บทที่ 7
ความถี่และวงจรขยาย

7.1 บทนำ

จากรายละอียดในบทต่าง ๆ ที่ผ่านมา ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์วงจรขยายโดยกำหนดใช้สัญญาณขนาดน้อย ๆ (ประมาณ 5 มิลลิโวลท์) และความถี่ต่ำ ซึ่งสามารถละทิ้งปริมาณความจุของตัวจุต่าง ๆ ในวงจรได้ แต่ถ้าสัญญาณมีความถี่สูง (หรือสูงมาก) จะละทิ้งปริมาณดังกล่าวไม่ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับทรานซิสเตอร์ที่ได้เสนอ เช่น ลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์ในสภาวะต่าง ๆ ลักษณะสมบัติของวงจรทรานซิสเตอร์ ประสิทธิภาพและการออกแบบวงจรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ เป็นต้น สิ่งที่น่าสนใจในขอบเขตของสาขาวิชาอิเลคทรอนิกส์อีกสิ่งหนึ่ง คือ ความถี่ของสัญญาณมีความสัมพันธ์กับวงจรทรานซิสเตอร์อย่างไร ดังนั้น จึงเสนอรายละเอียดต่าง ๆ ไว้ในบทนี้

สัญญาณทางอิเลคทรอนิกส์มีหลายชนิด และมีความซับซ้อนแตกต่างกันไป เช่น สัญญาณ VIDEO ในระบบโทรทัศน์ เป็นต้น ปัญหา คือ ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณดังกล่าวนี้อาจเกิดความไม่แน่นอน (uncertainty) คำถาม คือ จะเลือกใช้วิธีการใดกำหนดคุณลักษณะของแต่ละสัญญาณในทางทฤษฎี ย่อมต้องใช้สมการคณิตศาสตร์เป็นตัวแทนสัญญาณเหล่านั้น ได้แก่ อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series) การย้ายหรือแปรค่าโดยวิธีการฟูเรียร์ (Fourier transform) และโดยวิธีการลาปลาซ (Laplace transform) เป็นต้น โดยถือว่าสัญญาณใด ๆ ก็ตาม เกิดจากคลื่นซายน์หลายคลื่นมาซ้อนกัน ซึ่งก่อให้เกิดคลื่นลัพธ์เป็นไปตามพีชคณิต (คือ เสริมหรือหักล้างกัน)

อนุกรมฟูเรียร์ซึ่งใช้แทนคลื่นซายน์ที่ซ้อนกัน ได้แก่

$$v(t) = V_1 \cos(\omega_s t + \phi_1) + V_2 \cos(2\omega_s T + \phi_2) + \ldots\ldots \quad (7.1)$$

แต่ถ้าสัญญาณไม่เป็นคลื่นซายน์จะแก้ปัญหาอย่างไร ? คำตอบคือ อนุโลมให้มีลักษณะการซ้อนกันเช่นเดียวกับคลื่นซายน์ แต่เป็นค่าโดยประมาณ ซึ่งในกรณีเช่นนี้ คลื่นซายน์อาจมีบางส่วนสัมพันธ์กันในลักษณะไม่เป็นฮาร์โมนิค (harmonic) เพื่อความเข้าใจ นึกถึงสภาพของคลื่นเสียงจำนวนหนึ่งซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ของคลื่นซายน์ที่มีความถี่ต่างกัน โดยทั่วไป สัญญาณลักษณะดังกล่าวนี้เขียนได้เป็นอนุกรมฟูเรียร์ ดังนี้

$$v(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + V_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) + \ldots \quad \ldots\ldots\ldots(7.2)$$

ซึ่งแต่ละส่วน ไม่จำเป็นต้องมีความถี่สัมพันธ์กันแบบฮาร์โมนิคก็ได้

จุดประสงค์ของบทนี้คือ เพื่อ

(1) อธิบายกฎเกณฑ์การหาอัตราขยายในหน่วยเดซิเบล (decibel) เขียนย่อเป็น dB

(2) ศึกษาคุณสมบัติหรือลักษณะที่วงจรขยายมีต่อค่าความถี่ใด ๆ ของสัญญาณที่ป้อนเข้าในวงจร

7.2 เดซิเบล หน่วยใช้วัดอัตราขยาย

ถ้าลองสังเกตการได้ยินของหู (มนุษย์) จะเห็นได้ว่า หูมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของเสียงที่มีระดับต่ำมากกว่าระดับสูง เช่น ถ้าเสียงจากลำโพง 2 วัตต์ เพิ่มเป็น 3 วัตต์ มีปริมาณความเข้มเพิ่มขึ้น 1 วัตต์ ผู้ฟังจะรู้สึกว่าเสียงดังมากขึ้น แต่ถ้าเสียงจากลำโพง 10 วัตต์ เพิ่มเป็น 11 วัตต์ ผู้ฟังจะไม่รู้สึกดังขึ้นมากนัก (บางครั้งอาจไม่สามารถสังเกตได้) **ความดัง** ที่ผู้ฟังได้ยินนั้น ขึ้นกับอัตราส่วนของ **กำลัง** ทั้งสองค่า

อัตราส่วนของ 3 วัตต์ ต่อ 2 วัตต์ คือ 1.5 (เพิ่มขึ้น 50%) และอัตราส่วนของ 11 วัตต์ ต่อ 10 วัตต์ คือ 1.1 (เพิ่มขึ้นประมาณ 10%) ดังนั้น กำหนดหน่วยเดซิเบล มีค่าขึ้นกับอัตราส่วนของระดับกำลัง และใช้ค่าล็อกการิธม (logarithm) ของอัตราส่วนกำลัง โดยใช้เฉพาะล็อกฐาน 10 เท่านั้น ทั้งนี้ เพื่อแปลงผลต่างระหว่างค่ามากกับค่าน้อย ให้มีปริมาณน้อย ๆ เช่น ถ้าอัตราส่วนของกำลังมีค่าเป็น 1000 ค่าล็อกฐาน 10 ของปริมาณ 1000 คือ 3 หน่วยเดซิเบลจึงแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรในวงจรอินพุทกับวงจรเอาท์พุท จากคำจำกัดความ

$$\text{bel} = \log(P_2/P_1) \quad \ldots\ldots\ldots(7.3)$$

$$\text{decibel} = \text{dB} = 10 \log(P_2/P_1) \quad \ldots\ldots\ldots(7.4)$$

ขั้นตอนในการหาค่าเป็นหน่วยเดซิเบล สรุปได้ดังนี้

(1) หาอัตราส่วน P_2/P_1 โดยทำให้ค่าทั้งสองมีหน่วยเดียวกัน เช่น $P_2 = 1$ W และ $P_1 = 1$ mW

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1000 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} = 1000$$

(2) เลือกให้ P_2 มีค่าสูงกว่า P_1 เสมอ เพื่อจะได้ค่าผลลัพธ์มากกว่า 1 เสมอ เป็นการขจัดปัญหาสำหรับค่าล็อกเป็นลบ

(3) หาค่าล็อกของผลลัพธ์ในข้อ (1) ซึ่งจากตัวอย่างนั้นได้ผล คือ

$$1000 = 10^3 = 3 \log 10 = 3$$

(4) คูณค่าล็อก ด้วย 10 ผลลัพธ์เป็นปริมาณในหน่วยเดซิเบล จากตัวอย่างเดิม

$$dB = 10 \times 3 = 30$$

ในทางกลับกัน ถ้ากำลังมีค่าลดจาก 1000 mW เป็น 1 mW จะได้ผลลัพธ์ของการสูญเสียกำลังเป็น -30 dB

7.2.1 เกนแรงดันไฟฟ้าในหน่วยเดซิเบล

อาศัยความสัมพันธ์ของกำลังและกระแส ความต้านทาน และแรงดันไฟฟ้า

$$P = I^2R = V^2/R$$

ถ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องแทนค่า R ด้วย Z เขียนสมการ (7.4) ได้เป็น

$$dB = 10 \log \left(\frac{V_2^2/Z_2}{V_1^2/Z_1} \right)$$

$$= 10 \log \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)$$

$$= 20 \log \frac{V_2}{V_1} + 10 \log \frac{Z_1}{Z_2} \qquad \text{.....(7.5)}$$

และมีบ่อยครั้งถือว่า $Z_1 = Z_2$ ดังนั้น ปริมาณที่สองด้านขวาของสมการ (7.5) จึงมีค่าเป็นศูนย์

7.2.2 เกนกระแสในหน่วยเดซิเบล

ในทำนองเดียวกับตอน 7.2.1 แทนค่าของกำลังให้อยู่ในรูปของกระแสและความขัด

$$dB = 10 \log \frac{I_2^2 R_2}{I_1^2 R_1}$$

$$= 20 \log \frac{I_2}{I_1} + 10 \log \frac{Z_2}{Z_1} \qquad \text{.....(7.6)}$$

ซึ่งมักถือว่า $Z_1 = Z_2$ และปริมาณหลังในสมการ (7.6) มีค่าเป็นศูนย์

ตัวอย่าง 7.1 เครื่องขยายหนึ่ง มีความขัดอินพุท 2 K และสัญญาณอินพุทมีค่า 0.2 v ผลเกิดที่โหลดขนาด 10 โอห์ม คือ กำลัง 5 วัตต์ จงหาหน่วยเดซิเบลของ (ก) เกนกำลัง (ข) เกนแรงดันไฟฟ้า และเกนกระแส โดยถือว่า $Z_o = Z_i$ (ค) เกนกำลังซึ่งคำนวณโดยอาศัยค่าของแรงดันไฟฟ้าอินพุทและเอาท์พุท

วิธี

(1) หาค่ากระแสอินพุท

$$I_i = \frac{0.2}{2000} = 0.1 \text{ mA}$$

(2) หาค่ากำลังอินพุท

$$P_i = \frac{(0.2)^2}{2000} = 20 \ \mu W$$

(3) หาค่าเกนกำลังในหน่วยเดซิเบล

$$dB = 10 \log \frac{P_o}{P_i} = 10 \log \left(\frac{5}{20 \times 10^{-6}} \right)$$

$$= 10 \log (2.5 \times 105)$$

$$= 10 (0.398 + 5)$$

$$= 54$$

นั่นคือ เกนกำลัง มีค่า 5 4 เดซิเบล

(4) หาค่าเกนแรงดันไฟฟ้าในหน่วยเดซิเบล โดยหาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท

$$V_o = (P_o R)^{1/2} = 7.07 \text{ v}$$

$$dB = 20 \log \frac{V_o}{V_i} \qquad (Z_i = Z_o)$$

$$= 20 \log 35.3 = 31$$

ดังนั้น เกนแรงดันไฟฟ้ามีค่า 31 เดซิเบล

(5) หาค่าเกนกระแสในหน่วยเดซิเบล โดยหาค่ากระแสเอาท์พุท

$$I_o = \left(\frac{P_o}{Z_o}\right)^{1/2} = 0.707 \text{ A}$$

$$dB = 20 \log \frac{I_o}{I_i} \qquad (Z_i = Z_o)$$

$$= 20 \log 7070 = 77$$

ดังนั้น เกนกระแสมีค่า 7 7 เดซิเบล

(6) หาค่าเกนกำลังในหน่วยเดซิเบลโดยอาศัยค่าเกนแรงดันไฟฟ้า และเกนกระแส ดังนี้

$$dB = 20 \log \frac{V_o}{V_i} + 10 \log \frac{Z_i}{Z_o}$$

$$= 20 \log \frac{7.07}{0.2} + 10 \log \frac{2000}{10}$$

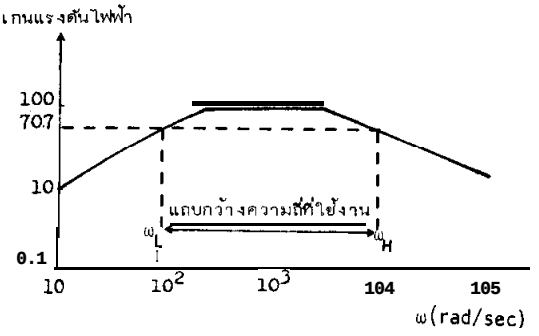
$$= 30.9 + 23.1 = 54$$

นั่นคือ เกนกำลังมีค่า 54 เดซิเบล เท่ากับผลในข้อ (3)

ข้อสังเกต คือ เกนกำลัง = $\frac{1}{2}$ (เกนแรงดันไฟฟ้า + เกนกระแส)

7.3 ความสัมพันธ์ของเกนแรงดันไฟฟ้าและความถี่

วิธีการง่ายและสะดวกต่อการศึกษาอิทธิพลของความถี่สัญญาณที่มีต่อเกนแรงดันไฟฟ้า ทำโดยพล็อตค่าทั้งสองในระนาบ xy ซึ่งเส้นกราฟจะมีลักษณะดังแสดงในรูป 7.1 สังเกตว่าเกนแรงดันไฟฟ้าลดลงในช่วงความถี่ต่ำ ทั้งนี้ เนื่องจากตัวจุคัปปลิง และในช่วงความถี่สูงจะได้เกนแรงดันไฟฟ้าลดค่าลงอีกเช่นกัน สาเหตุเนื่องจากความจุในวงจรนั่นเอง ส่วนของเส้นกราฟที่อยู่ระหว่างช่วงความถี่ต่ำและสูงดังกล่าวเป็นแถบความถี่ที่เกนแรงดันไฟฟ้าไม่ขึ้นกับความถี่ (กล่าวคือ เกนแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ ไม่ว่าความถี่จะแปรเช่นไร) เรียกแถบความถี่นี้ว่าแถบกลาง (mid-band) ของเครื่องขยาย ซึ่งคุณสมบัติของเครื่องขยายอุดมคติจะต้องทำหน้าที่ขยายได้อย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงความถี่ใด ๆ หรือกล่าวว่า ลักษณะสมบัติความถี่ (frequency characteristic) ของเครื่องขยายอุดมคติเป็นลักษณะสมบัติที่มีเกนเรียบ (flat gain) หลักการดังกล่าวจะประยุกต์ใช้กับระบบขยายตามความเป็นจริงได้อย่างไร ? เป็นที่ตกลงกันว่า แถบความถี่ที่มีเกนเรียบนั้นควรมีค่าเกนไม่ต่ำกว่า 70% ของการขยายที่กึ่งกลางแถบความถี่นั้น ดังนั้น จึงมีการแบ่งช่วงของเส้นกราฟในรูป 7.1 ดังนี้



รูป 7.1 ลักษณะเส้นกราฟของเกนแรงดันไฟฟ้า สัมพันธ์กับค่าความถี่

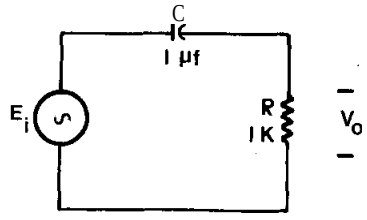
(1) ω_L และ ω_H เป็นตัวกำหนดขีดจำกัดความถี่ หรือเป็นตัวบ่งถึงแถบกว้าง ซึ่งโดยทั่วไปมักเรียกทับศัพท์ **"แบนด์วิดธ์"** (bandwidth)

(2) ความถี่คัตออฟ (cutoff frequency) คือ ความถี่สูงกว่า ω_H หรือต่ำกว่า ω_L เป็นค่าความถี่ที่กำลังเอาท์พุทลดลงครึ่งหนึ่งของค่าความถี่กลาง บางครั้งจึงเรียกเป็นความถี่ครึ่งกำลัง หรืออาจเรียกชื่อเป็นความถี่เบรค หรือ ความถี่ 3 dB

ในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรขยายเชิงเส้น จะคำนึงถึงการตอบสนอง (response) ของเครื่องขยายที่มีต่อสัญญาณแบบคลื่นซายน์ ซึ่งศึกษาจากค่าเกนและลักษณะสมบัติการเคลื่อนเฟสของเครื่องขยายในฟังก์ชันของความถี่ โดยปกติหูจะไวต่อการแปรค่าของอำพน (amplitude) และความถี่ของส่วนประกอบสัญญาณ แต่ไม่ไวต่อรูปร่างคลื่นของสัญญาณ ดังนั้นการเคลื่อนเฟสจึงไม่เป็นที่สนใจนักในการออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ฟังเสียง แต่ถ้าเป็นระบบโทรทัศน์ สัญญาณวีดีโอ (video) ต้องมีรูปคลื่นสัญญาณแน่นอน

พิจารณาที่ความถี่ 0.707 โดยใช้วงจรตามรูป 7.2 แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเขียนได้เป็น

$$V_o = \frac{E_i R}{R - jX_C} \qquad \ldots (7.7)$$



รูป 7.2 แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท V_o ขึ้นกับความถี่ของ E_i

ดังนั้น กำลังเอาท์พุทที่ส่งไปยังโหลด R มีค่าเป็น

$$P = \frac{V_o^2}{R} = \frac{E_i^2 R}{(R - jX_C)^2} \qquad \ldots\ldots\ldots (7.8)$$

ณ ความถี่สูง ตัวจุ C ประพฤติเป็นตัวลัดวงจร ดังนั้น ความขัดเป็นศูนย์

$$X_C = \frac{1}{WC} = 0$$

เขียนสมการ (7.8) ใหม่เป็น

$$P = \frac{E_i^2}{R} \qquad (\omega \text{ มีค่าสูง}) \qquad \ldots\ldots (7.9)$$

ณ ความถี่ต่ำ ขนาดของนิพจน์จินตภาพในสมการ (7.8) มีค่าเท่ากับนิพจน์จริง ซึ่งเขียนได้ว่า $X_C = R$ ดังนั้น $R - jR = \sqrt{2}\,R$ นั่นคือ

$$P = \frac{1}{2}\left(\frac{E_i^2}{R}\right) \qquad (\omega \text{ มีค่าต่ำ}) \qquad \text{.....(7.10)}$$

ที่ค่า ω_L พิจารณากำลังเอาท์พุท ดังนี้

(1) เปรียบเทียบสมการ (7.10) กับ (7.8) เห็นได้ว่ากำลังเอาท์พุทลดลงครึ่งหนึ่งของค่ากำลังสูงสุด

(2) หาอัตราส่วนของสมการทั้งสองใน ข้อ (1) และแปรค่าในหน่วยเดซิเบล

$$dB = 10 \log 2 = 3$$

(3) ต่อไปพิจารณาเมื่อ $X_C = 1/(\omega_L C) = R$ แทนค่าลงใน (7 . 7)

$$\frac{V_o}{E_i} = \frac{R}{R - j/\omega_L C} = \frac{R}{R - jR} = \frac{R}{\sqrt{2}\,R\angle -45^\circ} = 0.707\angle 45^\circ \text{.....(7.11)}$$

แต่ที่ค่า ω_H สมการ (7.11) มีค่า $V_o/E_i = 1$ (ที่ ω_H มีค่า $X_C = 0$) จึงกล่าวได้ว่า V_o/E_i มีค่าเป็น 1 ที่ความถี่สูง และที่ความถี่คัตออฟมีค่า V_o/E_i เป็น 0.707 เท่าของค่าความถี่สูง ในทางปฏิบัติ วัดค่า ω_L ได้ โดยลดความถี่ของ E_i ในรูป 7.2 จน V_o มีค่าลดลงเป็น 0.707 E_i จากนั้นอ่านค่า ω_L จากหน้าปัดออสซิสโลสโคป

จากสมการ (7.11) หาค่า ω_L โดยการตรวจพินิจวงจร ซึ่งจากคำจำกัดความ ω_L เป็นความถี่ซึ่งขนาดของนิพจน์จริง และ j เท่ากัน นั่นคือ

$$R = \frac{1}{\omega_L C} \quad \text{หรือ} \quad \omega_L = \frac{1}{R\text{-}C} \qquad \text{.....(7.12)}$$

RC เป็นค่าคงที่เวลา (time constant) แทนด้วยสัญลักษณ์ τ ดังนั้น หาค่าความถี่คัตออฟ ω_L โดย

(1) พิจารณาความต้านทาน R และใช้ค่านี้กับความขัดของตัวจุ

(2) หาค่าคงที่เวลา τ

(3) ω_L มีค่าเป็นส่วนกลับของ τ ตามสมการความสัมพันธ์

$$\omega_L = \frac{1}{R\text{-}C} = \frac{1}{\tau} \qquad \text{.....(7.13)}$$

ตัวอย่าง 7.1 จงหาค่าความถี่คัตออฟของวงจรดังแสดงในรูป 7.2

วิธี $\tau = RC = 10^{3} \times 10^{-6} = 10^{-3}$

$$\omega_L = \frac{1}{\tau} = 10^{3} \text{ rad/sec}$$

หรือแปลงค่าเป็นเฮิร์ตซ (Hertz) ทำโดยแทนค่า

$$f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{10^{3}}{2\pi} = 159\text{Hz}$$

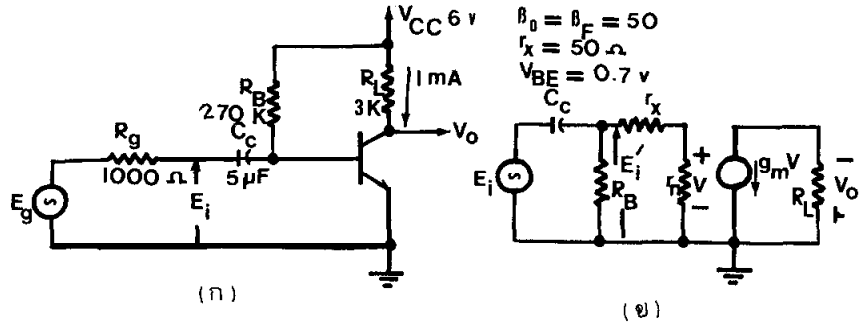
สำหรับเฟสของแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทมีลักษณะอย่างไร? หาคำตอบโดยพิจารณาสมการ (7.11) ที่ความถี่สูง นิพจน์จินตภาพตัดทิ้งได้ และเฟสของ V_o เป็นเช่นเดียวกับ E_i แต่ที่ความถี่ต่ำ V_o นำ E_i อยู่ 45° จึงกล่าวได้ว่า V_o มีเฟสต่างกับค่าที่ความถี่คัตออฟอยู่ 45°

7.4 ค่าความจุและความถี่

7.4.1 บทบาทของตัวจุคัปปลิงที่ความถี่ต่ำ

ตัวอย่างที่ใช้ในการอธิบายคือ วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ดังแสดงในรูป 7.3 (ก) เลือกให้ E_i เป็นตัวอ้างอิง โดยรักษาอำพนคงที่ของ E_i จากนั้นหาปริมาณ V_o ผลคือ สามารถหาค่าเกนแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงความถี่กลาง (midfrequency range) ซึ่งตัวจุ C_c ประพฤติตนเป็นตัวลัดวงจร ถ้า E_i มีความถี่ลดลง ตัวจุ C_c มีความต้าน (reactance) เพิ่มขึ้น ดังนั้น V ลดลง และส่งผลให้ V_o ลดลงด้วย ความต้านทานที่ปรากฏต่อตัวจุ C_c คือ $R_B \,//\, (r_x + r_\pi)$ เขียนสมการ (7.13) ใหม่เป็น

$$\omega_L = \frac{1}{C_c\{R_B \,//\, (r_x + r_\pi)\}} = \frac{1}{\tau} \qquad \text{.....(7.14)}$$



รูป 7.3 (ก) ตัวอย่างวงจรเพื่อศึกษาค่าคงที่เวลา ซึ่ง E_i เป็นตัวอ้างอิง
(ข) แบบจำลองของรูป (ก)

โดย r_x และ r_π เป็นปริมาณความต้านทานที่ถูกสร้างขึ้นในแบบจำลองไฮบริด-ไพ และให้ R_{in} เป็นความต้านทานอินพุทของวงจร มีค่าเป็น $R_B \,//\, (r_x + r_\pi)$ อาศัยโครงร่างของแบบจำลองไฮบริด-ไพในรูป 7.3 (ข) เขียนค่าของ V (รายละเอียดได้กล่าวแล้วในตอน 6.4) ความต้านทานที่ปรากฏต่อ E_i คือ $X_C + R_{in}$ และความสัมพันธ์ของ V และกระแสเบสที่ไหลผ่าน r_π คือ

$$V = I_b r_\pi = \frac{E_i'}{(r_x + r_\pi)}\, r_\pi \qquad \ldots\ldots (i)$$

เขียน E_i' ให้อยู่ในรูปของ E_i โดยพิจารณา

$$\frac{E_i'}{R_{in}} \qquad \frac{E_i}{X_C + R_{in}}$$

$$E_i' = \frac{R_{in}}{X_C + R_{in}} E_i \qquad \text{แทนค่าลงใน (i)}$$

$$V = \left[\frac{r_\pi}{r_x + r_\pi}\right]\left[\frac{R_{in}}{R_{in} + X_C}\right] E_i$$

$$= \left[\frac{r_\pi}{r_x + r_\pi}\right]\left[\frac{R_{in}}{R_{in} + \dfrac{1}{j\omega C_C}}\right] E_i \qquad (7.15)$$

ต่อไปหาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท V_o โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$|V_o| = g_m V R_L$$

แทนค่า V จากสมการ (7.15)

$$|V_o'| = g_m R_L \left[\frac{r_\pi}{r_x + r_\pi}\right]\left[\frac{R_{in}}{R_{in} + \dfrac{1}{j\omega C_C}}\right] E_i$$

แทนค่า $g_m r_\pi = \beta_0$

$$|V_o| = \frac{\beta_0 R_L E_i}{(r_x + r_\pi)}\left[\frac{R_{in}}{R_{in} + 1/j\omega C_C}\right]$$

จัดรูปของนิพจน์ด้านขวาของสมการให้ง่ายขึ้น โดยหารทั้งเศษและส่วนด้วย R_{in}

$$|V_o| = \frac{\beta_0 R_L E_i}{(r_x + r_\pi)}\left[\frac{1}{1 + 1/(j\omega C_C R_{in})}\right]$$

$$\frac{V_o}{E_i} = \frac{\beta_0 R_L / (r_x + r_\pi)}{1 + 1/(j\omega C_C R_{in})} \qquad \ldots\ldots\ldots (7.15)$$

จากข้อกำหนด $A_v(mid) = \frac{\beta_0 R_L}{(r_x + r_\pi)}$ และ $\omega_L = \frac{1}{C_C R_{in}}$

$$\frac{V_o}{E_i} = A_v(mid)\left[\frac{1}{1+\frac{\omega_L}{j\omega}}\right] \qquad (7.16)$$

ณ ตำแหน่ง $\omega = \omega_L$ มุมเฟส คือ 45° กำหนดให้

$$\theta = \arctan\frac{\omega_L}{\omega} \qquad .....(7.17)$$

พิจารณาสมการ (7.16) ถ้า $\omega = \omega_L$ ดังนั้น $A_{v(mid)}$ จึงถูกหารด้วยค่า $1+j(1) = \sqrt{2}$ ซึ่ง $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ สรุปได้ว่า ω_L เป็นค่าความถี่ต่ำคัตออฟ

ถ้าใช้ E_g เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง จากรูป 7.3 (ก) ด้านอินพุทมีตัวจุ C_C และ R_g ต่ออนุกรมกับ $R_B // (r_x + r_\pi)$ ซึ่งถ้าแทนให้ $R_{in} = R_B // (r_x + r_\pi)$ เขียนค่าความถี่ต่ำคัตออฟเป็น

$$\omega_L = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{C_C(R_g + R_{in})} \qquad .....(7.18)$$

สำหรับกรณีต่อความต้านทานที่ขาเอมมิตเตอร์ ต้องเพิ่มค่า $(\beta_0+1)R_E$ ดังนั้น $R_{in} = R_B // [(r_x + r_\pi + (\beta_0+1)R_E]$ ผลคือ ลดค่า ω_L ทำให้การตอบสนองของวงจรขยายต่อค่าความถี่ต่ำดีขึ้น แต่เกนแรงดันไฟฟ้าลดลง

ตัวอย่าง 7.2 ตามวงจรในรูป 7.3 (ก) ถ้าเพิ่มความต้านทานเอมมิตเตอร์ R_E100 โอห์ม และถือว่า E_i มีอำพนคงที่ จงหาค่าความถี่คัตออฟ ถ้ากระแสคอลเลคเตอร์มีค่าคงที่ โดยไม่คำนึงถึงค่า R_B และ $C_C = 5 \times 10^{-6}$ f

วิธี ความต้านทานที่ปรากฏต่อตัวจุคือ $(r_x + r_\pi)$ ต่ออนุกรมกับ $(\beta_0 + 1)R_E$

(1) หาค่า $r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{\beta_0}{\frac{1\text{ mA}}{25\text{ mv}}} = \frac{\beta_0}{0.040} = 1250\ \Omega$

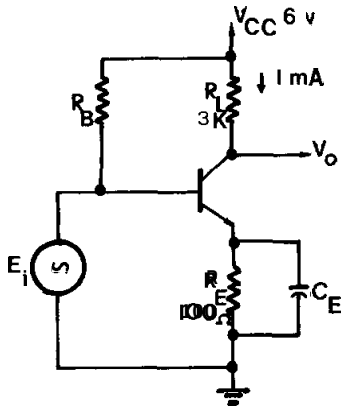
2) หาค่า ω_L โดยอาศัยสมการ (7.14)

$$\omega_L = \frac{1}{C_C[r_x + r_\pi + (\beta_0+1)R_E]} \sim \frac{1}{(5\times10^{-6})(6400)}$$

$$= 31.2\text{ rad/sec} \sim 5\text{ Hz}$$

7.4.2 บทบาทของตัวจุบายพาสที่ความถี่ต่ำ

ตัวอย่างวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม ต่อตัวจุบายพาสที่ขาเอมมิตเตอร์ ดังแสดงในรูป 7.4 (ก) ที่ค่าความถี่กลาง ตัวจุ C_E ลัดวงจรแทน R_E ส่วน E_i มีความถี่ต่ำลง ตัวจุจะมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จน R_E ไม่ถูกบายพาส



รูป 7.4 ตัวอย่างวงจรแสดงการต่อตัวจุบายพาส C_E ซึ่งสัญญาณกระแสสลับเท่านั้นที่ผ่านตัวจุนี้ได้ โดยทรานซิสเตอร์มี $(\beta_0 = \beta_F = 50$

ค่า ω_L หาโดยเริ่มพิจารณาความต้านทานที่ปรากฏต่อตัวจุ C_E ซึ่งถ้ามองเข้าสู่ขาเอมมิตเตอร์จะเห็นความต้านทาน R_E ต่อขนานกับปริมาณ $(r_x + r_\pi)/(\beta_0 + 1)$

$$\omega_L = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{C_E\left(R_E \,/\!/\, \dfrac{(r_x + r_\pi)}{\beta_0 + 1}\right)} \qquad \text{.....(7.19)}$$

ตัวอย่าง 7.3 ถ้าวงจรในรูป 7.4 มีค่า $r_x = 0$ จงหาค่า C_E เพื่อทำการคัตออฟที่ค่าความถี่ต่ำ 500 rad/sec

วิธี (1) หาค่า r_π

$$r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{50}{\dfrac{1\text{ mA}}{25\text{ mv}}} = 1.25\text{ K}$$

(2) หาค่าความต้านทานปริมาณ $\dfrac{r_x + r_\pi}{\beta_0 + 1} = 24.5\ \Omega$

(3) หาค่า $R_E \,/\!/\, \left(\dfrac{r_x + r_\pi}{\beta_0 + 1}\right) = 100 \,/\!/\, 24.5 \sim 20\ \Omega$

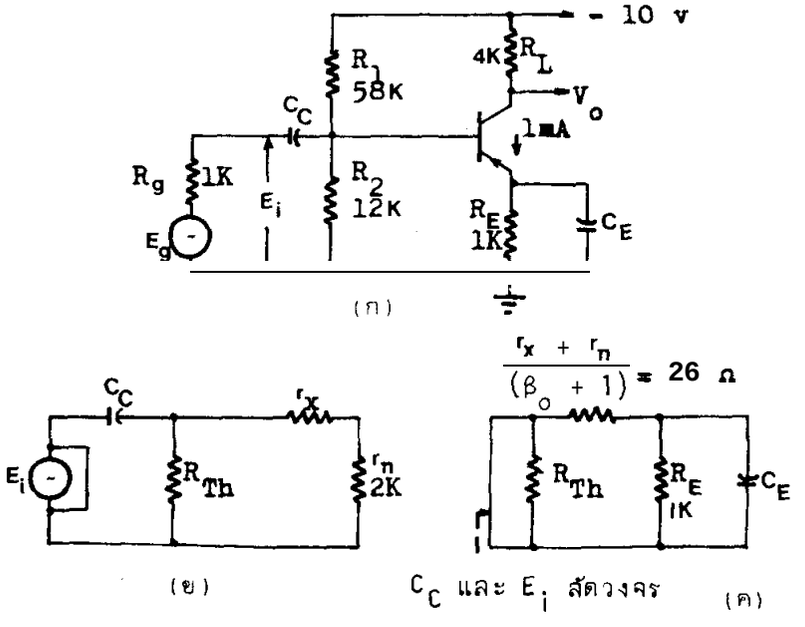
(4) ใช้สมการ (7.19) หาค่า C_E

$$C_E = \frac{10^6}{(500)\,(20)} = 100\,\mu f$$

7.4.3 วงจรขยายที่ประกอบด้วยตัวจุคัปปลิงและบายพาส

ในการวิเคราะห์วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมที่ประกอบด้วยตัวจุคับปลิงและบายพาสแยกพิจารณาผลที่เกิดจากตัวจุแต่ละค่า ความถี่คัตออฟหาโดยอาศัยค่าคงที่เวลาเมื่อมีการลัดวงจรรูปวงจรที่ 7.5 (ก) แยกพิจารณา ดังนี้

(1) สมมุติตัวจุ C_C ลัดวงจร (ต่อสัญญาณกระแสสลับ) และตัวจุ C_E มีค่ามากจนอาจใช้เพียง C_C เท่านั้นที่มีผลต่อความถี่คัตออฟ ω_C ความต้านทานที่ปรากฏต่อตัวจุ C_C คือ $R_{Th} = R_1 \,//\, R_2$ ต่อขนานกับ $(r_x + r_n)$ (หรือสรุปได้ว่า C_C เท่านั้นที่ก่อให้วงจรเกิดภาวะคัตออฟ ณ ความถี่หนึ่ง)



รูป 7.5 (ก) วงจรขยายที่ใช้ศึกษาบทบาทของตัวจุคัปปลิงและบายพาส (ข) แสดงการลัดวงจรของ C_C (ค) แสดงการลัดวงจรของ C_E โดยกำหนด $\beta_0 = \beta_F = 80$, $r_x = 100\ \Omega$, $r_n = 2\ K\Omega$

$$\omega_C = \frac{1}{\tau_C} = \frac{1}{C_C\,[\,R_{Th} \,//\, (r_x + r_n)\,]} \qquad \text{.....(7.20)}$$

ค่าคงที่เวลาในสมการ (7.20) เป็นค่าคงที่เวลาในการลัดวงจรของตัวจุ C_C

(2) กรณีตัวจุ C_E ลัดวงจร ย้อนขั้นตอนที่ (1) เพื่อหาค่าความถี่คัตออฟ โดยพิจารณาความต้านทานที่ปรากฏต่อ C_E ทั้งนี้ ถือว่าตัวจุ C_C มีค่ามาก และเป็นขณะที่อยู่ในช่วงความถี่ซึ่งค่าความต้านทานต่อการไหลของกระแสสลับใน C_E มีค่ามาก จนถือได้ว่ามีเพียง C_E เท่านั้นที่ส่งผลให้วงจรเกิดภาวะคัตออฟ ณ ความถี่ ω_E และยังคงใช้ E_i เป็นหลักอ้างอิง เขียนความสัมพันธ์ดังนี้

$$\omega_E = \frac{1}{\tau_E} = \frac{1}{C_E \left(R_E \,//\, \frac{(r_x + r_\pi)}{\beta_0 + 1}\right)} \qquad \text{.....(7.21)}$$

เปรียบเทียบสมการ (7.20) และ (7.21) ตัวประกอบ $(r_x + r_\pi)/(\beta_0 + 1)$ เป็นค่าน้อย ๆ และมีผลให้ ω_E มีค่าสูงมากได้ ยกเว้นเมื่อ C_E มีค่ามาก ดังนั้น ต้องทำการเลือกค่าความจุให้เหมาะสมเพื่อสนองค่าคงที่เวลาในการลัดวงจรของสัญญาณ ดังแสดงในตัวอย่าง 7.4

ตัวอย่าง 7.4 จากวงจรในรูป 7.5 ให้ใช้ E_i เป็นหลักอ้างอิง (ก) จงคำนวณค่าตัวจุคัปปลิงเพื่อคัตออฟเครื่องขยายที่ ω_C = 100 rad/sec (ข)จงคำนวนค่าตัวจุเอมมิตเตอร์ เพื่อทำการคัตออฟ ณ ความถี่เดียวกัน (ค) เลือกใช้ตัวจุเพียงตัวเดียว เพื่อคัตออฟเครื่องขยาย จากนั้นเปลี่ยนเป็นอีกตัวจุหนึ่ง และทำการคัตออฟที่ความถี่ต่ำกว่าอยู่ 10 เท่า คือที่ 10 rad/sec (ง)หาค่า V_o/E_i ที่ความถี่กลาง และความถี่คัตออฟ

วิธี (ก) จากสมการ (7.20)

$$cc = \frac{1}{100\,[10^4 \,//\, 21001} \sim 5.8\,\mu f$$

โดย $R_{Th} = 12 \,//\, 58 = 10\,K$

(ข) จากสมการ (7.21)

$$C_E = \frac{1}{100\,[\,1000 \,//\, 26\,]} \sim 400\,\mu f$$

(ค) (1) เลือกใช้ตัวจุ C_C ทำการคัตออฟเครื่องขยายที่ 100 rad/sec ดังนั้น (2) C_E ต้องเพิ่มค่าเป็น 4000 μf เมื่อคัตออฟที่ 10 rad/sec เพื่อความประหยัด ควรใช้ C_E เป็น 400 μf แต่เพิ่ม C_C เป็น 58 μf ในทางปฏิบัติอาจเลือกใช้ตัวจุที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าดังกล่าว

(ง) จากสมการ (6.11)

$$\frac{V_o}{E_i} = -\frac{\beta_0 R_L}{r_x + r_\pi} = \frac{80\,(4000)}{2100} = 152 \qquad \text{ที่ค่าความถี่กลาง}$$

$$\frac{V_o}{E_i} = 0.707\,(152) = 108 \qquad \text{ที่ค่าความถี่ } \omega_E$$

โดยทั่วไป ความถี่ต่ำคัตออฟ ω_L เป็นผลบวกของค่าคงที่เวลา ดังนี้

$$\omega_L = \frac{1}{\tau_C} + \frac{1}{\tau_E} = \omega_C + \omega_E \qquad \text{.....(7.22)}$$

แต่ถ้าเลือกให้ $\omega_E \geq 10\ \omega_C$ ดังนั้น ค่าโดยประมาณคือ $\omega_L \sim \omega_E$

การหาค่า C_C อาจทำได้อีกวิธีหนึ่ง โดยต้องทราบค่า C_E จากนั้นสมมุติว่า

(1) $\omega_E = \omega_C$

(2) $R_{Th} \gg (r_x + r_\pi)$ ในสมการ (7.20)

(3) $R_E \gg \frac{r_x + r_\pi}{\beta_0 + 1}$ ในสมการ (7.21)

(4) เขียนสมการความสัมพันธ์ที่เท่ากันของค่าทั้งสอง เมื่อ $\omega_C = \omega_E$

สมการ (7.20) = สมการ (7.21)

$$\omega_C \sim \frac{1}{C_C\,(r_x + r_\pi)} = \omega_E \sim \frac{1}{C_E\,\frac{(r_x + r_\pi)}{\beta_0 + 1}}$$

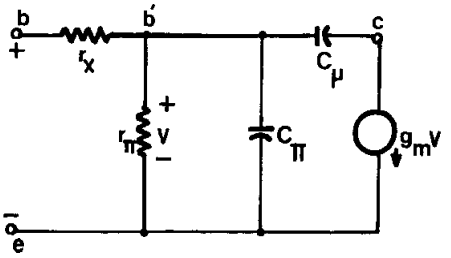
$$C_C \sim \frac{C_E}{\beta_0 + 1} \qquad (\text{เมื่อ } \omega_C = \omega_E) \qquad \text{.....(7.23)}$$

ซึ่งจากตัวอย่าง 7.4 สามารถหาค่า C_E ได้จากข้อ (ข) จากนั้นหาค่า C_C จากสมการ (7.23) ผลลัพธ์ได้ค่าประมาณ 5 μf จากนั้นคูณค่านี้ด้วย 10

7.5 แบบจำลองของทรานซิสเตอร์รอยต่อสำหรับความถี่สูง

ถ้าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่วงจรทรานซิสเตอร์มีความถี่สูง เมื่อเกิดการแปรค่าย่อมก่อให้ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อทั้งสองของทรานซิสเตอร์แปรค่าตามไปด้วย ดังนั้น ปริมาณพาหะประจุที่เคลื่อนผ่านบริเวณประจุระวางทั้งสองนั้นแปรค่าไป (รวมทั้งในบริเวณ

เบสด้วย) พิจารณาเมื่อสัญญาณอยู่ในช่วงเพิ่มค่าไบแอสตรงให้กับรอยต่อเอมมิตเตอร์ พาหะประจุในบริเวณดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติของการเก็บประจุในทรานซิสเตอร์ (ตามรายละเอียดในบทที่ 1) ดังนั้น เสนอตัวจุในโครงร่างวงจรที่แทนพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูป 7.6 ซึ่งประกอบด้วย (1) C_π แทนความจุของรอยต่อเอมมิตเตอร์และ (2) C_μ แทนความจุของรอยต่อคอลเลคเตอร์ และตัวจุทั้งสองนั้นต่อขนานกันอยู่



รูป 7.6 แบบจำลองของทรานซิสเตอร์สำหรับสัญญาณมีความถี่สูง

การหาค่า C_μ

ทรานซิสเตอร์บางตัวอาจบอกค่า C_μ ไว้ในแผ่นข้อมูล ซึ่งใช้สัญญลักษณ์ $C_{b'c}$ หรืออาจหาค่าประมาณโดยอาศัยค่า C_{obo} ในแผ่นข้อมูล (C_{obo} เป็นปริมาณเพิ่มค่าทีละเล็กละน้อยของความจุเอาท์พุท ของวงจรเบสร่วม ซึ่งเอมมิตเตอร์ถูกเปิดวงจร) หรืออาจวัดค่าระหว่างขั้วเบสและคอลเลคเตอร์ ค่าของ C_{obo} จะสูงกว่า C_μ เล็กน้อย เนื่องจากได้รวมค่าความจุที่ตำแหน่งสัมผัสและความจุระหว่างขั้วเบส-คอลเลคเตอร์ C_{obo} ลดค่าลงเมื่อแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น

การหาค่า C_π

บางครั้งอ่านได้จากแผ่นข้อมูล โดยใช้สัญญลักษณ์ $C_{b'e}$ หรืออาจคำนวณ โดยอาศัยข้อมูลที่ทราบค่า ดังนี้

(1) ทราบค่า ω_β (หรือ f_β) จากทางบริษัทผู้ผลิต จากนั้นหาค่า

$$C_\pi = \frac{1}{r_\pi \omega_\beta} - C_\mu \qquad (\text{โดย } \omega_\beta = 2\pi f_\beta) \qquad \text{.....(7.24)}$$

(2) ทราบค่า ω_T (หรือ f_T)

$$C_\pi = \frac{g_m}{\omega_T} - C_\mu \qquad (\text{โดย } \omega_T = 2\pi f_T) \qquad \text{.....(7.25)}$$

(3) ถ้าบอกค่า $\beta = \beta_m$ ที่ความถี่สูง ๆ (คือที่ ω_m) โดย $\omega_m > 3\ \omega_\beta$ และ

$$C_\pi = \frac{g_m}{\beta_m\ \omega_m} - C_\mu \qquad \text{.....(7.26)}$$

ส่วนชื่อที่เรียกมีหลายชื่อ เช่น ความถี่คัตออฟเบตา, f-beta, $f_\beta = f_{hfe}$ และความถี่คัตออฟแอลฟา, $f_\alpha = f_T = f_{hfb}$ หรือผลคูณของเกนกระแสและแถบกว้าง

7.6 การกำหนดแถบกว้างความถี่

7.6.1 ความสัมพันธ์ของ β และความถี่

ย้อนพิจารณาแบบจำลองในรูป 7.6 ตัวจุ C_π และ C_μ ต่อขนาน ดังนั้น ความจุลัพธ์มีค่าเป็น $(C_\pi + C_\mu)$ ถ้าขั้วเอาท์พุทประพฤติเป็นตัวลัดวงจร กระแสอินพุทคือ I_b ซึ่งเป็นอำพนเชิงซ้อน (complex amplitude) ของคลื่นรูปซายน์ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวจุ C_π มีลักษณะเป็นอำพนเชิงซ้อนเช่นเดียวกัน และเขียนค่าทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$V = \left[\frac{r_\pi}{1 + j\omega\,(C_\pi + C_\mu)r_\pi} \right] I_b \qquad \text{.....(7.27)}$$

หมายเหตุ r_π ต่อขนานกับตัวจุ C_π หาค่าความต้านทานลัพธ์ R โดยใช้ความสัมพันธ์ $\frac{1}{R} =$

$$\frac{1}{r_\pi} - \frac{1}{jx_C} = \frac{1}{r_\pi} + j\omega C$$

ซึ่งแทนค่า $C = C_\pi + C_\mu$ ดังนั้น ความต้านทานลัพธ์คือ

$$R = \frac{r_\pi}{1 + j\omega\,(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$

จากคำจำกัดความ $\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_m V}{I_b}$ .....(7.28)

ซึ่งโดยแท้จริงแล้ว $I_c = g_m V - j\omega C_\mu V$

ปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน C_μ ซึ่งเป็นนิพจน์ที่สองนั้นมีค่าน้อยมาก จึงละทิ้งได้ เมื่อแทนค่า V จากสมการ (7.27) ลงในสมการ (7.28)

$$\beta = \frac{g_m}{\frac{1}{r_\pi} + j\omega\,(C_\pi + C_\mu)} \qquad \text{.....(7.29)}$$

จากสมการ (7.29) แสดงว่า β ขึ้นกับค่าความถี่ แยกวิเคราะห์เป็น 3 กรณี ดังนี้

(1) ณ ความถี่ต่ำ นิพจน์ j สามารถละทิ้งได้ จึงเขียนสมการ (7.29) ได้ใหม่

$$\beta = g_m r_\pi = \beta_0 \quad (\omega \text{ ต่ำ}) \qquad \text{.....(7.30)}$$

(2) ให้ ω_β เป็นความถี่ซึ่งนิพจน์จริง และ j มีค่าเท่ากันในสมการ (7.29) และ $\beta = 0.707\,\beta_0$ นั่นคือ

$$\frac{1}{r_\pi} = \omega_\beta (C_\pi + C_\mu) \quad (\omega = \omega_\beta) \qquad \text{.....(7.31)}$$

สมการ (7.31) เหมือนสมการ (7.24)

(3) ณ ความถี่สูงกว่า 3 ω_β นิพจน์จริงสามารถละทิ้งได้ สมการ (7.29) จึงกลายเป็น

$$\beta \sim \frac{g_m}{\omega (C_\pi + C_\mu)} \quad (\omega \geq 3\,\omega_\beta) \qquad \text{.....(7.32)}$$

ค่า $\beta = \beta_m$ หาโดยใช้ค่าความถี่ ω_m ซึ่งมีค่ามากกว่า 3 ω_β จากนั้นแทนค่าลงในสมการ (7.32) ซึ่งผลคือสมการ (7.26) หรืออาจเพิ่มค่าความถี่จน β มีค่าเป็นหนึ่ง นิยามให้ค่าดังกล่าวเกิด ณ ความถี่ ω_T และแทนค่าลงในสมการ (7.29)

$$g_m = \frac{1}{r_\pi} + j\omega_T (C_\pi + C_\mu) \qquad \text{.....(7.33)}$$

สมการ (7.33) เป็นเช่นเดียวกับสมการ (7.25)

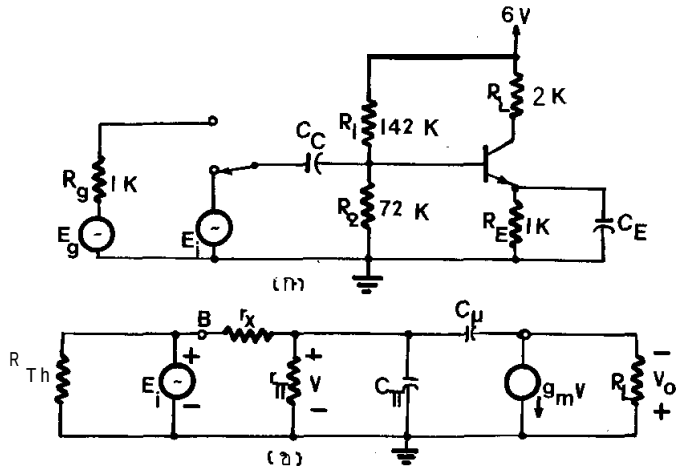
7.6.2 การหาค่าความถี่สูงคัตออฟ

ในการวิเคราะห์ตามจุดประสงค์นี้ เลือกใช้วงจรเอมมิตเตอร์ร่วมดังแสดงในรูป 7.7 (ก) และสร้างโครงร่างวงจรสมมูลไฮบริด-ไพสำหรับความถี่สูงในรูป 7.7 (ข) ซึ่ง C_μ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเกนแรงดันไฟฟ้า $g_m R_L$ เพิ่มขึ้น ลักษณะเป็นไปตามกลไกมิลเลอร์เอฟเฝคท์ (Miller effect) ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในตอนต่อไป จากรูป 7.7 (ข) นิยามความจุ C ดังนี้

$$C = C_\pi + C_\mu (1 + g_m R_L) \qquad \text{.....(7.34)}$$

โดยใช้ C และปริมาณ $r_x \,//\, r_\pi$ ในการหาค่าคงที่เวลา ณ ความถี่สูงเมื่อให้ E_i เป็นหลักอ้างอิง ความถี่สูงคัตออฟ ω_H เป็นส่วนกลับของค่าคงที่เวลา ดังนี้

$$\omega_H = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{C (r_x \,//\, r_\pi)} \sim \frac{1}{C r_x} \qquad \text{.....(7.35)}$$



รูป 7.7 (ก) วงจรเอมมิตเตอร์ร่วม (ข) แบบจำลองของรูป (ก) สำหรับกรณีความถี่สูง

ตัวอย่าง 7.5 สำหรับในรูป 7 . 7 ทรานซิสเตอร์ทำงานโดยมีค่า

I_C = 1 mA $\quad$ r_π = 2.5 K

$\beta_0 = \beta_f$ = 100 $\quad$ ω_β = 8 0 0 krad/sec

r_x = 50 Ω $\quad$ C_π = 490 pf

g_m = 0.04 $\quad$ C_μ = 10 pf

(ก) จงหาค่า V_o/E_i ณ ความถี่ต่ำ (ข) หาค่าความถี่สูงคัตออฟ

วิธี (ก)

$$\frac{V_o}{E_i} = \frac{\beta_0 R_L}{r_x + r_\pi} = -78.4$$

(ข) จากสมการ (7.34)

$$C = C_\pi + C_\mu(1 + g_m R_L) = 1300 \text{ pf}$$

หาค่า ω_H จากสมการ (7.35)

$$\omega_H = \frac{1}{C(r_x /\!/ r_\pi)} = 1.54 \times 10^7 \text{ rad/sec}$$

ตัวอย่าง 7.6 ถ้ากำหนดค่าเป็นไปตามตัวอย่าง 7.5 แต่สับสวิทซ์ไปที่ต้นกำเนิด E_g (ก) จงหาค่า V_o/E_g (ข) หาค่าความถี่สูงคัตออฟใหม่

วิธี (ก) หาค่าความต้านทานลัพธ์ในด้านอินพุท

$$R_{in} = R_{Th} // (r_x + r_\pi) \qquad \text{.....(i)}$$

โดย $R_{Th} = R_1 // R_2 = 50K$ แทนค่าใน (i)

$$R_{in} = 50 // (2.55 \times 10^3) = 2.43\ K$$

$$E_i = \frac{R_{in}}{R_g + R_{in}} E_g = \frac{2430}{3430} = 0.70$$

อาศัยค่า V_o/E_i จากตัวอย่าง 7.5 เพื่อหาค่า V_o/E_g ดังนี้

$$\frac{V_o}{E_g} = \frac{E_i}{E_g}\frac{V_o}{E_i} = 0.70\,(78.4) = 55.5$$

เมื่อใช้ E_g เป็นหลัก ตัวจุ C มองเห็นความต้านทานมีค่าเป็น

$$R = r_\pi // (r_x + R_{Th} // R_g) = 710\ \Omega$$

และความถี่สูงคัตออฟคือ $\omega_H = \frac{1}{RC} = 1.08 \times 10^6$ rad/sec

สิ่งที่น่าสนใจคือ แถบกว้างสูงสุดจะเป็นอย่างไร ณ ความถี่สูงคัตออฟเริ่มจากปริมาณเกนแรงดันไฟฟ้า ถ้า E_i เป็นหลัก

$$A_v = \frac{V_o}{E_i} = -\frac{\beta_0 R_L}{r_x + r_\pi}$$

แต่ $\beta_0 = g_m r_\pi$ และถ้าให้ $r_x \ll r_\pi$ ดังนั้น

$$A_v = g_m R_L$$

ผลคูณของเกนแรงดันไฟฟ้า กับแถบกว้างคือ

$$A_v\omega_H = g_m R_L \left[\frac{1}{\{ C_\pi + C_\mu(1 + g_m R_L) \}\{ r_x // r_\pi \}} \right]$$

สำหรับกรณี $r_x \ll r_\pi$ ได้ผล $r_x // r_\pi = r_x$

$$A_v\omega_H \sim \frac{g_m R_L}{r_x [C_\pi + C_\mu (1 + g_m R_L)]}$$

$$\sim \frac{g_m R_L}{r_x (C_\pi + g_m R_L C_\mu)}$$

$$\sim \frac{1}{r_x \left(\frac{C_\pi}{g_m R_L} + C_\mu \right)} \qquad \ldots (7.36)$$

จากสมการ (7.36) แสดงว่า ถ้าความขัดมีค่าต่ำ แถบกว้างมีค่ามาก ดังนั้น ถ้า R_L มีค่าน้อย แถบกว้างจะมีค่ามาก แต่เกนแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าน้อยด้วย ($A_v = g_m R_L$) ผู้ใช้งานของวงจรต้องเลือกสิ่งหนึ่งระหว่างปริมาณ (1) แถบกว้างมีค่ามาก หรือ (2) เกนแรงดันไฟฟ้ามีค่ามาก อนึ่ง จากสมการ (7.36) ถ้าต้องการให้การตอบสนองต่อความถี่สูงดี ทรานซิสเตอร์ต้องมีค่าน้อย ๆ สำหรับ r_x, C_π และ C_μ แต่ g_m มีค่ามาก (I_c มีค่ามาก)

7.7 มิลเลอร์เอฟเฟคท์ (Miller effect)

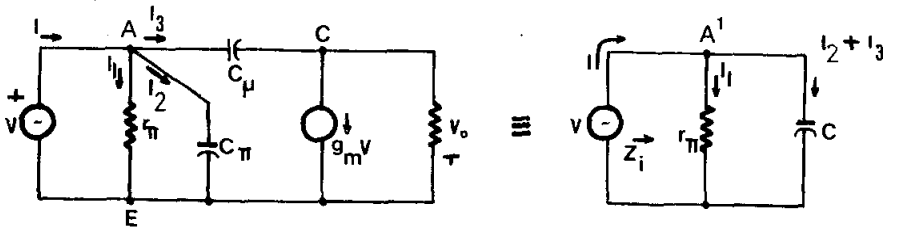
ความหมายของมิลเลอร์เอฟเฟคท์ เป็นผลที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านอินพุทในรูป 7.7 (ข) มองเห็นปริมาณความต้านทานลัพธ์มีค่าเท่ากับ r_π ต่อขนานกับค่าความจุลัพธ์ซึ่งมีค่ามากกว่าผลรวมของ C_π และ C_μ ซึ่งได้เคยแสดงในสมการ (7.34) แล้ว เพื่อง่ายในการอธิบายใช้โครงร่างวงจรสมมูลในรูป 7.8 แทน เริ่มโดยพิจารณาการแยกของกระแสอินพุท ณ จุด A จากนั้นเขียนให้อยู่ในรูปของ V และ V_o ดังนี้

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$= \frac{V}{r_\pi} + j\omega C_\pi V + j\omega C_\mu (V + V_o) \qquad \ldots\ldots (i)$$

แต่ I_3 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ $g_m V$ ในวงจรเอาท์พุท ดังนั้น ถือว่า

$$V_o = g_m V R_L \qquad \ldots\ldots (ii)$$



รูป 7.8 แบบจำลองโครงร่างวงจรเพื่ออธิบายมิลเลอร์เอฟเฟคท์

แทนค่าจาก (ii) ลงใน (i)

$$I = \frac{V}{r_\pi} + j\omega C_\pi V + j\omega C_\mu (V + g_m V R_L)$$

หารตลอดสมการด้วย V

$$\frac{I}{V} = \frac{1}{r_\pi} + j\omega C_\pi + j\omega C_\mu (1 + g_m R_L)$$

$$= \frac{1 + j\omega r_\pi C_\pi + j\omega r_\pi C_\mu (1 + g_m R_L)}{r_\pi}$$

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{r_\pi}{1 + j\omega r_\pi [C_\pi + C_\mu (1 + g_m R_L)]}$$

ให้ $C = C_\pi + C_\mu (1 + g_m R_L)$ เพื่อความสะดวก

$$Z = \frac{r_\pi}{1 + j\omega r_\pi C}$$

คูณทั้งเศษและส่วนด้วย $1/j\omega C$

$$Z = \frac{r_\pi (1/j\omega C)}{(1/j\omega C) + r_\pi} = r_\pi \,//\, (1/j\omega C) \qquad \text{.....(7.37)}$$

จากสมการ (7.37) กล่าวได้ว่า V มองเห็น r_π ขนานอยู่กับความจุซึ่งมีปริมาณมากกว่าผลรวมของ C_π และ C_μ โดย C_μ มีค่าสูงกว่าค่าที่เลือกใช้ เรียกการที่ C_μ มีค่าสูงเช่นนี้ว่า มิลเลอร์เอฟเฟคท์

7.8 บทสรุป

รายละเอียดในบทนี้ ได้เสนอบทบาทของความจุที่มีต่อวงจรทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นกรณีสัญญาณอินพุทมีความถี่สูง ในการวิเคราะห์ปริมาณความขัดจะต้องเสนอค่าเป็นตัวเลขเชิงซ้อน ซึ่งสามารถหาขีดจำกัดของแถบกว้างความถี่ ดังนี้

(1) ณ ความถี่ต่ำ ขนาดของนิพจน์จริง เท่ากับของนิพจน์จินตภาพ

(2) ณ ความถี่สูง นิพจน์จินตภาพมีค่าเป็นศูนย์

ทั้งสองกรณีดังกล่าวได้ค่าอยู่ในหน่วย rad/sec ถ้าต้องการแปลงให้อยู่ในหน่วยความถี่ ทำโดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\omega = 2\pi f$$

ในการออกแบบวงจรขยาย ถ้าต้องการหาค่าความจุของตัวจุบายพาส C_E โดยกำหนดความถี่ต่ำคัตออฟ ให้ดำเนินการดังตัวอย่าง 7.3 และถ้าต้องการหาค่าความจุของทั้งตัวจุบายพาสและตัวจุคัปปลิง ให้ดำเนินการตามตัวอย่าง 7.4

นอกจากนี้ ยังต้องคำนึงถึงความจุซึ่งเป็นพารามีเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (ดังได้เคยเสนอแล้ว ว่าทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติของตัวจุ ในบทที่ 2) เนื่องจากทรานซิสเตอร์มี 2 รอยต่อ จึงเสนอความจุของแต่ละรอยต่อด้วยตัวจุ C_π และ C_μ ต่อขนานกัน ซึ่งความจุลัพธ์มีค่าเป็น

$$C = C_\pi + C_\mu$$

ส่วนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างเกนแรงดันไฟฟ้าแถบกว้างความถี่ และความขัดของวงจร แสดงในสมการ (7.36) ซึ่งอาจใช้เป็นหลักในการตัดสินใจเลือกออกแบบวงจรขยายให้มีการตอบสนองความถี่สูงได้ดีเพียงใด

แบบฝึกหัดบทที่ 7

7.1 เดซิเบล เป็นหน่วยของอะไร?

7.2 ตามตัวอย่าง 7.2 ถ้า R_E เพิ่มค่าเป็น 200 Ω จะมีผลต่อ ω_L อย่างไร?

7.3 ตามตัวอย่าง 7.3 ถ้าเพิ่มค่า C_E เป็นสองเท่า ค่า ω_L จะเป็นเท่าใด?

7.4 จากคำถามในข้อ 7.3 ถ้า C_E = 100 μF แต่ลดกระแส I_C ลงครึ่งหนึ่งกลายเป็น 0.5 mA จะมีผลต่อ ω_L อย่างไร?

7.5 ใช้วงจรในรูป 7.5 ถ้า R_g = 50 Ω จงหาค่าของ ω_C และ ω_E

7.6 ถ้ากำหนด I_C = 1 mA, C_μ = 5 pF, β_o = 100, ω_m = 628 จงหาค่า C_π

7.7 แผ่นข้อมูลกำหนด f_T = 62.8 MHz และC_π = 3 pF เมื่อ I_C = 1 mA จงหาค่า C_π

7.8 มิลเลอร์เอฟเฟคท์คืออะไร? อธิบายโดยใช้ตัวอย่างตามวงจรในรูป 7.7

7.9 จงสร้างโครงร่างของแบบจำลองทรานซิสเตอร์ 2 รอยต่อ ณ ความถี่สูง พร้อมทั้งอธิบายความหมายของแต่ละธาตุในวงจรดังกล่าว

7.10 กรณีต่อตัวจุบายพาส C_E ในวงจรเอมมิตเตอร์ร่วม มีหลักเกณฑ์ใหญ่ ๆ ในการเลือกค่าของตัวจุดังกล่าวนี้อย่างไร?