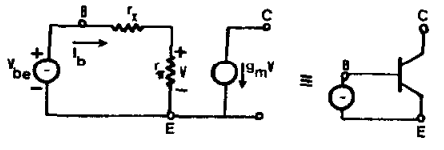
บทที่ 6
แบบจำลองไฮบริด-ไพ

6.1 บทนำ

การวิเคราะห์วงจรขยายโดยใช้วงจรสมมูลแทนปริมาณทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับตัวทรานซิสเตอร์นั้นทำได้หลายวิธี เช่น วงจรสมมูลไฟฟ้ากระแสตรง วงจรสมมูลไฮบริด วงจรสมมูลแปรผัน และวงจรสมมูลไฮบริด-ไพ (hybrid-pi) ทั้งนี้ ถือว่าสัญญาณของวงจรขยายมีขนาดน้อย ๆ พอที่จะก่อให้สัญญาณขาเข้าและขาออกมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง ส่วนธาตุวงจรที่ใช้ในแต่ละแบบจำลองจะเลือกให้มีคุณสมบัติของความเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถใช้แทนทรานซิสเตอร์ได้ พวกธาตุวงจรที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวจุ และต้นกำเนิดกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นอิสระ สำหรับธาตุวงจรสุดท้ายมักอยู่ในภาคเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์ ซึ่งขึ้นต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณจริง ๆ ภายนอกทรานซิสเตอร์ (ลักษณะแบบเส้นตรง) แบบจำลองไฮบริด-ไพ ถูกวิเคราะห์โดยวิธีการทางฟิสิกส์ จะกล่าวรายละเอียดในบทนี้ โดยถือว่า เครื่องขยายมีความถี่ต่ำ สัญญาณเป็นพวกมีขนาดน้อย ๆ (ประมาณ 5 มิลลิโวลท์) ความถี่ดังกล่าวมีขนาดประมาณ $10^2 - 10^4$ Hz ซึ่งจะทำให้ตัวจุคัปปลิง (coupling capacitor) และตัวจุบายพาส (bypass capacitor) ปฏิบัติเป็นวงจรลัดต่อสัญญาณกระแส ส่วนความจุภายในตัวทรานซิสเตอร์ปฏิบัติเป็นวงจรเปิด

6.2 รายละเอียดของธาตุวงจรในแบบจำลองไฮบริด-ไพ ความถี่ต่ำ

แนวความคิดพื้นฐานของแบบจำลองไฮบริด-ไพ ได้กำหนดใช้ความต้านทาน 2 ค่า ต่ออนุกรมกันในภาคอินพุท ภาคเอาท์พุทใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณ 1 ตัว โครงร่างวงจรสมมูลแสดงในรูป 6.1 ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบวงจรสมมูลมีดังนี้



รูป 6.1 แบบจำลองไฮบริด-ไพ อย่างง่าย (สัญญาณความถี่ต่ำ)

V_{be} เป็นต้นกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แบบอุดมคติ

r_x และ r_π เป็นตัวต้านทาน ต่ออนุกรมกันอยู่ในวงจรอินพุทของแบบจำลอง

V เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม r_π

$g_m V$ เป็นต้นกำเนิดกระแสที่ไม่เป็นอิสระ บรรจุอยู่ในวงจรเอาท์พุท ค่าขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า V ด้วยปริมาณความนำของการส่งผ่าน หรือเรียกทับศัพท์เป็น "ทรานส์คอนดัคแตนซ์" (transconductance) ของสัญญาณขนาดน้อย ๆ สัญญลักษณ์คือ g_m

หน้าที่ของแต่ละธาตุวงจรในแบบจำลองไฮบริด-ไพ

(1) ตัวต้านทาน r_π

จากรูป 6.1 V_{be} เป็นตัวเพิ่มไบแอสตรงแบบทีละเล็กละน้อย (incremental) ปริมาณพาหะประจุที่เพิ่มขึ้นจะถูกฉีดข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์ และเข้าสู่บริเวณกัมมันตของเบส ซึ่งจะถูกแพร่กระจายเข้าไปในคอลเลคเตอร์ ในการนี้ย่อมเกิด "การรวมตัวกันใหม่" เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเพิ่มปริมาณพาหะประจุในเบส ขั้วเบสมี I_b ทำหน้าที่ป้อนการรวมตัวกันใหม่นี้ ความสัมพันธ์ระหว่าง I_b และแรงดันตกคร่อมรอยต่อเบส-เอมมิตเตอร์ V คือ r_π

(2) ตัวต้านทาน r_x

บางครั้งอาจเรียกเป็น ความต้านทานที่มีแผ่อยู่ในเบส เนื่องจากในบริเวณเบส ถือว่ามีความต้านทานปริมาณหนึ่ง มีลักษณะเป็นปริมาตร ทำหน้าที่ต้านกระแสที่ไหลข้ามรอยต่อเอมมิตเตอร์ ใช้สัญญลักษณ์เป็น r_x ในรูป 6.1 เมื่อมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้า V_{be} จะก่อให้เกิดสัญญาณกระแส I_b ไหลในวงจร บรรดาพาหะประจุซึ่งมีการรวมตัวกันใหม่นั้น ได้รับการป้อนจากขั้วเบส (คือ I_b) จะต้องข้ามผ่านกำแพงความต้านทานนี้ในเบส

(3) ทรานส์คอนดัคแตนซ์ (transconductance) g_m

ในภาคเอาท์พุทของวงจรรูป 6.1 มีต้นกำเนิดกระแสที่ไม่เป็นอิสระคือ $g_m V$ ใช้แทนกระแสคอลเลคเตอร์ มีทิศทางกระแสนิยมตามแนวลูกศร เนื่องจากในวงจรมี V_{be} เป็นตัวเพิ่มพาหะประจุ (แบบทีละเล็กทีละน้อย) ซึ่งจะเดินทางไปถึงขั้วคอลเลคเตอร์ ผลคือกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มค่าขึ้นตาม สมมุติด้วยปริมาณ ΔI_c ซึ่งหาค่าได้จากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อเอมมิตเตอร์ V และความต้านทานซึ่งมีค่าเป็นส่วนกลับของความนำของการส่งผ่าน g_m ดังนั้น สามารถเขียนสมการของกระแสคอลเลคเตอร์ด้วยปริมาณ $g_m V$ โดยตรงโดยกำหนดให้

$$g_m = \frac{I_c}{\frac{kT}{q}} \qquad \ldots\ldots\ldots (6.1)$$

โดย I_C เป็นขนาดของกระแสคอลเลคเตอร์ ปริมาณไฟฟ้ากระแสตรง

k เป็นค่าคงที่โบลท์แมนน์ (Boltzmann) = 1.38×10^{-23} J/°K

q เป็นค่าประจุอิเล็กตรอน = 1.60×10^{-19} C

T เป็นค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ หน่วยเป็น °K

ค่า rms ของสัญญาณกระแสคอลเลคเตอร์ I_C เป็นสัดส่วนกับค่า rms ของแรงดันไฟฟ้า ณ รอยต่อเบส-เอมมิตเตอร์ V คูณกับปริมาณความนำของการส่งผ่าน g_m ดังนั้น

$$I_c = g_{mv} \qquad \text{.....(6.2)}$$

แรงดันไฟฟ้า V ซึ่งเกิดจาก I_b ไหลผ่านตัวต้านทาน r_π มีค่าเป็น

$$V = I_b r_\pi \qquad \text{.....(6.3)}$$

แทนค่าจากสมการ (6.3) ลงในสมการ (6.2)

$$I_c = g_m r_\pi I_b \qquad \text{.....(6.4)}$$

เขียนสมการ (6.4) ให้อยู่ในรูปของปริมาณที่เพิ่มขึ้นทีละเล็กทีละน้อย ดังนี้

$$g_m r_\pi = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \qquad \text{. . ..(6.5)}$$

เปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ $\beta_0 = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ (2.15) เขียนได้ว่า

$$\beta_0 = g_m r_\pi \qquad \text{.....(6.6)}$$

ค่าของ β_o อาจได้จากการวัด หรืออ่านจากแผ่นข้อมูล (จากบริษัทผู้ผลิต) และ g_m หาค่าได้จากสมการ (6.1) ดังนั้น คำนวณ r_π จากสมการ (6.6)

โดยทั่วไป ถ้าเป็นสัญญาณความถี่ต่ำ มักละทิ้งปริมาณ r_x แต่ความต้านทานขาอินพุท h_{ie} (กล่าวแล้วในตอน 3.4 และในรูป 2.20) มีค่าเป็นผลบวกของ r_x และ r_π

$$h_{ie} = r_x + r_\pi \qquad \text{.....(6.7)}$$

และ $$r_x = h_{ie} - r_\pi \qquad \text{.....(6.8)}$$

สรุปขั้นตอนการหาค่าของธาตุวงจรไฮบริด-ไพ

(1) หากระแสคอลเลคเตอร์ I_C จากนั้นหาค่า g_m จากสมการ (6.1) สัมประสิทธิ์ kT/q มีค่าเป็น 25 mv ณ อุณหภูมิห้อง

(2) หาค่า β_o ได้ 2 วิธี

(2.1) อ่านจากแผ่นข้อมูล (h_{fe}) และแก้ไขให้ตรงกับจุดทำงาน หรือ

(2.2) วัดจากกราฟลักษณะสมบัติด้านเอาท์พุทของทรานซิสเตอร์ ณ จุดทำงาน

(3) คำนวณ r_π จากสมการ (6.6)

(4) ค่า h_{ie} หาได้ 2 วิธี ดังนี้

(4.1) อาศัยความชันของลักษณะสมบัติด้านอินพุท ณ จุดทำงาน หรือ

(4.2) อ่านจากแผ่นข้อมูล และแก้ให้ตรงกับจุดทำงาน จากนั้นนำไปคำนวณค่า r_x จากสมการ (6.7)

ปัญหาคือ h_{ie} ที่ได้จากวิธี (4.1) นั้นมักไม่แม่นยำนัก แต่ค่าจากวิธี (4.2) ก็เป็นค่าของทรานซิสเตอร์โดยเฉพาะ ซึ่งอาจไม่ใช่ตัวที่ใช้อยู่ก็ได้ จากสมการ (6.8) อาจถือว่า h_{ie} มีค่าโดยประมาณเท่ากับ r_π ที่หาได้จากขั้นตอนที่ (3) ดังนั้น r_x จึงเป็นผลต่างของสองปริมาณที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก บางกรณี h_{ie} มีค่าน้อยกว่า r_π ซึ่งถือได้ว่า $r_x = 0$ และ h_{ie} มีขนาดเท่า r_π

ตัวอย่าง 6.1 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม มีกระแสไบแอส $I_C = 1$ mA ณ 17 °C โดย $\beta_0 = 100$ คงที่ r_x น้อยมากจนตัดทิ้งได้ (ก) จงหาพารามิเตอร์ไฮบริด-ไพสำหรับความถี่ต่ำ (ข) ถ้า $I_C = 100\,\mu$A ย้อนคำถามข้อ (ก) ใหม่ และเปรียบเทียบผลที่มีต่อความต้านทานอินพุท (ค) ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50 °C ย้อนคำถามข้อ (ก) และ (ข) ใหม่

วิธี (ก) แนวคิดคือ พารามิเตอร์ไฮบริด-ไพ คือ g_m และ r_π จากสมการ (6.1)

$$g_m = \frac{1\text{ mA}}{25\text{ mv}} = 0.04\text{ mho}$$

และ

$$r_\pi = \frac{\beta_o}{g_m} = 2.5\text{K}$$

(ข)

$$g_m = \frac{0.10\text{ mA}}{25\text{ mv}} \quad 0.004\text{ mho}$$

$$r_\pi = \frac{100}{0.004} = 25\text{K}$$

(ค)

$$\frac{kT}{q} = 8.62 \times 10^{-5}(67 + 273) = 29.3\text{ mv}$$

จากข้อ (ก)

$$g_m = \frac{1\text{ mA}}{29.3\text{ mv}} = 0.034\text{ mho}$$

$$r_\pi = \frac{100}{0.034} = 2.93 \text{ K}$$

และจากข้อ (ข) $g_m = \frac{0.1 \text{ mA}}{29.3 \text{ mv}} = 0.0034 \text{ mho}$

$$r_\pi = \frac{100}{0.0034} = 29.3 \text{ K}$$

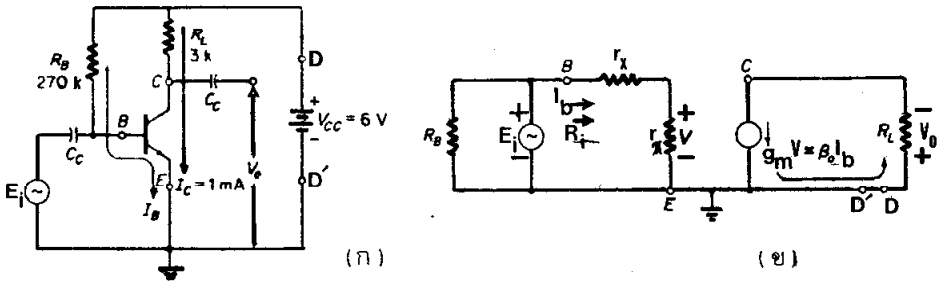
สรุปได้ว่า เมื่อกระแสคอลเลคเตอร์ลดค่า 10 เท่า มีผลให้ความต้านทานอินพุทเพิ่มขึ้น 10 เท่า

6.3 วงจรขยายเอมมิตเตอร์ร่วม

รายละเอียดต่อไปนี้ เป็นการใช้แบบจำลองไฮบริด-ไพ เพื่อวิเคราะห์วงจรขยายแบบเอมมิตเตอร์ร่วม เริ่มจากพิจารณารูปวงจร 6.2 (ก) มี E_i เป็นแหล่งป้อนสัญญาณอุดมคติ คือไม่มีความต้านทานภายใน เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์วงจร สร้างแบบจำลองดังแสดงในรูป 6.2 (ข) ซึ่งตัวจุและแหล่งกำเนิดสัญญาณกระแสตรงเป็นวงจรปิด โดยถือว่าธาตุวงจรทั้งสองมีปริมาณความขัดต่อการไหลของกระแสไฟสลับน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ตัวต้านทาน R_B ไม่มีผลต่อความต้านทานอินพุท (R_i) ของทรานซิสเตอร์ จึงถูกจัดไว้ด้านซ้ายของ E_i เปรียบเทียบทิศทางของกระแสในวงจรของรูป 6.2 (ก) และ (ข) ซึ่ง E_i เป็นช่วงเวลาที่ขั้วอินพุท (คือเบส) ถูกขับให้มีสภาพเป็นบวก (เมื่อเทียบกับขั้วเอมมิตเตอร์) ส่วนขั้วเอาท์พุท (คือคอลเลคเตอร์) ถูกขับให้มีสภาพเป็นลบ โดย $g_m V$ และ V_o มีเฟสต่างกับ E_i เป็น 180°

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (A_v) $= \frac{-V_o}{E_i}$ หรือ $V_o = -A_v E_i$

เครื่องหมายลบแสดงถึงลักษณะการกลับเฟส นอกจากนี้ อาจเขียนอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าในรูปของพารามิเตอร์วงจรและของทรานซิสเตอร์ด้วย พิจารณารูป 6.2 (ข)



รูป 6.2 (ก) วงจรขยายเอมมิตเตอร์ร่วม
(ข) วงจรสมมูลไฮบริด-ไพ ของรูป (ก)

$$V = I_b r_\pi = \frac{E_i}{(r_x + r_\pi)} \cdot r_\pi \qquad \text{.....(6.8)}$$

$$V_o = I_C R_L = -(g_m V) R_L$$

แทนค่า V จากสมการ (6.8)

$$V_o = -g_m \frac{(r_\pi)}{(r_x + r_\pi)} E_i R_L \qquad \text{.....(6.9)}$$

เขียนสมการ (6.9) ในรูปของอัตราขยายแรงดัน

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = -gm \left\{ \frac{r_\pi}{(r_x + r_\pi)} \right\} R_L \qquad \text{.....(6.10)}$$

แทนค่า $\beta_o = g_m r_\pi$ ลงในสมการ (6.10)

$$A_v = -\beta_o \frac{R_L}{(r_x + r_\pi)} \qquad \text{.....(6.11)}$$

จากสมการ (6.11) กล่าวได้ว่า

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า = อัตราขยายกระแส $\times$ $\frac{\text{ความต้านทานของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท}}{\text{ความต้านทานของแรงดันไฟฟ้าอินพุท}}$

.....(6.12)

โดย R_L เป็นความต้านทานที่ปรากฏต่อแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท V_o

$(r_x + r_\pi)$ เป็นความต้านทานที่ปรากฏต่อแรงดันไฟฟ้าอินพุท E_i

$$A_i = \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_m V}{I_b} = gm \frac{(I_b r_\pi)}{{}_b I_b} = g_m r_\pi = \beta_o \qquad \text{.....(6.13)}$$

เห็นได้ว่า สมการอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยปริมาณของธาตุวงจรที่ต้องการรู้ค่า (ในกรณีความถี่ต่ำ) ดังนี้

(1) อัตราขยายกระแส

(2) ความต้านทานอินพุทของทรานซิสเตอร์

(3) ความต้านทานโหลด

จากสมการ (6.10) และ (6.11) แสดงว่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขึ้นโดยตรงกับโหลด R_L ถ้าต้องการศึกษาลักษณะที่อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับกระแสคอลเลคเตอร์พิจารณาสมการ (6.11) ถ้า r_x มีค่าน้อย ๆ เขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$A_v \sim -\beta_o \frac{R_L}{r_\pi} = -g_m R_L \qquad (r_x << r_\pi) \qquad \text{.....(6.14)}$$

แทนค่า g_m จากสมการ (6.1)

$$A_v \sim -\frac{I_C R_L}{\frac{kT}{q}} \qquad \text{.....(6.15)}$$

จากสมการ (6.15) สรุปได้ว่า อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสที่จุดทำงานเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิลดลง

ตัวอย่าง 6.3 จากรูป 6.2 ถ้า $\beta_0 = 50$ (ก) จงหาอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า (ข) จงหาความต้านทานต่อกระแสสลับของทรานซิสเตอร์ที่มีต่อ E_i โดยถือว่า $r_x = 0$ (ค) จงหาอัตราขยายกระแสของสัญญาณขนาดน้อย ๆ

วิธี

(ก) จากสมการ (6.11)

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = -\beta_0 \frac{R_L}{(r_x + r_\pi)} \qquad \text{..(i)}$$

หาค่า r_π จากสมการ (6.6) ซึ่ง $r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m}$ และหาค่า g_m จาก (6.1)

$$g_m = \frac{I_C}{\frac{kT}{4}} \qquad \frac{1}{25} = 0.04$$

นั่นคือ $$r_\pi = \frac{50}{0.04} = 1250\ \Omega$$

แทนค่าทั้งหมดลงใน (i) ได้ค่า $A_v = 120$

(ข) $h_{ie} = r_\pi = 1250\ \Omega = R_i$

(ค) $A_i = \beta_0 = 50$

ขีดจำกัดของแบบจำลองไฮบริด-ไพ

(1) E_i ต้องมีความถี่อยู่ในช่วง $10^2 - 10^4$

(2) V_{bep} ซึ่งเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าระหว่างเบส-เอมมิตเตอร์ มีลักษณะการแปรค่าแบบทีละเล็กละน้อย ต้องมีค่าไม่เกิน 5 mv และจากวงจรในรูป 6.2 ค่านี้จะมีผลให้ E_i มีค่ายอดเป็น 5 mv เช่นกัน ถ้าเป็นกรณี β_0 คงที่ (พอสมควร) สมการอัตราขยายแรงดันไฟฟ้ายังคงใช้ได้ ค่าของ V_{bep} อาจเพิ่มสูงกว่าค่าที่ได้กล่าวนี้

(3) V_0 มีการแปรค่ายอดถึงยอด (p/p) อยู่ในขีดจำกัด และขึ้นโดยตรงต่อ V_{CE}

ตัวอย่าง 6.4 ตามวงจรในรูป 6.2 (ก) สำหรับขีดจำกัดในแบบจำลองไฮบริด-ไพ ค่ายอดถึงยอดที่สามารถเป็นค่าสูงสุดของ V_o และ I_b เป็นเท่าไร (ข) ถ้า $\beta_o = 50$ และไม่แปรค่าตาม I_C หรือ V_{CE} ถ้ายังคงอยู่ในขีดจำกัดของแบบจำลองไฮบริด-ไพ E_i จะมีค่ายอดเท่าไร จึงจะพอดีทำให้ V_o เกิดการเพี้ยน (ค) ตามข้อกำหนดใน (ก) และ (ข) สัญญาณกระแสที่เข้าสู่ขั้วเบสมีค่ายอดเท่าไร (ง) ค่ายอดของกระแสคอลเลคเตอร์ที่สมนัยกัน เป็นเท่าใด

วิธี

(ก) ตามขีดจำกัดของแบบจำลองไฮบริด-ไพ ค่ายอดของ $E_i = 5$ mv ต่อไปหาค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยค่าของธาตุวงจรและพารามิเตอร์ไฮบริด-ไพ

$$A_v = -\frac{\beta_o R_L}{(r_x + r_\pi)} = -120$$

ค่ายอดของ $V_o = -A_v E_i = 0.6$ v

(ข) จากรูป 6.2 (ก) $V_{CE} = V_{RL} = 3$ v

นั่นคือ $V_{op} = 3$ v

ค่ายอดสูงสุดของ $E_i = E_{i[max]} = \frac{V_{op}}{A_v} = 25$ mv

(ค) ค่ายอดของสัญญาณกระแสเบส

$$I_{bp} = \frac{E_{ip}}{r_\pi} = 4 \ \mu A$$

$$I_{bp(max)} = \frac{E_{i(max)}}{r_\pi} = 20 \ \mu A$$

(ง) ค่ายอดของกระแสคอลเลคเตอร์ ซึ่งแกว่งอยู่ภายในขีดจำกัดของไฮบริด-ไพ

$$I_{cp} = \beta_o I_{bp} = 0.2 \text{ mA}$$

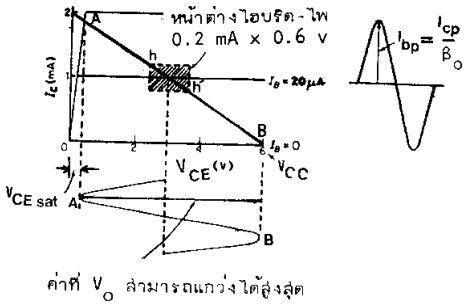
$$I_{cp(max)} = \beta_o I_{bp(max)} = 1 \text{ mA}$$

ผลจากตัวอย่าง 6.4 สามารถกำหนดบริเวณที่เป็นขอบเขตของแบบจำลองไฮบริด-ไพบนเส้นโหลด ดังแสดงในรูป 6.3 ลักษณะคล้ายหน้าต่าง จึงเรียกชื่อเป็น "หน้าต่างไฮบริด-ไพ" (hybrid-pi window) ซึ่งมีรายละเอียดของปริมาณต่าง ๆ ดังนี้

เมื่อ $V_{be} = 5$ mv, $E_{ip} = 5$ mv, $I_{bp} = 4 \ \mu A$

$I_{cp} = 0.2$ mA, $V_{cep} = V_{op} = 0.6$ v

นั่นคือ หน้าต่างไฮบริด-ไพ มีขนาด $0.2\ \text{mA} \times 0.6\ \text{v}$



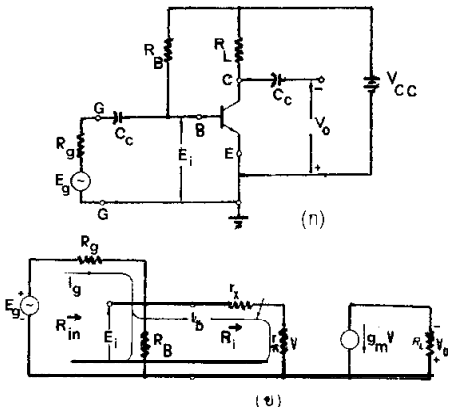
รูป 6.3 แสดงบริเวณหน้าต่างไฮบริด-ไพของจุดทำงานหนึ่ง และการเดินทางจากยอดถึงยอดของกระแสและแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์ที่สมนัยกับ $E_{ip} = 5$ mv

ถ้าแหล่งกำเนิดสัญญาณ E_g มีความต้านทาน R_g และวงจรทรานซิสเตอร์มีความต้านทานอินพุท R_{in} ในรูป 6.4 (ก) สัญญาณจะถูกส่งไปยัง R_g และ R_{in} จากแบบจำลองในรูป 6.4 (ข)

$$\frac{E_i}{R_{in}} = \frac{E_g}{R_{in} + R_g}$$

$$E_i = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} E_g \qquad \text{..... (6.16)}$$

โดย $R_{in} = R_B // (r_x + r_\pi) = \dfrac{R_B (r_x + r_\pi)}{R_B + (r_x + r_\pi)}$ ..... (6.17)



รูป 6.4 (ก) วงจรขยายเอมมิตเตอร์ร่วม แหล่งกำเนิดสัญญาณ E_g *มีความต้านทานภายในเป็น* R_g *(ข) แสดงวงจรสมมูลไฮบริด-ไพ ของวงจรรูป (ก)*

จากสมการ (6.11), $A_v = \frac{V_0}{E_i} = -\beta_0 \frac{R_L}{(r_x + r_\pi)}$

แทนค่า E_i จากสมการ (6.16), $\frac{V_0}{E_g \left(\frac{R_{in}}{R_{in} + R_g}\right)} = -\beta_0 \frac{R_L}{(r_x + r_\pi)}$

$$\frac{V_0}{E_g} = -\beta_0 \left(\frac{R_L}{r_x + r_\pi}\right) \left(\frac{R_{in}}{R_{in} + R_g}\right) \quad \text{.....(6.18)}$$

สมการ (6.18) แสดงอัตราขยายแรงดัน R_g ควรมีค่าน้อย ๆ เนื่องจากเป็นปริมาณที่ลดค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ส่วน R_{in} ควรมีค่ามาก ซึ่งจากสมการ (6.17) แสดงว่า R_B ควรมีค่ามาก และถ้า R_B มีค่ามากเมื่อเทียบกับ r_π ดังนั้น ความต้านทานอินพุทต่อกระแสสลับของทรานซิสเตอร์ (คือ R_i และ R_g) จะเป็นค่าแสดงถึงปริมาณเกนแรงดันไฟฟ้าที่สูญเสียไปในภาคอินพุท

อัตราขยายกระแสของวงจร คือ A_i เขียนสมการได้เป็น

$$A_i = \frac{I_0}{I_b} = \frac{g_m V}{I_g} = \frac{g_m (I_b r_\pi)}{I_i} = \frac{\beta_0 I_b}{I_i} \quad \text{.....(6.19)}$$

ตามรูปแบบมาตรฐานในสมการ (6.12) ต้องจัดการแทนค่าในสมการ (6.19) ให้อยู่ในนิพจน์ของความต้านทาน เริ่มโดย (1) พิจารณา I_g เห็นได้ว่าปริมาณนี้ถูกแบ่งระหว่าง R_B และ $(r_x + r_\pi)$ (2) จากลูปอินพุท เขียนสมการของกระแสเบส I_B โดยพิจารณาแรงดันตกคร่อม R_B ย่อมมีค่าเท่ากันเสมอ ไม่ว่าจะคิดจากลูปด้านขวาหรือซ้าย นั่นคือ

$$I_b (R_B + r_x + r_\pi) = I_g R_B$$

$$I_b = \frac{R_B}{R_B + r_x + r_\pi} I_g \quad \text{.....(6.20)}$$

แทนค่า I_i จาก (6.20) ลงในสมการ (6.19)

$$A_i = \frac{\beta_0 I_b}{I_g} = \frac{R_B}{R_B + r_x + r_\pi} \beta_0 \quad \text{.....(6.21)}$$

ทำนองเดียวกับสมการ (6.18) ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้จากการตรวจพินิจรูป 6.4 V_0 มองเห็นความต้านทาน R_L ส่วน E_g มองเห็นความต้านทาน $(R_g + R_{in})$ เกนกระแสสลับของทรานซิสเตอร์ คือ β_0 เขียนเกนแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$A_v = \frac{V_0}{E_g} = \frac{I_c R_L}{I_g (R_g + R_{in})} = -\frac{(\beta_0 I_b) R_L}{I_g (R_g + R_{in})}$$

แทนค่า I_i จากสมการ (6.20)

$$A_v = \frac{V_0}{E_g} = -\beta_0 \frac{R_B \quad R_L}{(R_B + r_x + r_\pi)\ (R_g + R_{in})} \qquad \text{..... (6.22)}$$

สมการ (6.22) เหมือนกับสมการ (6.18) ทุกประการ

ตัวอย่าง 6.5 วงจรในรูป 6.4 (ก) ถ้ากำหนดให้ I_{CBO} และ r_x น้อยมากจนละทิ้งได้, $\beta_F = \beta_0 = 50$, $V_{BE} = 0.6$ v, $V_{CC} = 6$ v, $R_L = 5$ K จงเลือก R_B เพื่อให้ได้กระแส $I_C = 0.5$ mA สรุปตำแหน่งจุดทำงานที่หาค่าได้

วิธี

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_C/\beta_F} = 540\ \text{K}$$

ณ ตำแหน่งจุดทำงาน $I_C = 0.5$ mA, $I_B = 10\ \mu$A, $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_L = 3.5$ v

ตัวอย่าง 6.6 ตามตัวอย่าง 6.5 ถ้า R_g แปรค่าระหว่าง 100 Ω และ 100 K จะมีผลอย่างไรต่ออัตราขยายแรงดันไฟฟ้า $\frac{V_0}{E_i}$ และ $\frac{V_0}{E_g}$

วิธี จากสมการ (6.11) หาค่าของ $\frac{V_0}{E_i}$

$$\frac{V_0}{E_i} = -\frac{\beta_0 R_L}{(r_x + r_\pi)} = -100$$

(โดย $r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{\beta_0}{I_C/0.025} = 2500\ \Omega$)

เห็นได้ว่า ไม่มีพจน์ของ R_g ในสมการของ $\frac{V_0}{E_i}$ ดังนั้น ค่านี้จึงคงที่เสมอไม่ว่า R_g จะแปรค่าอย่างใด

จากสมการ (6.18)

$$\frac{V_0}{E_g} = -\beta_0 \left(\frac{R_L}{r_x + r_\pi}\right)\left(\frac{R_{in}}{R_{in} + R_g}\right)$$

พิจารณา $R_{in} = R_B \,//\, (r_x + r_\pi) \sim r_\pi$

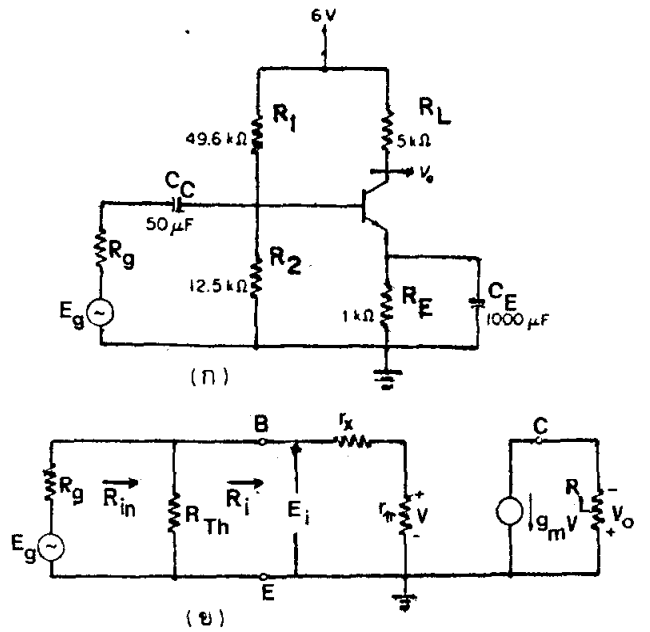
ปริมาณ $(R_{in} + R_g)$ แปรค่าตาม R_g ซึ่งจะมีผลให้ค่า $\frac{V_0}{E_g}$ ลดลง

ตัวอย่าง 6.7 ตามวงจรในรูป 6.5 (ก) จงหา (ก) ตำแหน่งจุดทำงานสำหรับไฟฟ้ากระแสตรงของวงจร (ข) ความต้านทานที่ปรากฏต่อ E_g ถ้า $R_g = 0$ และ 2.5 K (ค) สำหรับแต่ละค่าของ R_g ใน ข้อ (ข) หาค่า $\frac{V_0}{E_g}$

วิธี (ก) ข้อมูลที่จุดทำงาน คือ I_C, I_B และ V_{CE} ก่อนอื่นหาค่าของธาตุวงจรสมมูลเทเวนิน ดังนี้

$$R_{Th} = (12.5K) // (49.6\,K) \sim 12.5\,K$$

และ $$V_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = 1.21"$$



รูป 6.5 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมซึ่งต่อ R_E *และ* R_g *แสดงความต้านทานของแหล่งกำเนิดสัญญาณ* E_g *(ข) แบบจำลองสัญญาณขนาดน้อย ๆ ของรูป (ก) กำหนด*

$\beta_0 = \beta_F = 50,\ I_{CBO} = 0,\ V_{VE} = 0.6\ v,\ r_x = 0$

$$I_1 = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta_F + 1)R_E} = 10\,\mu A$$

$$I_C = \beta_F I_B = 0.5\ mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_C R_L + I_E R_E) = 3\ v$$

(โดยแทนค่า $I_E = I_C + I_B = 0.51\ mA$)

คำตอบคือ ณ จุดทำงาน มีค่า $I_B = 10\,\mu A$

$$I_C = 0.5\ mA$$

$$V_{CE} = 3\ v$$

(ข) จากรูป 6.5 (ข) R_E และ V_{CC} ลัดวงจร หาพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ดังนี้

$$r_\pi = \frac{\beta_o}{g_m} = \frac{\beta_o}{\frac{I_C}{25\ mv}} = \frac{50}{0.02} = 2.5\,K$$

$$R_{in} = R_{Th} // r_\pi = 2\,K$$

ความต้านทานที่มีต่อ $E_g = R_{in} + R_g = 2K \quad (R_g = 0)$

$= 4.5\,K \quad (R_g = 2.5\,K)$

(ก) ใช้สมการ (6.18) หาค่า $\frac{V_o}{E_g}$

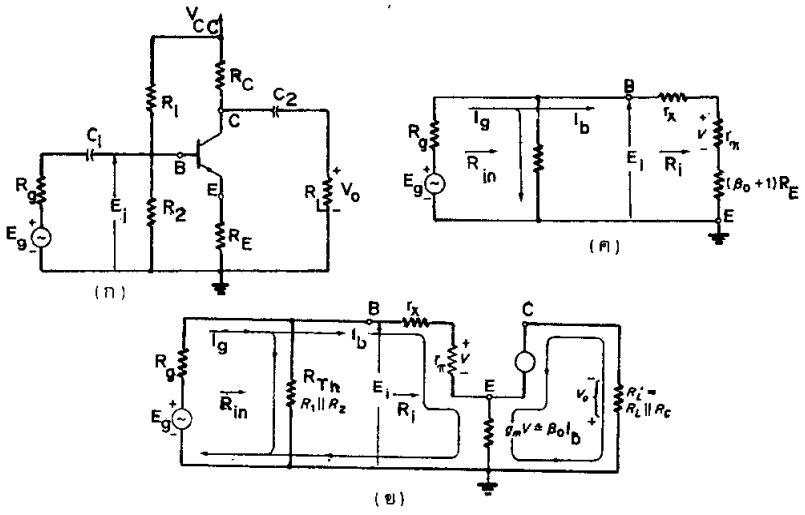
$$\frac{V_o}{E_g} = -\beta_o \left(\frac{R_L}{r_x + r_\pi}\right)\left(\frac{R_{in}}{R_{in} + R_g}\right)$$

$= -100 \quad (R_g = 0)$

$= -42.4 \quad (R_g = 2500)$

6.4 การเพิ่มตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ในวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม

วงจรในรูป 6.6 (ก) ได้เพิ่มตัวต้านทานเอมมิตเตอร์ R_E โดยไม่ถูกบายพาส ผลคือวงจรมีค่าความต้านทานอินพุทเพิ่มขึ้น แต่เกนแรงดันไฟฟ้าลดลง เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์วงจรเลือกใช้คุณสมบัติการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์ (ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดแล้วในตอน 4.2) รูป 6.6 (ข) เป็นแบบจำลองสำหรับสัญญาณขนาดน้อย ๆ ของรูป 6.6 (ก) เห็นได้ว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน R_E สามารถเขียนได้หลายรูปแบบ ดังนี้



รูป 6.6 (ก) วงจรขยายเอมมิตเตอร์ร่วมซึ่งต่อ R_E ที่ขาเอมมิตเตอร์ (ข) โครงร่างวงจรเทียบเท่าของรูป (ก) (ค) แบบจำลองวงจรสมมูลเฉพาะลูปอินพุท แสดงความต้านทานอินพุทของรูป (ก) เพื่อจะเขียน v ในนิพจน์ของ E_i หรือ E_g ได้โดยวิธีการตรวจพินิจ

$$V_{RE} = (I_b + g_m V)R_E = (I_b + \beta_o I_b)R_E = I_b(\beta_o + 1)R_E = I_e R_E \quad \text{.....(6.23)}$$

สำหรับนิพจน์ $I_b(\beta_o + 1)R_E$ แปลความหมายได้ว่า แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน R_E เป็นผลคูณของสัญญาณกระแส I_b และความต้านทานที่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น $(\beta_o + 1)R_E$ นั่นคือ เมื่อผู้สังเกตุมองเข้าในขั้วเบส จะมองเห็นความต้านทาน R_E อยู่ในขาเบส แต่มีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น $(\beta_o + 1)R_E$ แบบจำลองเพื่อแสดงคุณสมบัติการแปลงความต้านทานคือรูป 6.6 (ค)

จุดประสงค์ของการสร้างแบบจำลอง คือเพื่อหาปริมาณ A_v ในนิพจน์ง่าย ๆ ของ V_o และ E_i พิจารณารูป 6.6 (ค) E_i ถูกแบ่งค่าระหว่าง r_x, r_π และ $(\beta_o + 1)R_E$ เขียนความสัมพันธ์ของ V ดังนี้

$$V = I_b r_\pi = \frac{E_i}{r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E} r_\pi \quad \text{.....(6.24)}$$

ส่วน V_o เขียนโดยพิจารณารูป 6.6 (ข)

$$V_o = -g_m VR:$$

$$R_L' = R_L /\!/ R_C = \frac{R_L R_C}{R_L + R_C} \quad \text{.....(6.25)}$$

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = -\frac{g_m VR;}{E_i} \quad \text{.....(6.26)}$$

แทนค่าV จาก (6.24) ลงใน (6.26)

$$A_v = -\frac{g_m r_\pi R_L'}{r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E} = -\frac{\beta_o R_L'}{R_i} \quad \text{.....(6.27)}$$

$$R_i = r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E \quad \text{.....(6.28)}$$

และจาก $\beta_o = g_m r_\pi$

สมการ (6.27) เป็นรูปมาตรฐานของอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจร (คือเท่ากับผลคูณของอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ และ R_L ซึ่งมองเห็นโดย V_o หารด้วย R_i ซึ่งมองเห็นโดย E_i) ซึ่งความต้านทานอินพุทที่วัดระหว่างขั้วเบสกับกราวนด์ ให้มีค่าเป็น R_i

อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าในนิพจน์ของ E_g หาโดยอาศัยวงจรสมมูลด้านอินพุทในรูป 6.6 (ค) ซึ่ง E_g ถูกแบ่งระหว่าง R_g และ R_{in} (โดย $R_{in} = R_B /\!/ R_i$) เริ่มจากการเขียนสมการของ E_i ในนิพจน์ของ E_g ดังนี้

$$E_i = I_g R_{in} = \left[\frac{E_g}{R_g + R_{in}}\right] R_{in} \quad \text{.....(6.29)}$$

แทนค่า E, จากสมการ (6.29) ลงในสมการ (6.27)

$$A_v = \frac{V_o}{\frac{E_g R_{in}}{R_g + R_{in}}} = \frac{-\beta_o R_L'}{R_i}$$

$$\frac{V_o}{E_g} = -\frac{\beta_o R_L'}{R_i}\left(\frac{R_{in}}{R_g + R_{in}}\right) \qquad \text{.....(6.30)}$$

โดย $R_{in} = R_{Th} /\!/ R_i$ และ $R_i = r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E$

จัดรูปของสมการ (6.30) ใหม่ โดยแทนค่า R_{in} เพื่อกำจัดนิพจน์ R_i ที่เป็นตัวหาร

$$\frac{V_o}{E_g} = -\beta_o \left(\frac{R_{Th} /\!/ R_i}{R_i}\right)\left(\frac{R_L'}{R_g + R_{in}}\right)$$

$$= -\beta_o \left(\frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_i}\right)\left(\frac{R_L'}{R_g + R_{in}}\right) \qquad \text{....(6.31)}$$

สมการ (6.31) เป็นรูปมาตรฐานของอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า เช่นเดียวกับสมการ (6.27) โดย $\left(\frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_i}\right)$ เป็นตัวแบ่งกระแสอินพุท ความต้านทานที่มองเห็นโดย E_g คือ $R_g + R_{in}$

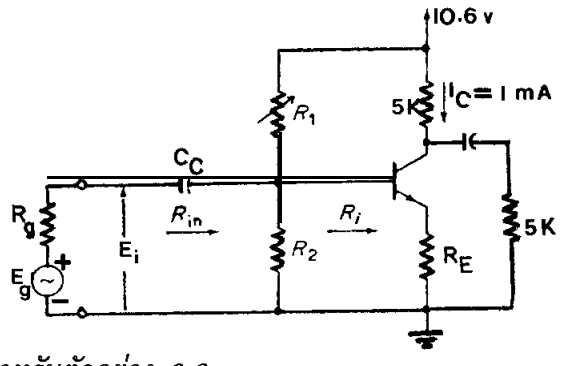
จากสมการ (6.27) อาจทำนายค่าของ $\frac{V_o}{E_i}$ ในนิพจน์ของความต้านทานได้โดยประมาณ ถ้า $(r_x + r_\pi) \ll (\beta_o + 1)R_E$ และ $(\beta_o + 1) \sim \beta_o$ ดังนั้น

$$\frac{V_o}{E_i} = -\frac{\beta_o R_L'}{r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E} \sim -\frac{R_L'}{R_E} \qquad \text{.....(6.32)}$$

ตัวอย่าง 6.6 ตามวงจรในรูป 6.7 R_1 ปรับค่าได้ เพื่อก่อกระแส $I_C = 1$ mA , $\beta_o = 50$

(ก) ถ้า $R_E = 0$ จงหาค่า $\frac{V_o}{E_i}$ และ R_i

(ข) ถ้า $R_E = 500\ \Omega$ ย้อนคำถามข้อ (ก) พร้อมทั้งหาค่าโดยประมาณของ $\frac{V_o}{E_i}$ ด้วย



รูป 6.7 ใช้สำหรับตัวอย่าง 6.6

วิธี (ก) เมื่อ $R_E = 0$

$$R_i = r_x + r_\pi = \frac{\beta_o}{g_m} = \frac{\beta_o}{\frac{1\text{ mA}}{25\text{ mV}}} = 1.25\text{ K}$$

$R_L' = R_C // R_L = 2.5$ K

หาค่า A, จากสมการ (6.11)

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = -\frac{\beta_o R_L'}{R_i} = -100 \qquad \text{(i)}$$

(ข) เมื่อ $R_E = 500\ \Omega$ ค่า R, เพิ่มขึ้น จากสมการ (6.28)

$$R_i = r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E = 26.7\text{ K}$$

ย้อนกลับไปแทนเป็นค่า R, ในสมการ (i) ได้ค่า A_v ใหม่

$$A, = -4.68$$

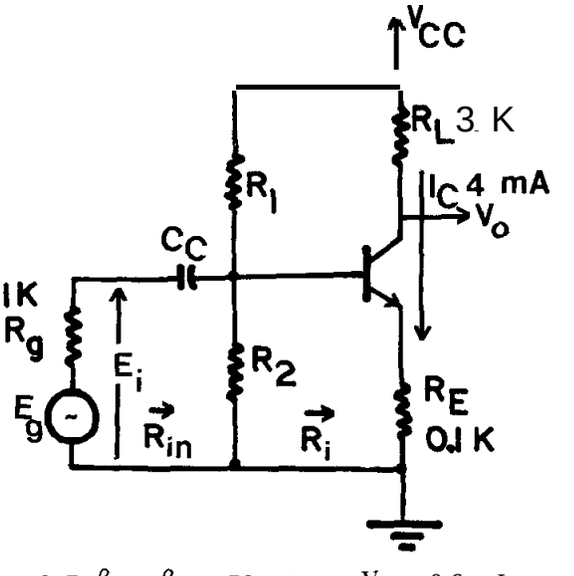
ค่าโดยประมาณ หาโดยใช้สมการ (6.32)

$$A. = -\frac{R_L'}{R_E} = -5$$

ข้อสังเกต ควรเปรียบเทียบกรณีวงจรต่อ R_E หรือไม่ต่อ (คือ $R_E = o$) มีผลอย่างไรต่ออัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

ตัวอย่าง 6.7 จากวงจรในรูป 6.8 มีค่า $\frac{V_o}{E_i} \sim \frac{R_L}{R_E} \sim 30$

แรงดันไฟฟ้าที่สูญเสียจาก E_g ไปยัง E_i มีค่าประมาณ 1/3 ถ้า R_{in} มีค่าเป็น 2 Rg สมมุติออกแบบให้มีเกนแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 20 ระหว่าง V_o และ Eg (ก) ต้องการ $I_C = 4$ mA ถ้าให้ความต้านทานที่ปรากฏต่อ E_i มีค่าต่ำสุดเป็น 2.7 K จงหาค่า R_{Th} ต่ำสุดที่เป็นไปได้ (ข) จงหาอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า $\frac{V_o}{E_i}$ และ $\frac{V_o}{E_g}$



รูป 6.8 ใช้สำหรับตัวอย่าง 6.7 $\beta_o = \beta_F = 50$, $r_x = o$, $V_{BE} = 0.6$ V, I, = o

วิธี (ก) (1) ก่อนอื่นหาค่าธาตุวงจรสมมูลไฮบริด-ไพ

$$g_m = \frac{I_C}{25\ mv} = 0.16\ mho$$

$$r_\pi = \frac{\beta_o}{g_m} = 313\ R$$

(2) หาค่า R_i จากสมการ (6.28)

$$R_i = r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E = 5.4\ K$$

(3) หาค่า R_{Th} โดยใช้ค่า $R_{in} \geq 2.7$ K ตามโจทย์กำหนด เนื่องจาก

$$R_{in} = R_{Th} \,//\, R_i$$

$$2.7\ K = \frac{(5.4\ K)R_{Th}}{(5.4K) + R_{Th}}$$

$R_{Th} = 5.4$ K เป็นค่าต่ำสุด เพื่อตอบสนองข้อกำหนดความต้านทานอินพุท

(4) หาค่า V_B จากลูปอินพุท ซึ่งต้องอาศัยปริมาณกระแสตรง

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_F} = 80\ \mu A$$

$$V_B = I_B [\ R_{Th} + (\beta_o + 1)R_E\ ] + V_{BE} = 1.44\ v$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_B} R_{Th} = 90\ K$$

$$R_2 = \frac{V_{CC}}{V_{CC} - V_B} R_{Th} = 5.75\ K$$

$$\frac{V_o}{E_i} = -\frac{\beta_o R_L}{R_i} = -28.3$$

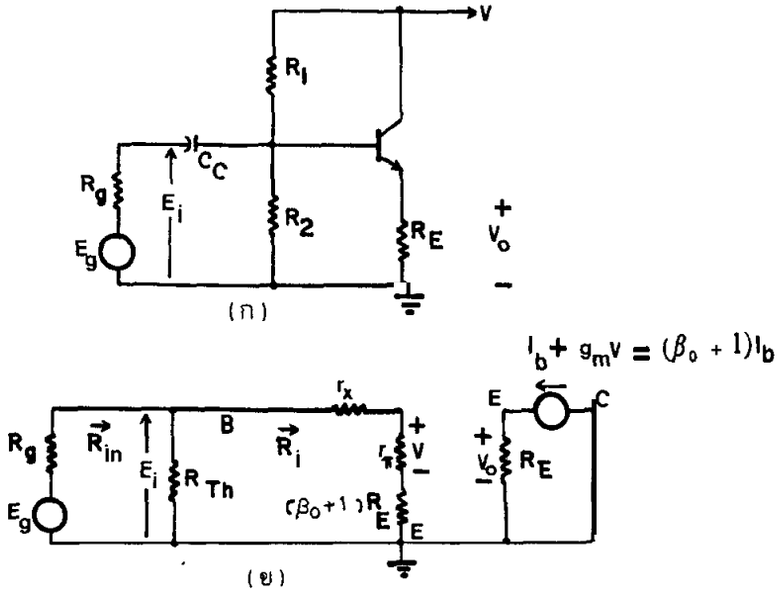
$$\frac{E_i}{E_g} = \frac{R_{in}}{(R_g + R_{in})} = 0.73$$

$$A_v = \frac{V_o}{E_g} = \frac{V_o}{E_i} \cdot \frac{E_i}{E_g} = 20.6$$

6.5 วงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วมและเบสร่วม

ตัวอย่างวงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม แสดงในรูป 6.9 (ก) ซึ่งมีวิธีการไบแอสเช่น

เดียวกับวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม โครงร่างวงจรสมมูลไฮบริด-ไพถือว่า E_i อยู่ในช่วงเวลาป้อนไบแอสตรงให้กับทรานซิสเตอร์ แสดงในรูป 6.9 (ข) ซึ่งก่อให้ $I_c = g_m V$ เพิ่มค่าขึ้นทีละเล็กทีละน้อย แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_E เกิดจากปริมาณกระแส $(g_m V + I_b)$ ซึ่งมีค่าเป็น V_o นั่นเอง ข้อสังเกตุคือขั้วคอลเลคเตอร์เป็นกราวนด์กรณีไฟฟ้ากระแสสลับ (โดยผ่าน V_{CC}) จึงเป็นขั้วร่วมกับขั้วลบของทั้ง E_i และ V_o จากรูป 6.9 (ข) เขียนสมการของความต้านทานอินพุท R_i ดังนี้



รูป 6.9 (ก) วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (ข) วงจรสมมูลของรูป (ก) โดยแปลง R_E เข้าสู่ขาเบสด้วยปริมาณ $(\beta_o + 1)$ เท่า

$$R_i = \frac{E_i}{I_b} = r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E \qquad \text{.....(6.33)}$$

ต่อไปเขียนสมการของแรงดันไฟฟ้าขาออก V_o

$$V_o = R_E(\beta_o + 1)I_b \qquad \text{.....(6.34)}$$

$$I_b = \frac{V_o}{(\beta_o + 1)R_E} \qquad \text{.....(6.35)}$$

แทนค่า I_b ลงในสมการ (6.33)

$$\frac{E_i}{V_o} = \frac{1}{(\beta_o + 1)R_E}\left[\, r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E \,\right]$$

$$\frac{V_o}{E_i} = \frac{(\beta_o + 1)R_E}{r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E} \qquad \text{.....(6.36)}$$

ถ้า $(r_x + r_\pi) \ll (\beta_o + 1)R_E$ จึงลดรูปของสมการ (6.36) เป็น

$$\frac{V_o}{E_i} \sim 1 = A_v \text{ เมื่อ } (r_x + r_\pi) \ll (\beta_o + 1)R_E \qquad \text{.....(6.37)}$$

พิจารณา กระแสไหลผ่าน R_E มีค่าเป็น $(\beta_o + 1)I_b$ ดังนั้น เกนกระแสจึงมีรูปเป็น

$$A_i = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{(\beta_o + 1)I_b}{I_b} = \beta_o + 1 \qquad \text{.....(6.38)}$$

ส่วนเกนแรงดันไฟฟ้าในรูปของ $\frac{V_o}{E_g}$ เขียนโดยอาศัยรูป 6.9 (ข) ซึ่ง E_g ถูกแบ่งค่าระหว่างตัวต้านทาน R_g และ R_{in} ซึ่ง $R_{in} = R_{Th} \,//\, R_i$ เขียนความสัมพันธ์ของ E_g และ E_i ตามสมการ (6.16) ซึ่ง $E_i = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} E_g$ แล้วแทนค่านี้ลงในสมการ (6.36) ซึ่งแทน $R_i = r_x + r_\pi + (\beta_o + 1)R_E$

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = \frac{V_o}{\left(\frac{R_{in}}{R_{in} + R_g}\right) E_g} = \frac{(\beta_o + 1)R_E}{R_i}$$

$$\frac{V_o}{E_g} = \left[\frac{(\beta_o + 1)R_E}{R_i}\right]\left[\frac{R_{in}}{R_g + R_{in}}\right] \qquad \text{.....(6.39)}$$

แทนค่า $R_{in} = R_{Th} \,//\, R_i = \frac{R_{Th}R_i}{R_{Th} + R_i}$ ลงในสมการ (6.39) และจัดรูปสมการใหม่

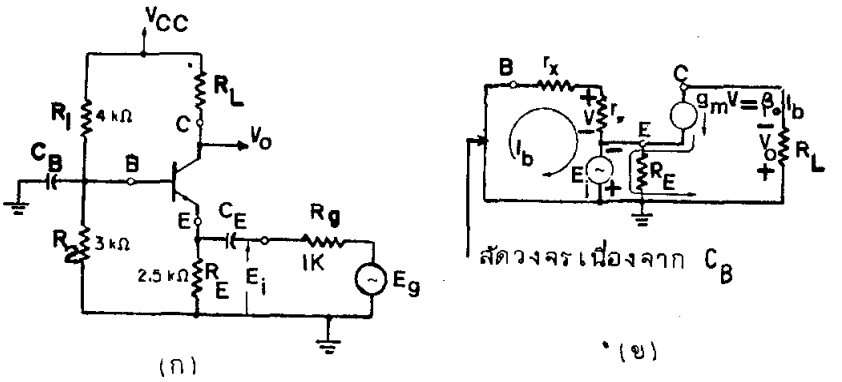
$$\frac{V_o}{E_g} = \left[\frac{(\beta_o + 1)R_E}{R_i}\right]\left[\frac{R_{Th}R_i}{R_{Th} + R_i}\right]\left[\frac{1}{R_g + R_{in}}\right]$$

นั่นคือ $$\frac{V_o}{E_g} = \left[\frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_i}\right](\beta_o + 1)\left[\frac{R_E}{R_g + R_{in}}\right] \qquad \text{...(6.40)}$$

เปรียบเทียบสมการ (6.40) กับสมการ (6.36) เห็นได้ว่า นิพจน์ที่เพิ่มขึ้น คืออัตราส่วนแสดงการแบ่งกระแสอินพุท $\left(\frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_i}\right)$ ส่วนปริมาณ $(R_g + R_{in})$ เป็นความต้านทานที่ปรากฏต่อ E_g

ส่วนวงจรเบสร่วมดังแสดงในรูป 6.10 (ก) มีลักษณะคล้ายกับวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม วงจรสมมูลแสดงในรูป 6.10 (ข) มี E_i ปรากฏอยู่ระหว่างขั้วเอมมิตเตอร์และเบส ซึ่งจากรูป (ก) ขั้วเบสจะเป็นกราวนด์กรณีไฟฟ้ากระแสสลับ (มีสัญญาณความถี่ต่ำ) และเนื่องจาก V_{CC} ถือว่าปฏิบัติเป็นวงจรลัดต่อกระแสสลับ ดังนั้น ขั้วบนของ R_L จึงอยู่ที่กราวนด์ ส่วนปริมาณ

$R_1 \,//\, R_2$ ถูกกำจัดโดยตัวจุ C_B สัญญาณเอาท์พุทวัดจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานโหลด R_L ที่ขั้วคอลเลคเตอร์ อย่างไรก็ตาม ยังคงใช้คุณสมบัติการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์ได้อยู่เสมอ



รูป 6.10 (ก) วงจรเบสร่วม จัดโครงร่างให้เหมือนกับวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม แต่ขั้วเบสจะกลายเป็นกราวนด์ในกรณีไฟฟ้ากระแสสลับ (ข) แบบจำลองไฮบริด-ไพของรูป (ก) สำหรับกรณีสัญญาณขนาดน้อย ๆ มีความถี่ต่ำ ทั้งนี้ $I_{CBO} = 0 = r_x$, $\beta_o = \beta_F = 50$ *และ* $V_{BE} = 0.6$ v

เริ่มศึกษาโดยอาศัยรูป 6.10 (ข) R_E เป็นตัวระบายกระแสของ E_i ส่วน E_i มีกระแส I_b และ $\beta_o I_b$ ไหลผ่าน เขียนความต้านทานอินพุทของทรานซิสเตอร์ ดังนี้

$$R_i = \frac{E_i}{(\beta_o + 1)I_b} \qquad \text{.....(6.41)}$$

จากลูปอินพุท $\frac{E_i}{I_b} = r_x + r_\pi$ แทนค่านี้ลงใน (6.41)

$$R_i = \frac{r_x + r_\pi}{\beta_o + 1} \qquad (6.42)$$

ปริมาณที่น่าสนใจคือเกนแรงดันไฟฟ้า $\frac{V_o}{E_i}$ สำหรับ V_o มีค่าเท่ากับกระแส $\beta_o I_b$ คูณกับความต้านทาน R_L

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = \frac{\beta_o I_b R_L}{E_i} = \frac{\beta_o R_L}{r_x + r_\pi} \qquad \text{.....(6.43)}$$

สมการ (6.43) มีรูปเช่นเดียวกับสมการ (6.27) ซึ่งเป็นอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม แต่สำหรับวงจรเบสร่วม R_E ไม่มีผลต่ออัตราขยายกระแส และไม่มีการกลับเฟสในวงจรเบสร่วม

ค่าที่น่าสนใจอีกค่าหนึ่งคือเกนกระแสของวงจร จากรูป 6.10 (ข) กระแสเอาท์พุทคือ $\beta_o I_b$ ส่วนกระแสอินพุทเป็นกระแสทั้งหมดที่ถูกขับจาก E_i ซึ่งกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ทั้งหมดคือ $I_b + \beta_o I_b$ จึงเขียน A_i ได้ดังนี้

$$A_i = \frac{I_o}{I_{in}} = \frac{\beta_o I_b}{(\beta_o + 1) I_b} \qquad \text{.....(6.44)}$$

โดย α_o เป็นเกนกระแสตรงไปข้างหน้า (ไม่ใช่ย้อนกลับ) ของวงจรเบสร่วม (บนแผ่นข้อมูลคือค่า h_{fb})

ส่วนเกนแรงดันไฟฟ้าในรูปของ $\frac{V_o}{E_g}$ เขียนโดยพิจารณารูป 6.10 (ข) เช่นเดียวกันเริ่มจากสมการแบ่งแรงดันไฟฟ้า

$$E_i = \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}} E_g$$

$$A_v = \frac{V_o}{E_g} = \frac{V_o}{E_i} \cdot \frac{E_i}{E_g} = \left(\frac{\beta_0}{\beta_0 + 1}\right)\left[\frac{R_L}{\left(\frac{r_x + r_\pi}{\beta_o + 1}\right)}\right]\left[\frac{R_{in}}{R_g + R_{in}}\right] \qquad \text{..(6.45)}$$

ซึ่ง $$\frac{V_o}{E_i} = \frac{I_o R_L}{I_i R_i} = \frac{\beta_o}{(\beta_o + 1)} \left[\frac{R_L}{\left(\frac{r_x + r_\pi}{\beta_0 + 1}\right)}\right]$$

ต่อไปทำการจัดรูปของสมการ (6.45) ใหม่ โดยใช้สมการ (6.40) เป็นหลัก คือ จัดนิพจน์หลังสุดเป็น $\frac{R_L}{R_g + R_{in}}$ และแทนค่า $R_i = \frac{r_x + r_\pi}{\beta_o + 1}$ จากนั้นแทนค่า $R_{in} = R_E // R_i$

นั่นคือ $$\frac{V_o}{E_g} = \left(\frac{R_E}{R_E + R_i}\right)\left(\frac{\beta_0}{\beta_0 + 1}\right)\left(\frac{R_L}{R_g + R_{in}}\right) \qquad \text{.....(6.46)}$$

จากสมการ (6.46) สังเกตสัมประสิทธิ์ที่เป็นตัวแบ่งกระแสอินพุท แสดงว่า I_g ถูกแบ่งระหว่าง R_E และ R_i ดังนั้น เขียนเกนกระแสได้ใหม่

$$A_i = \frac{I_L}{I_g} = \frac{V_o / R_L}{E_g / (R_g + R_{in})} = A_V \left(\frac{R_g + R_{in}}{R_L}\right)$$

แทนค่า A_v จากสมการ (6.46)

$$A_i = \frac{I_L}{I_i} = \left(\frac{R_E}{R_E + R_i}\right)\left(\frac{\beta_0}{\beta_0 + 1}\right) \qquad \text{.....(6.47)}$$

ตัวอย่าง 6.8 จากวงจรในรูป 6.10 จงหา (ก) จุดทำงาน dc, (ข) $\frac{V_o}{E_i}$ (ค) R_{in}, (ง) $\frac{V_o}{E_g}$

วิธี

(ก) ข้อมูล ณ ตำแหน่งจุดทำงาน คือ I_B, I_C, และ V_{CE}

เริ่มหาค่า I_B จากลูปอินพุท

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta_0 + 1) R_E} \qquad \text{.....(i)}$$

$$R_{Th} = 3\ \text{K} \,/\!/\, 4\ \text{K} = 1.72\ \text{K}$$

$$V_B = V_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} = 12.8\ \text{v}$$

แทนค่า R_{Th} และ V_B ใน (i) ได้ค่า $I_B = 94.2\ \mu\text{A}$

$$I_C = \beta_F I_B = 4.71 - \text{mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (V_{RE} + V_{RL})$$

$$= V_{CC} - (I_E R_E + I_C R_L)$$

$$= 30 - (12.0 + 9.4) = 8.6\ \text{v}$$

(ข) จากสมการ (6.43)

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = \beta_0 \left[\frac{R_L}{r_x + r_\pi}\right] \qquad \text{.....(ii)}$$

$$r_x = 0,\ r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{\beta_0}{\text{I,I 25 mv}} = 267$$

แทนค่าใน (ii) ได้ค่า $A_v = 374$

(ค) จากสมการ (6.42)

$$R_i = \frac{r_x + r_\pi}{\beta_0 + 1} = 5.2\ \Omega$$

$$R_{in} = R_E \,/\!/\, R_i = 5.2\ \Omega$$

(ง) $$\frac{V_o}{E_g} = \frac{V_o}{E_i} \cdot \frac{E_i}{E_g} = A_v \cdot \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}} = 1.87$$

$$(E_{.} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_g} E_g)$$

6.6 การหาค่าความต้านทานเอาท์พุทโดยใช้คุณสมบัติการแปลงความต้านทาน

จากคำนิยาม ความต้านทานเอาท์พุทของวงจรเป็นความต้านทานที่ถูกมองเข้าในขั้วเอาท์พุทของอุปกรณ์ เมื่อไม่มีการต่อโหลด

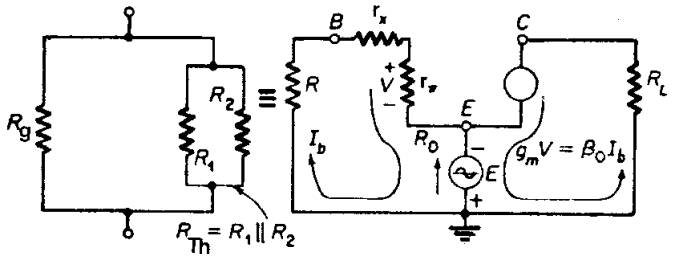
จากหัวข้อ 6.4 ถ้าผู้สังเกตติดตามกระแสเบส จะมองเห็นความต้านทานในขาเบสมีค่าเท่าเดิม แต่ถ้าเป็นกระแสเอมมิตเตอร์ จะมองเห็นความต้านทานดังกล่าวเพิ่มค่าเป็น (β_0+1) เท่าทำนองเดียวกัน ถ้ามองเข้าสู่ขั้วคอลเลคเตอร์ จะเห็นความต้านทานของต้นกำเนิดกระแส g_mV มีค่าสูงมากจนอาจแทนด้วยค่าอนันต์ และขั้วเอาท์พุทของวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม คือ ขั้วคอลเลคเตอร์ จึงคาดได้ว่าความต้านทานเอาท์พุทมีค่าสูง

วิธีการแปลงค่าความต้านทานเข้าสู่ขาของทรานซิสเตอร์เป็นวิธีง่าย ทุ่นเวลาในการร่างวงจรสมมูลใด ๆ เนื่องจากใช้คาดคะเนปริมาณความต้านทานโดยตรงจากวงจร แต่สำหรับการอธิบายในขั้นแรกนี้ จำต้องวาดโครงร่างแสดงปริมาณความต้านทานต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการเข้าใจ จากวงจรในรูป 6.11 ลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์วงจร ดังนี้

(1) รวมค่าความต้านทานด้านอินพุททั้งหมดที่อยู่ภายนอกทรานซิสเตอร์ ได้แก่ R_g ต่อขนานกับความต้านทานลัพธ์ของ $R_1 \,//\, R_2 = R_{Th}$ เพื่อความสะดวกกำหนดให้

$$R = R_g \,//\, R_{Th}$$

(2) ธาตุวงจรของแบบจำลองไฮบริด-ไพ ยังคงประกอบด้วย r_x ต่ออนุกรมกับ r_π ด้านเอาท์พุทมี g_mV อยู่ระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์และเอมมิตเตอร์



รูป 6.11 วงจรที่ใช้หาความต้านทานเอาท์พุทของเอมมิตเตอร์ ในรูป 6.9 (ก)

(3) สำหรับที่ขาเอมมิตเตอร์ ตัด R_E ออก เพื่อสะดวกในการศึกษา แต่ต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณ E ไว้แทน

(4) กระแสอินพุทเกิดจาก E ได้สร้างกระแส I_b ไหลผ่าน r_π ครบวงจร และกระตุ้น $g_m V$ เกิดกระแสไหลผ่าน E (ซึ่ง $g_m V = I_c = \beta_0 I_b$) ดังนั้น กระแสไหลผ่าน E ทั้งหมด คือ $(\beta_0 + 1) I_b$

(5) ความต้านทานเอาท์พุท R_o เป็นความต้านทานที่ปรากฏต่อ E ดังนั้น เขียนได้เป็น

$$R_o = \frac{E}{(\beta_0 + 1) I_b} \qquad \text{.....(6.48)}$$

เขียน I_b จากลูปอินพุท

$$I_b = \frac{E}{r_x + r_\pi + R} \qquad \text{.....(6.49)}$$

แทนค่าจากสมการ (6.49) ลงใน (6.48) เขียนได้เป็น

$$R_o = \frac{r_x + r_\pi + R}{\beta_0 + 1} \qquad \text{....(6.50)}$$

จากสมการ (6.50) แสดงว่า เมื่อมองเข้าสู่ขาเอมมิตเตอร์ ความต้านทานทุกค่าที่ I_b ไหลผ่านจะถูกหารด้วย $(\beta_0 + 1)$

(6) สำหรับกรณีมี R_E ต่ออยู่ ความต้านทานเอาท์พุททั้งหมดคือ $R_o \,//\, R_E$ ข้อสังเกตคือ R_E มีค่าคงเดิม

ตัวอย่าง 6.9 ตามวงจรในรูป 6.11 ใช้ทรานซิสเตอร์ซิลิคอน (ไม่ต้องคำนึงถึงกระแสรั่ว) ถ้า $\beta_0 = \beta_F = 50$ และ $r_x = 0$

(ก) จงหาค่า R_1 และ R_2 ซึ่งต้องมีค่าความต้านทานรวมอย่างน้อยที่สุด เท่า R_i

(ข) คำนวณค่า $\frac{V_o}{E_i}$

(ค) ค่าสูงสุดของ E_i เป็นเท่าใด ก่อนจะถึงค่าจำกัดของแบบจำลองไฮบริด-ไพ

วิธี หาค่าของ R_i จากสมการ (6.33)

$$R_i = r_x + r_\pi + (\beta_o + 1) R_F \qquad \text{.....(i)}$$

$$r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{50}{I_C / 25\ \text{mv}} = 1.25\ \text{K}$$

แทนค่าลงในสมการ (i) ได้ค่า $R_i = 154\ \text{K}$

ดังนั้น $R_{Th} = R_1 // R_2 \geq 154\,K$ ต่อไปหาค่า R_1 และ R_2 จาก

$$R_1 \quad \frac{V_{CC}R_{Th}}{V_B} \qquad \text{..... .(ii)}$$

และ $$R_2 = \frac{V_{CC}R_{Th}}{V_{CC}-V_B} \qquad \text{..... .(iii)}$$

ค่าที่ต้องหาคือ V_B ถ้าเลือกใช้ $R_{Th} = 154\,K$ จากลูปอินพุท

$$V_B = I_B \{R_{Th} + (\beta_F + 1) R_E\} + V_{BE}$$

$$= \frac{I_C}{\beta_F} \{R_{Th} + (\beta_F + 1) R_E\} + V_{BE}$$

$$= 6.74\ v$$

แทนค่าลงใน (ii), $R_1 = 205\ K$

แทนค่าลงใน (iii), $R_2 = 614\ K$

(ข) จากสมการ (6.36)

$$\frac{V_o}{E_i} \quad \frac{(\beta_0 + 1) R_E}{R_i} = 0.994$$

(ค) ขีดจำกัดของ V_{be} ในแบบจำลองไฮบริด-ไพ คือ 5 mv ค่ายอดของ I_b คือ

$$I_{bp} = \frac{V_{be}}{r_\pi} = 4\,\mu A$$

ค่ายอดของ E_i ที่สมนัยกัน เกิดขณะเมื่อค่ายอดของกระแสเบสไหลผ่าน R_i ซึ่ง

$$E_{ip} = I_{bp}R_i = 0.616\ v$$

ตัวอย่าง 6.10 จากตัวอย่าง 6.9 สมมุติ $R_g = 10K$ และ $E_{gp} = 0.5\ v$ จงหาค่า I_{gp}, I_{bp}, กระแสไหลผ่าน R_E, E_{ip}, V_o/E_g, V_o

วิธี

(1) เริ่มจากหาค่า I_{gp} โดยพิจารณาลูปอินพุท

$$I_{gp} = \frac{E_g}{R_g + R_{in}} \qquad \text{.....(i)}$$

แต่ $R_{in} = R_i // R_{Th} = 154\,K // 154\,K = 77\,K$

แทนค่าใน (i) ได้ $I_{gp} = 5.74\ \mu A$

(2) หาค่า I_{bp} โดยพิจารณาด้านอินพุทเช่นกัน เขียนสมการในลักษณะการแบ่งกระแส

$$I_{bp} = \left(\frac{R_{Th}}{R_{Th}+R_i}\right) I_g = 2.87\ \mu A$$

(3) กระแสไหลผ่าน $R_E = (\beta_0+1)\, I_b = 147\ \mu A$

(4) หาค่า E_{ip} โดยอาศัยค่าของ E_g ซึ่งโจทย์กำหนด และเขียนความสัมพันธ์ในลักษณะการแบ่งสัญญาณของตัวต้านทาน (หรืออาจดูจากรูป 6.9 (ข) ก็ได้)

$$E_i = \frac{R_{in}}{R_g+R_{in}} E_g = 0.442\ v$$

(5) หาค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าในรูปของ $\frac{V_o}{E_g}$ จากสมการ (6.40)

$$\frac{V_o}{E_g} = \frac{R_{Th}}{R_{Th}+R_i} (\beta_0+1) \left(\frac{R_E}{R_g+R_{in}}\right) = 0.88$$

(6) หาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท อาศัยค่าจากขั้นตอนที่ (5)

$$V_o = A_v E_g = 0.44\ v$$

ตัวอย่าง 6.11 จากตัวอย่าง 6.10 คำนวณค่า V_o โดยใช้คุณสมบัติการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์

วิธี

(1) รวมค่าความต้านทานภายนอกวงจรทั้งหมด คล้ายวิธีการในรูป 6.11 (ข)

$$R_{Th} = R_1 \,//\, R_2 \quad \text{และ} \quad R = R_{Th} \,//\, R_g$$

ถ้าใช้ค่าจากตัวอย่าง 6.9, $R_1 \,//\, R_2 = 154\ K$

ดังนั้น $R = 154\ K \,//\, 10\ K = 9.4\ K$

(2) ความต้านทาน R ต่ออนุกรมกับ $r_x\ (=0)$ และ r_π

ให้ $R_o = R + r_\pi = 9.4\ K + 1.25\ K$

(3) แปลงความต้านทานเข้าสู่ขาเอมมิตเตอร์ กลายเป็น $\frac{R_o}{\beta_0+1} = 208\ \Omega$

(4) หาค่าแรงดันไฟฟ้าเทเวนิน จากลูปอินพุท และจากคำจำกัดความ

$$E_{Th} = \frac{R_{Th}}{R_{Th}+R_g} E_g = \frac{154\ K}{(154+10)\ K} \times 0.5\ V = 0.47\ V$$

(5) เขียนแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท ในลักษณะการแบ่งแรงดันไฟฟ้าของด้านอินพุท ซึ่ง E_{th} จะถูกแบ่งระหว่าง ($\frac{R_o}{\beta_o+1}$) กับ R_E (ให้ $R_o' = \frac{R_o}{\beta_o+1}$)

$$V_{op} = \frac{R_E}{R_E + R_o'} E_{th} = 0.44 \text{ v}$$

ได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับค่าในตัวอย่าง 6.10

(หมายเหตุ V_o เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_E)

สรุปกฎพื้นฐานที่ใช้ในการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์ คือ

(1) เมื่อมองเข้าสู่ขั้วเอมมิตเตอร์ หารตัวต้านทานทุกค่าที่กระแสเบสไหลผ่านด้วยปริมาณ (β_o+1)

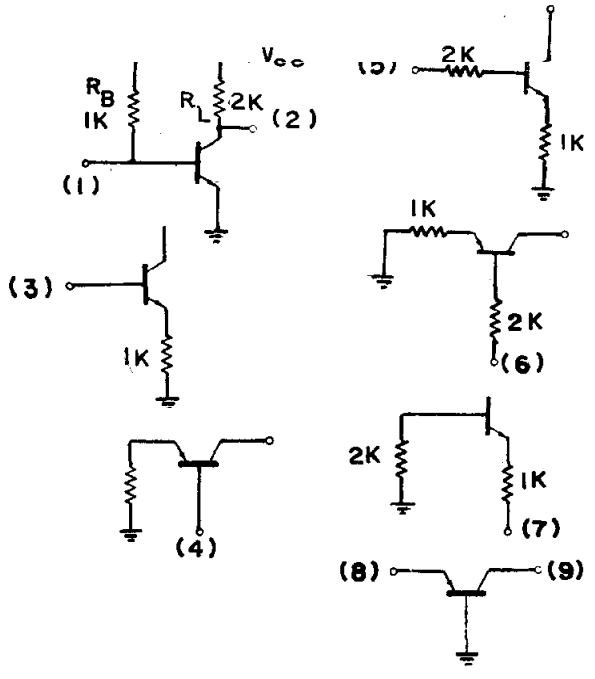
(2) ถ้ามองเข้าสู่ขาเบส คูณความต้านทานทุกค่าที่กระแสเอมมิตเตอร์ผ่าน ด้วยปริมาณ (β_o+1)

โดยถือเสมอว่า (r_x+r_π) มีกระแสเบสไหลผ่าน และขั้วคอลเลคเตอร์ มีความขัดสูง (เป็นค่าของ $g_m V$)

ตัวอย่าง 6.12 จงหาความต้านทานต่อกระแสสลับ ระหว่างกราวนด์และขั้วที่กำหนดในรูป แต่ละวงจรมี $\beta_o = 99$ และ $r_x + r_\pi = 1K$ ถือว่าทรานซิสเตอร์อยู่ในภาวะแอคทีฟ แม้วงจรจะไม่สมบูรณ์ก็ตาม

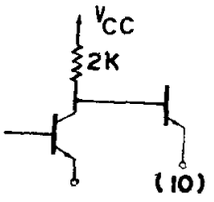
วิธี

1. $R = (r_x+r_\pi) // R_B = 500\ \Omega$
2. $R = 2\ K$
3. $R = r_x + r_\pi + (\beta_o+1)R_E = 101\ K$
4. $R =$ ข้อ 3
5. $R = 2\ K + 1\ K + (100 \times 1\ K) = 103K$
6. $R = 2\ K + 1\ K + (100 \text{x} 1\ K) = 103\ K$
7. $R = 1\ K + \frac{1\ K}{100} + \frac{2\ K}{100} = 1.30\ K$
8. $R = \frac{1\ K}{100} = 10\ \Omega$
9. $R = \infty$
10. $R = \frac{1\ K}{100} + \frac{2\ K}{100} = 30\ \Omega$



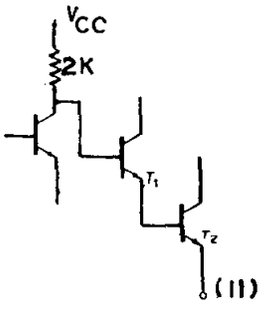
11. แยกวิเคราะห์วงจรทีละขั้น (1) มองเข้าสู่เอมมิตเตอร์ของ T_1 ดังนั้น

$$R = \frac{r_x + r_\pi + 2K}{\beta_o + 1} = 30$$



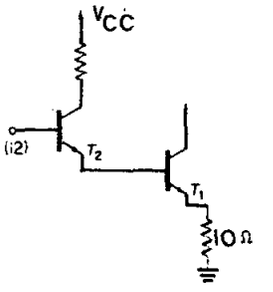
(2) มองเข้าสู่เอมมิตเตอร์ของ T_2 จะมองเห็น $\frac{r_x + r_\pi}{\beta_0 + 1}$ ของ T_2 ต่ออนุกรมกับ $\frac{R}{\beta_0 + 1} = 0.3\ \Omega$

$\therefore R' = 10 + 0.3 = 10.3\ \Omega$



12. การวิเคราะห์แยกเป็น 2 ขั้น เช่นกัน (1) มองเข้าสู่เบสของ T_1, $R = (\beta_0 + 1)(10) + (r_x + r_\pi)_{T_1}$ (2) มองเข้าสู่เบสของ T_2 จะมองเห็น $(r_x + r_\pi)_{T_2}$ ต่ออนุกรมกับ $(\beta_0 + 1)\ R = 200\ K$

นั่นคือ $R' = 1\ K + 200\ K = 201\ K$



6.7 บทสรุป

การวิเคราะห์วงจรทรานซิสเตอร์ด้วยแบบจำลองไฮบริด-ไพ เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทรานซิสเตอร์โดยตรง ในแบบจำลองด้านอินพุทประกอบด้วยตัวต้านทาน r_x ซึ่งแทนปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสเบสไหลผ่านความต้านทานโอห์มมิคของเบส ตัวต้านทานนี้ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน r_π ซึ่งแทนปริมาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อเอมมิตเตอร์ และแรงดันไฟฟ้านี้เป็นตัวควบคุมกระแสคอลเลคเตอร์ จึงเสนอให้มีต้นกำเนิดกระแส $g_m V$ ในภาคเอาท์พุทของวงจรสมมูล

โดยทั่วไป r_x มีค่าน้อยมากสำหรับกรณีสัญญาณมีความถี่น้อย ๆ ดังนั้น ในหลาย ๆ ตัวอย่างการวิเคราะห์วงจรจึงมักละทิ้งค่านี้ ถ้าลองเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์วงจรวิธีต่าง ๆ เห็นได้ว่าผลการคำนวณใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ ย่อมอยู่ภายในขีดกำหนดของแบบจำลอง และสามารถหาความสัมพันธ์ของธาตุวงจรสมมูลได้เช่นกัน

นอกจากนี้ ยังมีอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งพิจารณาค่าความต้านทานของวงจรโดยการตรวจพินิจ ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรสมมูล แต่อาศัยคุณสมบัติการแปลงความต้านทานของทรานซิสเตอร์ และคำนวณค่าความต้านทานลัพธ์ที่ต่อขนานกันตามกฎของเทเวนิน

แบบฝึกหัดบทที่ 6

6.1 ตามรูป 6.1 จงสร้างแบบจำลองไฮบริด-ไพของวงจรคอลเลคเตอร์ร่วม

6.2 จากตัวอย่าง 6.1 ถ้า $I_C = 1$ mA คงที่ แต่ใช้ทรานซิสเตอร์มีค่า $\beta_0 = 200$ แทน จงหาพารา-มีเตอร์ไฮบริด-ไพ (ณ ความถี่ต่ำ)

6.3 "หน้าต่างไฮบริด-ไพ" คืออะไร จงอธิบาย

6.4 ทวนคำถามในตัวอย่าง 6.5 โดย $\beta_F = \beta_0 = 100$

6.5 จากวงจรในรูป 6.5 (ก) ถ้าใช้ $R_2 = 1$ K ให้ทบทวนคำถามในตัวอย่าง 6.7

6.6 วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมดังแสดงในรูป 6.6 (ก) R_E มีบทบาทอย่างไรในการรักษาเสถียรภาพของวงจร จำเป็นหรือไม่ในการต่อตัวจุบายพาส C_E

6.7 จากตัวอย่าง 6.11 ถ้า $R_1 >> R_2$ และ $R_{Th} >> R_s$ จงคำนวณหา V_o โดยใช้คุณสมบัติการแปลงความต้านทาน

6.8 ตามวงจรในรูป 6.6 (ก) กำหนด $V_{CC} = 10.6$ v, $V_{BE} = 0.6$ v, $R_C = 5$ K, $R_2 = \infty$, $\beta_o = 50$ $r_x = 0$, $I_C = 1$ mA, $R_L = 0$ ทวนคำถามในตัวอย่าง 6.6 ใหม่

6.9 ทวนคำถามในตัวอย่าง 6.12 ถ้า $\beta_0 = 49$