บทที่ 3
ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่า

3.1 ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่า (Bipolar Junction Transistor: BJT)

ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่า (Bipolar Junction Transistor : BJT) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ประยุกต์ใช้ในวงจรขยายสัญญาณ หรือวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ BJT ถูกสร้างจากสารกึ่งตัวนำ Silicon (Si) หรือ Germanium (Ge) ชนิดเอ็นและชนิดพี โดยตัว BJT จะประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำที่โด๊ปแล้วชนิดพี และชนิดเอ็น ถ้าสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่อกับขาคอลเล็กเตอร์, ชนิดเอ็นต่อกับขาเบส และชนิดพีอีกข้างต่อกับขาอีมิเตอร์ เรียกว่า BJT ชนิด PNP ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) ในทางกลับกัน ถ้าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นต่อกับขาคอลเล็กเตอร์, ชนิดพีต่อกับขาเบส และชนิดเอ็นอีกข้างต่อกับขาอีมิเตอร์ เรียกว่า BJT ชนิด NPN ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)

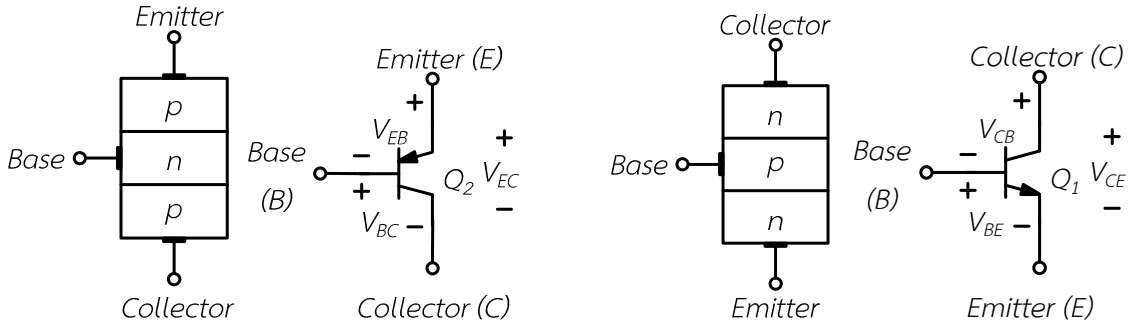
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด อุณหภูมิมีผลต่อจุดการทำงานของอุปกรณ์ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจากเดิม แรงดันตกคร่อมเบสกับอีมิเตอร์ (V_{BE}) ที่ทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์นั้นเริ่มไหลนั้นลดลง ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 3.2 อุณหภูมิ $T_1 > T_2 > T_3$ แรงดัน V_{BE} ที่ทำให้กระแสคอลเล็กเตอร์ที่อุณหภูมิ T_1 น้อยกว่า T_3 ในการทำงานของ BJT นั้นมีย่านการทำงาน 3 ย่านดังนี้

- ย่านคัทออฟ (Cutoff region)

การทำงานในย่านคัทออฟนี้กระแสเบสไม่ไหล (I_B = 0 μA) ส่งผลให้กระแสคอลเล็กเตอร์ไม่ไหล

- ย่านอิ่มตัว (Saturation region)

การทำงานในย่านอิ่มตัวนี้ กระแสคอลเล็กเตอร์นั้นไหลแบบเชิงเส้น เพียงเพิ่มแรงดันตกคร่อมคอลเล็กเตอร์-อีมิเตอร์ (V_{CE}) เล็กน้อย ซึ่งลักษณะการทำงานแบบนี้จึงเหมาะที่นำไปประยุกต์ใช้เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์



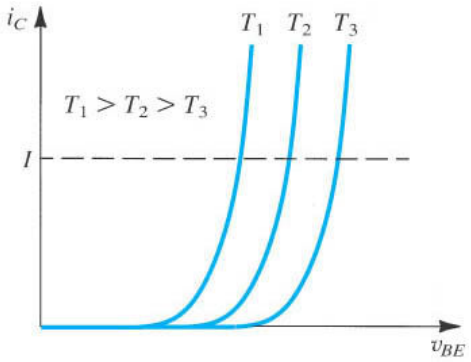
รูปที่ 3.1 โครงสร้าง และสัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่า (ก) PNP และ (ข) NPN (มนตรี ศิริปรัชญานันท์)

- ย่านไวงาน (Active region)

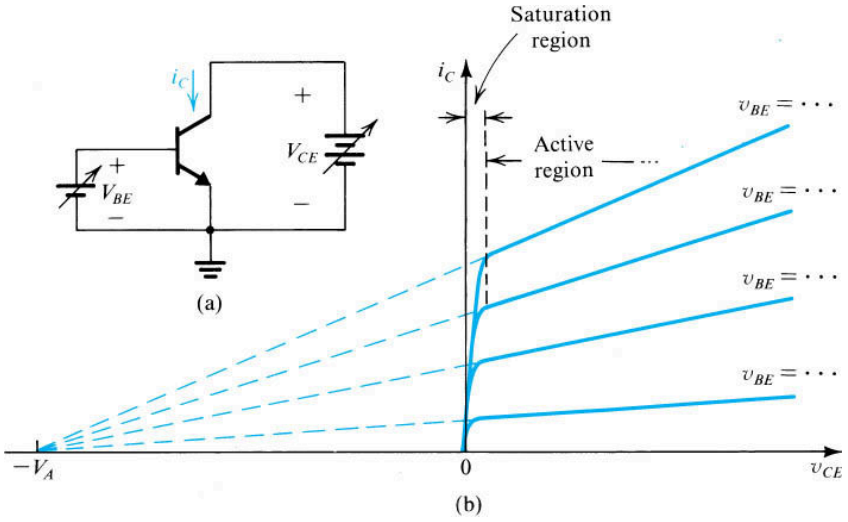
การทำงานในย่านไวงานนั้นกระแสคอลเล็กเตอร์ (I_C) เปลี่ยนแปลงไม่มากมาก ถึงแม้จะเพิ่มแรงดันตกคร่อมคอลเล็กเตอร์-อิมิเตอร์ (V_{CE}) มากขึ้น ดังรูปที่ 3.3 และในย่านการทำงานนี้แรงดันตกคร่อมเบส-อิมิเตอร์ (V_{BE}) มีค่า V_{BE} = 0.7 V จากการไหลของกระแสคอลเล็กเตอร์ที่ค่อนข้างคงที่ถึงแม้แรงดันตกคร่อมคอลเล็กเตอร์-อิมิเตอร์ (V_{CE}) จะมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น การทำงานในย่านไวงานจึงนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรขยายสัญญาณ

ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ต่างจากชนิด PNP อย่างไร

ตอบ ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN จะต้องไบอัสแรงดัน V_{BE} ให้มีลักษณะไบอัสและป้อนกระแส I_B ไหลเข้าขาเบส แล้วกระแส I_C ปริมาณมากจะไหล ขณะที่ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP จะต้องไบอัสแรงดัน V_{EB} ให้มีลักษณะไบอัสตรงและกระแส I_B ไหลออกจากขาเบส แล้วกระแส I_C ปริมาณมากจะไหลออกจากทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.2 กราฟผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อแรงดันเบส-อิมิเตอร์ (Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith)



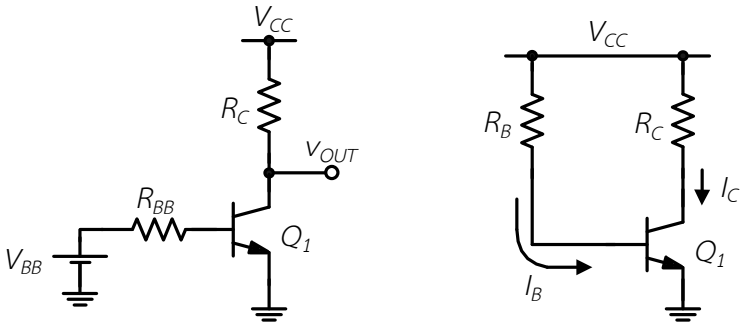
รูปที่ 3.3 กระแสคอลเล็กเตอร์และแรงดันคอลเล็กเตอร์-อิมิเตอร์ (Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith)

3.2 การไบอัสวงจรขยายทรานซิสเตอร์ (มนตรี ศิริปรัชญานันท์)

การใช้งาน BJT ทำหน้าที่ขยายสัญญาณในวงจรขยาย จะต้องมีการจัดไบอัสที่เหมาะสม เพื่อเลือกจุดทำงานที่เหมาะ (Quiescent operation point, Q-point) เพื่อนำวงจรไปขยายสัญญาณขนาดเล็กตามที่ได้ออกแบบไว้ วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์มีดังนี้ 1. วงจรไบอัสคงที่ (Fixed bias circuit) 2. วงจรไบอัสแบบบ่งแรงดัน (Voltage divider bias circuit) และ 3. ไบอัสด้วยตัวเอง (Self-bias circuit)

3.2.1 วงจรไบอัสคงที่ (Fixed-bias circuit)

รูปที่ 3.4 (ก) แสดงวงจรไบอัสคงที่ ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่า ตัวต้านทาน R_{BB} ทำหน้าที่กำหนดกระแส I_B ที่ไหลเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์ ตัวต้านทาน R_C หน้าที่กำหนดแรงดันที่ขาคอลเล็กเตอร์ แรงดันไบอัส V_{BB} และแรงดันไฟเลี้ยง V_{CC} ขณะที่รูปที่ 3.4 (ข) แสดงวงจรไบอัสคงที่ ซึ่งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่า ตัวต้านทาน R_B และ R_C และแรงดันไฟเลี้ยง V_{CC} กระแสเบส (I_B) ที่ใช้ในการไบอัส I_B ได้จากแรงดันไฟเลี้ยงจ่ายผ่านตัวต้านทาน R_B ซึ่งทำหน้าที่กำหนดค่ากระแสเบส สมมุติให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่านแอคทีฟ กระแสเบสมีค่าเท่ากับ



(ก) (ข)

รูปที่ 3.4 วงจรไบอัสคงที่ (Fixed-bias circuit) (ก) ไบอัสด้วย V_{BB} และ (ข) ไบอัสด้วย V_{CC}

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \tag{3.1}$$

และกระแสคอลเล็กเตอร์ I_C มีค่าเท่ากับ

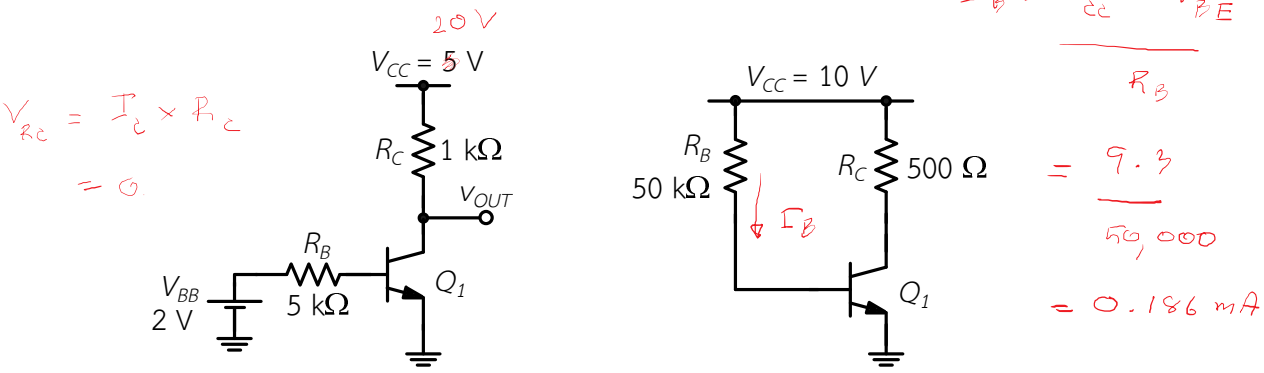
$$I_C = \beta I_B \tag{3.2}$$

แรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ V_{CE} ของจุดทำงานสงบซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \tag{3.3}$$

ตัวอย่างที่ 3.1 รูปที่ 3.5 แสดงวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบแรงดันคงที่ กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN มี β = 50 ทำการหาค่า I_B I_C และ V_{CE} ของวงจรในรูป 3.5 (ก) และ 3.5 (ข)

(ก) วิธีทำ หากระแส I_B ในรูปที่ 3.5 (ก) ด้วยการสมมุติให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่าน Active Forward ซึ่งกระแส I_B เท่ากับ



(ก) (ข)

รูปที่ 3.5 วงจรไบอัสคงที่ (Fixed-bias circuit)

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB}} \qquad (3.4)$$

แทนค่า V_{BB} = 2 V R_{BB} = 5 kΩ และ V_{BE} = 0.7 V

$$I_B = \frac{2V - 0.7V}{5k\Omega} \qquad (3.5)$$

$$= 0.26 \text{ mA}$$

และหากระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ด้วยสมการ

$$I_C = \beta I_B \qquad (3.6)$$

แทนค่า I_B และ β = 50

$$I_C = 50 \times 0.26 \text{ mA} \qquad (3.7)$$

$$= 13 \text{ mA}$$

แรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ V_{CE} ของจุดทำงานสงบซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \tag{3.8}$$

แทนค่า V_{CC} = 5 V R_C = 2 kΩ และ I_C = 1.3 mA

$$V_{CE} = 5\text{ V} - (1.3\text{ mA} \times 2\text{ k}\Omega) \tag{3.9}$$

$$= 2.4\text{V}$$

(ข) วิธีทำ หากระแส I_B ในรูปที่ 3.5 (ข) ด้วยการสมมุติให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่าน Active Forward ซึ่งกระแส I_B เท่ากับ

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \tag{3.10}$$

แทนค่า V_{CC} = 10 V, R_B = 50 kΩ และ V_{BE} = 0.7 V

$$I_B = \frac{10V - 0.7V}{50k\Omega} \tag{3.11}$$

$$= 0.186\text{ mA}$$

และหากระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ด้วยสมการ

$$I_C = \beta I_B \tag{3.12}$$

แทนค่า I_B และ β = 50

$$I_C = 50 \times 0.186\text{ mA} \tag{3.13}$$

$$= 9.3\text{ mA}$$

แรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ V_{CE} ของจุดทำงานสงบซึ่งมีค่าเท่ากับ

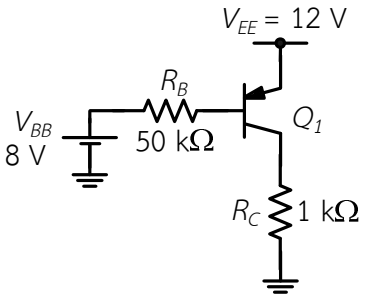
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \tag{3.14}$$

แทนค่า V_{CC} = 10 V, R_C = 500 Ω และ I_C = 9.3 mA

$$V_{CE} = 10\ V - (9.3\ mA \times 500\ \Omega) \quad (3.15)$$

$$= 5.35\ V$$

ตัวอย่างที่ 3.2 กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ในรูปที่ 3.6 มี β = 50 ทำการหาค่า I_B, I_C และ V_{CE}



รูปที่ 3.6 วงจรไบอัสคงที่ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

วิธีทำ หากระแส I_B ในรูปที่ 3.6 ด้วยการสมมุติให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในย่าน Active Forward ซึ่งกระแส I_B เท่ากับ

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{EB} - V_{BB}}{R_B} \quad (3.16)$$

แทนค่า V_{EE} = 12 V, R_B = 50 kΩ และ V_{BE} = 0.7 V

$$I_B = \frac{12V - 0.7V - 8V}{50k\Omega} \quad (3.17)$$

$$= 0.066\ mA$$

และหากระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ด้วยสมการ

$$I_C = \beta I_B \quad (3.18)$$

แทนค่า I_B และ β = 50

$$I_C = 50 \times 0.066\ mA \quad (3.19)$$

$$= 3.3 \text{ mA}$$

แรงดันระหว่างคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ V_{CE} ของจุดทำงานสงบซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$V_{EC} = V_{EE} - I_C R_C \tag{3.20}$$

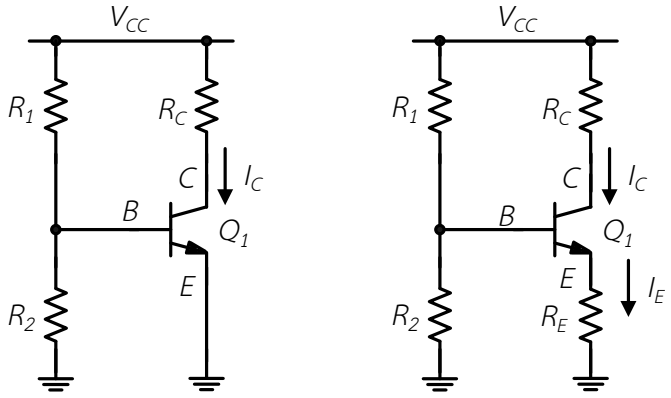
แทนค่า V_{EE} = 12 V, R_C = 1 kΩ และ I_C = 3.3 mA

$$V_{CE} = 12 \text{ V} - (3.3 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega) \tag{3.21}$$

$$= 8.7 \text{ V}$$

3.2.2 วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดัน (Voltage-divider bias circuit)

รูปที่ 3.7 (ก) แสดงวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบแบ่งแรงดันซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ทำหน้าที่แบ่งแรงดันไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ Q_1 และตัวต้านทาน R_C ขณะที่รูปที่ 3.7 (ข) แสดงวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบแบ่งแรงดันซึ่งมีตัวต้านทาน R_E เพิ่มเข้ามาในวงจร ซึ่งการไบอัสวงจรลักษณะนี้วงจรจะมีเสถียรภาพดี เนื่องจากวงจรมีการป้อนกลับแบบลบผ่านตัวต้านทาน R_E แต่อัตราขยายของวงจรจะน้อยกว่าวงจรไบอัสแบบไม่ได้ต่อ R_E ซึ่งการหาอัตราขยายของวงจรจะกล่าวในบทที่ 4

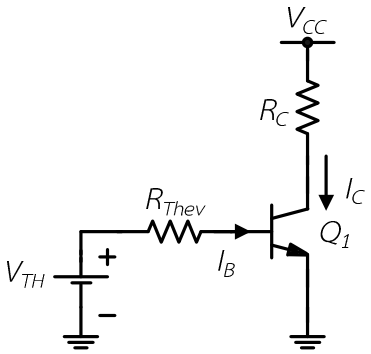


(ก) (ข)

รูปที่ 3.7 (ก) วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดัน และ (ข) วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดันและมี R_E

การวิเคราะห์วงจรไบอัสทั้ง 2 วงจร จะต้องแทนวงจรด้านอินพุตของวงจรด้วยวงจรเทียบเคียงแบบเทวินิน รูปที่ 3.8 แสดงวงจรไบอัสที่เทียบเคียงด้วยวิธีของเทวินินของวงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดัน ซึ่งแรงดันเทวินิน V_{Th} เท่ากับ

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \tag{3.22}$$



รูปที่ 3.8 วงจรไบอัสที่เทียบเคียงด้วยวิธีของเทวินิน

และค่าความต้านทานขาออกของวงจรเทียบเทียงเทวินิน R_{Thev} เท่ากับ

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{3.23}$$

กระแสเบสที่ใช้ในการไบอัส (I_B) คำนวณได้จากสมการ

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \tag{3.24}$$

และหากระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ด้วยสมการ

$$I_C = \beta I_B \tag{3.25}$$

แรงดันระหว่าง คอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ V_{CE} ของจุดทำงานสงบคำนวณได้จากสมการ

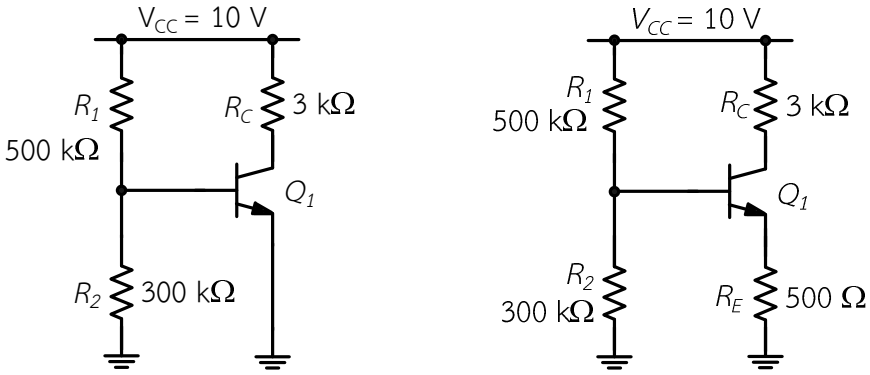
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \tag{3.26}$$

ตัวอย่างที่ 3.3 กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ในรูปที่ 3.9 มี β = 100 ให้หาค่า I_B, I_C และ V_{CE}

ก) วิธีทำ หากระแส I_B ด้วยวิธีการเทวินิน ซึ่งเราจะทำการหาค่าแรงดันเทวินินได้จากสมการ

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \tag{3.27}$$

$$V_{Th} = \frac{300k\Omega}{500k\Omega + 300k\Omega} \times 10V \tag{3.28}$$



รูปที่ 3.9 (ก) วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดัน และ (ข) วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดันและมี R_E

$$= 3.75 \text{ V}$$

และค่าความต้านทานขาออกของวงจรเทียบเทียงเทวินิน R_{Thev} เท่ากับ

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{3.29}$$

$$R_{Th} = \frac{500k\Omega \times 300k\Omega}{500k\Omega + 300k\Omega} \tag{3.30}$$

$$= 187.5 \text{ k}\Omega$$

จากรูปที่ 3.6 แสดงวงจรไบอัสที่เทียบเคียงด้วยวิธีของเทวินิน ซึ่งกระแสเบสที่ใช้ในการไบอัส (I_B) คำนวณได้จากสมการ

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \tag{3.31}$$

$$I_B = \frac{3.75V - 0.7V}{187.5k\Omega} \tag{3.32}$$

$$= 16.26 \text{ } \mu\text{A}$$

และหากระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ด้วยสมการ

$$I_C = \beta I_B \tag{3.33}$$

$$I_C = 100 \times 16.26\ \mu A \tag{3.34}$$

$$= 1.626\ mA$$

แรงดันระหว่าง คอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ V_{CE} ของจุดทำงานสงบคำนวณได้จากสมการ

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \tag{3.35}$$

$$= 10\ V - (1.626\ mA \times 3\ k\Omega) \tag{3.36}$$

$$= 5.122\ V$$

ข) วิธีทำ กระแส I_B ด้วยวิธีการเทวินิน ซึ่งแรงดันเทวินิน และค่าความต้านทานเทวินินมีค่าเท่ากับข้อ (ก) กระแสเบสที่ใช้ในการไบอัส (I_B) คำนวณได้จากสมการ

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E} \tag{3.37}$$

$$I_B = \frac{3.75V - 0.7V}{187.5k\Omega + (101 \times 500\Omega)} \tag{3.38}$$

$$= 12.8\ \mu A$$

และหากระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ด้วยสมการ

$$I_C = \beta I_B \tag{3.39}$$

$$I_C = 100 \times 28.57\ \mu A \tag{3.40}$$

$$= 1.28\ mA$$

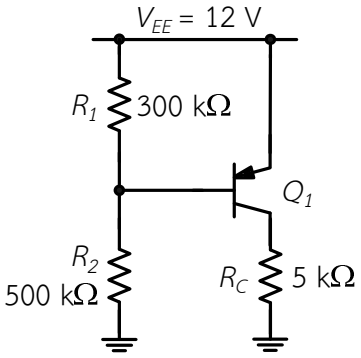
แรงดันระหว่าง คอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ V_{CE} ของจุดทำงานสงบคำนวณได้จากสมการ

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \tag{3.41}$$

$$V_{CE} = 10\ V - (1.28\ mA \times 5.5\ k\Omega) \tag{3.42}$$

$$= 5.52\ V$$

ตัวอย่างที่ 3.4 กำหนดให้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP มี β = 80 ให้หาค่า I_B, I_C และ V_{EC} วงจรในรูปที่ 10



รูปที่ 3.10 วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

วิธีทำ หากระแส I_B ด้วยวิธีการเทวินิน ซึ่งเราจะทำการหาค่าแรงดันเทวินินได้จากสมการ

$$V_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} \tag{3.43}$$

$$V_{Th} = \frac{500k\Omega}{500k\Omega + 300k\Omega} \times 12V \tag{3.44}$$

$$= 7.5 \text{ V}$$

และค่าความต้านทานขาออกของวงจรเทียบเทียงเทวินิน R_{Thev} เท่ากับ

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{3.45}$$

$$R_{Th} = \frac{500k\Omega \times 300k\Omega}{500k\Omega + 300k\Omega} \tag{3.46}$$

$$= 187.5 \text{ k}\Omega$$

กระแสเบสที่ใช้ในการไบอัส (I_B) คำนวณได้จากสมการ

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{Th} - V_{EB}}{R_{Th}} \tag{3.47}$$

$$I_B = \frac{12V - 7.5V - 0.7V}{187.5k\Omega} \quad (3.48)$$

$$= 20.26\ \mu A$$

และหากระแสคอลเล็กเตอร์ I_C ด้วยสมการ

$$I_C = \beta I_B \quad (3.49)$$

$$I_C = 80 \times 20.26\ \mu A \quad (3.50)$$

$$= 1.62\ mA$$

แรงดันระหว่าง อิมิตเตอร์กับคอลเล็กเตอร์ V_{EC} ของจุดทำงานสงบคำนวณได้จากสมการ

$$V_{EC} = V_{EE} - I_C R_C \quad (3.51)$$

$$= 12\ V - (1.26\ mA \times 5\ k\Omega) \quad (3.52)$$

$$= 5.7\ V$$