ่งมีสถานะเป็น OFF เช่นเมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้าที่วงจรสวิตช์ที่ 1 และทำให้ทรานซิสเตอร์ T_1 ทำงานในสภาวะอิ่มตัว แล้วดังนั้นแรงดันเอาต์พุต ของวงจรสวิตช์ที่ 1จะมีค่าเปลี่ยน $-V_{CC}$ เป็น 0 โวลต์ (หรือน้อยมาก) นั่นคือแรงดันอินพุตของวงจรสวิตช์ที่ 2 จะมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 เปลี่ยนสถานะจาก ON เป็น OFF และมีผลทำให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรสวิตช์ที่ 2 เปลี่ยนจาก 0 โวลต์ เป็น $+ V_{cc}$ ซึ่งแรงดันนี้ก็คือแรงดันอินพุต ของวงจรสวิตช์ ที่ 1 ดังนั้นถึงแม้ว่าไม่มีสัญญาณอินพุตจากภายนอกเข้ามาอีกก็ตาม ทรานซิสเตอร์ T_1 ก็ยังสามารถทำงานอยู่ในสถานะ ON ได้ตลอดไปเนื่องจากมีสัญญาณอินพุตจากภายในป้อนอยู่ตลอดเวลานั้นคือ วงจรสวิตช์ วงจรที่ 1 จะ ON และวงจรสวิตช์ที่ 2 จะ OFF และจะคงสถานะนี้ต่อไปจนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงใดๆที่อินพุตของวงจรสวิตช์ที่ 2

วงจรสวิตช์ในรูปที่ 5.1 อาจเขียนใหม่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเล็กเตอร์คัปปลิ้ง (collector – coupling) โดยทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งจะทำงานอยู่ในสภาวอิ่มตัว และอีกตัวหนึ่งจะอยู่ในสภาวะคัตออฟ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความต้านทานของตัวต้านทานของวงจรสวิตช์ทั้งสองแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย วงจรนี้จะคงสภาพเช่นนี้ตลอดไปจนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงใดๆที่ อินพุตหรือมีวงจรทริกเกอร์ (trigger circuit) ถูกนำมาต่อร่วม

ด้วย วงจรนี้เรียนว่า “วงจรจุดฉนวน” ซึ่งจะมีผลทำให้วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ มีการทำงานได้และถูกนำไปใช้งานได้อย่างมีประโยชน์ยิ่งวงจรจุดชนวนนี้จะกล่าวถึงโดยละเอียดในบทต่อๆไป



รูปที่ 5.2 แสดงวงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเล็กเตอร์คัปเปิล

5.2 พารามิเตอร์ของวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเล็กเตอร์คัปเปิล

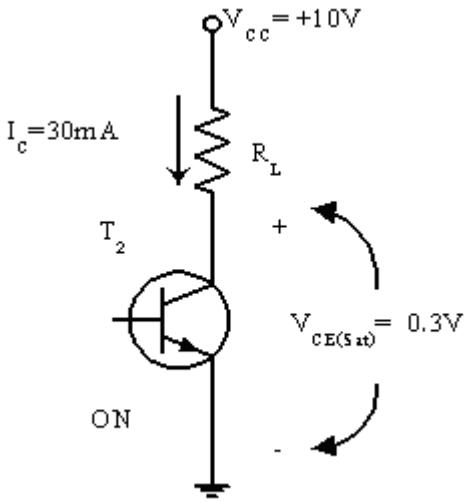
5.2.1 การหาค่าอุปกรณ์ที่ประกอบเป็นวงจร

ตัวอย่างที่ 1 จากวงจรที่แสดงในรูปที่5.2 จงออกแบบวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเล็กเตอร์คัปปลิ้งชนิดอิ่มตัว (saturated collector-coupling bistable multvibrator) ให้คุณสมบัติดังนี้ $e_0 = 10\ v_{peak}$, $I_c = 30$ mA วงจรนี้ทำงานได้ในย่านอุณหภูมสูงถึง 65 °C โดยกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นซิลิกอนแบบ NPN มีค่า $h_{FEmin} = 30$, $I_{CBO} = 0.5\ \mu A$ ที่อุณหภูมิ 20°C
และมีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง (D.C. Sources) ค่า 10 โวลต์อยู่ 2 ตัว

วิธีทำ สมมติว่า $V_{BEoff} = -0.5$ V.

ดังนั้นการอกกแบบวงจรก็คือการกำหนดค่า R_1,R_2 และ R_L ในวงจรที่ 5.2 นั้นเอง ขั้นตอนในการออกแบบก็คือ

หาค่า R_L จากการพิจารณาขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะ ON ดังในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะทรานซิสเตอร์ในสภาวะ ON

นั้นคือ $$R_L = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_C} = \frac{(+10)-(+0.3)}{30\ \text{mA}}$$

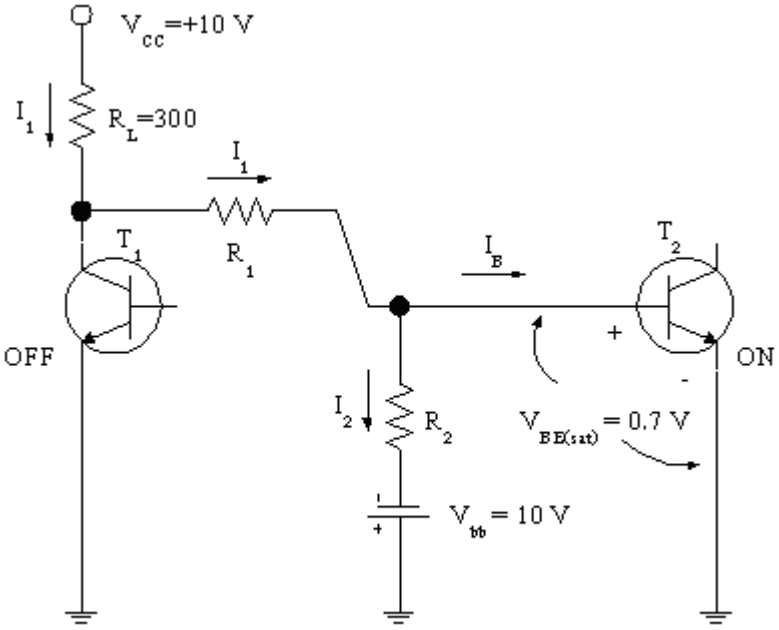
$$= \frac{9.7}{30\ \text{mA}} = 324\ \Omega$$

ค่าความต้านทานที่วางขายมักมีค่า 300 Ω ดังนั้นเราจึงควรเลือกค่า R_L = 300 Ω เพื่อให้แน่ใจว่าจะทำให้ได้กระแส I_C = 30 mA

2. จากวงจรดังกล่าวในรูปที่ 5.2 พิจารณาว่า T_2 อยู่ในสภาวะ ON และ T_1 อยู่ในสภาวะ OFF ดังนั้นส่วนหนึ่งของวงจรอาจเขียนเปรียบเทียบได้ดังในรูปที่ 5.4

3. จากวงจรเปรียบเทียบในรูปที่ 5.4 สามารถเขียนสมการโหนด (node equation) ได้นั้นคือสมการกระแสของวงจรเปรียบเทียบนี้เขียนได้ว่า

$$I_1 = I_2 + I_3$$



รูปที่ 5.4 แสดงวงจรเปรียบเทียบของส่วยหนึ่งของวงจรในรูปที่ 5.2
เมื่อพิจารณาว่า T_2 อยู่ในสภาวะ ON และ T_1 อยู่ ในสภาวะ OFF

ดังนั้น $$\frac{V_{(R_L+R_1)}}{R_L+R_1} = \frac{V_{R2}}{R_2}+I_B$$

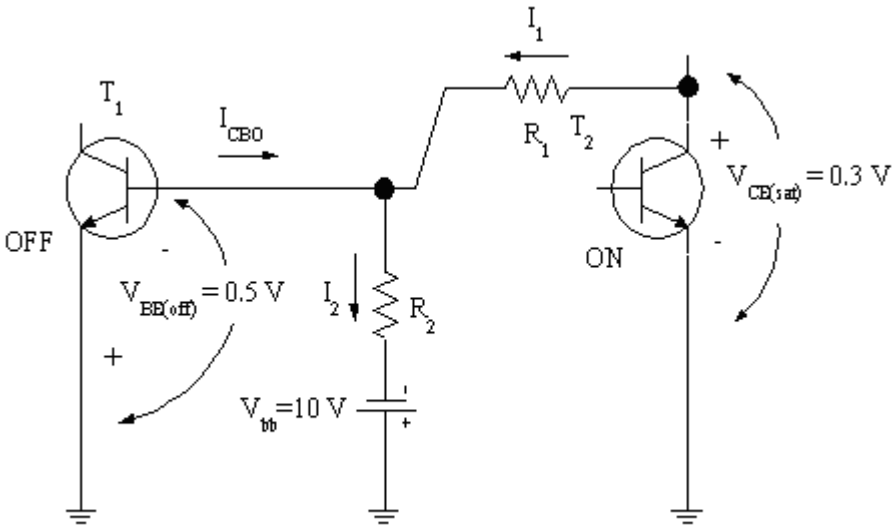
หรือ $$\frac{V_{CC}-V_{BEsat}}{R_L+R_1} = \frac{V_{BEsat}-V_{bb}}{R_2}+I_B$$

$$\frac{(+10)-[+0.7]}{0.3\,k+R_1} = \frac{(+0.7)-(-10)}{R_2}+1mA$$

$$\frac{9.3}{0.3\,k+R_1} = \frac{10.7}{R_2}+1mA \qquad \text{(สภาวะ ON)}$$

4. จากวงจรดังแสดงในรูปที่ 8.2 พิจารณาว่า T2 อยู่ในสภาวะ ON และ T1 อยู่ในสภาวะ OFF ดังนั้นส่วนหนึ่งของวงจรอาจเขียนวงจรเปรียบเทียบได้ดังในรูปที่ 5.5

5. จากวงจรเปรียบเทียบในรูปที่ 5.5 สามารถเขียนสมการโหนดได้



รูปที่ 5.5 แสดงวงจรเปรียบเทียบของส่วนหนึ่งของวงจรในรูปที่ 5.2
เมื่อพิจารณาว่า T_1 อยู่ในสภาวะ OFF และ T_2 อยู่ในสภาวะ ON

นั่นคือ สมการกระแสของวงจรเปรียบเทียบนี้เขียนได้ว่า

$$I_2 = I_1 + I_{CBO}$$

โดยที่ $I_{CBO} = 0.5\mu A$ ที่อุณหภูมิ 25^{o} C

หรือ $= 1.0\mu A$ ที่อุณหภูมิ 35^{o} C

$= 2.0\mu A$ ที่อุณหภูมิ 45^{o} C

$= 4.0\mu A$ ที่อุณหภูมิ 55^{o} C

$= 8.0\mu A$ ที่อุณหภูมิ 65^{o} C

ดังนั้น
$$\frac{V_{R_2}}{R_2} = \frac{V_{R_1}}{R_1} + I_{CBO}$$

$$\frac{V_{BEoff} - V_{bb}}{R_2} = \frac{V_{CEsat} - V_{BEoff}}{R_1} + I_{CBO}$$

$$\frac{(-0.5)-(-10)}{R_2} = \frac{(+0.3)-(+0.5)}{R_1} + 0.008\,mA$$

จะเห็นว่ากระแส I_{CBO} มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสอื่น ดังนั้นอาจไม่นำมาพิจารณาก็ได้ นั่นคือ

$$\frac{9.5}{R_2} = \frac{0.8}{R_1}$$

หรือ $R_2 = 11.9R_1$ (สมการ OFF)

เมื่อแทนค่า R_2 ในสมการ ON จะได้ว่า

$$\frac{9.3}{0.3k + R_1} = \frac{10.7}{11.9R_1} + 1mA$$

$$\frac{9.3}{0.3k + R_1} = \frac{0.9}{R_1} + 1mA$$

$$1mA \cdot R_1^{\,2} - 8.1R_1 + 0.27k = 0$$

จากสมการข้างบนสามารถหาค่า R_1 ได้ โดยใช้วิธีการแก้สมการกำลังสอง

ดังนั้น $$R_1 = \frac{8.1 \pm \sqrt{(8.1)^2 - \left(4 \times 1mA \times 0.27k\right)}}{2 \times 1mA}$$

$$R_1 = 8.1k\Omega$$

แต่ค่าความต้านทานที่วางขายและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ก็คือ 6.8 kΩ และ 8.2 kΩ ดังนั้นเราจึงเลือกค่า R_1 = 6.8 kΩ ทั้งนี้ก็เพื่อให้แน่ใจได้ว่าจะทำให้ได้กระแสเบสที่มีค่ามากพอสำหรับการทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในสภาวะ ON ได้อย่างเต็มที่

และดังนั้น $R_2 = 11.9R_1$

$= 11.9 \times 8.1k\Omega$

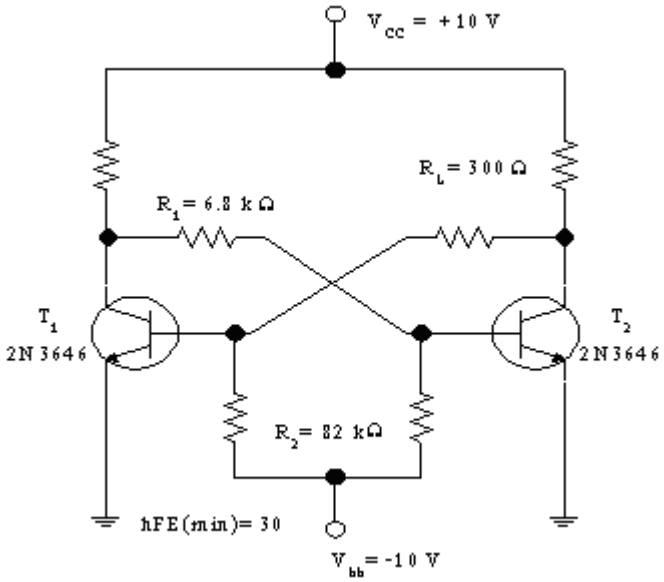
$R_2 = 96.4k\Omega$

5.2.2 เลือกอุปกรณ์ตามค่ามาตรฐาน

ค่าความต้านทานที่มีค่ามาตรฐานใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ คือ 82 kΩ และ 100 kΩ ดังนั้นเราจึงเลือกค่า R_2 = 82 kΩ ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่า ทรานซิสเตอร์ OFF อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรก็คือ R_1 = 6.8 kΩ, R_2 = 82 kΩ, และ R_L = 300 Ω

ตัวอย่างที่ 1 จากวงจรในรูปที่ 5.6 ซึ่งได้จากการคำนวณออกแบบ จงแสดงให้เห็นว่า ผลจากการคำนวณออกแบบวงจรนี้เป็นไปอย่างถูกต้อง และวงจรนี้สามารถทำงานตามที่ต้องการได้อย่างสมบูรณ์จากโจทย์สรุปได้ว่า

1. จะต้องพิสูจน์ให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์สามารถทำงานในสภาวะ ON ได้อย่างสมบูรณ์ คือเป็นสภาวะอิ่มตัว



รูปที่ 5.6

2. จะต้องพิสูจน์ให้เห็นว่า ทรานซิสเตอร์สามารถทำงานในสภาวะ OFF ได้อย่างสมบูรณ์ คือ เป็นสภาวะคัตออฟ การวิเคราะห์ขั้นที่ 1 สามารถทำได้ดังนี้ คือ

3.

จากวงจรแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.6 เขียนวงจรเปรียบเทียบการทำงานส่วนหนึ่งของวงจรได้ดังในรูปที่ 5.7 โดยพิจารณาว่าทรานซิสเตอร์ T_2 อยู่ในสภาวะ ON และทรานซิสเตอร์ T_1 อยู่ในสภาวะ OFF พิจารณาจากรูปที่ 5.7 จะเห็นว่าสามารถเขียนสมการโหนดได้ ดังนี้

$$I_1 = I_2 + I_B$$

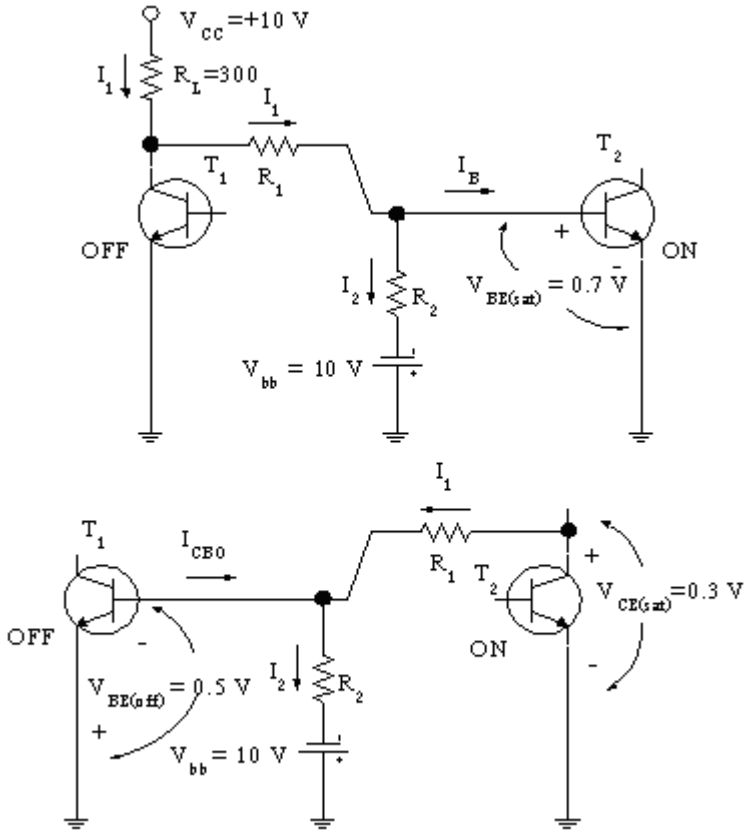
$$\frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_1 + R_L} = \frac{V_{BEsat} - V_{bb}}{R_2} + I_B$$

$$\frac{(+10) - (+0.7)}{6.8\,k + 0.3\,k} = \frac{(+0.7) - (-10)}{82\,k} + 1mA$$

$$\frac{9.3}{7.1k} = \frac{10.7}{82k} + I_B$$

$$I_B = 1.18mA$$

กระแสเบสนี้คือค่าที่คำนวณได้ และไหลจริงในวงจรซึ่งได้จากการออกแบบวงจรดังกล่าวมาแล้ว และจากรูปที่ 5.8 ซึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบแสดงการทำงานอีกส่วนหนึ่งของวงจรจะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้



รูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8

$$I_1 + I_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_1} = \frac{(+10) - (+0.3)}{0.3k} = 32.3mA$$

และเมื่อพิจารณาว่ากระแส $I_{CBO} = 0$

ดังนั้น $I_1 = I_2$

โดย $$I_1 = \frac{V_{bb} - V_{CEsat}}{R_1 + R_2}$$

$$= \frac{(-10) - (0.3)}{6.8k + 82k} = \frac{10.3}{88.8k}$$

$$= 0.117mA$$

ดังนั้น $I_C = (I_1 + I_C) - I_1 = 32.3mA - 0.117mA$

$Ic = 32.2\,mA$

จาก $\frac{I_c}{I_B} = h_{FE\,min}$

ดังนั้น $I_B = \frac{I_C}{h_{FE\,min}} = \frac{32.2\,mA}{30\,mA} = 1.07\,mA$

ค่ากระแส I_B คือกระแสเบสที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 ทำงานในสภาวะ ON ได้อย่างอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่ากระแส I_B ที่ได้จากการออกแบบ I_B = 1.24 mA มีค่ามากพอ (มากกว่า I_B = 1.07 mA) ที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 ทำงานในสภาวะ ON ได้อิ่มตัวอย่างสมบูรณ์
การวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2 สามารถทำได้ดังนี้คือ

จากวงจรเปรียบเทียบแสดงการทำงานส่วนหนึ่งของวงจรในรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 5.8 โดยพิจารณาว่า T_2 อยู่ในสภาวะ ON และ T_1 อยู่ในสภาวะ OFF สามารถเขียนสมการโหนดได้ว่า

$$I_2 = I_1 + I_{CBO}$$

$$\frac{V_{BEoff} - V_{bb}}{R_2} = \frac{V_{CEsat} - V_{BEoff}}{R_1} + I_{CBO}$$

$$\frac{V_{BEoff} - (-10)}{82k} = \frac{(+0.3) - V_{BEoff}}{R_1} + I_{CBO}$$

$$6.8\,k \cdot V_{BEoff} + 6.8\,k \cong 24.6\,k - 82\,k \cdot V_{BEoff}$$

ดังนั้น $V_{BEoff} = -0.488$

ซึ่งปกติเมื่อทรานซิสเตอร์ T_1 ทำงานในย่านคัตออฟ อย่างสมบูรณ์ ค่าของ V_{BEoff} = 0.0 V ดังนั้นผลจากการออกแบบวงจรให้ค่า V_{BEoff} = 0.488 V ซึ่งมีค่าน้อยกาว่า 0.0 V ทำให้เชื่อได้ว่าทรานซิสเตอร์ T_1 จะทำงานย่านคัตออฟได้อย่างสมบูรณ์

การวิเคราะห์ทั้งสองขั้นดังกล่าวมาแล้วนั้นเป็นการพิสูจน์ว่าทรานซิสเตอร์ T_1 ทำงานในสภาวะ ON ได้อิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นผลการออกแบบวงจรดังแสดงในรูปที่ 8.6 จึงเป็นไปอย่างถูกต้องโดยที่วงจรสามารถทำงานได้ผลตามที่ต้องการทุกประการ

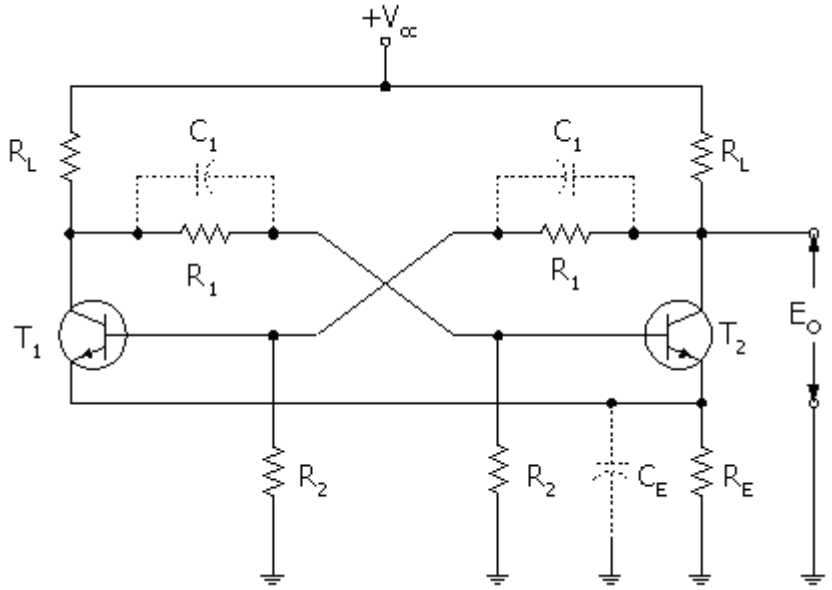
5.3 คุณสมบัติของวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิล

วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิลนี้มีลักษณะคล้ายกับวงจรไบสเตเปิลมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเล็กเตอร์คัปเปิล ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในเรื่องที่ 8 แต่ก็มีส่วนที่แตกต่างกันบ้างทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งจะกล่าวต่อไปในเรื่องนี้ รวมทั้งข้อดีและข้อเสียของวงจรแบบนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเล็กเตอร์คัปเปิลก้จะได้ถูกนำมาพิจารณาด้วย

5.3.1 วงจรพื้นฐาน

ลักษณะวงจรพื้นฐานของ วงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิล แสดงได้ดังรูปที่ 5.9 การทำงานของวงจรแบบนี้ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบอิ่มตัว มากกว่าแบบไม่อิ่มตัว โดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรม ซึ่งทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรแบบอิมิตเตอร์จะต้องมีค่า“เวลาสะสม” (storage time) น้อยมาก อย่างไรก็ดีวงจรแบบไม่อิ่มตัวก็สามารถนำไปใช้งานได้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะในงานประเภทที่เป็นสวิตช์ซึ่งมีความเร็วในการทำงานสูงมาก และในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรณีของวงจรซึ่งมีการทำงานแบบอิ่มตัว

หลักการง่าย ๆ ของวงจรไบสเตเบลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิลนี้เหมือนกันกับวงจรของวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบคอลเล็กเตอร์ กล่าวคือเมื่อทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งในวงจรทำงานอยู่ในสภาวะ ON อย่างอิ่มตัว ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งก็จะไม่ทำงานคือ OFF และอยู่ในย่านคัตออฟ และจะอยู่ในสภาวะนี้ตลอดไปจนกว่าจะมีแรงดันไบอัสจากภายนอกถูกป้อนเข้ามาสถานะการทำงานก็จะกลับเป็นตรงกันข้าม โดยทรานซิสเตอร์ซึ่ง ON จะเปลี่ยนเป็น OFF และทรานซิสเตอร์ซึ่ง OFF จะเปลี่ยนเป็น ON ซึ่งเวลาของการเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานนี้จะเร็วมาก วงจรพื้นฐานจากรูปที่ 5.9 สามารถเขียนใหม่ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.10 เพื่อสะดวกแก่การนำไปใช้ประกอบการอธิบายการทำงานของวงจรนี้

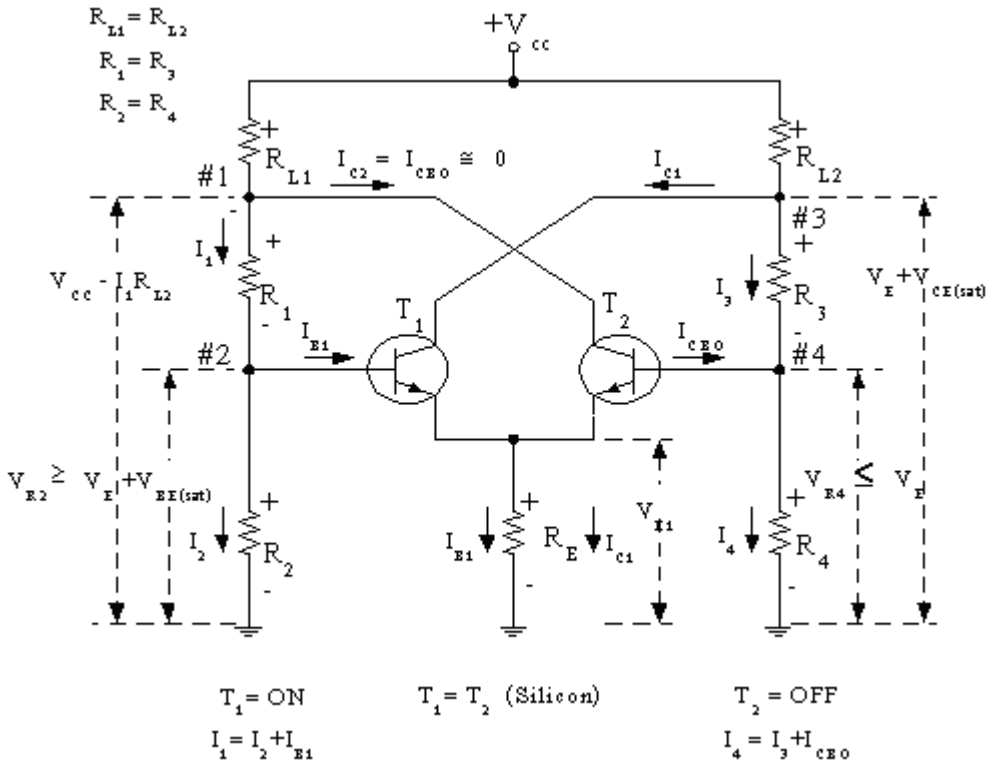


รูปที่ 5.9 แสดงวงจรพื้นฐานของวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิล

5.3.2 การทำงานของวงจร

จากรูปที่ 5.10 สมมุติว่าทรานซิสเตอร์T_1อยู่ในสภาวะ ON และเป็นย่านอิ่มตัวทรานซิสเตอร์ T_2 อยู่ในสภาวะ OFF โดยอยู่ในย่านคัตออฟ กระแสอิมิตเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ T_1จะไหลผ่านตัวต้านทานอิมิตเตอร์ร่วม R_E ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน R_E แรงดันที่ตกคร่อม R_E นี้จะมีผลทำให้ทรานซิสเตอร์ ทั้งสองได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับ กระแส I_2 ซึ่งไหลจากกราวด์ผ่านตัวต้านทาน R_2 ตรงไปยัง V_{cc} จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_2 ซึ่งมีผลทำให้ทรานซิสเตอร์ T_1 ได้รับแรงดันไบแอสตรง (ดังในรูป) ดังนั้น T_1 จะสามารถทำงานในสภาวะ ON และอยู่ในย่านอิ่มตัวได้ก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อม R_2 มีค่ามากกว่า ผลรวมของแรงดันตกคร่อม R_E และ V_{BEsat} จากที่ทรานซิสเตอร์ T_1 อยู่ในสภาวะ ON จะทำให้ T_2 อยู่ในภาวะ OFF เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อม R_E จะมีค่ามากกว่าแรงดันที่ตกคร่อม R_4

พิจารณาจากรูปที่ 5.10 ถ้าหากที่จุด 2 (เบสของทรานซิสเตอร์ T_1) มีศักดาเป็นศูนย์ (เมื่อเทียบกับกราวด์) ทรานซิสเตอร์ T_1 ก็จะเริ่มหยุดทำงานเปลี่ยนเป็นสภาวะ OFF ศักดาที่คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ T_1 จะมีค่าเพิ่มเป็น V_{cc} ดังนั้นที่จุด4 (แรงดันตกคร่อม R_4) จะมีค่าเป็นบวกเพิ่มมากขึ้น ผลจากแรงดันตกคร่อม R_4 เพิ่มขึ้นนี่เองจะทำให้ทรานซิสเตอร์ T_2 ได้รับแรง
ดันไบแอสตรงและเริ่มทำงานเปลี่ยนเป็นสภาวะ ON และแรงดันที่จุด 1 ก็จะมีค่าลดลงด้วย นั้นคือเมื่อมีการลัดวงจรจากจุด 2 และกราวด์ชั่วขณะหนึ่ง ขณะใดก็ตามจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานการณ์การทำงานของวงจรทันที



รูปที่ 5.10 แสดงวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิตมิเตอร์คัปเปิล

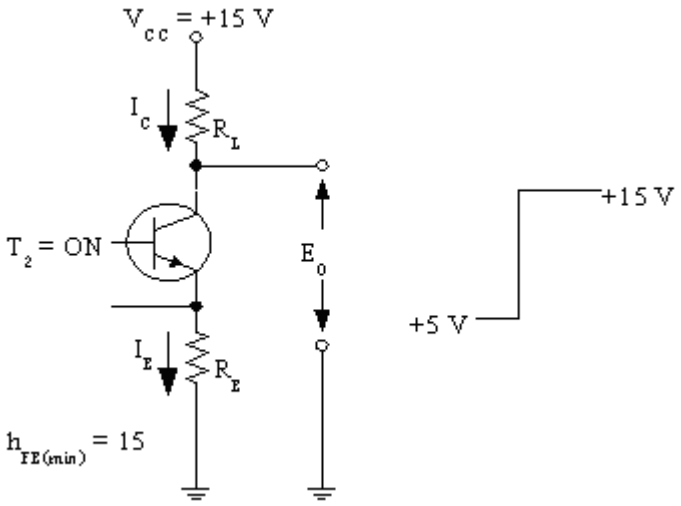
5.4 พารามิเตอร์ของวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิล

5.4.1 การคำนวณออกแบบวงจรไบสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิล

ตัวอย่างที่ 1 จากวงจรดังแสดงในรูปที่ 5.9 จงออกแบบวงจรไบสเตเบิลแบบอิมิตเตอร์คัปเปิลซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ $E_O = 10\ V_{peak}$,$I_C = 20\ mA$ กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวที่ใช้เป็นชนิดซิลิกอนชนิด NPN มีค่า $h_{FEmin} = 15$, $I_{CBO} \cong 0$ และมีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 15 V สมมุติว่า $V_{BEoff} = -0.5$ V โดยให้คำนวณหาค่าที่เหมาะสมของ R_1, R_2, R_L และ R_E ตามลำดับ

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าความต้านทานของ R_L และ R_E ได้จากการพิจารณาวงจรของทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในสภาวะ ON ดังในรูปที่ 5.11 โดย



รูปที่ 5.11 แสดงวงจรของทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในสภาวะ ON

$$V_{CC} - I_C R_L - V_{CE(sat)} - I_E R_E = 0 \qquad \text{.....(1)}$$

เมื่อ $I_E \approx I_C$

ดังนั้น
$$V_{CC} - I_C R_L - V_{CE(sat)} - I_C R_E = 0 \qquad \text{.....(2)}$$

$$-I_C (R_L + R_E) = -V_{CC} + V_{CE(sat)} \qquad \text{.....(3)}$$

$$(R_L + R_E) = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{I_C} \qquad \text{.....(4)}$$

$$(R_L + R_E) = \frac{15\ V - 0.3\ V}{20\ mA}$$

$$(R_L + R_E) = 735\Omega$$

จากสมการที่ 1 จะได้ว่า

$$V_{CC} - V_{R_L} - V_{CE(sat)} - V_E = 0 \quad \text{.....(5)}$$

$$V_E = V_{CC} - (V_{R_L} + V_{CE(sat)}) \quad \text{.....(6)}$$

$$V_E = 15\,V - (10\,V + 0.3\,V)$$

$$V_E = 4.7\,V$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE(min)}} \quad \text{.....(7)}$$

$$I_B = \frac{20\,mA}{15}$$

$$I_B = 1.33\,mA$$

$$I_E = I_B + I_C \quad \text{.....(8)}$$

$$I_E = 1.33\,mA + 20\,mA$$

$$I_E = 21.33\,mA$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} \quad \text{.....(9)}$$

$$R_E = \frac{4.7\,V}{21.33\,mA}$$

$$R_E = 220\,\Omega$$

เลือกค่า R_E ที่ใช้งานจริงเท่า 220 โอห์ม

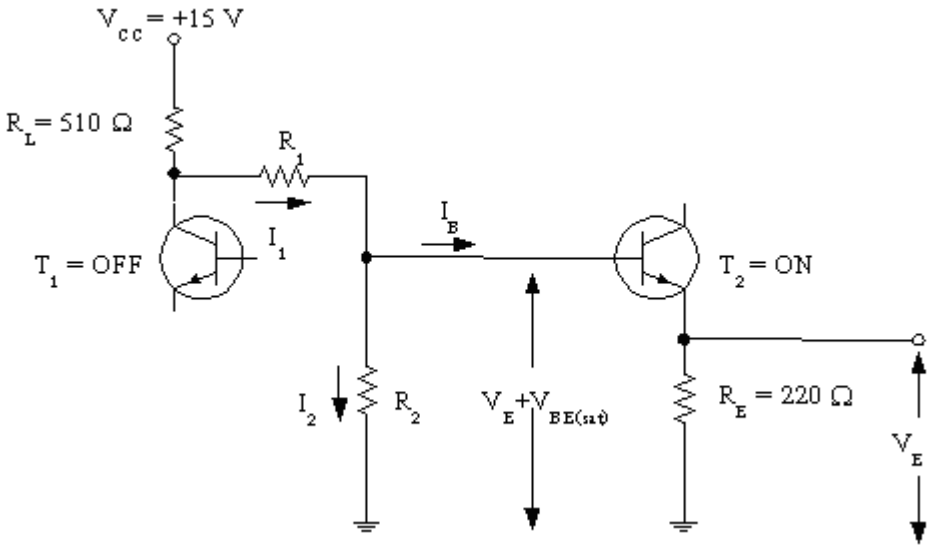
$$R_L = (R_L + R_E) - R_E \quad \text{.....(10)}$$

$$R_L = 735\,\Omega - 220\,\Omega$$

$$R_L = 515\,\Omega$$

เลือกค่า R_L ที่ใช้งานจริงเท่า 510 โอห์ม

ขั้นตอนที่ 2 จากรูปที่ 5.9 อาจเขียนเป็นวงจรเปรียบเทียบแสดงการทำงานบางส่วนได้ดังแสดงในรูปที่ 5.12 โดยที่ทรานซิสเตอร์ T_1 อยู่ในระหว่าง OFF และทรานซิสเตอร์ T_2 อยู่ในสภาวะ ON



รูปที่ 5.12 แสดงวงจรเปรียบเทียบการทำงานบางส่วนของวงจรสมบูรณ์ เมื่อทรานซิสเตอร์ T_1 อยู่ในระหว่าง OFF และทรานซิสเตอร์ T_2 อยู่ในสภาวะ ON

จากรูปที่ 5.12 เขียนสมการโหนดได้ดังนี้

$$I_1 = I_2 + I_B \qquad \text{.....(11)}$$

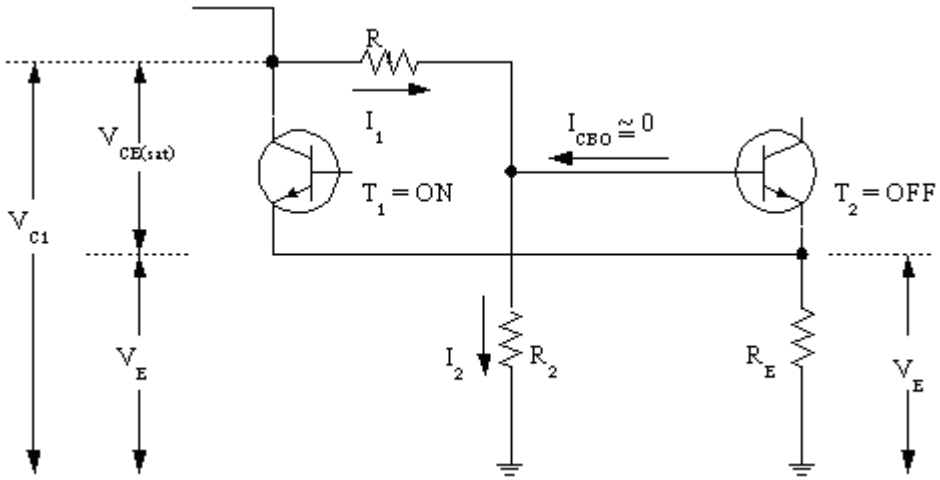
$$\frac{V_{R_L} + V_{R_1}}{R_L + R_1} = \frac{V_{R_2}}{R_2} + I_B \qquad \text{.....(12)}$$

$$\frac{V_{CC} - V_E + V_{BE(sat)}}{R_L + R_1} = \frac{V_E + V_{BE(sat)}}{R_2} + I_B \qquad \text{.....(13)}$$

$$\frac{15\ V - 4.7\ V + 0.7\ V}{515\ \Omega + R_1} = \frac{4.7\ V + 0.7\ V}{R_2} + 1.33\ mA$$

สมการ ON $$\frac{9.6\ V}{515\ \Omega + R_1} = \frac{5.4\ V}{R_2} + 1.33\ mA \qquad \text{.....(14)}$$

ขั้นตอนที่ 3 จากรูปที่ 5.9 อาจเขียนเป็นวงจรเปรียบเทียบแสดงการทำงานบางส่วนได้ดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยที่ทรานซิสเตอร์ T_1 อยู่ในระหว่าง ON และทรานซิสเตอร์ T_2 อยู่ในสภาวะ OFF



รูปที่ 5.13 แสดงวงจรเปรียบเทียบการทำงานบางส่วนของวงจรสมบูรณ์เมื่อทรานซิสเตอร์ T_1 อยู่ในระหว่าง ON และทรานซิสเตอร์ T_2 อยู่ในสภาวะ OFF

จากรูปที่ 5.13 เขียนสมการโหนดได้ดังนี้

$$I_2 = I_1 + I_{CBO} \qquad \text{.....(15)}$$

$$\frac{V_{R_2}}{R_2} = \frac{V_{R_1}}{R_1} + I_{CBO} \qquad \text{.....(16)}$$

$$\frac{V_E + V_{BE(OFF)}}{R_2} = \frac{V_{C_1} - V_E + V_{BE(OFF)}}{R_1} + I_{CBO} \qquad \text{.....(17)}$$

$$\frac{V_E + V_{BE(OFF)}}{R_2} = \frac{V_E + V_{CE(sat)} - V_E + V_{BE(OFF)}}{R_1} + I_{CBO} \qquad \text{.....(18)}$$

$$\frac{4.7\,V + \left(-0.5\,V\right)}{R_2} = \frac{\left(4.7\,V + 0.3\,V\right) - \left(4.7\,V + \left(-0.5\,V\right)\right)}{R_1} + 0\,V$$

$$\frac{4.2\,V}{R_2} = \frac{5\,V - 4.2\,V}{R_1} + 0\,V$$

$$4.2\,R_1 = 0.8\,R_2$$

$$R_2 = \frac{4.2\,R_1}{0.8}$$

สมการ OFF $$R_2 = 5.25\,R_1 \qquad \text{.....(19)}$$

ขั้นตอนที่ 4 ใช้สมการ ON และสมการ OFF ในการหาค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 นำสมการที่(19) แทนลงในสมการที่ (14)

$$\frac{9.6\ \text{V}}{515\,\Omega + R_1} = \frac{5.4\ \text{V}}{5.25\,R_1} + 1.33\ \text{mA} \qquad \text{.....(20)}$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการกำลังสอง

$$\frac{9.6}{515+R_1} = \frac{5.4}{5.25\,R_1} + 1.33\times10^{-3}$$

$$\frac{9.6}{515+R_1} = \frac{1.03}{R_1} + 1.33\times10^{-3}$$

$$\frac{9.6}{515+R_1} = \frac{1.03+\left(1.33\times10^{-3}\times R_1\right)}{R_1}$$

$$9.6\,R_1 = 1.03\left(515+R_1\right)+\left(1.33\times10^{-3}\times R_1\right)\left(515+R_1\right)$$

$$9.6\,R_1 = 530.45 + 1.03\,R_1 + 0.685\,R_1 + 1.33\times10^{-3}\,R_1^2$$

$$9.6\,R_1 - 1.715\,R_1 = 530.45 + 1.33\times10^{-3}\,R_1^2$$

$$7.885\,R_1 = 530.45 + 1.33\times10^{-3}\,R_1^2$$

$$1.33\times10^{-3}\,R_1^2 - 7.885\,R_1 + 530.45 = 0$$

หาค่า R_1 ด้วยสมการควอดราติก

$$R_1 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

$$R_1 = \frac{-(-7.885) \pm \sqrt{(-7.885)^2 - (4\times1.33\times10^{-3}\times530.45)}}{2\times1.33\times10^{-3}}$$

$$R_1 = \frac{-(-7.885) \pm \sqrt{62.17-2.82}}{2.66\times10^{-3}}$$

$$R_1 = \frac{7.885 \pm 7.70}{2.66\times10^{-3}}$$

$$R_1 = 5859.02\,\Omega \text{ หรือ } 69.54\,\Omega$$

เลือกค่า R_1 ที่ใช้งานจริงเท่ากับ 5.6 กิโลโอห์ม หาค่า R_2 โดยแทนค่า R_1 ในสมการที่ (19) จะได้

$$R_2 = 5.25\, R_1$$
$$R_2 = 5.25 \times 5859.02\ \Omega$$
$$R_2 = 30759.86\ \Omega$$

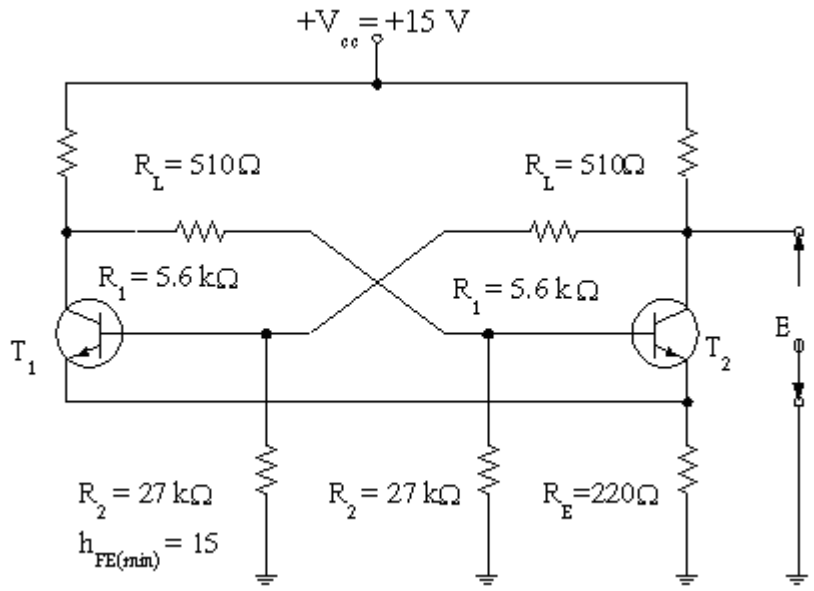
เลือกค่า R_2 ที่ใช้งานจริงเท่ากับ 27 กิโลโอห์ม

5.4.2 การเลือกอุปกรณ์ตามค่ามาตรฐาน

ในขั้นตอนที่ 1 เราเลือกใช้ค่า R_E ค่า 220 โอห์ม ได้ เนื่องจากมีวางขายในท้องตลาด ส่วนค่า R_Lที่มีวางขายและใกล้เคียงค่าที่คำนวณ (515 โอห์ม)ได้ก็คือ 510 โอห์ม และ 560โอห์ม ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ค่า R_L เท่ากับ 510 โอห์ม เพื่อให้แน่ใจว่ากระแส I_C จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20 มิลลิแอมป์

ในขั้นตอนที่ 5 พิจารณาว่า R_1 เป็นโหลดของทรานซิสเตอร์ซึ่งอยู่ในสภาวะ OFF ดังนั้นค่า R_1 จึงควรมีค่ามากเพื่อแน่ใจว่า ทรานซิสเตอร์จะคัตออฟได้อย่างสมบูรณ์ เราจึงควรเลือกค่า R_1 เท่ากับ 5.859 กิโลโอห์ม แต่ค่ามาตรฐานที่วางขายมี 5.6 กิโลโอห์ม และ 6.8 กิโลโอห์ม ดังนั้นค่า R_1 ที่เลือกใช้ก็คือ 5.6 กิโลโอห์ม เพื่อแน่ใจว่ากระแสเบสมีค่ามากพอสำหรับวงจรขณะทำงานในภาวะ ON ส่วนค่า R_2 ที่มีวางขายและใกล้เคียงค่าที่คำนวณ (30.75 กิโลโอห์ม)ได้ก็คือ 27 กิโลโอห์ม และ 33 กิโลโอห์ม ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ค่า R_2 เท่ากับ 27 กิโลโอห์ม เพื่อให้แน่ใจได้ว่าจะทำให้ ทรานซิสเตอร์คัตออฟได้อย่างสมบูรณ์

สรุปได้ว่าเพื่อให้วงจรทำงานได้อย่างสมบูรณ์ และถูกต้องตามต้องการค่าความต้านทานที่เหมาะสมก็คือ R_L เท่ากับ 510 โอห์ม R_E เท่ากับ 220 โอห์ม R_1 เท่ากับ 5.6 กิโลโอห์ม และ R_2เท่ากับ 27 กิโลโอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 5.14

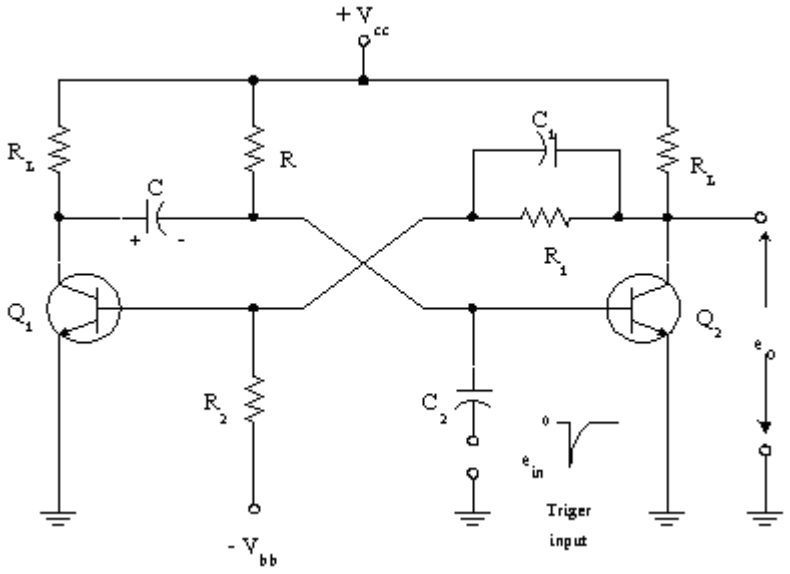


รูปที่ 5.14 แสดงวงจรไบสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แบบอิมิตเตอร์คัปเปิลที่สามารถทำได้จริง

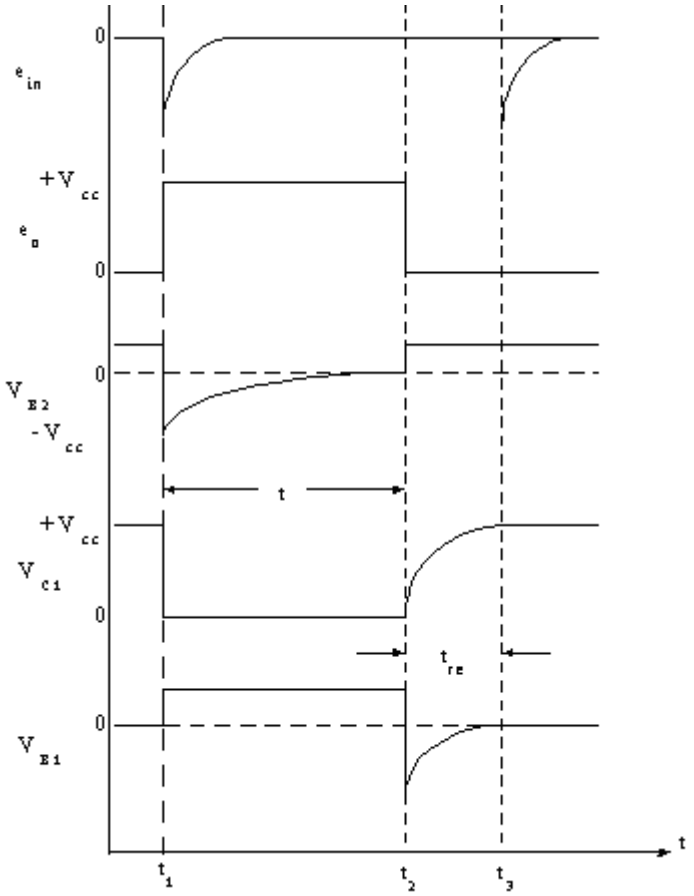
5.5 คุณสมบัติของวงจรโมโนสเตเบิลมัลตไวเบรเตอร์ (Monostable multivibrator)

วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงการทำงานเมื่อมีสัญญาณอินพุตมาควบคุมการทำงาน การทำงานของวงจรแต่ละครั้งจะทำงานเพียงสภาวะเดียว โดยที่วงจรหนึ่งจะทำงานตลอดเวลาส่วนอีกวงจรหนึ่งจะคัตออฟตลอดเวลา วงจรจะอยู่ในสภาวะเช่นนี้จนกว่าจะมีสัญญาณอินพุตมากระตุ้นสภาวะการทำงาสนจะกลับกันชั่วขณะ คือวงจรที่ทำงานอยู่จะคัตออฟ วงจรที่คัตออฟอยู่จะทำงานแทน หลังจากช่วงเวลาที่กำหนดไว้หมดลง วงจรจะกลับไปอยู่ในสภาวะเดิม เวลาดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยค่าของเวลาคงที่ RC วงจรจะกลับไปอยู่ในสภาวะเดิมจนกว่ากระทั่งมีอินพุตใหม่ป้อนเข้ามาอีก

วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ นี้จะประกอบไปด้วยวงจรกลับสัญญาณ (inverter circuit) สองวงจร ซึ่งเอาต์พุตของวงจรกลับสัญญาณวงจรแรก จะถูกนำมาเป็นอินพุตของวงจรที่สอง โดยวิธี อาร์-ซี คัปปลิ้ง (R-C coupling) และเอาตพุตของวงจรที่สองจะถูกนำเอามาเป็นอินพุต ของวงจรแรกโดยวิธีรีซิสทีฟคัปปลิ้ง (resistive coupling) สัญญาณแรงดันที่ใช้เป็นสัญญาณทริกเกอร์ของวงจรนี้ โดยปกติมักมีลักษณะแบบสัญญาณดิฟเฟอเรนชิเอต ที่มีครึ่งล่างเพียงครึ่งเดียว และจะทำให้ที่เอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์นี้มีรูปร่างเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้นี้ มักถูกนำไปใช้ในการควบคุมวงจรพัลส์อื่นๆ เช่น วงจรเกต (Gate circuit) เป็นต้น และวงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบนี้อาจถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า "วงจรถ่วงสัญญาณ" (delay circuit) และวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์นี้บางครั้งก็จะเรียกว่า "วันช๊อตมัลติไวเบรเตอร์" (one-shot multivibrator)แสดงดังรูปที่ 5.15



(ก) วงจร



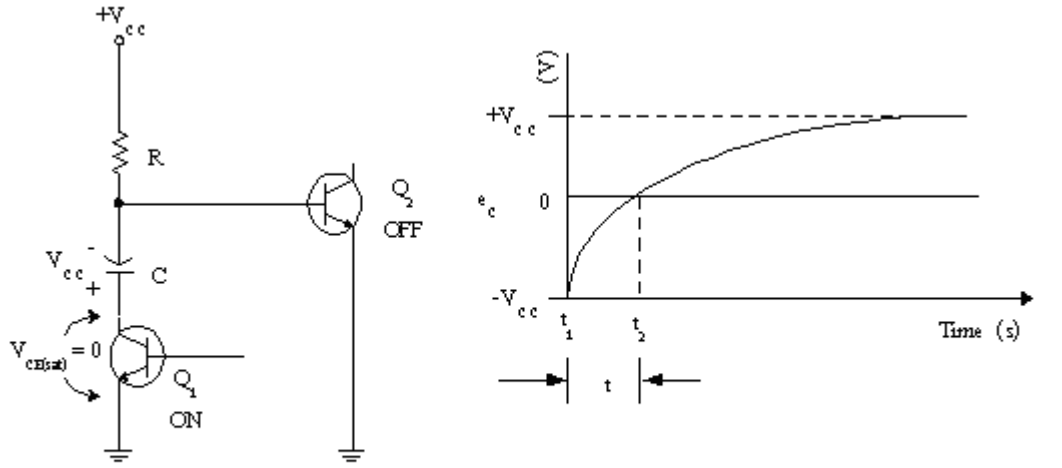
(ข) รูปของสัญญาณตามจุดต่างๆ

รูปที่ 5.15 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

5.5.1 การทำงานของวงจร

จากรูปที่ 5.15 เป็นวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ในการทำงานสภาวะปกติที่ยังไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนเข้ามา ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะไม่นำกระแส (OFF) ส่วนทรานซิสเตอร์ Q_2 จะนำกระแส (ON) เป็นสภาวะเสถียรภาพของวงจร ตัวเก็บประจุ C จะประจุแรงดันถึงค่า V_{CC} มีขั้วแรงดันซ้ายบวกขวาลบแสดงดังรูป

ที่เวลา t_{-1} วงจรแบ่งแรงดัน R_1 และ R_2 ร่วมกับแหล่งจ่ายแรงดัน V_{BB} จ่ายแรงดันไบแอส ย้อนกลับให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 ไม่นำกระแส (OFF) ในสภาวะเสถียรภาพนี้ เมื่อมีสัญญาณพัลส์แบบลบป้อนเข้ามาที่เบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 ที่เวลา t_{+1} ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 กลับไปอยู่ในสภาวะไม่นำกระแส (OFF) ขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 จะมีแรงดันค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่า V_{CC} มีผลทำให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแส (ON) จนถึงจุดอิ่มตัวเสมือนขาคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ถูกต่อลงกราวด์ ทำให้แผ่นเพลตขั้วบวกของตัวเก็บประจุ C ถูกต่อลงกราวด์แสดงได้ดังรูปที่ 5.16



(ก) แสดงวงจรการทำงานของวงจรที่เวลา t_{+1} (ข) การเก็บประจุของตัวเก็บประจุ C จากเวลา t_{+1} ถึงเวลา t_{-2}

รูปที่ 5.16 แสดงสภาวะการคายประจุของ C ผ่านทรานซิสเตอร์

ที่เวลา t_{+1} ทรานซิสเตอร์ Q_2 ได้รับแรงดันไบแอสกลับมีขนาดแรงดันเท่ากับ V_{CC} ตัวเก็บประจุ C ประจุแรงดันจาก $-V_{CC}$ จนถึง $+V_{CC}$ ผ่านตัวต้านทาน R และทรานซิสเตอร์ Q_1 แรงดันที่ถูกประจุไว้ที่ตัวเก็บประจุ C เป็นแรงดัน 0 V ทรานซิสเตอร์ Q_2 เริ่มนำกระแสอีกครั้งเมื่อตัวเก็บประจุ C เริ่มประจุแรงดันเป็นขั้วตรงข้าม ช่วงเวลาที่ทรานซิสเตอร์ Q_2 ไม่นำกระแส่ คือช่วงเวลาที่เป็นแรงดันพัลส์ออกเอาต์พุต e_Oในช่วงเวลา t ตามรูปที่ 5.16 (ข)แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 ได้รับแรงดันไบแอสย้อนกลับดังนั้น

ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะคงสภาพ OFF ต่อไป กระทั่งแรงดันนี้มีค่าเป็น 0 V ช่วงเวลาซึ่งทรานซิสเตอร์ Q_2 มีสภาพ OFF อยู่นี้ก็คือ "ขนาดความกว้างของพัลส์" (pulse duration time) t ที่เอาท์พุตนั่นเอง

5.5.2 ความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุต

จากรูปวงจรที่ 5.16 ช่วงเวลาซึ่งตัวเก็บประจุ C ใช้ในการเก็ปประจุกระทั่งมีแรงดันตกคร่อมเป็น 0 V โดยทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวต้านทาน R อาจหาได้จากสมการของการเก็บประจุดังนี้

$$e_C = E - \left(E \pm E_{CO}\right)\varepsilon^{-t/RC}$$

ซึ่งในกรณีของวงจรโมโนสเตเบิลเมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการจะเขียนได้ว่า

$$0 = V_{CC} - \left(V_{CC} + V_{CC}\right)\varepsilon^{-t/RC}$$

$$0 = V_{CC} - 2V_{CC}\,\varepsilon^{-t/RC}$$

$$2V_{CC} = V_{CC}\,\varepsilon^{-t/RC}$$

$$\varepsilon^{+t/RC} = 2$$

$$t = \frac{RC \log_{10} 2}{\log_{10} \varepsilon} = \frac{RC\left(0.301\right)}{0.434}$$

$$t = 0.69\,RC$$

ในทางปฏิบัติค่ารงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะมีค่าเพียง 90 % ของค่า V_{CC}

$$e_C = E - \left(E \pm E_{CO}\right)\varepsilon^{-t/R_L C}$$

$$0.9V_{CC} = V_{CC} - \left(V_{CC} + 0\right)\varepsilon^{-t_{re}/R_L C}$$

$$0.9V_{CC} = V_{CC} - \left(\frac{V_{CC}}{\varepsilon^{t_{re}/R_L C}}\right)$$

$$\frac{V_{CC}}{\varepsilon^{t_{re}/R_L C}} = 0.1V_{CC}$$

$$\varepsilon^{t_{re}/R_L C} = 10$$

$$t_{re} = \frac{R_L\,C \log_{10} 10}{\log_{10} \varepsilon} = \frac{R_L\,C\left(1.0\right)}{0.434}$$

$$= 2.3\,R_L C$$

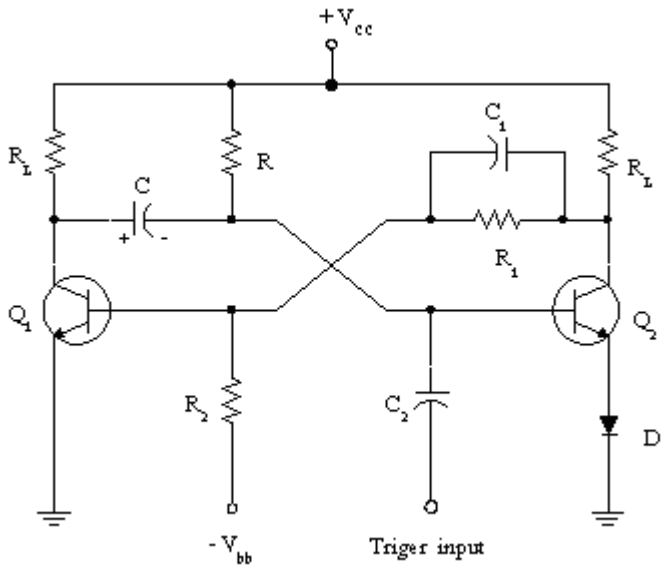
ดังนั้นช่วงเวลาอย่างน้อยที่สุดจะต้องให้สำหรับการทริกเกอร์วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ก็คือ T

โดยที่ $T = t + t_{re}$

$$= 0.69\,RC + 2.3\,R_L C$$

$$T = \left(069\,R + 2.3\,R_L\right)C$$

แรงดันที่ไบอัสกลับที่จ่ายให้รอยต่อที่จ่ายให้อิมิตเตอร์กับเบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 ที่เวลา t_{+1} มีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย V_{CC} ถ้าแรงดันที่ไบอัสกลับที่ป้อนให้รอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสมีค่ามากกว่าค่าทนได้ของทรานซิสเตอร์ (V_{EBO}) ทรานซิสเตอร์อาจจะชำรุดเสียหาได้ทันที การป้องกันทำได้โดยต่อไดโอดอำดับเข้ากับขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 ก่อนลงกราวด์แสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนนิดต่อเพิ่มไดโอดที่ขาอิมิตเตอร์ Q_2

จากรูปที่ 5.17 เป็นวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดต่อเพิ่มไดโอดที่ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิส Q_2 ช่วยป้องกันการพังของรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบส ซึ่งเมื่อตัวเก็บประจุ C ประจุแรงดันถึงแหล่งจ่าย V_{CC} จ่ายมาตกคร่อมขาแบสกับกราวด์ของทรานซิสเตอร์ Q_2 เป็นไบอัสกลับจะเป็นแรงดันตกคร่อมรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสส่วนหนึ่ง และเป็นแรงดันตกคร่อมไดโอด D อีกส่วนหนึ่ง ไดโอด D ทำหน้าที่เป็นวงจรแบ่งแรงดันไบอัสกลับของ V_{CC} ที่จ่ายให้ช่วยป้องกันมิให้แรงดันไบอัสกลับที่ตกคร่อมระหว่างรอยต่ออิมิตเตอร์กับเบสมีค่าสูงเกินกว่าแรงดัน V_{EBO} ที่ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะทนได้

5.6 พารามิเตอร์ของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

5.6.1 การออกแบบวงจร

จากวงจรโมโนสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 5.17 เรามาลองออกแบบวงจรดังต่อไปนี้ กำหนดให้ e_O = 12 Vpeak , I_C = 20 mA , Output pulse duration = 20 μsec , Q = 1200 pC ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวที่ใช้เป็นซิลิกอนแบบ NPN มีค่า h_{FEmin} = 20 , $I_{CBO} \cong 0$, V_{EBO} = 5 V , PIV = 60 V , ไดโอดที่ใช้เป็น ซิลิกอนไดโอด , ใช้แหล่งจ่ายไฟ 12 V และ 6 V อย่างละ 1 ตัวและค่า V_{BEoff} = -0.5

จงหาคำนวณหาค่า R , R_1 , R_2 , R_L , C , C_1 และ C_2

ลำดับขั้นการพิจารณา

1. จากทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะนำกระแส (ON) หาค่า $R_L = R_{L1} = R_{L2}$ โดยใช้กฎของโอห์ม

$$R_L = \frac{V_{CC}}{I_C} = \frac{12\ V}{20\ mA} = 600\ \Omega$$

แต่ R_L ที่ใช้งานจริง $= 620\ \Omega$

2. หาค่ากระแส (I_B) ต่ำสุดที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานถึงจุดอิ่มตัว

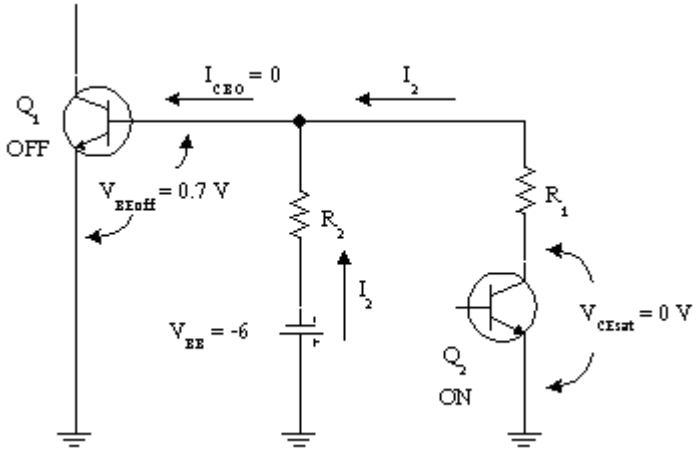
$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE\ min}} = \frac{20\ mA}{20} = 1\ mA$$

3. หาค่าความต้านทาน R ที่จะจำกัดกระแสเบสตามข้อที่ 2

$$R = \frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{I_B} = \frac{12\ V - 0.7\ V}{1\ mA}$$

$$R = 11.3\ k\Omega$$

4. ในกรณีที่วงจรทรานซิสเตอร์ขณะหยุดนำกระแส (OFF) แสดงดังรูปที่ 5.18 เขียนสมการของ $V_{BE(OFF)}$ ในเทอมของแหล่งจ่ายแรงดัน V_{BB} และเขียนสมการ OFF ในเทอมของ R_1 และ R_2



รูปที่ 5.18 แสดงวงจรขณะ Q_1 OFF

สมการ OFF

$$I_{CBO} = I_1 + I_2$$

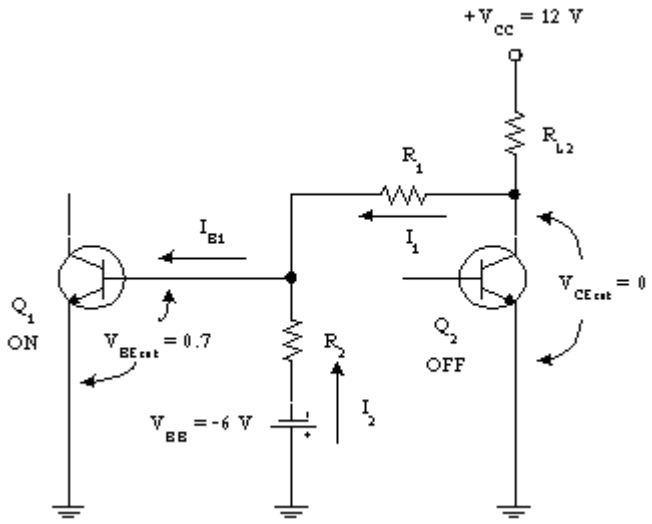
$$I_{CBO} = \frac{V_{BEoff} - V_{CEsat}}{R_1} + \frac{V_{BEoff} - V_{BB}}{R_2}$$

$$0 = \frac{(-0.5) + 0}{R_1} + \frac{(-0.5) - (-6)}{R_2}$$

$$0 = \frac{-0.5}{R_1} + \frac{5.5}{R_2}$$

$$R_2 = 11R_1 \qquad \text{.....(1)}$$

5. ในกรณีที่วงจรทรานซิสเตอร์ขณะนำกระแส (ON) แสดงดับรูปที่ 5.19 เขียนสมการวงจร ON ด้วยโหนด (node equation) ในเทอมของ R_1 และ R_1



รูปที่ 5.19 แสดงวงจรขณะ Q_1 ON

สมการ ON
$$I_1 = I_2 + I_B$$
$$\frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_{L2} + R_1} = \frac{V_{BEsat} - V_{BB}}{R_2} + I_B$$
$$\frac{12\,V - 0.7\,V}{0.62\,k\Omega + R_1} = \frac{0.7\,V - \left(-0.6\,V\right)}{R_2} + 1\,mA$$
$$\frac{11.3\,V}{0.62\,k\Omega + R_1} = \frac{6.7\,V}{R_2} + 1\,mA \qquad \text{.....(2)}$$

6. ใช้สมการ ON และสมการ OFF ในการหาค่าความต้านทาน R_1 และ R_2

นำสมการที่ (1) แทนลงในสมการที่ (2)

$$\frac{11.3\,V}{0.62\,k\Omega + R_1} = \frac{6.7\,V}{11R_1} + 1\,mA$$
$$11.3 \times 11R_1 = \left[6.7(0.62\,k\Omega + R_1)\right] + \left[1\,mA\,(0.62\,k\Omega + R_1)(11R_1)\right]$$
$$124.3R_1 = 4154 + 6.7R_1 + 6.82R_1 + 0.011R_1^2$$
$$124.3R_1 - 6.7R_1 - 6.82R_1 = 0.011R_1^2 + 4154$$
$$110R_1 = 0.011R_1^2 + 4154$$

$$0.011R_1^2 - 110R_1 + 4154 = 0$$

หาค่า R_1 ด้วยสมการควอดราติก (quadratic equation)

จากสูตร $$R_1 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$R_1 = \frac{-(-110) \pm \sqrt{(110)^2 - (4 \times 0.011 \times 4154)}}{2 \times 0.011}$$

$$= \frac{110 \pm \sqrt{12{,}100 - 182}}{0.022}$$

$$R_1 = \frac{110 + 109}{0.022} \cong 9954\ \Omega$$

เลือกค่า R_1 ใช้งานจริง $= 10\ k\Omega$

ใช้ค่า $R_1 = 10\ k\Omega$ แทนค่าลงในสมการที่ (1)

$$R_2 = 11R_1 = 11 \times 10\ k\Omega$$

$$R_2 = 110\ k\Omega$$

เลือกค่า R_2 ใช้งานจริง $= 100\ k\Omega$

7. ใช้สมการการประจุของตัวเก็บประจุหาค่าความจุของตัวเก็บประจุ C ที่ประจุแรงดันจาก $-V_{CC}$ ถึง 0 V ในเวลา 200 μsec โดยตัวเก็บประจุจะประจุผ่านตัวต้านทาน R และแหล่งจ่าย V_{CC}

จาก $$C = \frac{t}{0.693\ R}$$

$$C = \frac{200\ \mu sec}{0.693 \times 10\ k\Omega} = \frac{200 \times 10^{-6}}{0.693 \times 10 \times 10^{3}} = 0.0289\ \mu F$$

เลือกค่า C ใช้งานจริง $= 0.03\ \mu F$

8. ใช้สมการประจุไฟฟ้าหาค่าตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2

$$C_1 = \frac{Q}{e_{in}} = \frac{Q}{V_{CC}}$$

$$C_1 = \frac{1200\ pC}{12\ V} = 100\ pF$$

เลือกค่า C_1 ใช้งานจริง $= 100\ pF$

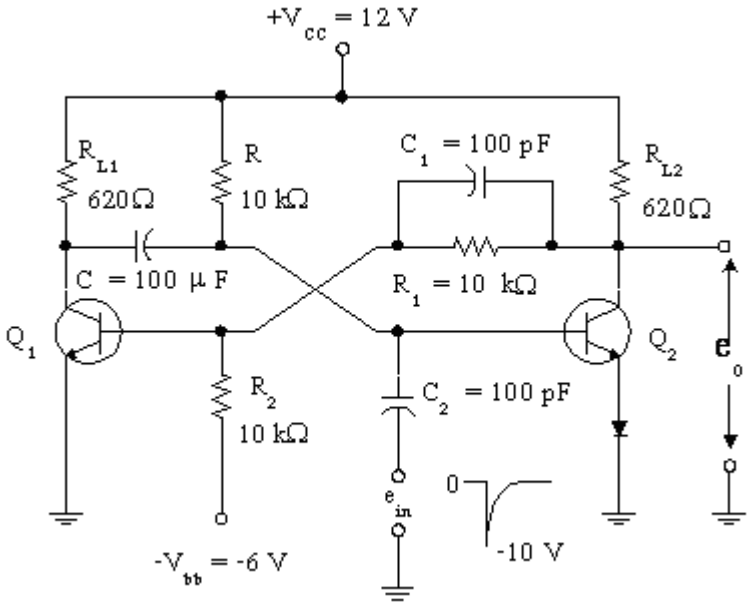
$$C_2 = \frac{Q}{e_{in}} = \frac{1200\ pC}{10\ V}$$

$$C_2 = 120\ pF$$

เลือกค่า C_2 ใช้งานจริง $= 100\ pF$

5.6.2 การเลือกอุปกรณ์ตามค่ามาตรฐาน

วงจรจากการออกแบบสามารถเขียนเป็นวงจรใหม่ได้ดังรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 วงจรที่ออกแบบได้ตามตัวอย่าง

5.7 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ **(Astable multivibrator circuit)**

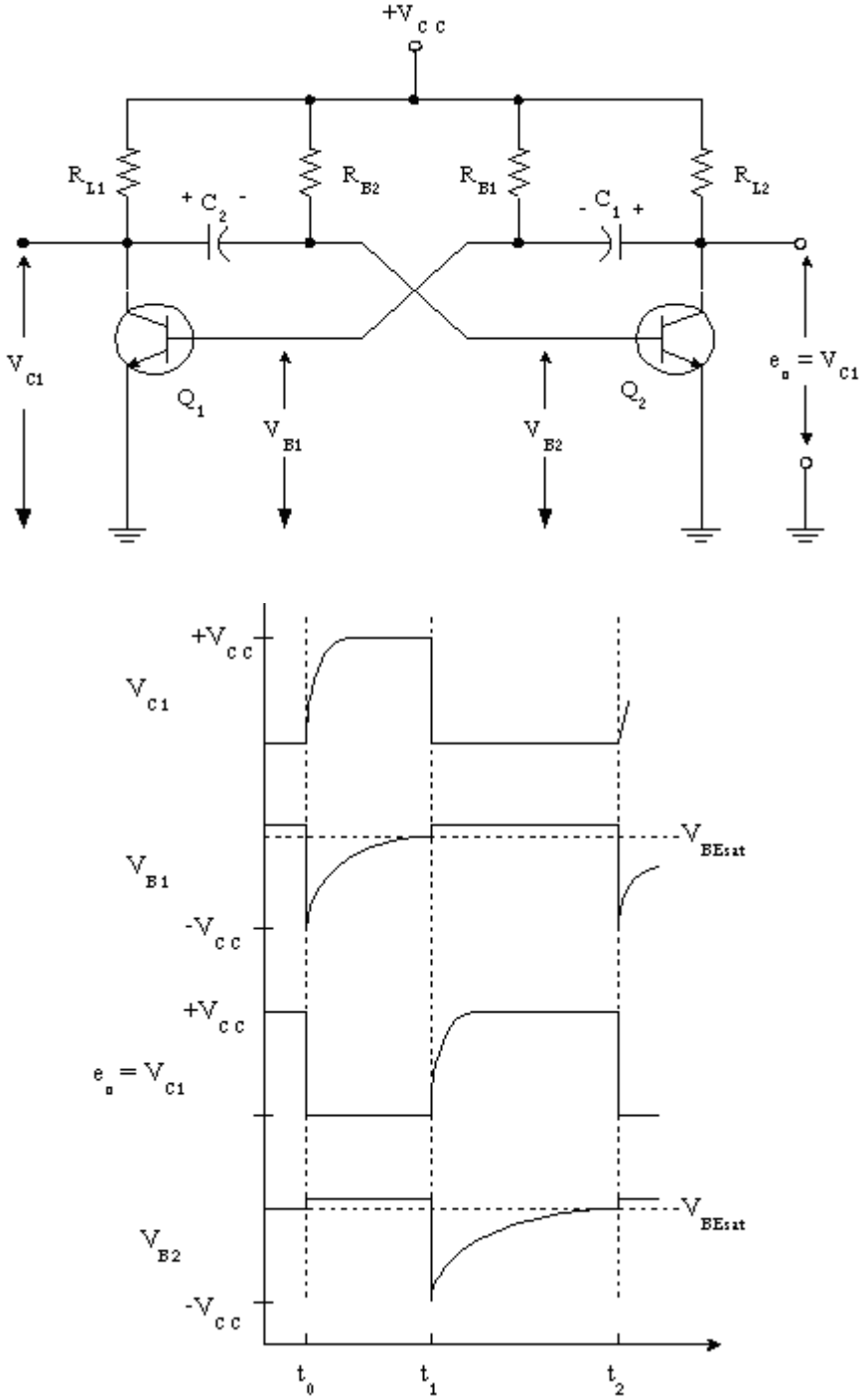
วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ เป็นวงจรมัลติไวเบรเตอร์ชนิดหนึ่ง ซึ่งบางครั้งนิยมเรียกว่า"ฟรีรันนิ่งค์ มัลติไวเบรเตอร์" (Free running multivibrator) และโดยปกติมักถูกนำไปใช้เป็นวงจรผลิตคลื่นจัตุรัส(square-wave) วงจรชนิดนี้ประกอบด้วยวงจรกลับสัญญาณสองวงจร โดยที่เอาต์พุตของวงจรแรกจะถูกนำไปเป็นอินพุตของวงจรที่สอง และเอาต์พุตของวงจรที่สองจุถูกนำไปเป็นอินพุตของวงจรแรก การป้อนสัญญาณจากเอาต์พุตกลับไปเป็นอินพุตใช้วิธีอาร์ซีคัปปลิ้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.21

วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ คือวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสภาวะกึ่งเสถียรภาพ 2 สภาวะ ระยะเวลาของแต่ละสภาวะกึ่งเสถียรภาพทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงที่ของ อาร์-ซี ในวงจรมัลติไวเบรเตอร์ ถึงแม้ว่าไม่มีสัญญาณพัลส์จากอินพุตป้อนเข้ามากระตุ้นการทำงาน วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ก้สามารถกำเนิดสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมออกเอาต์พุตได้ วงจรจะทำงานคล้ายกับวงจรกำเนิดความถี่ (oscillator)

5.7.1 การทำงานของวงจร

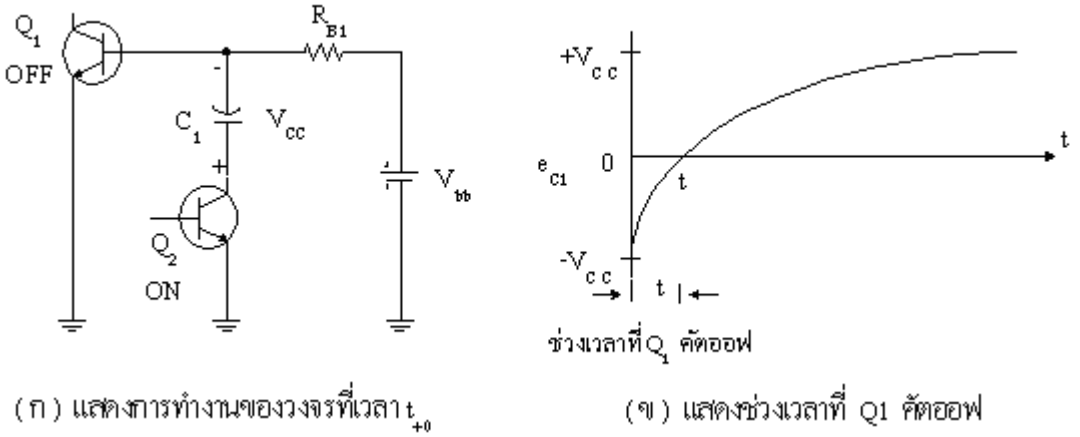
จากรูปที่ 5.21 เป็นวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ชนิดคอลเล็คเตอร์คัปเปิล การทำงาน ของวงจรอธิบายได้ดังนี้ ที่เวลา t_{+0} ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะนำกระแสถึงจุดอิ่มตัว ส่วนทรานซิสเตอร์ Q_1 จะคัตออฟ กระแสเบสของ

ทรานซิสเตอร์ Q_2 ก็คือกระแสที่ไหลเพื่อทำให้ตัวเก็บประจุ C_2 ทำการเก็บประจุ กระทั่งแรงดันตกคร่อม C_2 มีค่าเป็น V_{CC} ทำให้แรงดันที่ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นแบบเอ็กโพเนนเชี่ยลจนถึงค่าแรงดัน V_{CC} ตามการเก็บประจุ C_2 ตัวความต้านทาน R_{B2} ควรเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมให้ทรานซิสเตอร์Q_2 ทำงานถึงจุดอิ่มตัวในสภาวะ ON นั่นคือทรานซิสเตอร์ Q_2 จะทำงานถึงจุดอิ่มตัวหลังจากตัวเก็บประจุ C_2 ประจุแรงดัน V_{CC}



รูปที่ 5.21 วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

ในทำนองเดียวกัน ตัวเก็บประจุ C_1 จะประจุแรงดันถึงค่าแรงดัน V_{CC} เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำงานถึงจุดอิ่มตัวเช่นกัน ขณะทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแสถึงจุดอิ่มตัว เสมือนเป็นสวิตช์ที่ต่อวงจร ต่อแผ่นเพลตที่ประจุแรงดันบวกของตัวเก็บประจุ C_1 ลงกราวด์ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 5.22

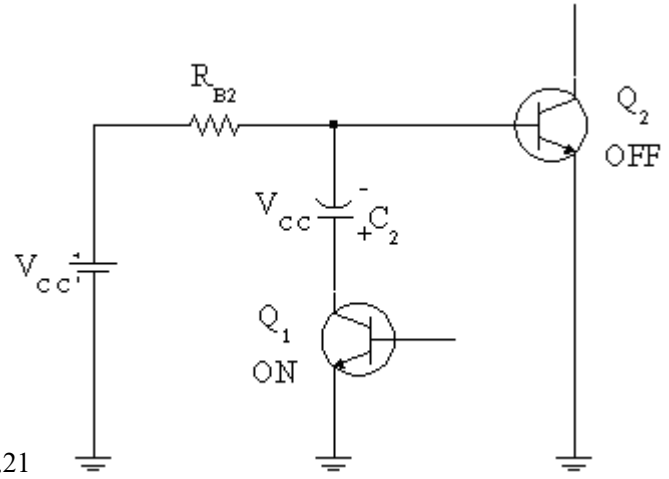


(ก) แสดงการทำงานของวงจรที่เวลา t_{+0} (ข) แสดงช่วงเวลาที่ Q1 คัตออฟ

รูปที่ 5.22 แสดงสภาวะคายประจุของ C_1 ผ่านทรานซิสเตอร์ Q_2

จากรูปที่ 5.22 จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุของ C_1 ต่อขนานกับรอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และจากที่ตัวเก็บประจุ C_1 มีแรงดันประจุอยู่แล้วเท่าแหล่งจ่าย V_{CC} จึงทำให้มีแรงดัน V_{CC} จ่ายเป็นแรงดันไบอัสกลับให้ตัวทรานซิสเตอร์ Q_1 ที่เวลา t_{+0} มีค่าเป็น $-V_{CC}$ ทรานซิสเตอร์ Q_1 อยู่ในสภาวะ OFF

ที่เวลา t_{+0} นี้ ตัวเก็บประจุ C_1 จะเริ่มประจุแรงดันอีกจาก $-V_{CC}$ ถึง $+V_{CC}$ แสดงดังรูปที่ 5.22 (ข) ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะยังคง OFF จนกระทั่งถึงช่วงเวลา t_{-1} เพราะในขณะเวลาดังกล่าวไบแอสที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 เป็น 0 V เมื่อถึงช่วงเวลา t_{+1} รอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 จะได้รับไบแอสตรง ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 เริ่มนำกระแส เพราะทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสที่เวลา t_{+1} ทำให้แผ่นเพลตที่ประจุแรงดันบวกของตัวเก็บประจุ C_2 ถูกต่อลงกราวด์ ดังนั้นแรงดันที่ประจุในตัวเก็บประจุ C_2 กลายเป็นแรงดันไบแอสกลับให้กับตัวทรานซิสเตอร์ Q_2 แสดงได้ดังรูป 5.23



รูปที่ 5.23 ส่วนประกอบของรูปที่ 5.21 สภาวะการคายประจุของ C_2 ผ่านทรานซิสเตอร์ Q_1

ที่เวลา t_{+1} ตัวเก็บประจุ C_2 เริ่มจะประจุแรงดันจาก $-V_{CC}$ ผ่านทานซิสเตอร์ Q_1 ขณะ ON และผ่าน R_{B2} ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะ OFF จนกว่าตัวเก็บประจุ C_2 จะมีประจุตกคร่อมเป็น 0 V ทรานซิสเตอร์ Q_2 จึงจะเริ่มนำกระแสอีกครั้งในเวลา t_{+2}

ช่วงเวลาระหว่าง t_{+1} ถึงช่วงเวลา t_{-2} ตัวเก็บประจุ C_1 จะประจุแรงดันถึงค่า V_{CC} มีกระแสเบสไหลเนื่องจากทรานซิสเตอร์ Q_1 ON การทำงานของวงจรจะเป็นเช่นนี้โดยสลับกันทำงานเรื่อยไป ทำให้เอาต์พุตได้รูปสัญญาณสี่เหลี่ยมมุมฉาก แสดงดังรูปที่ 5.21 (ข) ความแรงของแรงดันเอาต์พุตมีค่า $V_{CC}-V_{CEsat}$

จากรูปที่ 5.21 จะได้ว่า

$t_1 - t_0$ = เวลา t_A

และ $t_2 - t_1$ = เวลา t_B

ให้ T = เวลา 1 คาบ (period)

ดังนั้น $T = t_A + t_B$

เมื่อ $t_A = 0.69\, R_{B1}C_1$

$t_B = 0.69\, R_{B2}C_2$

แทนค่า $T = 0.69\, R_{B1}C_1 + 0.69\, R_{B2}C_2$

ตามปกติให้ $R = R_{B1} = R_{B2}$

จะได้ $T = 0.69\, R(C_1 + C_2)$

ในกรณีที่วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เป็นแบบสมมาตร จะได้

$C = C_1 = C_2$

ดังนั้น $T = 0.69\, R(C + C)$

$T = 0.69\, R(2C)$

จะได้ $T = 1.38\, RC$

5.7.2 ตัวอย่างการนำวงจรไปประยุกต์ใช้งาน

วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ คือวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสภาวะกึ่งเสถียรภาพ 2 สภาวะ ระยะเวลาของแต่ละสภาวะกึ่งเสถียรภาพทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงที่ของ อาร์-ซี ในวงจรมัลติไวเบรเตอร์ ถึงแม้ว่าไม่มีสัญญาณพัลส์จากอินพุตป้อนเข้ามากระตุ้นการทำงาน วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ก็สามารถกำเนิดสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมออกเอาต์พุตได้ วงจรจะทำงานคล้ายกับวงจรกำเนิดความถี่ (oscillator) รูปคลื่นสีเหลี่ยมใช้เป็นสัญญาณนาฬิกาในวงจอิเล็กทรอนิกส์และดิจิตอล

5.8 พารามิเตอร์ของวงจรอะสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์

5.8.1 การออกแบบวงจร

ตัวอย่างการออกแบบวงจร

ต้องการออกแบบวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ คือ e_O = 10 Vpeak เป็นพัลส์บวก มีความกว้าง 20 μsec โดยช่วงเวลาระหว่างพัลส์ มีค่า 10 μsec และ I_{Con} = 10 mA กำหนดให้ มีแหล่งจ่ายศักดาค่า 0 ~ 30 V 1 เครื่อง ขนาด 0 ~ 250 mA ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นซิลิกอนชนิด NPN มีค่า h_{Femin} = 20 , V_{EBOmax} = 15 V, I_{CBO} = 0

วิธีทำ

$$\Delta e_O = 10\ V = V_{CC}$$

$$R_L = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_C} = \frac{10 - 0.3}{10\ mA} = \frac{9.7}{10\ mA}$$

$$R_L = 970\ \Omega \quad \text{เลือกใช้ค่า } 1\ k\Omega \text{ แทน}$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE\,min}} = \frac{10\ mA}{20} = 0.5\ mA$$

$$R_B = R_{B1} = R_{B2} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_B}$$

$$R_B = \frac{10 - 0.7}{0.5\ mA} = \frac{9.3}{0.5\ mA}$$

$$R_B = 16\ k\Omega \quad \text{เลือกใช้ค่า } 18\ k\Omega \text{ แทน}$$

$$(t_2 - t_1) = \text{ความกว้างของพัลส์ที่เอาต์พุต} = 20\ \mu sec$$

$$t = 0.69\ RC$$

$$C_2 = \frac{t}{0.69\ R_{B2}} = \frac{20 \times 10^{-6}}{(0.69)(18 \times 10^3)}$$

$$C_2 = 1.61 \times 10^{-9}\ F$$

$$C_2 = 0.0016\ \mu F \quad \text{เลือกใช้ค่า } 0.0015\ \mu F$$

$$(t_1 - t_0) = \text{ช่วงเวลาระหว่างพัลส์} = 10\ \mu sec$$

$$C_1 = \frac{t}{0.69\ R_{B1}} = \frac{10 \times 10^{-6}}{(0.69)(18 \times 10^3)}$$

$$C_1 = 0.805 \times 10^{-9}\ F \quad \text{เลือกใช้ค่า } 0.00082\ \mu F \quad \text{แทน}$$

สำหรับการปรับแต่งเพื่อให้ได้พัลส์ที่มีความกว้างเท่ากับ 20 μsec พอดีนั้น สามารถทำได้โดยการแทนค่า R_{B2} ด้วยตัวความต้านทานค่าคงที่ค่าหนึ่งกับตัวความต้านทานซึ่งปรับค่าได้อีกตัวหนึ่งดังนั้น

$$R_{B2} \geq R_1 + R_2$$

โดยที่ R_1 มีค่าคงที่ , R_2 ปรับค่าได้

$$18\ \text{k}\Omega \ \geq \ 6.8\ \text{k}\Omega \ + \ 10\ \text{k}\Omega$$

$$R_{B2} \ = \ 6.8\ \text{k}\Omega \ + \ \frac{10\ \text{k}\Omega}{2}$$

$$= \ 11.8\ \text{k}\Omega$$

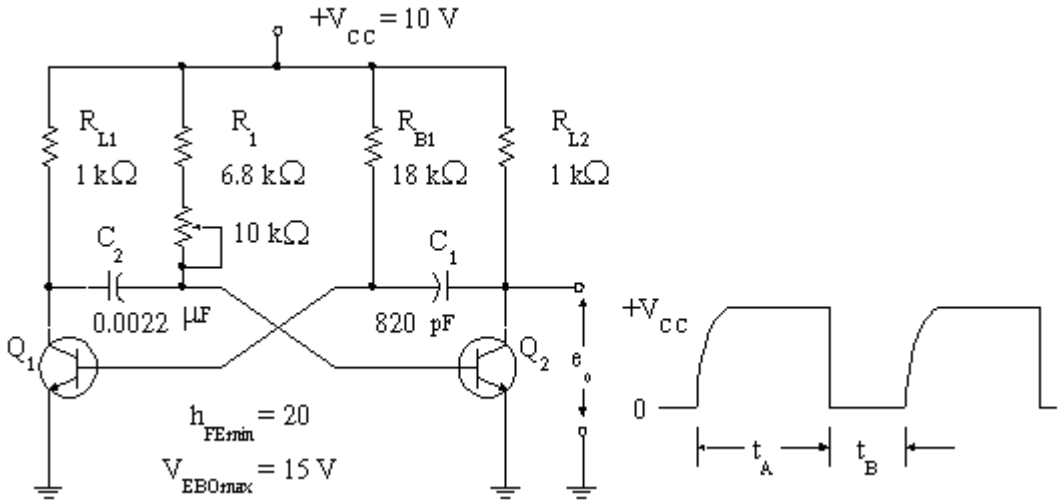
$$C_2 \ = \ \frac{t}{0.69\ R_{B2}} \ = \ \frac{20\times10^{-6}}{(0.69)\ (11.8\times10^{3})}$$

$$C_2 \ = \ 2.45\times10^{-9}$$

$C_2 \ = \ 0.00245\ \mu\text{F}$ ใช้ค่า $0.0022\ \mu\text{F}$ แทน

5.8.2 การเลือกอุปกรณ์ตามค่ามาตรฐาน

ดังนั้นวงจรที่ออกแบบแล้วจึงมีลักษณะดังในรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 วงจรที่ออกแบบได้ตามตัวอย่าง

จบเนื้อหา บทที่ 8 วงจรมัลติไวเบรเตอร์