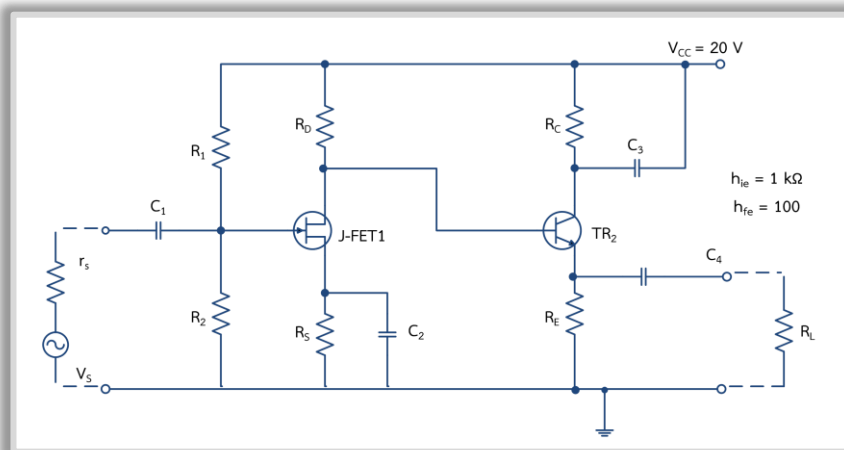
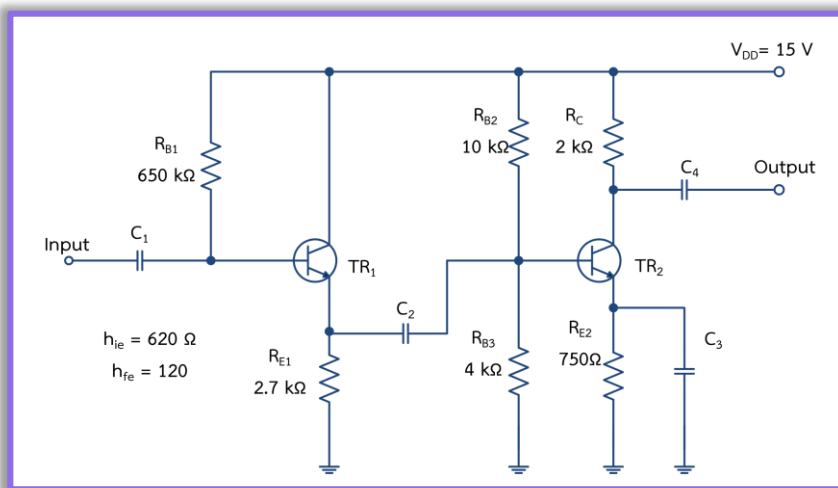


หน่วยที่ 8 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค (Multistage Amplifier Circuit)



โดย

นายเอกนรินทร์ พลาชีวะ

แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคฉะเชิงเทรา

สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

กระทรวงศึกษาธิการ

หน่วยที่ 8

การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค (Multistage Amplifier Circuit)

สาระสำคัญ

วงจรขยายแบบคาสเคด คือการนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่ออนุกรมกัน โดยอัตราขยายของวงจรจะเท่ากับผลคูณของอัตราขยายของวงจรแต่ละภาค อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรภาคแรก และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรภาคสุดท้าย

วงจรขยายแบบคาสโคด คือ การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อเชิงขนานกัน โดยอัตราขยายของวงจรจะเท่ากับผลคูณของอัตราขยายของวงจรแต่ละภาค เช่นเดียวกับวงจรขยายแบบคาสเคดวงจรที่นิยมคือการนำวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมที่ไบอัสแบบแบ่งแรงดันมาเป็นวงจรทางด้านอินพุตและใช้วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วมเป็นวงจรทางด้านเอาต์พุต วงจรในลักษณะดังกล่าวจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงสามารถนำไปใช้ในงานด้านความถี่สูงได้ดี

จุดประสงค์การเรียนรู้

จุดประสงค์ทั่วไป

เพื่อให้มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับ วงจรขยายแบบคาสเคด วงจรขยายแบบคาสโคด วงจรขยายผลต่าง การเชื่อมต่อสัญญาณ (Coupling) แบบต่างๆในวงจรขยายสัญญาณหลายภาค

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. คำนวณหาค่าอัตราขยายของวงจรขยายแบบคาสเคดได้อย่างถูกต้อง
2. คำนวณหาค่าอัตราขยายของวงจรขยายแบบคาสโคดได้อย่างถูกต้อง
3. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายผลต่างได้อย่างถูกต้อง
4. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากระแสสลับของวงจรขยายผลต่างได้อย่างถูกต้อง
5. อธิบายการเชื่อมต่อสัญญาณแบบต่างๆในวงจรขยายสัญญาณหลายภาคได้อย่างถูกต้อง

หัวข้อเนื้อหา

8.1 วงจรขยายแบบคาสเคด

8.2 วงจรขยายแบบคาสโค้ด

8.3 วงจรขยายผลต่าง

8.3.1 การวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้ากระแสตรง

8.3.2 การวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้ากระแสสลับ

8.4 การเชื่อมต่อสัญญาณ (Coupling) แบบต่างๆในวงจรขยายสัญญาณหลายภาค

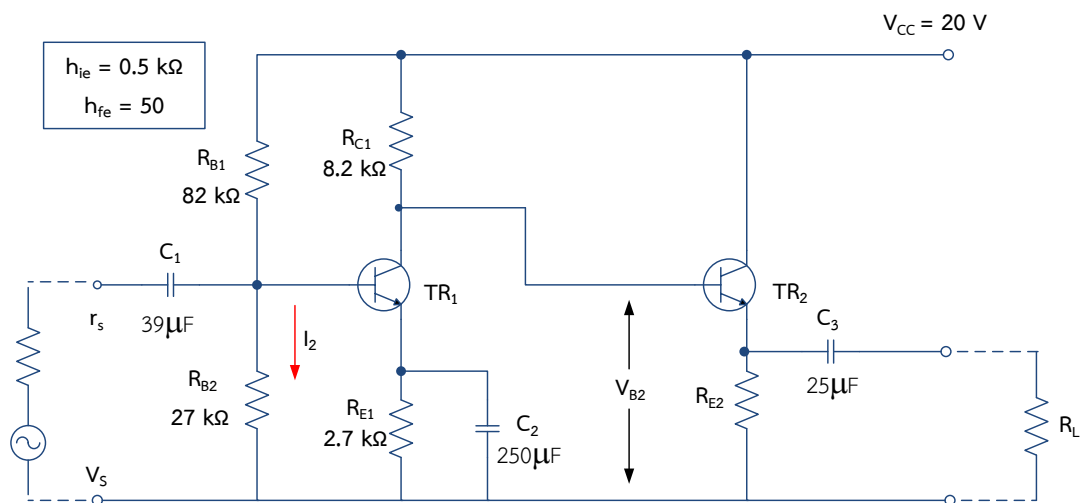
แบบทดสอบก่อนเรียน

หน่วยที่ 8 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค (Multistage Amplifier Circuit)

คำชี้แจง

1. จงทำเครื่องหมายกากบาท (X) เลือกคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเพียงข้อเดียว
2. แบบทดสอบมีจำนวน 10 ข้อ ใช้เวลาทำแบบทดสอบ 10 นาที

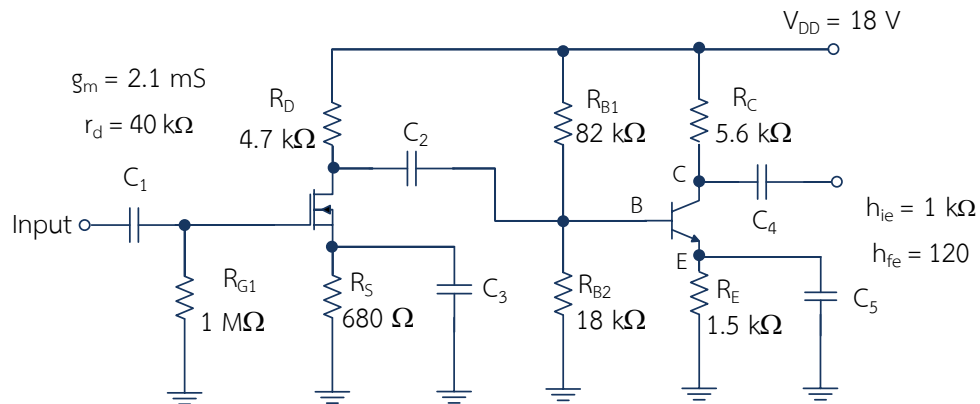
1. จากรูปที่ 3 จงคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเรคต์คัปปลิงมีค่าตรงกับข้อใด



รูปที่ 1 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 1

- ก. 162.2 Ω
- ข. 262.2 Ω
- ค. 388 Ω
- ง. 488 Ω
- จ. 500 Ω

2. จากวงจรจงคำนวณหาค่าอัตราขยายรวมมีค่าตรงกับข้อใด



รูปที่ 2 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 2

- ก. $A_{VT} = 3,522.37$
 ข. $A_{VT} = 4,923.25$
 ค. $A_{VT} = 5,933.76$
 ง. $A_{VT} = 6,643.21$
 จ. $A_{VT} = 7,331.27$
3. วงจรขยายแบบคาสโคดมีลักษณะตรงกับข้อใด
- ก. อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำมาก
 ข. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าสูงมาก
 ค. การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่ออนุกรมกัน
 ง. การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อเชิงขนานกัน
 จ. อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลหารของอัตราขยายแต่ละภาค
4. วงจรขยายผลต่างมีลักษณะตรงกับข้อใด
- ก. การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อแบบวงจรผสม
 ข. อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลคูณของอัตราขยายแต่ละภาค
 ค. อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าสูงมาก
 ง. เปรียบเทียบสัญญาณจากสองอินพุตขยายออกเอาท์พุต
 จ. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของภาคที่ 2

6. จากวงจรจงคำนวณหาค่ากระแส (I_{C1}) มีค่าตรงกับข้อใด
- ก. $I_{C1} = 179.23 \mu A$
 - ข. $I_{C1} = 191.11 \mu A$
 - ค. $I_{C1} = 211.81 \mu A$
 - ง. $I_{C1} = 231.25 \mu A$
 - จ. $I_{C1} = 291.67 \mu A$
7. ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ควรเลือกใช้ตามข้อใดจริงจะเหมาะสม
- ก. น้อยกว่าที่คำนวณได้
 - ข. มากกว่าที่คำนวณได้
 - ค. ต้องเท่ากับที่คำนวณได้เท่านั้น
 - ง. ใกล้เคียงหรือเท่ากับที่คำนวณได้และมีจำหน่าย
 - จ. ต่อหลาย ๆ ตัวเพื่อให้ได้ค่าตรงตามที่คำนวณ
8. จากวงจรจงคำนวณหาอัตราขยายแรงดัน (A_V) มีค่าตรงกับข้อใด
- ก. $A_V = -151.45$
 - ข. $A_V = -178.23$
 - ค. $A_V = -223.18$
 - ง. $A_V = -256.78$
 - จ. $A_V = -292.46$
9. วงจรขยายแบบคาสเคดมีลักษณะตรงกับข้อใด
- ก. อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลคูณของอัตราขยายแต่ละภาค
 - ข. อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลหารของอัตราขยายแต่ละภาค
 - ค. การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อเชิงขนานกัน
 - ง. อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของภาคสุดท้าย
 - จ. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของภาคแรก
10. การเชื่อมต่อแบบใดที่มีการสูญเสียสัญญาณที่ส่งผ่านน้อยที่สุด
- ก. การเชื่อมต่อโดยใช้คาปาซิเตอร์
 - ข. การเชื่อมต่อโดยตรง
 - ค. การเชื่อมต่อโดยใช้หม้อแปลง
 - ง. การเชื่อมต่อโดยใช้ตัวต้านทาน
 - จ. การเชื่อมต่อโดยใช้ไดโอด

หน่วยที่ 8

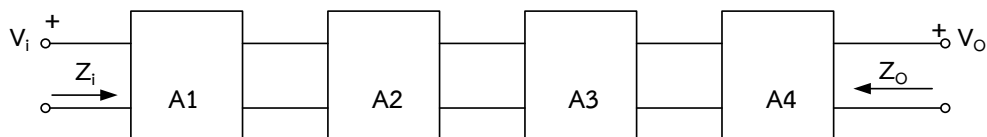
การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค (Multistage Amplifier Circuit)

เนื้อหาสาระ

สำหรับวงจรขยายสัญญาณการใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียวส่วนใหญ่จะทำให้ได้อัตราขยายและแบนด์วิดท์ที่ไม่มากพอต่อการนำไปใช้งานหรือวงจรอาจมีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุต เอาต์พุตไม่แมตช์กับโหลดที่นำมาต่อกับวงจร ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยใช้วิธีการเพิ่มวงจรขยายให้มากกว่าหนึ่งวงจรโดยจะเรียกว่าวงจรขยายหลายภาค (Multistage Stage Amplifier) วิธีการนี้ทำให้ผลรวมของวงจรมีอัตราขยายแรงดันเพิ่มมากขึ้น สามารถขับสัญญาณหรือกระแสให้โหลดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงขึ้นและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่ต่ำ

8.1 วงจรขยายแบบคาสเคด

วงจรขยายแบบคาสเคด คือการนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่ออนุกรมกัน โดยอัตราขยายของวงจรจะเท่ากับผลคูณของอัตราขยายของวงจรแต่ละภาค อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรภาคแรก และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรจะมีค่าเท่ากับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรภาคสุดท้าย ลักษณะของวงจรแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 8.1 บล็อกไดอะแกรมการต่อวงจรขยายแบบคาสเคด

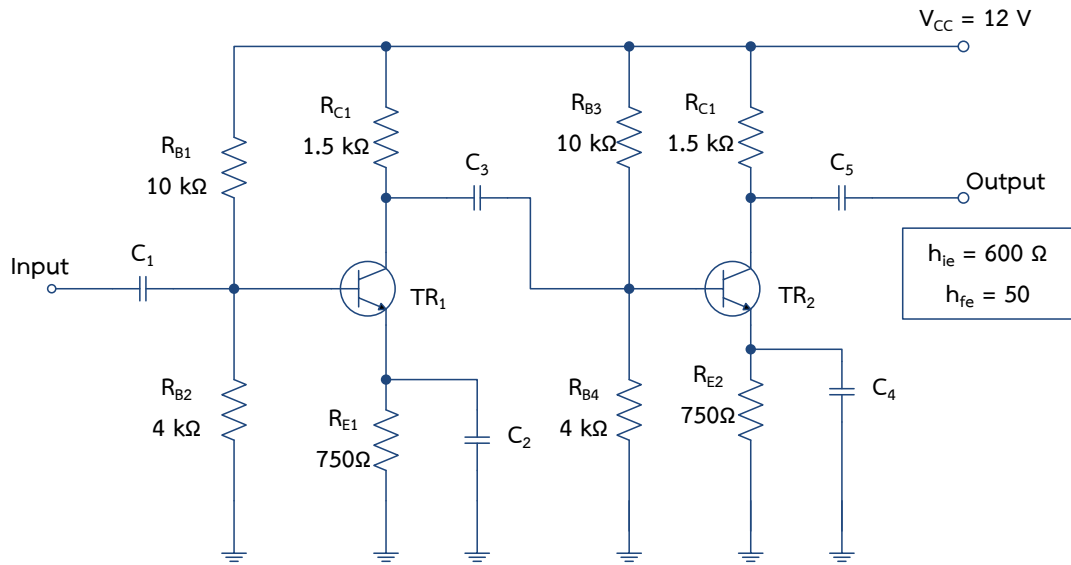
จากรูปที่ 8.1 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$A_{VT} = A_{V1} \cdot A_{V2} \cdot A_{V3} \cdot A_{Vn} \quad \dots 8.1$$

$$Z_i = Z_{i1} \quad \dots 8.2$$

$$Z_o = Z_{on} \quad \dots 8.3$$

ตัวอย่าง 8.1 จากรูปที่ 8.2 ถ้าทรานซิสเตอร์ 2 ตัวเป็นเบอร์เดียวกันมีค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน จงคำนวณหาค่า A_{V_T} , Z_i , Z_o



รูปที่ 8.2 วงจรมัลติสเตจคอมมอนอีมิเตอร์ (Ce) ต่อกับคอมมอนอีมิเตอร์ (Ce)

วิธีทำ หาค่า A_{V_T} จากสมการ

$$A_{V1} = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$A_{V1} = \frac{-(50)(1.5 \text{ k}\Omega)}{600 \Omega}$$

$$A_{V1} = -125$$

จากโจทย์ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวมีค่าพารามิเตอร์เหมือนกันดังนั้น

$$A_{V1} = A_{V2}$$

จากสมการที่ 8.1

$$A_{V_T} = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$A_{V_T} = (-125) \times (-125)$$

$$A_{V_T} = 15,625$$

ตอบ

หาค่า Z_i จากสมการที่ 8.2

$$Z_i = Z_{i1}$$

จะได้สมการหาค่า Z_i ดังนี้

$$Z_i = R_B // h_{ie}$$

$$Z_i = (R_{B1} // R_{B2}) // h_{ie}$$

$$Z_i = (10 \text{ k}\Omega // 4 \text{ k}\Omega) // 600 \Omega$$

$$Z_i = (2.85 \text{ k}\Omega) // 600 \Omega$$

$$Z_i = 495.65 \Omega$$

ตอบหาค่า Z_o จากสมการที่ 8.3

$$Z_o = Z_{o_n}$$

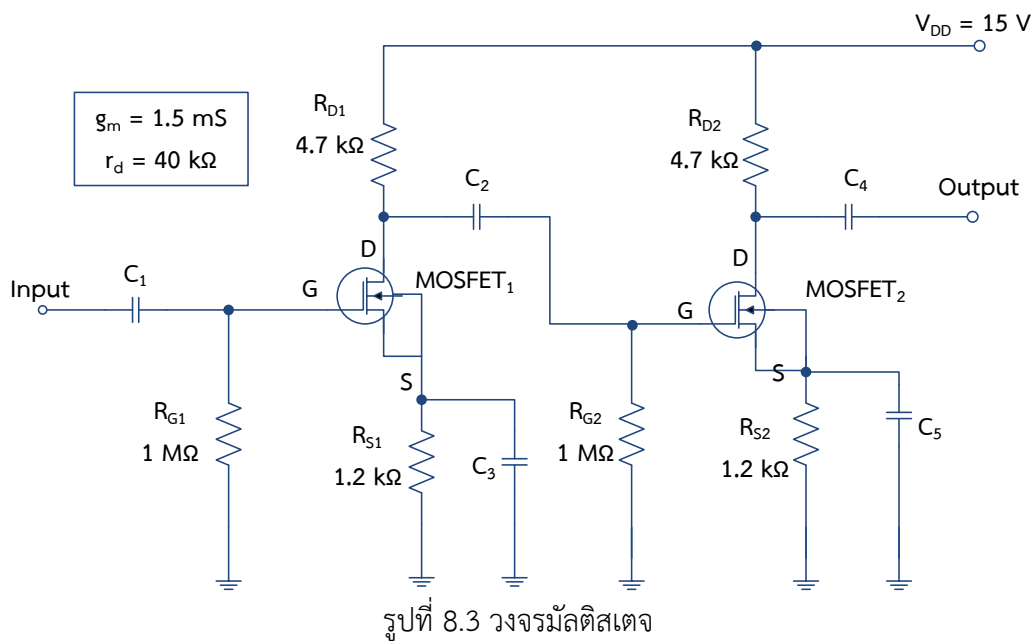
จากสมการที่ 8.6

$$Z_o = R_C$$

$$Z_o = 1.5 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

ตัวอย่าง 8.2 จากรูปที่ 8.3 ถ้าไดมอสเฟต 2 ตัว เป็นเบอร์เดียวกันมีค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน

จงคำนวณหาค่า A_{V_T} , Z_i , Z_o วิธีทำ หาค่า A_{V_T} จากสมการ

$$A_{V1} = -g_m (r_d // R_D)$$

$$A_{V1} = -(1.5 \text{ mS})(40 \text{ k}\Omega // 4.7 \text{ k}\Omega)$$

$$A_{V1} = -6.30$$

จากโจทย์ไดมอสเฟต 2 ตัวมีค่าพารามิเตอร์เหมือนกันดังนั้น

$$A_{V1} = A_{V2}$$

จากสมการที่ 8.1

$$A_{V_T} = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$A_{V_T} = (-6.30) \times (-6.30)$$

$$A_{V_T} = 39.69$$

ตอบ

หาค่า Z_i จากสมการที่ 8.2

$$Z_i = Z_{i_1}$$

$$Z_i = R_G$$

$$Z_i = 1 \text{ M}\Omega$$

ตอบ

หาค่า Z_o จากสมการที่ 8.3

$$Z_o = Z_{o_n}$$

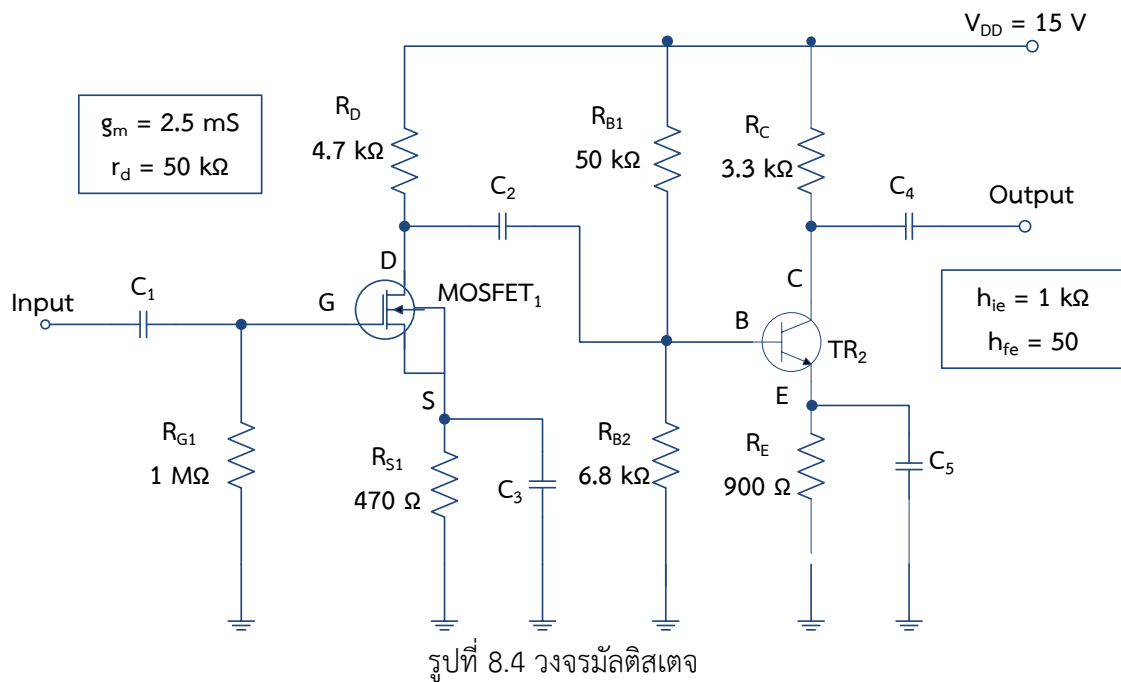
$$Z_o = R_D // r_d$$

$$Z_o = 4.7 \text{ k}\Omega // 40 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = 4.44 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

ตัวอย่าง 8.3 จากรูปที่ 8.4 คำนวณหาค่า A_{V_T} , Z_i , Z_o



วิธีทำ หาค่า A_{V_T} จากสมการ

$$A_{V1} = -g_m (r_d // R_D)$$

$$A_{V1} = -(2.5 \text{ mS})(50 \text{ k}\Omega // 4.7 \text{ k}\Omega)$$

$$A_{V1} = -(2.5 \text{ mS})(4.63 \text{ k}\Omega)$$

$$A_{V1} = -10.74$$

$$A_{V2} = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$A_{V2} = \frac{-(50)(3.3 \text{ k}\Omega)}{1 \text{ k}\Omega}$$

$$A_{V2} = -165$$

จากสมการที่ 8.1

$$A_{VT} = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$A_{VT} = (-0.74) \times (-165)$$

$$A_{VT} = 1772$$

ตอบ

หาค่า Z_i จากสมการที่ 8.2

$$Z_i = Z_{i1}$$

$$Z_i = R_G$$

$$Z_i = 1 \text{ M}\Omega$$

ตอบ

หาค่า Z_o จากสมการที่ 8.3

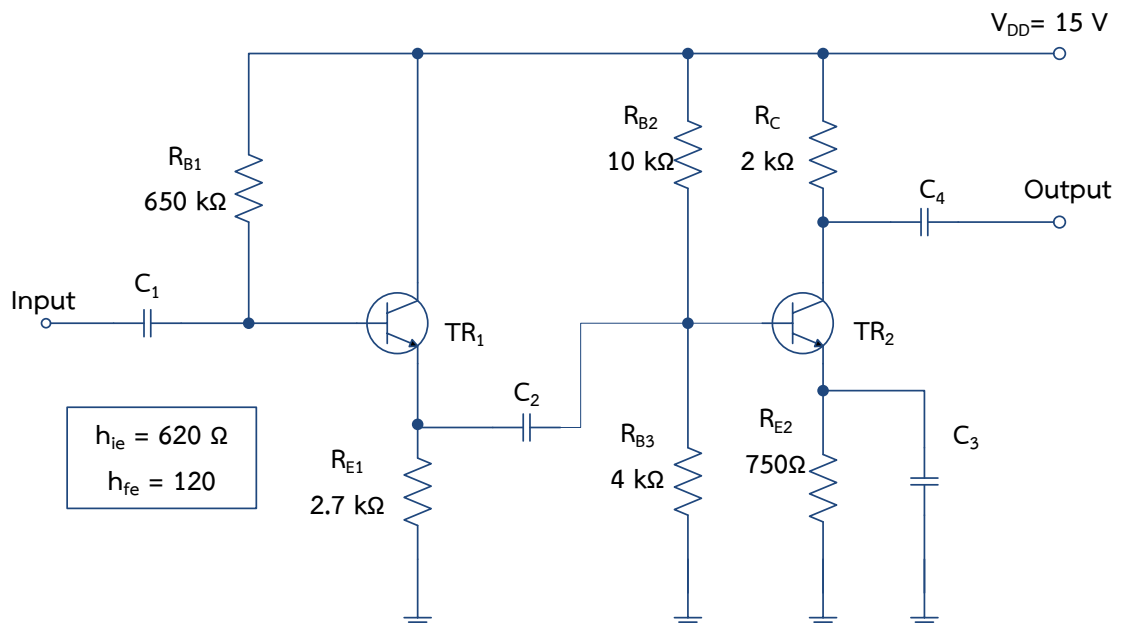
$$Z_o = Z_{o2}$$

$$Z_o = R_C$$

$$Z_o = 3.3 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

ตัวอย่าง 8.4 จากรูปที่ 8.5 คำนวณหาค่า A_{VT} , Z_i , Z_o



รูปที่ 8.5 วงจรมัลติสเตจคอมมอนคอลเลคเตอร์ (Cc)ต่อกับคอมมอนอิมิตเตอร์ (Ce)

วิธีทำ หาค่า A_{V_T}

จากสมการวงจรคอมมอนคอลเลคเตอร์จะได้

$$A_{V1} = 1$$

$$A_{V2} = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$A_{V2} = \frac{-(120)(2 \text{ k}\Omega)}{620 \Omega}$$

$$A_{V2} = -387$$

จากสมการที่ 8.1

$$A_{V_T} = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$A_{V_T} = (1) \times (-387)$$

$$A_{V_T} = -177.42$$

ตอบ

หาค่า Z_i จากสมการที่ 8.2

$$Z_i = Z_{i1}$$

$$Z_{i1} = R_{B1} // (h_{ie} + h_{fe} R_E)$$

$$Z_{i1} = 650 \text{ k}\Omega // (620 \Omega + (100 \times 2.7 \text{ k}\Omega))$$

$$Z_{i1} = 650 \text{ k}\Omega // (270.62 \text{ k}\Omega)$$

$$Z_{i1} = 194.38 \text{ k}\Omega$$

$$Z_i = 191.07 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

หาค่า Z_o จากสมการที่ 8.3

$$Z_o = Z_{o2}$$

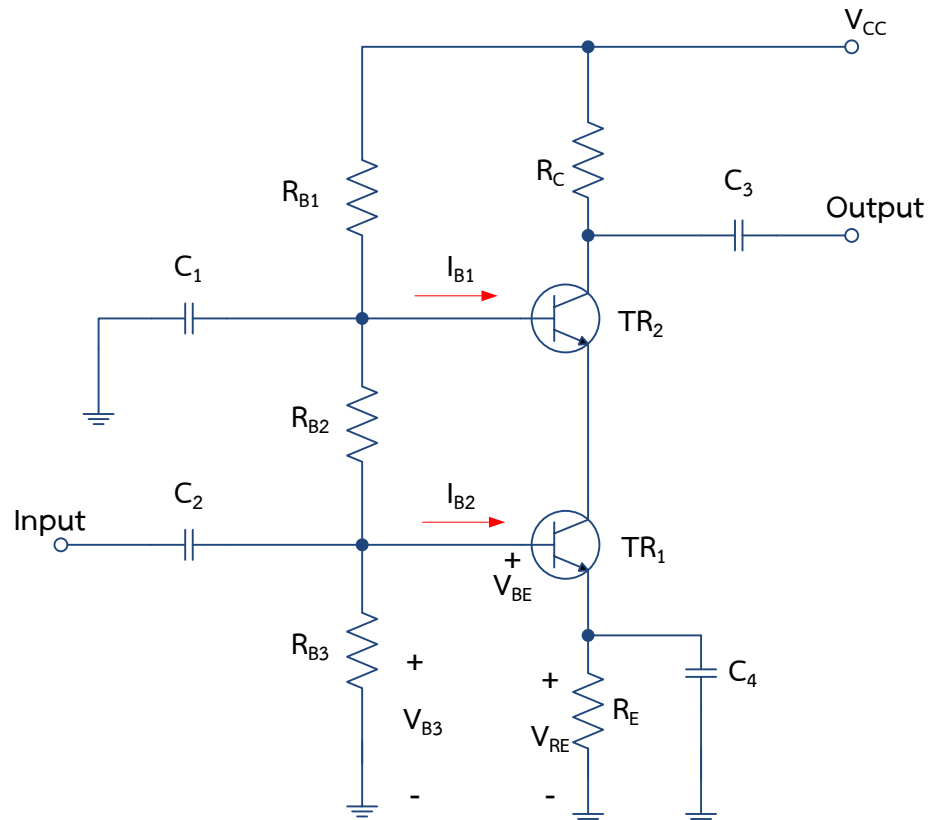
$$Z_o = R_C$$

$$Z_o = 2 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

8.2 วงจรขยายแบบคาสโคด

วงจรขยายแบบคาสโคดคือ การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อเชิงขนานกัน โดยอัตราขยายของวงจรจะเท่ากับผลคูณของอัตราขยายของวงจรแต่ละภาค เช่นเดียวกับวงจรขยายแบบคาสเคดวงจรที่นิยมคือการนำวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมที่ไบอัสแบบแบ่งแรงดันมาเป็นวงจรทางด้านอินพุตและใช้วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วมเป็นวงจรทางด้านเอาต์พุต วงจรในลักษณะดังกล่าวจะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างมากจึงสามารถนำไปใช้ในงานด้านความถี่สูงได้ดี ลักษณะของวงจรแสดงในรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6 วงจรขยายแบบคาสโคด

จากรูปที่ 8.6 วงจรขยายภาคที่ 1 (TR_1) ต่อยู่ในลักษณะวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วมไบอัสแบบแบ่งแรงดัน มีอินพุตต่ออยู่ที่ขา B ของ TR_1 เอาท์พุตอยู่ที่ขา C ของ TR_1 และมีขา E ของ TR_1 เป็นขาร่วม ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการอัตราขยายแรงดันได้ดังนี้

$$A_V = \frac{-R_C}{r_e} \quad \dots 8.4$$

จากรูปที่ 8.6 วงจรขยายภาคที่ 2 (TR_2) ต่อยู่ในลักษณะวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบเบสร่วม โดยอินพุตคือขา E ของ TR_2 รับสัญญาณมาจากขา C ของ TR_1 มีเอาท์พุตอยู่ที่ขา C ของ TR_2 และมีขา B ของ TR_2 เป็นขาร่วม ดังนั้นสมการอัตราขยายแรงดันและอินพุตอิมพีแดนซ์เขียนได้ดังนี้

$$A_V = \frac{R_C}{r_e} \quad \dots 8.5$$

$$Z_i = R_E // r_e \quad \dots 8.6$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

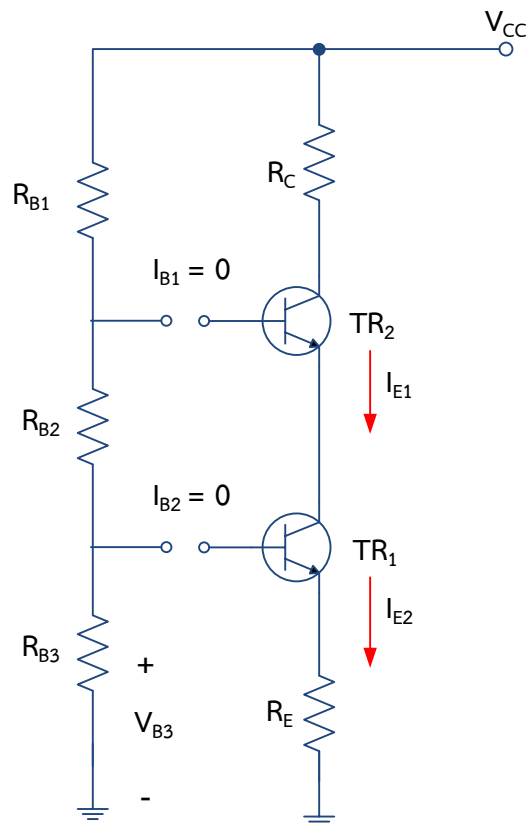
แต่เนื่องจากค่า r_e มีค่าน้อยกว่า R_E มากๆ ($r_e \ll R_E$)

ดังนั้น

$$Z_i = r_e$$

...8.7

จากภาพที่ 8.6 เนื่องจากคุณลักษณะของทรานซิสเตอร์ กระแส I_{B1} และ $I_{B2} \cong 0$ และไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถไหลผ่านตัวเก็บประจุได้ ดังนั้นจึงเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงได้ดังนี้



รูปที่ 8.7 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้ากระแสตรงของทรานซิสเตอร์และเมื่อให้กระแส I_{B1} และ $I_{B2} = 0$

จากรูปที่ 8.7 ตัวต้านทาน R_{B1} ตัวต้านทาน R_{B2} และตัวต้านทาน R_{B3} เปรียบเสมือนต่อในลักษณะอนุกรม ดังนั้นจึงสามารถหาค่า V_{B3} จากกฎการแบ่งแรงดันได้ดังนี้

$$V_{B3} = \frac{R_{B3}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} V_{CC}$$

...8.8

จากรูปที่ 8.6

$$V_{B3} = V_{BE1} + V_{RE}$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

ดังนั้น

$$V_{B3} = V_{BE1} + I_{E1} R_E$$

...8.9

จากรูปที่ 8.7

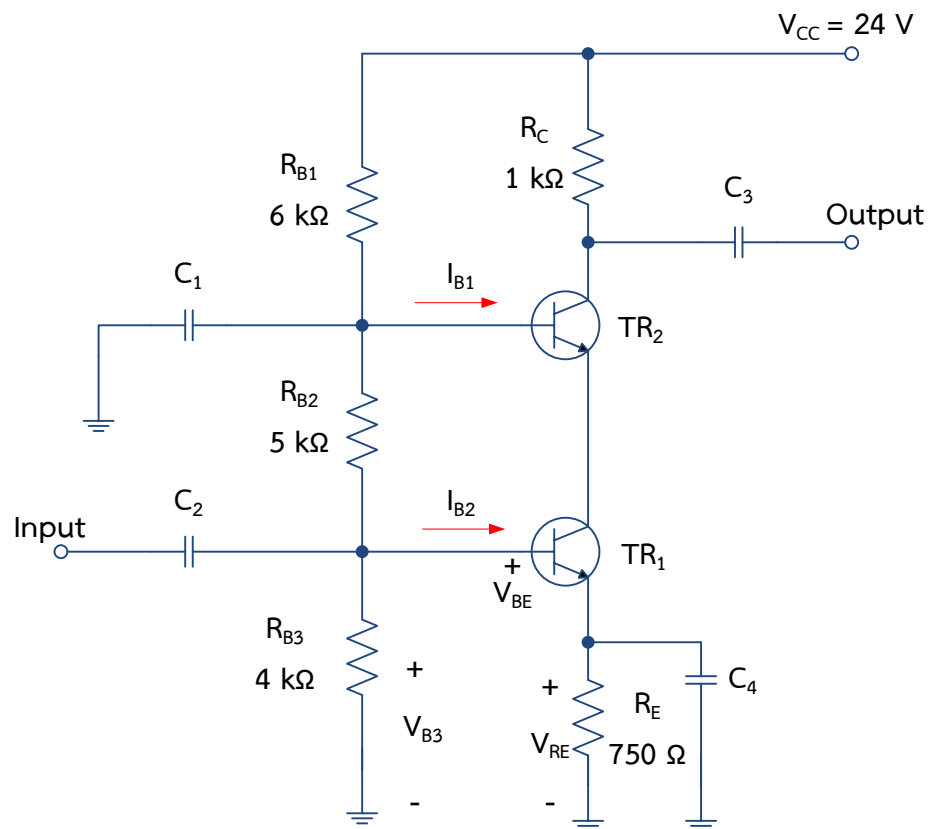
$$I_{E1} = I_{E2}$$

...8.10

ดังนั้น

$$r_{e1} = r_{e2}$$

...8.11

ตัวอย่างที่ 8.5 จาากรูปที่ 8.8 จงคำนวณหาค่าอัตราขยายรวม A_{VT} 

รูปที่ 8.8 วงจรขยายแบบคาสโค้ด

วิธีทำ

หาค่า A_{V1}

จากสมการที่ 8.5

$$A_{V1} = \frac{-R_C}{r_{e1}}$$

จากรูปที่ 8.8 R_C ของ TR_1 คือ Z_{i2} ดังนั้นจะได้ว่า

$$A_{V1} = \frac{-Z_{i2}}{r_{e1}}$$

จากสมการที่ 8.7

$$Z_{i2} = r_{e2}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$A_{V1} = \frac{-r_{e2}}{r_{e1}}$$

จากสมการ

$$r_{e1} = r_{e2}$$

ดังนั้น

$$A_{V1} = -1$$

หาค่า A_{V2} ได้จากสมการดังนี้

$$V_{B3} = \frac{R_{B3}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}} V_{CC}$$

$$V_{B3} = \frac{4 \text{ k}\Omega}{6 \text{ k}\Omega + 5 \text{ k}\Omega + 4 \text{ k}\Omega} \times 24 \text{ V}$$

$$V_{B3} = 6.4 \text{ V}$$

หาค่ากระแส I_{E1}

$$V_{B3} = V_{BE1} + I_{E1} R_E$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B3} - V_{BE1}}{R_E}$$

$$I_{E1} = \frac{6.4 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{750 \text{ }\Omega}$$

$$I_{E1} = 7.6 \text{ mA}$$

จากวงจรจะพบว่า

$$I_{E1} = I_{E2}$$

ดังนั้น เมื่อ $I_{E1} = 7.6 \text{ mA}$ จะสามารถหาค่า r_{e2} ได้ดังนี้

$$r_{e2} = \frac{26 \text{ mV}}{I_{E2}}$$

$$r_{e2} = \frac{26 \text{ mV}}{7.6 \text{ mA}}$$

$$r_{e2} = 3.42 \Omega$$

หาค่า A_{V2}

$$A_{V2} = \frac{R_C}{r_{e2}}$$

$$A_{V2} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{3.42 \Omega}$$

$$A_{V2} = 292.4$$

คำนวณหาค่า A_{V_T} จากสมการที่ 8.1

$$A_{V_T} = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

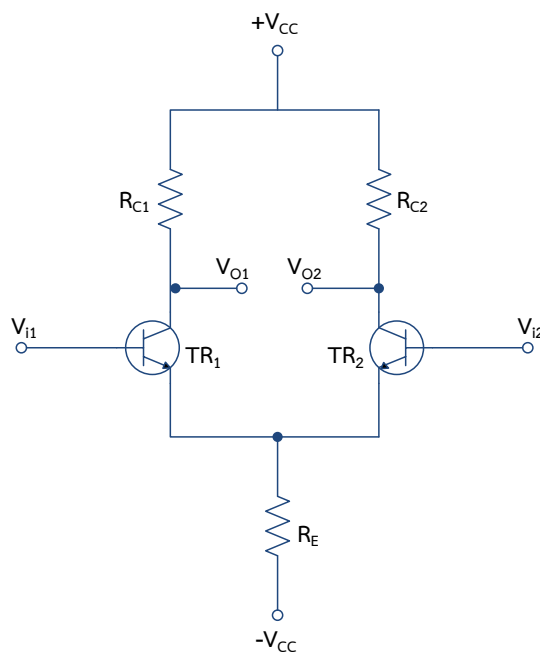
$$A_{V_T} = -1 \times 292.4$$

$$A_{V_T} = -292.4$$

ตอบ

8.3 วงจรขยายผลต่าง

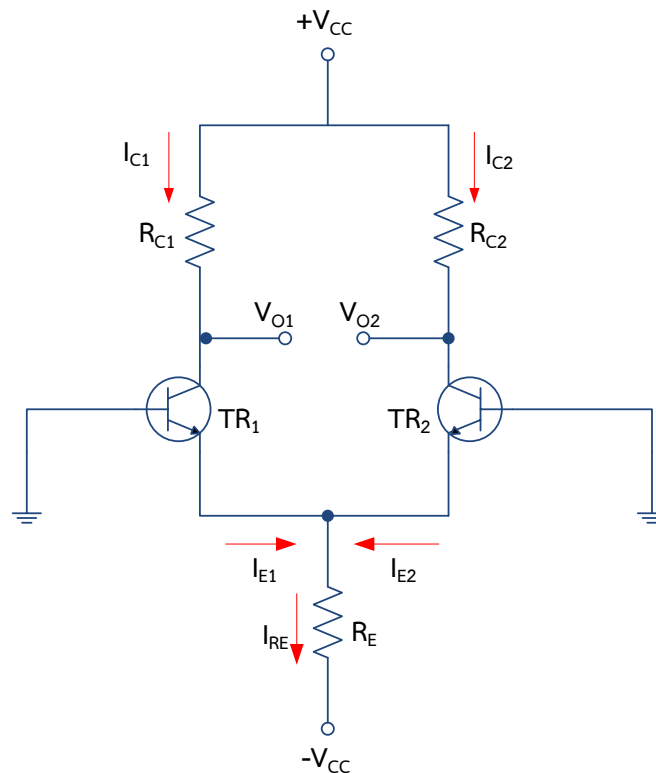
วงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier Circuit) คือ วงจรที่มีสองอินพุตมีภาคขยายสองภาคมาต่อร่วมกัน โดยวงจรจะเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากทั้งสองอินพุตและขยายออกมาเป็นสัญญาณเอาต์พุต โดยทั่วไปจะใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์เดียวกันสองตัวหรือเฟตเบอร์เดียวกันสองตัวต่อร่วมกันเป็นวงจรขยายผลต่าง โดยถูกผลิตออกมาในรูปของแบบไอซีลักษณะของวงจรจะแสดงในรูปที่ 8.9



รูปที่ 8.9 วงจรขยายผลต่าง

8.3.1 การวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้ากระแสตรง

การวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้ากระแสตรงจะพิจารณาในส่วนของกระแสตรง ดังนั้นในส่วนของอินพุต V_{i1} และ V_{i2} จึงกำหนดให้เป็นศูนย์เสมือนว่าอินพุตทั้งสองถูกลัดวงจรลงกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 8.10



รูปที่ 8.10 การวิเคราะห์ทางไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 8.10 ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวมีคุณลักษณะเหมือนกัน จากกฎของ Kirchhoff's Voltage Law จะได้ว่า

$$V_{EE} = V_{BE} + V_{RE}$$

$$V_{EE} = V_{BE} + I_{RE} R_E$$

ดังนั้น

$$I_{RE} = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} \quad \dots 8.12$$

จากกฎของ Kirchhoff's Current Law จะได้ว่า

$$I_{RE} = I_{E1} + I_{E2}$$

เนื่องจาก $I_{E1} = I_{E2}$;

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{I_{RE}}{2}$$

ดังนั้น

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{RE}}{2} \quad \dots 8.13$$

จากกฎของ Kirchhoff's Voltage Law

$$V_{CC} = V_{RC} + V_C$$

$$V_{CC} = I_C R_C + V_C$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

ดังนั้น

$$V_{C1} = V_{CC} - I_{C1} R_{C1} \quad \dots 8.14$$

และ

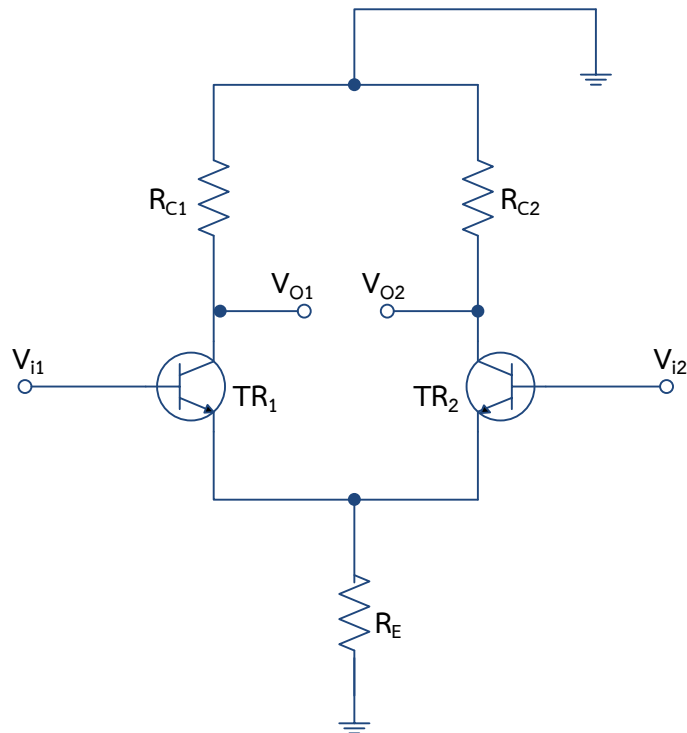
$$V_{C2} = V_{CC} - I_{C2} R_{C2} \quad \dots 8.15$$

ดังนั้น

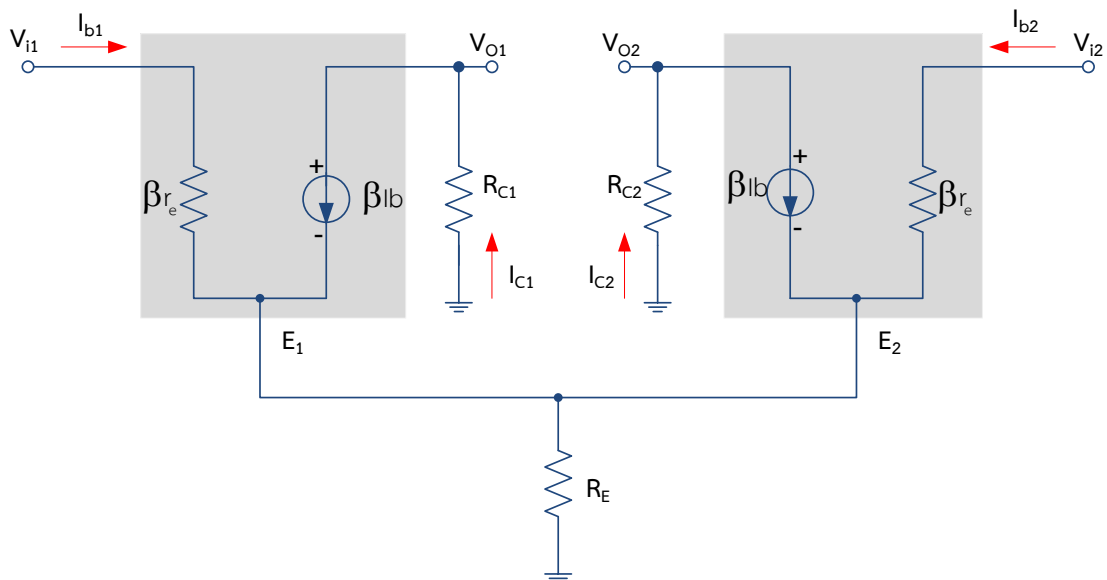
$$V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - \frac{I_{RE}}{2} R_C \quad \dots 8.16$$

8.3.2 การวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้ากระแสสลับ

การวิเคราะห์วงจรทางไฟฟ้ากระแสสลับจะพิจารณาในส่วนของกระแสสลับ ดังนั้นแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} และ V_{EE} จึงเปรียบเสมือนต่อลงกราวด์ ดังแสดงในรูปที่ 8.11 และเขียนวงจรสมมูล r_e ของวงจรผลต่างได้ดังแสดงในรูปที่ 8.12



รูปที่ 8.11 การต่อลั้ตวงจรที่แหล่งจ่ายไฟตรง

รูปที่ 8.12 วงจรสมมูล r_e ของวงจรขยายผลต่าง

จากรูปที่ 8.13 เนื่องจาก R_E มีค่ามากกว่า βr_e มาก ดังนั้นจึงเสมือนว่าเปิดวงจรที่ R_E ดังนั้นสามารถเขียนสมการหาค่า V_i ได้ดังนี้

$$V_i = V_{i1} - V_{i2}$$

$$V_i = I_b \beta r_e + I_b \beta r_e$$

$$V_i = 2(I_b \beta r_e)$$

$$V_i = 2\left(\frac{I_b}{\beta} \beta r_e\right)$$

$$V_i = 2I_c r_e$$

$$I_c = \frac{V_i}{2r_e}$$

...8.17

และสามารถเขียนสมการหาค่า V_o ได้ดังนี้

$$V_o = -I_c R_C$$

$$V_o = -\frac{V_i}{2r_e} R_C$$

...8.18

จากสมการหาค่าอัตราขยายแรงดัน

$$A_V = \frac{V_o}{V_i}$$

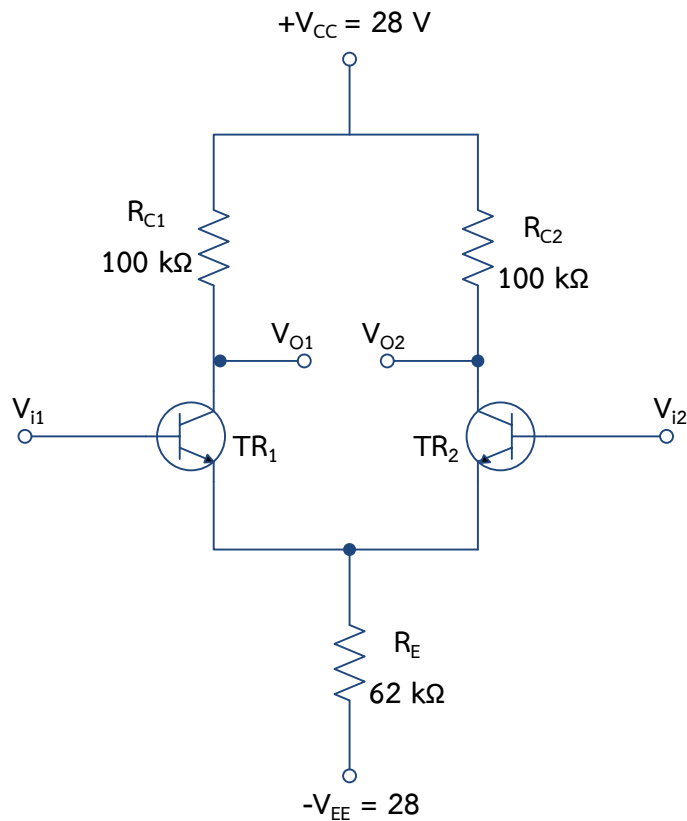
$$A_V = \frac{-\frac{V_i}{2r_e} R_C}{V_i}$$

ดังนั้น

$$A_V = \frac{-R_C}{2r_e}$$

...8.19

ตัวอย่างที่ 8.6 จากรูปที่ 8.13 จงคำนวณหาค่ากระแส I_{C1} และแรงดัน V_{C1} เขียนวงจรสมมูล r_e และหาค่าอัตราขยายแรงดัน A_v



รูปที่ 8.13 วงจรขยายผลต่าง

วิธีทำ จากสมการที่ 8.12

$$I_{RE} = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

$$I_{RE} = \frac{28 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{62 \text{ k}\Omega}$$

$$I_{RE} = 440.32 \text{ }\mu\text{A}$$

จากสมการที่ 8.13

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{RE}}{2}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{440.32 \mu\text{A}}{2}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = 220.16 \text{ }\mu\text{A}$$

ตอบ

จากสมการที่ 8.16

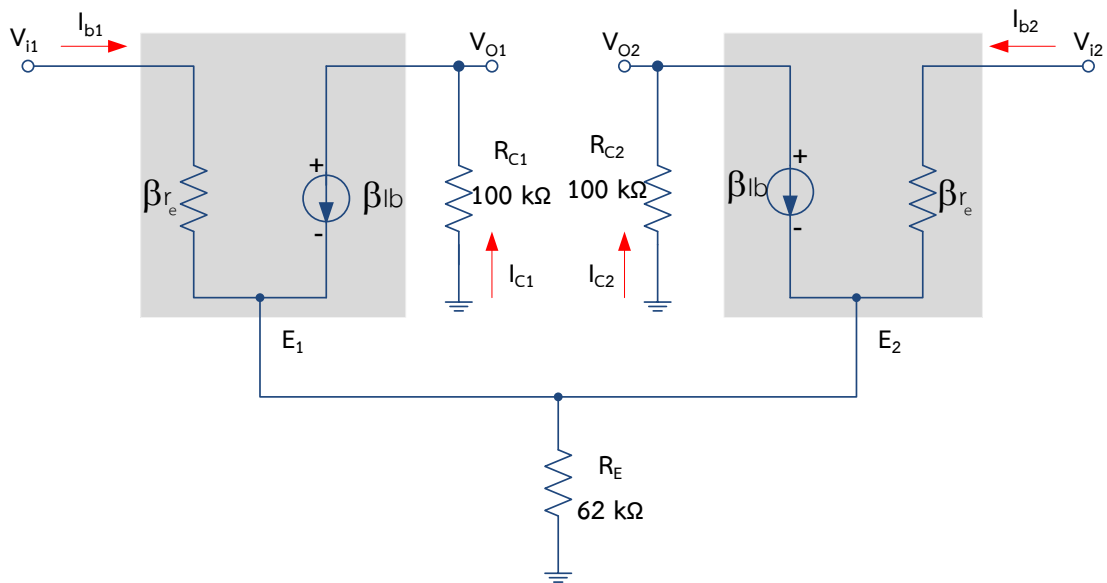
$$V_{C1} = V_{CC} - \frac{I_{RE}}{2} R_C$$

$$V_{C1} = 28 \text{ V} - \frac{440.32 \mu\text{A}}{2} (100 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{C1} = 5.98 \text{ V}$$

ตอบ

เขียนวงจรสมมูล r_e ได้ดังนี้



รูปที่ 8.14 วงจรสมมูล r_e ของวงจรในรูปที่ 8.13

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E}$$

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{440.32 \mu\text{A}}$$

$$r_e = 59.04 \Omega$$

อัตราขยายแรงดัน A_V

$$A_V = \frac{-R_C}{2r_e}$$

$$A_V = \frac{-100 \text{ k}\Omega}{2(59.04 \Omega)}$$

$$A_V = -846.88$$

ตอบ

8.4 การคัปปลิงสัญญาณ

การคัปปลิงสัญญาณ (Coupling) หรือการเชื่อมต่อสัญญาณในวงจรขยายสัญญาณหลายภาค เป็นการส่งผ่านสัญญาณจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งโดยจะต้องไม่ทำให้สัญญาณเกิดการสูญเสีย และไม่ทำให้วงจรขยายในภาคถัดไปสูญเสียความสมดุลในเรื่องอิมพีแดนซ์ด้วย

8.4.1 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบคอมมอนอิมิตอร์โดยใช้คาปาซิเตอร์คัปปลิง

8.4.2 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบการเชื่อมต่อโดยตรงหรือไดเร็คคัปปลิง

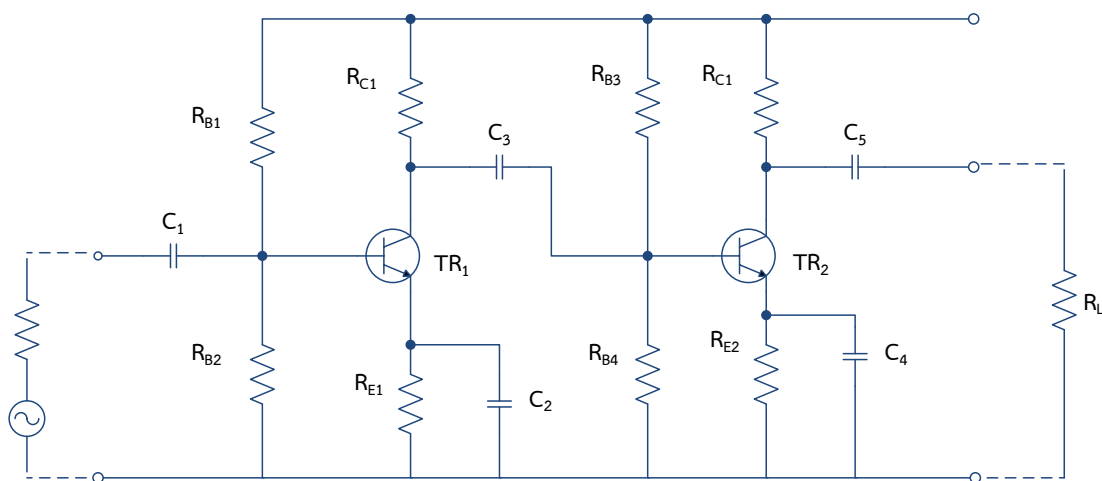
8.4.3 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบ Emitter Follower Output แบบไดเร็คคัปปลิง

8.4.4 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟดและทรานซิสเตอร์ร่วมกันโดยใช้คาปาซิเตอร์คัปปลิง

8.4.5 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟดและทรานซิสเตอร์ร่วมกันแบบไดเร็คคัปปลิง

8.4.1 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบคอมมอนอิมิตอร์โดยใช้คาปาซิเตอร์คัปปลิง

จากรูปที่ 8.15 เป็นรูปวงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบคอมมอนอิมิตอร์หลายภาคที่ใช้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่คัปปลิงสัญญาณ ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณหลายภาคนั้นจะคำนวณค่าอุปกรณ์ในวงจรภาคที่ 2 ก่อน แล้วจึงเลือกอุปกรณ์ในภาคที่ 1 ให้เหมือนกับในภาคที่ 2 โดย $R_{B1}=R_{B3}, R_{B2}=R_{B4}, R_{C1}=R_{C2}, R_{E1}=R_{E2}, C_1=C_3$ และ $C_2=C_4$ ในการคำนวณค่า C_3 ควรคำนึงถึงค่ารีซิสแตนซ์ทางด้านอินพุตของภาคที่ 2 และการคำนวณค่า C_5 จะต้องกำหนดให้ค่าคาปาซิแตนซ์ XC_5 มีค่าน้อยกว่า R_L ($XC_5 \ll R_L$)



รูปที่ 8.15 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคที่ใช้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่คัปปลิง

ในการออกแบบวงจรขยายหลายภาคจะแตกต่างไปจากวงจรขยายภาคเดียวคือ การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุบายพาสส์ C_2 และ C_4 โดยพิจารณาได้จากสมการ

$$XC_2 = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \quad \dots 8.20$$

จากสมการที่ 8.20 เขียนมาจากอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายภาคเดียว ที่ความถี่ต่ำกว่า 3 dB ของความถี่ f_1 ถ้าสมการนี้ใช้ในการคำนวณหาค่าความจุของ C_2 และ C_4 จะพบว่า วงจรขยายภาคแรกและวงจรขยายภาคที่สองจะมีอัตราขยายแรงดันของวงจรที่ความถี่ f_1 มีค่าต่ำกว่า 3 dB ซึ่งทำให้อัตราขยายแรงดันรวมของวงจรที่ความถี่ f_1 มีค่าต่ำกว่า 6 dB ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราขยายแรงดันที่ความถี่ f_1 ของวงจรทั้งหมดมีค่าลดลงเท่ากับ 3 dB แล้ว ตัวเก็บประจุบายพาสส์จะต้องคำนวณโดยใช้ อัตราการขยายของแต่ละวงจรมีค่าลดลง 1.5 dB ที่ความถี่ f_1 ดังนั้นคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุบายพาสส์จะต้องกำหนดค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์บายพาสส์ที่ขาอิมิตเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 0.65 ของค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมดังสมการที่ 8.21

$$XC_2 = 0.65 \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \quad \dots 8.21$$

ค่าคาปาซิเตอร์คัปปลิงของวงจรขยายจะมีค่าน้อยมาก จะมีผลต่อการตอบสนองต่อการขยายความถี่ที่ย่านความถี่ต่ำ

$$XC_1 = \frac{Z_i}{10} \quad \dots 8.22$$

และ

$$XC_5 = \frac{R_L}{10} \quad \dots 8.23$$

และจากการวิเคราะห์การขยายสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณหลายภาคจะมีการวิเคราะห์แบบเดียวกับวงจรขยายแบบภาคเดียว

หาค่าอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

$$Z_i = R_{B1} // R_{B2} // h_{ie} \quad \dots 8.24$$

$$Z_o = R_{C2} \quad \dots 8.25$$

$$Z_{i2} = R_{B3} // R_{B4} // h_{ie2} \quad \dots 8.26$$

หาค่าอัตราขยายแรงดัน ได้จาก

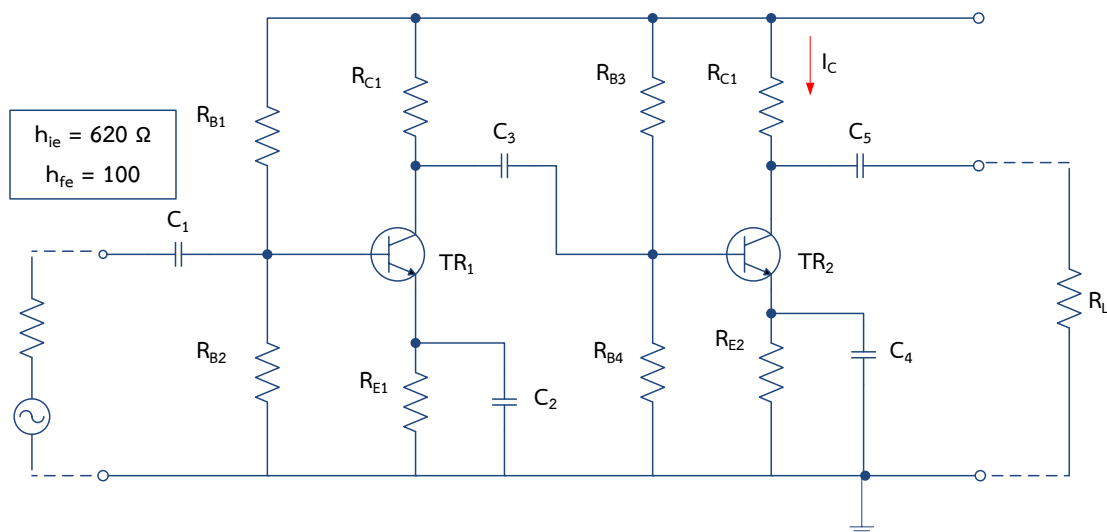
$$A_{V1} = - \frac{h_{fe1}(R_{C1} // Z_{i2})}{h_{ie1}} \quad \dots 8.27$$

และ

$$A_{V2} = - \frac{h_{fe2}(R_{C2} // R_L)}{h_{ie2}}$$

...8.28

ตัวอย่างที่ 8.7 จากรูปที่ 8.16 จงออกแบบวงจรขยายสัญญาณสองภาค โดยใช้คาปาซิเตอร์คัปปลิง ในวงจรใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2sc1815 มีค่า $V_{CC}=15\text{ V}$, $R_L=100\text{ k}\Omega$, $f_1=1\text{ kHz}$



รูปที่ 8.16 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคที่ใช้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่คัปปลิง

วิธีทำ

คำนวณหาค่าอุปกรณ์ในวงจรภาคที่ 2 ก่อนได้ดังนี้

หาค่า R_{C2} ได้ดังนี้

$$R_{C2} \ll R_L$$

$$R_{C2} = \frac{R_L}{10}$$

$$R_{C2} = \frac{100\text{ k}}{10}$$

$$R_{C2} = 10\text{ k}\Omega$$

หาค่า R_{E2} ได้ดังนี้

ในวงจรขยายสัญญาณจะมีค่ากระแสคอลเลคเตอร์ I_C มาก จะส่งผลทำให้แรงดันตกคร่อมที่ R_C หรือ V_{RC} มากขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อค่า V_{RC} มีค่ามากส่งผลให้ V_{CE} และ V_E จะต่ำลง ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ค่า V_{CE} เท่ากับ 3 V

ในวงจรขยายแบบเสถียร (Stability) ค่าของ $V_E \gg V_{BE}$ เพราะว่า $V_E = V_B - V_{BE}$ และ $I_C \approx I_E = V_E / R_E$ ซึ่งค่าของ V_E ที่เหมาะสมเท่ากับ 5 V (เฉพาะในวงจรการให้ไบอัสแบบเสถียร) เมื่อแหล่งจ่ายไฟน้อยกว่า 10 V ให้ใช้ค่าของ V_E มีค่าเท่ากับ 3 V ถ้าแรงดัน V_E น้อยกว่า 3 V จะทำให้เสถียรภาพของวงจรขยายไม่ดี

จากข้อกำหนดในการออกแบบนี้กำหนดให้ $V_E = 5 \text{ V}$ และ $V_{CE} = 3 \text{ V}$ ดังนั้นจากกฎของโอห์มจะได้ว่า

$$V_{RC} = V_{CC} - V_{CE} - V_E$$

$$V_{RC} = 15 \text{ V} - 3 \text{ V} - 5 \text{ V}$$

$$V_{RC} = 15 \text{ V} - 3 \text{ V} - 5 \text{ V}$$

$$V_{RC} = 7 \text{ V}$$

และสามารถหาค่า I_C

$$I_C = \frac{V_{RC}}{R_C}$$

$$I_C = \frac{7 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega}$$

$$I_C = 0.7 \text{ mA}$$

ดังนั้นหาค่า R_{E2} ได้ดังนี้

$$R_{E2} = \frac{V_E}{I_C}$$

$$R_{E2} = \frac{5 \text{ V}}{0.7 \text{ mA}}$$

$$R_{E2} = 7.14 \text{ k}\Omega \quad (7.1 \text{ k}\Omega)$$

ตอบ

หาค่า R_{B4} ได้ดังนี้ เมื่อ

$$I_2 = \frac{I_C}{10}$$

$$I_2 = \frac{0.7 \text{ mA}}{10}$$

$$I_2 = 70 \text{ }\mu\text{A}$$

ดังนั้นจะได้ R_{B4}

$$R_{B4} = \frac{V_E + V_{BE}}{I_2}$$

$$R_{B4} = \frac{5 \text{ V} + 0.7 \text{ V}}{70 \mu\text{A}}$$

$$R_{B4} = 81.45 \text{ k}\Omega$$

เลือกใช้ค่าความต้านทานมาตรฐานที่มีขายในท้องตลาดคือ $81 \text{ k}\Omega$ แทนค่าตัวต้านทานที่เลือกใช้ เพื่อหาค่า I_2 ใหม่อีกครั้งดังนี้

$$I_2 = \frac{V_E + V_{BE}}{R_{B4}}$$

$$I_2 = \frac{5 \text{ V} + 0.7 \text{ V}}{81 \text{ k}\Omega}$$

$$I_2 = 70.37$$

หาค่า R_{B3} ได้ดังนี้

$$R_{B3} = \frac{V_{CC} + V_B}{I_2}$$

โดย $V_B = V_E + V_{BE}$

$$R_{B3} = \frac{V_{CC} - (V_E + V_{BE})}{I_2}$$

$$R_{B3} = \frac{15 \text{ V} - (5 \text{ V} + 0.7 \text{ V})}{70.37 \mu\text{A}}$$

$$R_{B3} = 132.15 \text{ k}\Omega \text{ (132 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

หาค่าคาปาซิเตอร์ C_2 จากสมการที่ 8.30

$$XC_2 = 0.65 \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

$$XC_2 = 0.65 \frac{620}{1 + 100}$$

$$XC_2 = 3.99 \Omega$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_1 X_{C_2}}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(1 \text{ kHz})(3.99 \Omega)}$$

$$C_2 = 39.88 \mu\text{F} \quad (47 \mu\text{F})$$

ตอบหาค่าคาปาซิเตอร์ C_1 ได้ดังนี้

$$X_{C1} = \frac{Z_i}{10}$$

$$Z_i = R_{B1} // R_{B2} // h_{ie}$$

โดย $R_{B1} = R_{B3} = 132 \text{ k}\Omega$ และ $R_{B2} = R_{B4} = 81 \text{ k}\Omega$ แทนค่าในสมการ

$$Z_i = 132 \text{ k}\Omega // 81 \text{ k}\Omega // 620 \Omega$$

$$Z_i = 612.52 \Omega$$

ดังนั้น

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_1 \frac{Z_i}{10}}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi(1 \text{ kHz})\left(\frac{612.52 \Omega}{10}\right)}$$

$$C_1 = 2.59 \mu\text{F} \quad (3.3 \mu\text{F})$$

ตอบหาค่าคาปาซิเตอร์ C_5 ได้ดังนี้

$$X_{C5} = \frac{R_L}{10}$$

$$C_5 = \frac{1}{2\pi f_1 \frac{R_L}{10}}$$

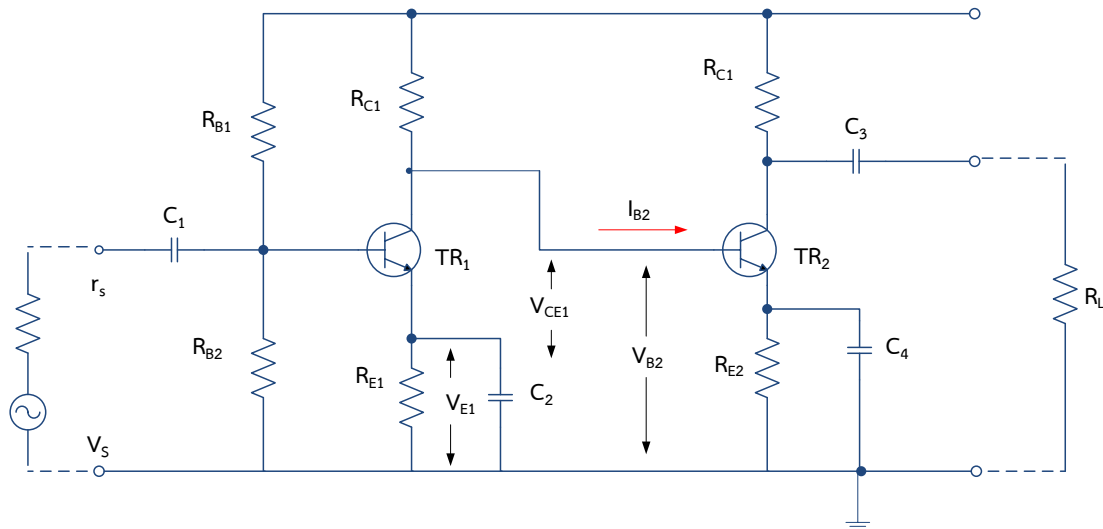
$$C_5 = \frac{1}{2\pi(1 \text{ kHz})\left(\frac{100 \text{ k}\Omega}{10}\right)}$$

$$C_5 = 15.91 \text{ nF} \quad (15 \text{ nF})$$

ตอบ

8.4.2 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบการเชื่อมต่อโดยตรงหรือไดเรกต์คัปปลิง

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบการเชื่อมต่อโดยตรงหรือไดเรกต์คัปปลิงเพื่อต้องการให้การสูญเสียของสัญญาณที่ส่งผ่านจากภาคหนึ่งไปยังอีกภาคหนึ่งน้อยที่สุด ดังวงจรที่ได้แสดงในรูปที่ 8.17 ซึ่งในวงจรนี้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ TR_1 จะต่อโดยตรงกับขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ TR_2



รูปที่ 8.17 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบการเชื่อมต่อโดยตรงหรือไดเรกต์คัปปลิง

จากวงจรรูปที่ 8.17 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบการเชื่อมต่อโดยตรงหรือไดเรกต์คัปปลิง หาค่าแรงดันไบอัสที่ขาเบสของ TR_2 (V_{B2}) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงดัน V_{C1} ของทรานซิสเตอร์ TR_1 ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_{B2} = V_{C1} = V_{E1} + V_{CE1}$$

หาค่าแรงดันที่ขาอีมิเตอร์ของ TR_2

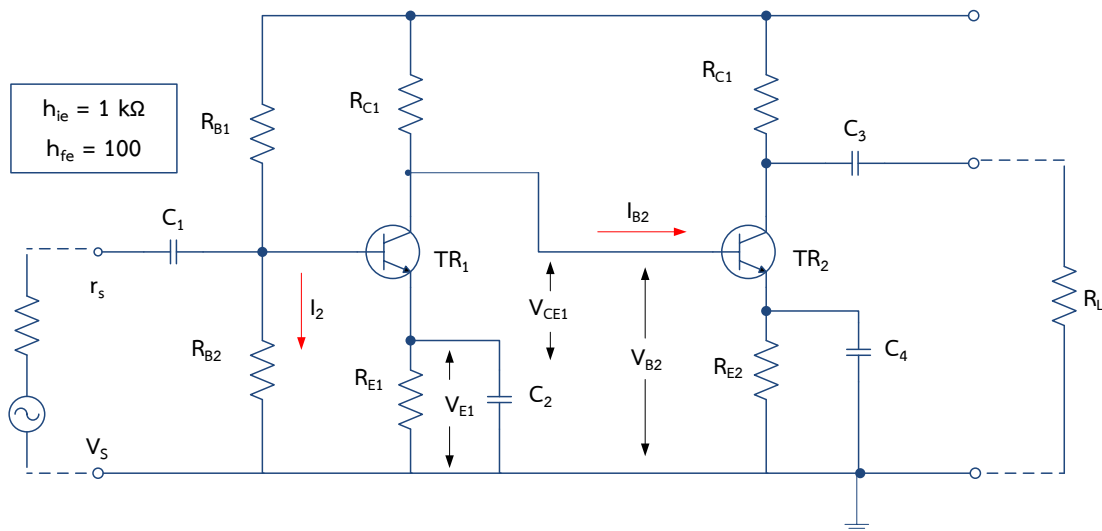
$$V_{E2} = V_{B2} - V_{BE}$$

และหาค่าแรงดันตกคร่อม R_{C2}

$$R_{C2} = \frac{V_{CC} - V_{E2} - V_{CE2}}{I_{C2}}$$

เมื่อพิจารณาในเรื่องของการออกแบบวงจรขยายแบบภาคเดียวใช้ค่า $V_{EC} = 3 \text{ V}$ และ $V_E = 5 \text{ V}$ แต่จะยกเว้นในกรณีแหล่งจ่ายไฟต่ำมากๆ และค่าดังกล่าวจะนำไปใช้ในการออกแบบวงจรหลายภาคด้วย

ตัวอย่างที่ 8.8 จากรูปที่ 8.18 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเร็คคัปปลิง โดยในวงจรใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2sc1815 แหล่งจ่ายไฟ $V_{CC}=20\text{ V}$ และค่าความต้านทานโหลด $R_L=39\text{ k}\Omega$, $f_1=100\text{ Hz}$ จงคำนวณหาค่าความต้านทานและค่าคาปาซิเตอร์ของวงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเร็คคัปปลิง



รูปที่ 8.18 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเร็คคัปปลิง

วิธีทำ

ในเรื่องของการออกแบบวงจรขยายแบบภาคเดียวใช้ค่า $V_{CE}=3\text{ V}$ และ $V_E=5\text{ V}$ ดังนั้น

$$V_{CE1}=V_{CE2}=3\text{ V} \text{ และ } V_{E1}=5\text{ V}$$

จากนั้นหาค่า V_{B2} ได้ดังนี้

$$V_{B2}=V_{C1}$$

$$V_{B2}=V_{CE1}+V_{E1}$$

$$V_{B2}=3\text{ V}+5\text{ V}$$

$$V_{B2}=8\text{ V}$$

จากนั้นหาค่า V_{E2} ได้ดังนี้

$$V_{E2}=V_{B2}-V_{BE}$$

$$V_{E2}=8\text{ V}-0.7\text{ V}$$

$$V_{E2}=7.3\text{ V}$$

จากนั้นหาค่า $V_{R_{C2}}$ ได้ดังนี้

$$V_{R_{C2}} = V_{CC} - V_{E2} - V_{CE1}$$

$$V_{R_{C2}} = 20 \text{ V} - 7.3 \text{ V} - 3 \text{ V}$$

$$V_{R_{C2}} = 9.3 \text{ V}$$

และ $R_{C2} \ll R_L$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$R_{C2} = \frac{R_L}{10}$$

$$R_{C2} = \frac{39 \text{ k}\Omega}{10}$$

$$R_{C2} = 3.9 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

จากนั้นหาค่า I_{C2} ได้ดังนี้

$$I_{C2} = \frac{V_{R_{C2}}}{R_{C2}}$$

$$I_{C2} = \frac{9.3 \text{ V}}{3.9 \text{ k}\Omega}$$

$$I_{C2} = 2.38 \text{ mA}$$

และเมื่อ $I_{C2} \cong I_{E2}$ จะได้ค่า R_{E2} ดังนี้

$$R_{E2} = \frac{V_{E2}}{I_{C2}}$$

$$R_{E2} = \frac{7.3 \text{ V}}{2.38 \text{ mA}}$$

$$R_{E2} = 3.01 \text{ k}\Omega \text{ (3.3 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

ดังนั้นจึงคำนวณหาค่า I_{C2} ใหม่ได้ดังนี้

$$I_{C2} = \frac{V_{E2}}{R_{E2}}$$

$$I_{C2} = \frac{7.3 \text{ V}}{3.3 \text{ k}\Omega}$$

$$I_{C2} = 2.21 \text{ mA}$$

และเมื่อ $I_{C1} \approx I_{C2} = 2.21 \text{ mA}$ ดังนั้นจะหาได้ค่า $V_{R_{C1}}$ ดังนี้

$$V_{R_{C2}} = V_{CC} - V_{C1}$$

$$V_{R_{C2}} = 20 \text{ V} - 8 \text{ V}$$

$$V_{R_{C2}} = 12 \text{ V}$$

ดังนั้นจะหาได้ค่า R_{C1} ดังนี้

$$R_{C1} = \frac{V_{R_{C1}}}{I_{C1}}$$

$$R_{C1} = \frac{12 \text{ V}}{2.21 \text{ mA}}$$

$$R_{C1} = 5.43 \text{ k}\Omega \text{ (5.6 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

จากนั้นจึงคำนวณหาค่า I_{C1} ใหม่ได้ดังนี้

$$I_{C1} = \frac{V_{R_{C1}}}{R_{C1}}$$

$$I_{C1} = \frac{12 \text{ V}}{5.6 \text{ k}\Omega}$$

$$I_{C1} = 2.14 \text{ mA}$$

และเมื่อ $I_{C1} \cong I_{E1}$ จะได้ค่า R_{E1} ดังนี้

$$R_{E1} = \frac{V_{E1}}{I_{C1}}$$

$$R_{E1} = \frac{5 \text{ V}}{2.14 \text{ mA}}$$

$$R_{E1} = 2.34 \text{ k}\Omega \text{ (2.2 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

หาค่า V_{B1} ได้ดังนี้

$$V_{B1} = V_{E1} + V_{BE}$$

$$V_{B1} = 5 \text{ V} + 0.7 \text{ V}$$

$$V_{B1} = 5.7 \text{ V}$$

เมื่อ

$$I_2 = \frac{I_{C1}}{10}$$

$$I_2 = \frac{2.14 \text{ mA}}{10}$$

ดังนั้น R_{B2} สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$I_2 = 214 \mu A$$

$$R_{B2} = \frac{V_{B1}}{I_2}$$

$$R_{B2} = \frac{5.7 V}{214 \mu A}$$

$$R_{B2} = 26.64 k\Omega (27 k\Omega)$$

ตอบ

คำนวณหาค่า I_2 ใหม่

$$I_2 = \frac{V_{B1}}{R_{B2}}$$

$$I_2 = \frac{5.7 V}{27 k\Omega}$$

$$I_2 = 211 \mu A$$

และ

$$R_{B1} = \frac{(V_{CC} + V_{B1})}{I_2}$$

$$R_{B1} = \frac{(20 V + 5.7 V)}{211 \mu A}$$

$$R_{B1} = 67.77 k\Omega (68 k\Omega)$$

ตอบ

เมื่อ $h_{fe} = 100$ และ $h_{ie} = 1 k\Omega$ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2SC1815 ดังนั้นหาค่า C_1 ได้ดังต่อไปนี้

$$Z_i = R_1 // R_2 // Z_b$$

$$Z_i = R_1 // R_2 // h_{ie}$$

และจากรูปที่ 8.18

$$Z_i = R_{B1} // R_{B2} // h_{ie}$$

$$Z_i = 68 k\Omega // 27 k\Omega // 1 k\Omega$$

$$Z_i = 950 \Omega$$

จากข้อกำหนด

$$X_{C1} = \frac{Z_i}{10}$$

$$X_{C1} = \frac{950 \Omega}{10}$$

$$X_{C1} = 95 \Omega$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

ดังนั้น

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f X_{C_1}}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})(95 \Omega)}$$

$$C_1 = 16.75 \mu\text{F} \text{ (16 } \mu\text{F)}$$

ตอบหาค่าคาปาซิเตอร์ C_2 และ C_3

จากข้อกำหนด

$$X_{C_2} = X_{C_3} = 0.65 \frac{h_{ie}}{(1+h_{fe})}$$

$$X_{C_2} = X_{C_3} = 0.65 \frac{1 \text{ k}\Omega}{(1+100)}$$

$$X_{C_2} = X_{C_3} = 6.44 \Omega$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f X_{C_2}}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})(6.44 \Omega)}$$

$$C_2 = 247.13 \mu\text{F} \text{ (220 } \mu\text{F)}$$

ตอบ

$$C_3 = 247.13 \mu\text{F} \text{ (220 } \mu\text{F)}$$

ตอบหาค่าคาปาซิเตอร์ C_4 จากข้อกำหนด

$$X_{C_4} = \frac{R_L}{10}$$

$$X_{C_4} = \frac{39 \text{ k}\Omega}{10}$$

$$X_{C_4} = 3.9 \text{ k}\Omega$$

$$C_4 = \frac{1}{2\pi f X_{C_4}}$$

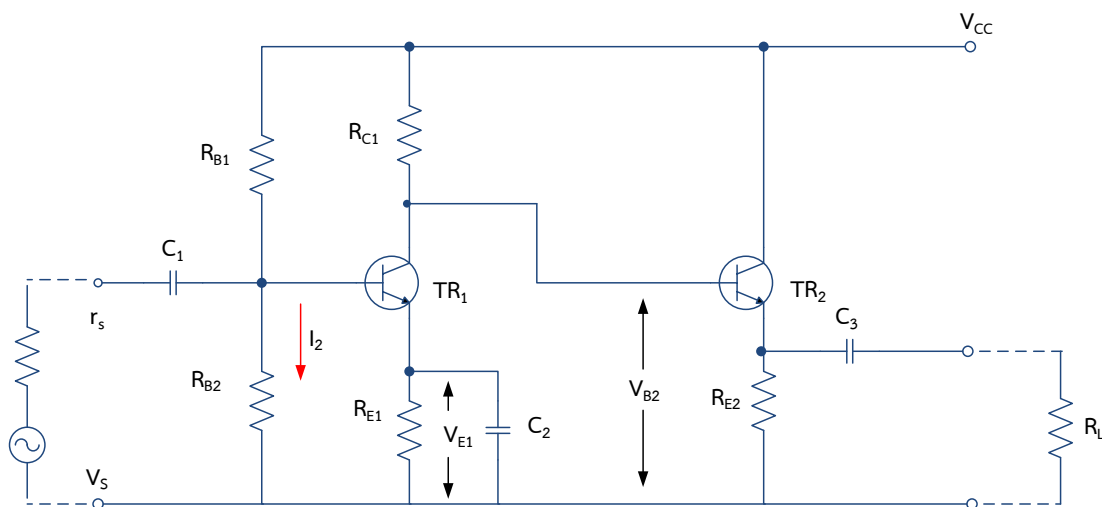
$$C_4 = \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})(3.9 \text{ k}\Omega)}$$

$$C_4 = 0.40 \text{ }\mu\text{F} \text{ (} 0.47 \text{ }\mu\text{F)}$$

ตอบ

8.4.3 วงจรขยายหลายภาคแบบ Emitter Follower Output แบบไดเร็กต์คัปปลิง

จากรูปที่ 8.19 เป็นวงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเร็กต์คัปปลิงโดย TR_2 เป็นวงจรขยายแบบคอมมอนคอลเลคเตอร์แรงดันไบอัสที่ขาเบสของ TR_2 (V_{B2}) หาได้จากค่าคงที่ของแรงดันที่คอลเลคเตอร์ของวงจรขยายภาคแรกและค่าตัวเก็บประจุ (C_1) คำนวณได้จาก $X_{C1} = Z_i/10$ และ C_2 กับ C_3 จะเป็นตัวกำหนดจุด 3 dB ที่ความถี่ต่ำ ซึ่งหาค่าได้จาก $X_{C2} = 0.65(h_{ie}/(1+h_{fe}))$ และ $X_{C3} = 0.65 \times R_L$ ที่ความถี่ f_1 ในการออกแบบนั้นความต้านทาน R_{E2} จะมีค่ามากกว่า R_L ส่วนค่ากระแส I_{E2} มีค่ามากกว่าค่ากระแส Peak AC Load (i_p) ซึ่งเป็นค่ากระแส Peak ที่เอาท์พุตคำนวณหาได้จาก $i_p = V_p/R_L$



รูปที่ 8.19 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเร็กต์คัปปลิงโดย TR_2

เป็นวงจรขยายแบบคอมมอนคอลเลคเตอร์

ตัวอย่างที่ 8.9 จากรูปที่ 8.19 ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 $h_{ie} = 0.5 \text{ k}\Omega$ และ $h_{fe} = 50$ มีค่าโดยมีแหล่งจ่ายไฟ $V_{CC} = 24 \text{ V}$ ความต้านทานโหลด $R_L = 100 \text{ }\Omega$ และแรงดันทางด้านเอาท์พุตเท่ากับ $\pm 100 \text{ mV}$ เมื่อจุด 3 dB ที่ความถี่ต่ำ $f_1 = 100 \text{ Hz}$ จงคำนวณอุปกรณ์ทุกตัวสำหรับวงจรไดเร็กต์คัปปลิง

วิธีทำ เริ่มแรกหาค่าความต้านทาน R_{E2} ก่อนจาก

$$i_p = V_p/R_L$$

$$i_p = 100 \text{ mV}/100 \text{ }\Omega$$

$$i_p = 1 \text{ mA}$$

ดังนั้น

$$I_{E2} > I_p$$

เมื่อ

$$I_{E2} = 2 \text{ mA}$$

จากข้อกำหนด $V_{E1} = 5 \text{ V}$ และ $V_{CE1} = 3 \text{ V}$

$$V_{B2} = V_{E1} + V_{CE1}$$

$$V_{B2} = 5 \text{ V} + 3 \text{ V}$$

$$V_{B2} = 8 \text{ V}$$

ดังนั้นหาค่า V_{E2} ได้ดังนี้

$$V_{E2} = V_{B2} - V_{BE}$$

$$V_{E2} = 8 \text{ V} - 0.7 \text{ V}$$

$$V_{E2} = 7.3 \text{ V}$$

จะสามารถหาค่าความต้านทาน R_{E2} ได้ดังนี้

$$R_{E2} = \frac{V_{E2}}{I_{E2}}$$

$$R_{E2} = \frac{7.3 \text{ V}}{2 \text{ mA}}$$

$$R_{E2} = 3.66 \text{ k}\Omega \text{ (3.3 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

หาค่าความต้านทาน R_{C1} และ R_{E1} ได้ดังนี้

เมื่อ $I_{C1} \cong I_{C2} = 2 \text{ mA}$ ดังนั้น

$$V_{R_{C1}} = V_{CC} - V_{C1}$$

$$V_{R_{C1}} = 20 \text{ V} - 8 \text{ V}$$

$$V_{R_{C1}} = 12 \text{ V}$$

จะได้ R_{C1} ดังนี้

$$R_{C1} = \frac{V_{R_{C1}}}{I_{C1}}$$

$$R_{C1} = \frac{12 \text{ V}}{2 \text{ mA}}$$

$$R_{C1} = 8 \text{ k}\Omega \text{ (8.2 k}\Omega\text{)}$$

ตอบจะได้ R_{E1} ดังนี้

$$R_{E1} = \frac{V_{E1}}{I_{C1}}$$

$$R_{E1} = \frac{5 \text{ V}}{2 \text{ mA}}$$

$$R_{E1} = 2.5 \text{ k}\Omega \text{ (2.7 k}\Omega\text{)}$$

ตอบหาค่าความต้านทาน R_{B2} เมื่อ

$$V_{B1} = V_{E1} + V_{BE}$$

$$V_{B1} = 5 \text{ V} + 0.7 \text{ V}$$

$$V_{B1} = 5.7 \text{ V}$$

จากข้อกำหนด

$$I_2 = \frac{I_{C1}}{10}$$

$$I_2 = \frac{2 \text{ mA}}{10}$$

$$I_2 = 200 \text{ }\mu\text{A}$$

ดังนั้น

$$R_{B2} = \frac{V_{B1}}{I_2}$$

$$R_{B2} = \frac{5.7 \text{ V}}{200 \text{ }\mu\text{A}}$$

$$R_{B2} = 28.5 \text{ k}\Omega \text{ (27 k}\Omega\text{)}$$

ตอบจากนั้นคำนวณค่าของ I_2 ใหม่ดังนี้

$$I_2 = \frac{V_{B1}}{R_{B2}}$$

$$I_2 = \frac{5.7 \text{ V}}{27 \text{ k}\Omega}$$

$$I_2 = 211 \text{ }\mu\text{A}$$

หาค่า R_{B1}

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{B1}}{I_2}$$

$$R_{B1} = \frac{20 \text{ V} - 5.7 \text{ V}}{211 \mu\text{A}}$$

$$R_{B1} = 87 \text{ k}\Omega \text{ (82 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

หาค่า C_1 เมื่อ $h_{ie} = 0.5 \text{ k}\Omega$ และ $h_{fe} = 50$ ดังนั้น

$$Z_i = R_{B1} // R_{B1} // h_{ie}$$

$$Z_i = 82 \text{ k}\Omega // 27 \text{ k}\Omega // 0.5 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

$$Z_i = 488 \Omega$$

จากข้อกำหนด

$$XC_1 = \frac{Z_i}{10}$$

$$XC_1 = \frac{488 \Omega}{10}$$

$$XC_1 = 48.8 \Omega$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi(f_1)(XC_1)}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})(48.8 \Omega)}$$

$$C_1 = 32.6 \mu\text{F} \text{ (39 } \mu\text{F)}$$

ตอบ

หาค่า C_2 และ C_3 โดยจากข้อกำหนด

$$XC_2 = 0.65 \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$$

$$XC_2 = 0.65 \frac{0.5 \text{ k}\Omega}{1 + 50}$$

$$XC_2 = 6.4 \Omega$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(f_1)(XC_2)}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})(6.4 \mu)}$$

$$C_2 = 249 \mu\text{F} \text{ (250}\mu\text{F)}$$

ตอบ

จากข้อกำหนด

$$XC_3 = 0.65 R_L$$

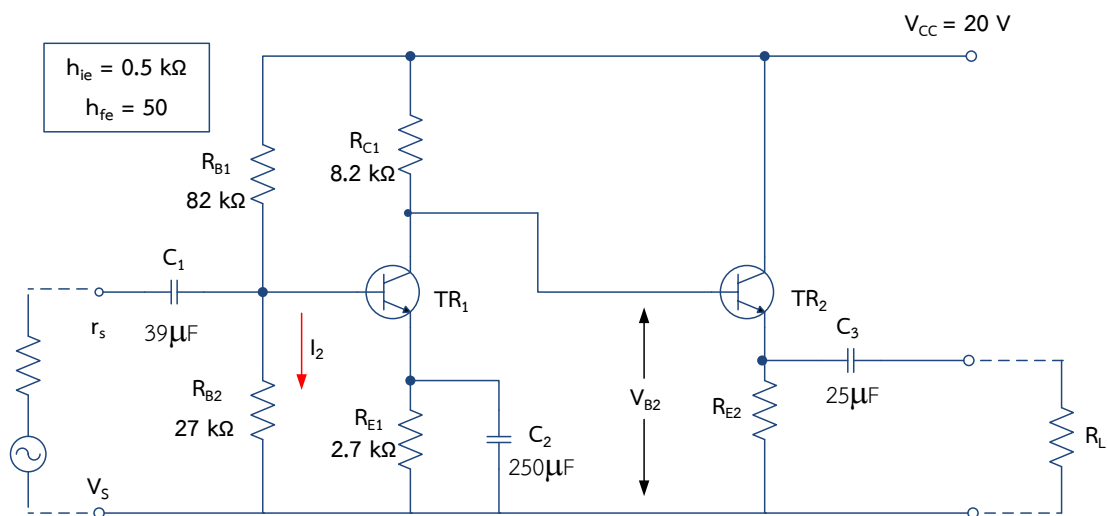
$$XC_3 = 0.65 (100\Omega)$$

$$XC_3 = 65 \Omega$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi(f_1)(XC_3)}$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi(100 \text{ Hz})(65 \Omega)}$$

$$C_3 = 24.5 \mu\text{F} \text{ (25 } \mu\text{F)}$$

ตอบ

รูปที่ 8.20 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเรคต์คัปปลิงโดย TR_2 เป็นวงจรขยายแบบคอมมอนคอลเลคเตอร์ที่ได้ค่าอุปกรณ์ทุกตัวจากตัวอย่างที่ 8.9

ตัวอย่างที่ 8.10 จากรูปที่ 8.20 จงคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เอาต์พุตอิมพีแดนซ์และอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเรคต์คัปปลิง

วิธีทำ

จากสมการการหา Z_i

$$Z_i = R_{B1} // R_{B2} // h_{ie}$$

$$Z_i = 82 \text{ k}\Omega // 27 \text{ k}\Omega // 0.5 \text{ k}\Omega$$

$$Z_i = 488 \text{ }\Omega$$

ตอบ

จากสมการการหาค่า Z_o

$$Z_o = \frac{[h_{ic} + R_{C1}]}{h_{fc}} // R_{E2}$$

เมื่อ $h_{ic} = h_{ie} = 0.5 \text{ k}\Omega$ และ $h_{fc} = 1 + h_{fe} = 1 + 50 = 51$ ดังนั้น

$$Z_o = \frac{[0.5 \text{ k}\Omega + 8.2 \text{ k}\Omega]}{51} // 3.3 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = 162.2 \text{ }\Omega$$

ตอบ

และจาก

$$Z_{i2} = h_{ic} + h_{fc}(R_{E2} // R_L)$$

$$Z_{i2} = 0.5 \text{ k}\Omega + 51(3.3 \text{ k}\Omega // 100 \text{ }\Omega)$$

$$Z_{i2} = 5.45 \text{ k}\Omega$$

หาค่าอัตราขยายแรงดันภาคแรก A_{V1}

$$A_{V1} = - \frac{h_{fe1}(R_{C1} // Z_{i2})}{h_{ie1}}$$

$$A_{V1} = - \frac{50 (8.2 \text{ k}\Omega // 5.45 \text{ k}\Omega)}{0.5 \text{ k}\Omega}$$

$$A_{V1} = -327$$

และเมื่ออัตราขยายแรงดันภาคที่ 2 เท่ากับ $A_{V2} = 1$

จะได้อัตราขยายแรงดันของวงจรขยายสัญญาณ

$$A_{VT} = A_{V1} \cdot A_{V2}$$

$$A_{VT} = (-327)(1)$$

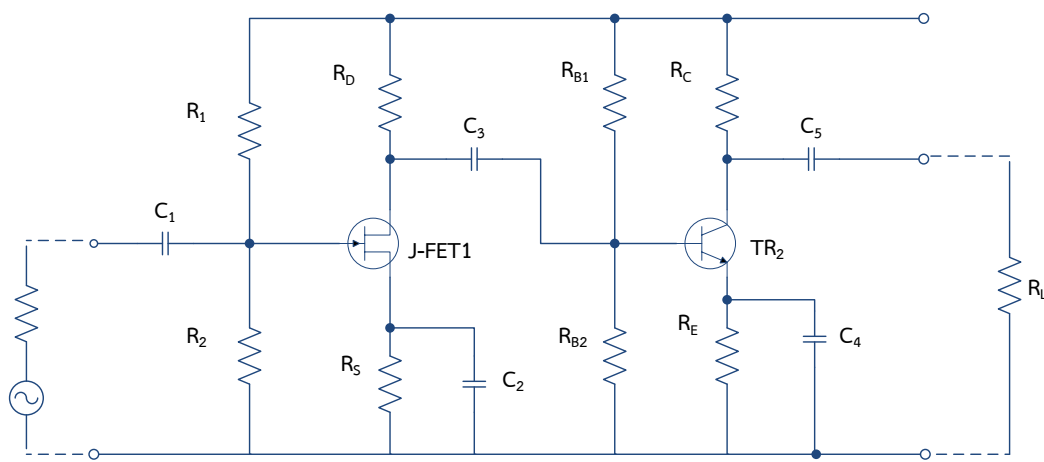
$$A_{VT} = -327$$

ตอบ

8.4.4 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟตและทรานซิสเตอร์ร่วมกันโดยใช้คาปาซิเตอร์คัปปลิง

วงจรขยายหลายภาคแบบนี้แบบมีค่าอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตสูงโดยใช้วงจรขยายในภาคแรกเป็นเฟต วงจรขยายนี้ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์และเฟตจึงเรียกว่า วงจร BIFET ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของวงจรนี้คือค่า Voltage Gain ต่ำกว่าวงจรขยายแบบใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

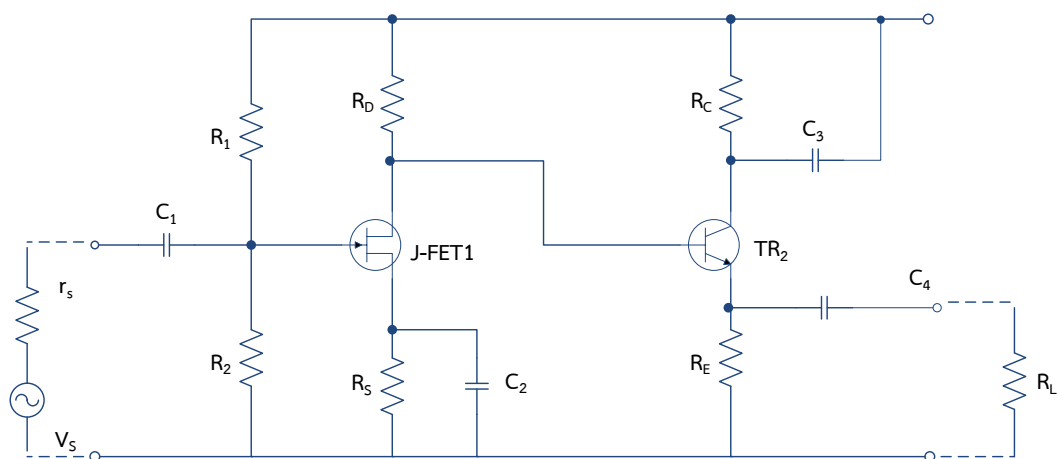
การหาค่าตัวเก็บประจุ (Capacitor) คัปปลิงของวงจร BIFET Amplifier ในวงจรรูปที่ 8.21 ซึ่งจะมีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูงและมีค่า Voltage Gain อยู่ในย่าน 5-15 เท่า ส่วนวงจรขยายในภาคที่ 2 จะมี Voltage Gain อยู่ระหว่าง 200 ถึง 500 เท่า ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์และความต้านทาน



รูปที่ 8.21 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟตและทรานซิสเตอร์ร่วมกันโดยใช้คาปาซิเตอร์คัปปลิง

8.4.5 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟตและทรานซิสเตอร์ร่วมกันแบบไดเรคคัปปลิง

วงจรที่ 8.22 แสดงวงจร Direct - Couple BIFET เมื่อ J-FET₁ คือ N-Channel J-FET และ TR₂ คือ PNP Bipolar Transistor



รูปที่ 8.22 วงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟตและทรานซิสเตอร์ร่วมกันแบบไดเรคคัปปลิง

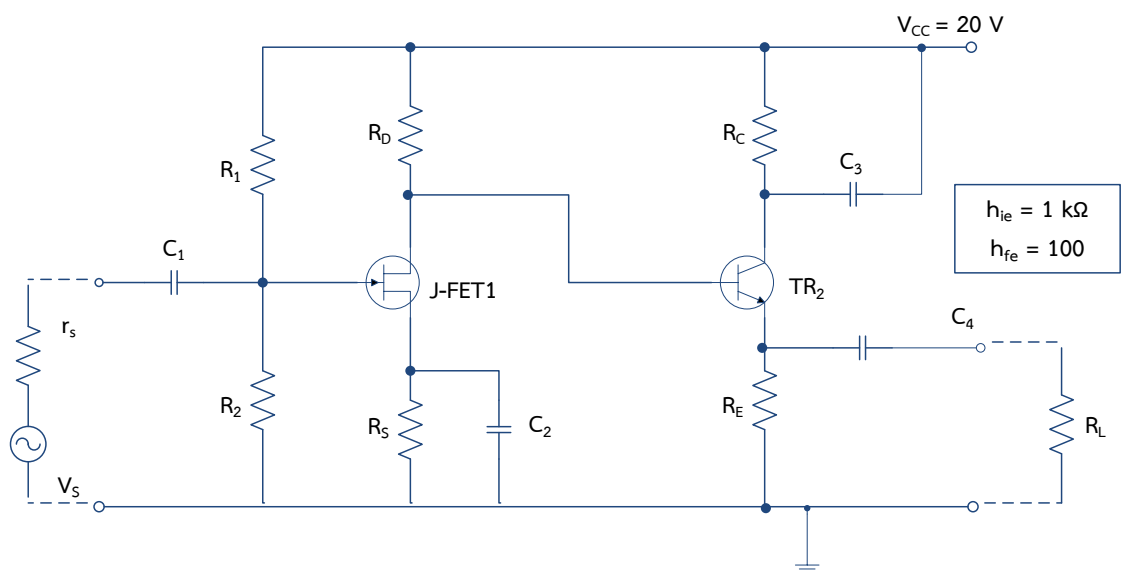
จากรูปที่ 8.22 หาค่า V_{E2} ของ TR_2 หาได้จาก

$$V_{E2} = V_{CC} - V_D - V_{BE}$$

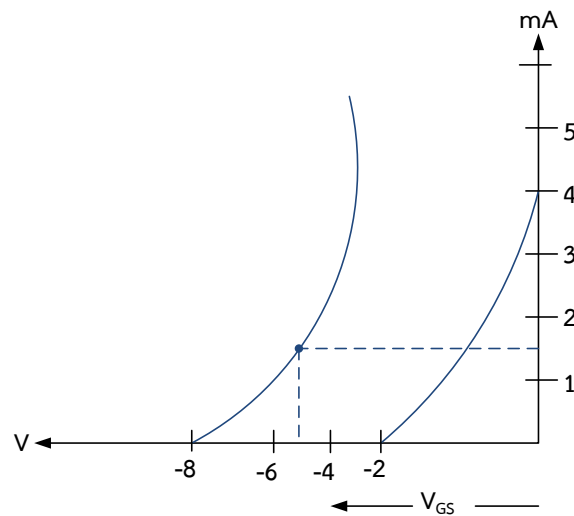
$$V_{E2} = V_D - V_{BE}$$

ส่วนการออกแบบวงจรขยายที่ใช้เฟตจะการใช้การ Transfer Characteristic ของเฟตมาใช้ในการออกแบบ

ตัวอย่างที่ 8.11 จากรูปที่ 8.23 เป็นวงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟตและทรานซิสเตอร์ร่วมกันแบบไดเร็คคัปปลิ่งเมื่อทรานซิสเตอร์ที่ใช้คือเบอร์ 2N3904 และเฟตเบอร์ BF245 $g_m = 6 \text{ mS}$ กำหนดให้แหล่งจ่ายไฟเท่ากับ 20 V ความต้านทานโหลดภายนอกเท่ากับ 180 k Ω อินพุตอิมพีแดนซ์ 500 k Ω และความถี่ Low Frequency ที่ 3 dB เท่ากับ 150 Hz จงคำนวณหาความต้านทานและค่าคาปาซิเตอร์ภายในวงจรโดยใช้ Transfer Characteristic ของเฟตประกอบในการออกแบบ



รูปที่ 8.23 เป็นวงจรขยายสัญญาณหลายภาคใช้เฟตและทรานซิสเตอร์ร่วมกันแบบไดเร็คคัปปลิ่ง



รูปที่ 8.24 Transfer Characteristic ของเจฟเฟต

วิธีทำ สำหรับเฟตเบอร์ BF245 J-FET เมื่อพิจารณารูป Transfer Characteristic ในรูปที่ 8.24 จะได้

$$I_D = 1.5 \text{ mA}$$

และ

$$V_{GS} = -5.6 \text{ V}$$

จากสูตร

$$V_{DS(\min)} = V_{p(\max)} + 1 \text{ V} - V_{GS}$$

เมื่อ

$$V_{p(\max)} = 8 \text{ V}$$

จะได้

$$V_{DS(\min)} = 8 \text{ V} + 1 \text{ V} - 5.6 \text{ V}$$

$$V_{DS(\min)} = 3.4 \text{ V}$$

$$V_{RD} + V_{RS} = V_{CC} - V_{DS}$$

$$V_{RD} + V_{RS} = 20 \text{ V} - 3.4 \text{ V}$$

$$V_{RD} + V_{RS} = 16.6 \text{ V}$$

$$V_{RD} = V_{RS} \cong 8.3 \text{ V}$$

จากข้อกำหนด $R_D = R_S$

$$R_D = R_S = \frac{V_{RD}}{I_D}$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

หาค่า V_{RS} และ V_{RD} ได้ดังนี้

$$R_D = R_S = \frac{8.3 \text{ V}}{1.5 \text{ mA}}$$

$$R_D = R_S = 5.53 \text{ k}\Omega \text{ (4.7 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

$$V_{RD} = V_{RS} = I_D R_D$$

$$V_{RD} = V_{RS} = (1.5 \text{ mA})(4.7 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{RD} = V_{RS} = 7.05 \text{ V}$$

$$V_{R2} = V_G = V_{RS} - V_{GS}$$

$$V_{R2} = V_G = 7.05 \text{ V} - 5.6 \text{ V}$$

$$V_{R2} = V_G = 1.45 \text{ V}$$

$$V_{R1} = V_{CC} - V_{RD}$$

$$V_{R1} = 20 \text{ V} - 7.05 \text{ V}$$

$$V_{R1} = 8.45 \text{ V}$$

สำหรับ $Z_i = 500 \text{ k}\Omega$ เมื่อ $P_2 = 1 \text{ M}\Omega$ ดังนี้

$$R_1 = \frac{V_{R1} \times R_2}{V_{R2}}$$

$$R_1 = \frac{8.45 \text{ V} \times 1 \text{ M}\Omega}{8.45 \text{ V}}$$

$$R_1 = 11.24 \text{ M}\Omega \text{ (10 M}\Omega\text{)}$$

ตอบเมื่อ $I_{C2} = 1 \text{ mA}$
ดังนั้น

$$V_{RC} = V_{RD} - V_{BE2}$$

$$V_{RC} = 7.05 \text{ V} - 0.7 \text{ V}$$

$$V_{RC} = 6.35 \text{ V}$$

หาค่าความต้านทาน R_C

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_{C2}}$$

$$R_C = \frac{6.35 \text{ V}}{1 \text{ mA}}$$

$$R_C = 6.3 \text{ k}\Omega \text{ (5.6 k}\Omega\text{)}$$

ตอบ

หาค่า I_{C2} ใหม่อีกครั้งจะได้

$$I_C = \frac{V_{RC}}{R_C}$$

$$I_C = \frac{6.35 \text{ V}}{5.6 \text{ k}\Omega}$$

$$I_C = 1.13 \text{ mA}$$

$$V_{RE} = V_{CC} - V_{RC} - V_{EC(\min)}$$

$$V_{RE} = 20\text{V} - 6.35 \text{ V} - 3 \text{ V}$$

$$V_{RE} = 10.65 \text{ V}$$

หาค่า R_E

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_C}$$

$$R_E = \frac{10.65 \text{ V}}{1.13 \text{ mA}}$$

$$R_E = 9.38 \text{ k}\Omega \quad (10 \text{ k}\Omega)$$

ตอบ

หาค่า C_1 ได้ดังนี้

$$Z_i = R_1 // R_2$$

$$Z_i = 10 \text{ M}\Omega // 1 \text{ M}\Omega$$

$$Z_i = 909 \text{ k}\Omega$$

$$X_{C_1} = \frac{Z_i}{10}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_1 X_{C_1}}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi (150 \text{ Hz})(909 \text{ k}\Omega / 10)}$$

$$C_1 = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$$

ตอบ

หาค่า C_2 ได้ดังนี้

$$X_{C_2} = \frac{0.65}{g_m}$$

$$X_{C_2} = \frac{0.65}{6 \text{ mS}}$$

$$X_{C_2} = 108.3 \text{ }\Omega$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_1 X_{C_2}}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi(150 \text{ Hz})(108.3 \Omega)}$$

$$C_2 = 9.79 \text{ } \mu\text{F} \text{ (10 } \mu\text{F)}$$

ตอบหาค่า C_3 ได้ดังนี้

$$X_{C_3} = 0.65 \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$$

$$X_{C_3} = 0.65 \frac{1 \text{ k}\Omega}{1+100}$$

$$X_{C_3} = 6.5 \Omega$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f_1 X_{C_3}}$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi(150 \text{ Hz})(6.5 \Omega)}$$

$$C_3 = 163 \mu\text{F} \text{ (180 } \mu\text{F)}$$

ตอบหาค่า C_4 ได้ดังนี้

$$X_{C_4} = \frac{R_L}{10}$$

$$X_{C_4} = \frac{R_L}{10} = \frac{100 \Omega}{10} = 10 \Omega$$

$$C_4 = \frac{1}{2\pi f_1 X_{C_4}}$$

$$C_4 = \frac{1}{2\pi(150 \text{ Hz})(10 \Omega)}$$

$$C_4 = 0.059 \mu\text{F} \text{ (0.06 } \mu\text{F)}$$

ตอบ

สรุป

วงจรขยายสัญญาณหลายภาค การต่อภาคขยายแต่ละภาคเข้าด้วยกันมักต่อวงจรแบบคาสเคด โดยต่อเรียงลำดับภาคขยาย ใช้เอาต์พุตภาคที่ 1 ต่อเข้าอินพุตภาคที่ 2 และเอาต์พุตภาคที่ 2 ต่อเข้าอินพุตภาคที่ 3 เป็นเช่นนี้เรื่อยไป ผลการต่อวงจรขยายแบบคาสเคดทำให้อัตราขยายของวงจรเพิ่มขึ้น

การต่อคาสเคดสามารถต่อวงจรได้ทั้งชนิดทรานซิสเตอร์อย่างเดียว ชนิดใช้ FET อย่างเดียวหรือชนิดใช้ทั้งทรานซิสเตอร์และ FET ร่วมกัน ลักษณะการจัดวงจรขยายเข้าด้วยกันสามารถจัดได้ทั้งวงจรคอมมอนเบส วงจรคอมมอนอิมิตเตอร์ วงจรคอมมอนคอลเลคเตอร์ วงจรคอมมอนซอส และวงจรคอมมอนดเรน ส่วนการเชื่อมต่อวงจรหรือการคัปปลิงทำได้หลายวิธีเช่นกัน เช่น คัปปลิงโดยตรง RC คัปปลิงและคัปปลิงด้วยหม้อแปลง

วงจรขยายความแตกต่างเป็นวงจรขยายที่ต่อภาคขยาย 2 วงจรเข้าด้วยกัน การขยายสัญญาณของวงจรขยายความแตกต่างใช้การเปรียบเทียบสัญญาณที่ป้อนเข้ามาของแต่ละอินพุต สัญญาณที่ออกเอาต์พุตคือสัญญาณผลต่างที่เหลือจากการเปรียบเทียบ นำไปขยายสัญญาณออกใช้งาน ในปัจจุบันวงจรขยายความแตกต่างมักถูกสร้างขึ้นในรูป IC ช่วยให้สะดวกในการต่อใช้งาน

แบบฝึกหัด

หน่วยที่ 8 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค
(Multistage Amplifier Circuit)

คำสั่ง จงตอบคำถามให้สมบูรณ์และถูกต้อง ใช้เวลาทำแบบฝึกหัด 20 นาที (คะแนนเต็ม 10 คะแนน)

1. จงหาค่า α เมื่อ $I_C=8.23$ mA และ $I_E=8.69$ mA

.....

.....

.....

.....

2. ทรานซิสเตอร์มีค่า $I_C=25$ mA, $I_B=200$ μ A จงคำนวณหาค่า β

.....

.....

.....

.....

3. จงคำนวณหาค่า β ของทรานซิสเตอร์ เมื่อ $\alpha = 0.96$

.....

.....

.....

.....

4. จงคำนวณหาค่า α ของทรานซิสเตอร์ เมื่อ $\beta = 30$

.....

.....

.....

.....

5. จงหาค่ากระแส I_C ของทรานซิสเตอร์เมื่อ $\alpha = 0.96$, $I_E=9.35$ mA

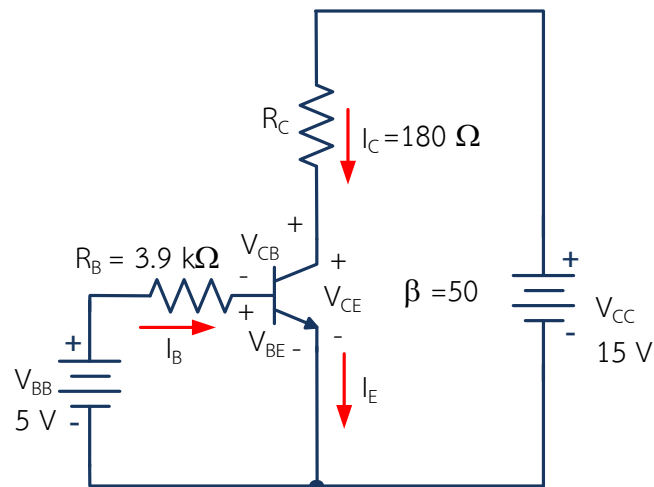
.....

.....

.....

.....

8. จากรูปที่ 3 คำนวณหาค่าแรงดัน V_{CE} , V_{BE} , V_{CB}



รูปที่ 6.44 วงจรการทำงานของทรานซิสเตอร์

[illegible]

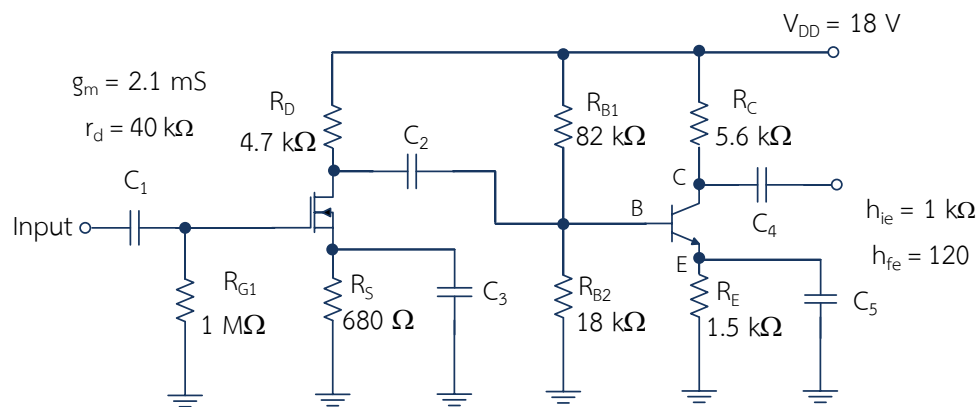
แบบทดสอบหลังเรียน

หน่วยที่ 8 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค (Multistage Amplifier Circuit)

คำชี้แจง

1. จงทำเครื่องหมายกากบาท (X) เลือกคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเพียงข้อเดียว
2. แบบทดสอบมีจำนวน 10 ข้อ ใช้เวลาทำแบบทดสอบ 10 นาที

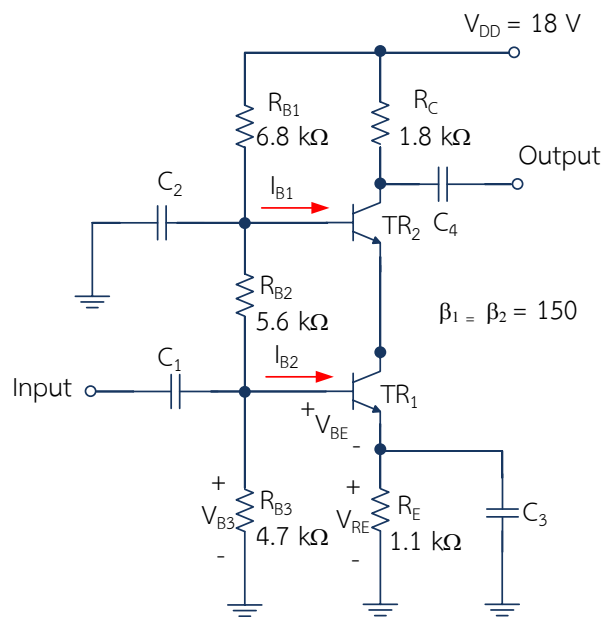
1. วงจรขยายแบบคาสโค้ดมีลักษณะตรงกับข้อใด
 - ก. การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อเชิงขนานกัน
 - ข. การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่ออนุกรมกัน
 - ค. อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลหารของอัตราขยายแต่ละภาค
 - ง. อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำมาก
 - จ. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าสูงมาก
2. จากวงจรจงคำนวณหาค่าอัตราขยายรวมมีค่าตรงกับข้อใด



รูปที่ 1 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 2

- ก. $A_{VT} = 3,522.37$
- ข. $A_{VT} = 4,923.25$
- ค. $A_{VT} = 5,933.76$
- ง. $A_{VT} = 6,643.21$
- จ. $A_{VT} = 7,331.27$

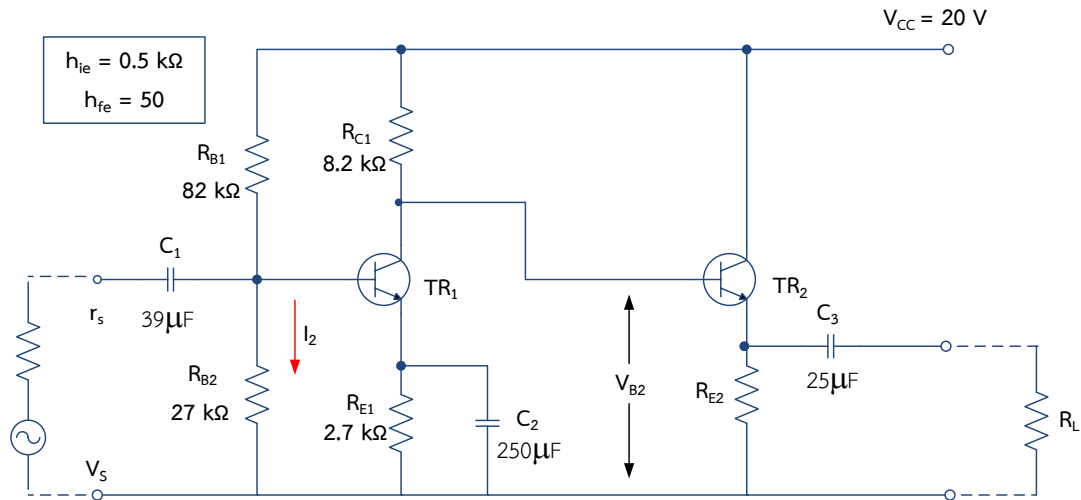
3. วงจรขยายผลต่างมีลักษณะตรงกับข้อใด
- การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อแบบวงจรผสม
 - อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลคูณของอัตราขยายแต่ละภาค
 - อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าสูงมาก
 - เปรียบเทียบสัญญาณจากสองอินพุตขยายออกเอาท์พุต
 - เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของภาคที่ 2
4. จากรูปที่ 2 จงคำนวณหาอัตราขยายรวม มีค่าตรงกับข้อใด



รูปที่ 2 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 4

- $A_{VT} = -162.03$
- $A_{VT} = -212.13$
- $A_{VT} = -267.06$
- $A_{VT} = -361.41$
- $A_{VT} = -392.91$

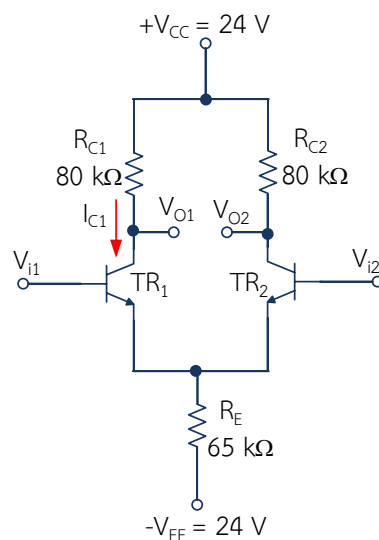
5. จากรูปที่ 3 จงคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์วงจรขยายสัญญาณหลายภาคแบบไดเรคต์คัปปลิ่งมีค่าตรงกับข้อใด



รูปที่ 3 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 5

- ก. 388 Ω
- ข. 488 Ω
- ค. 162.2 Ω
- ง. 262.2 Ω
- จ. 500 Ω

จงใช้วงจรรูปที่ 4 ตอบคำถามข้อที่ 6 และ ข้อที่ 8



รูปที่ 4 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 6 และ ข้อที่ 8

6. จากวงจรจงคำนวณหาค่ากระแส (I_{C1}) มีค่าตรงกับข้อใด
- ก. $I_{C1} = 179.23 \mu A$
 - ข. $I_{C1} = 191.11 \mu A$
 - ค. $I_{C1} = 211.81 \mu A$
 - ง. $I_{C1} = 231.25 \mu A$
 - จ. $I_{C1} = 291.67 \mu A$
7. ในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ควรเลือกใช้ตามข้อใดจริงจะเหมาะสม
- ก. น้อยกว่าที่คำนวณได้
 - ข. มากกว่าที่คำนวณได้
 - ค. ต้องเท่ากับที่คำนวณได้เท่านั้น
 - ง. ใกล้เคียงหรือเท่ากับที่คำนวณได้และมีจำหน่าย
 - จ. ต่อหลาย ๆ ตัวเพื่อให้ได้ค่าตรงตามที่คำนวณ
8. จากวงจรจงคำนวณหาอัตราขยายแรงดัน (A_V) มีค่าตรงกับข้อใด
- ก. $A_V = -151.45$
 - ข. $A_V = -178.23$
 - ค. $A_V = -223.18$
 - ง. $A_V = -256.78$
 - จ. $A_V = -292.46$
9. วงจรขยายแบบคาสเคดมีลักษณะตรงกับข้อใด
- ก. อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลคูณของอัตราขยายแต่ละภาค
 - ข. อัตราขยายของวงจรเท่ากับผลหารของอัตราขยายแต่ละภาค
 - ค. การนำวงจรขยายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปมาต่อเชิงขนานกัน
 - ง. อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของภาคสุดท้าย
 - จ. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของภาคแรก
10. การเชื่อมต่อแบบใดที่มีการสูญเสียสัญญาณที่ส่งผ่านน้อยที่สุด
- ก. การเชื่อมต่อโดยใช้คาปาซิเตอร์
 - ข. การเชื่อมต่อโดยตรง
 - ค. การเชื่อมต่อโดยใช้หม้อแปลง
 - ง. การเชื่อมต่อโดยใช้ตัวต้านทาน
 - จ. การเชื่อมต่อโดยใช้ไดโอด

บรรณานุกรม

- เจน สงสมพันธุ์. เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ 3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์. ปทุมธานี : สถาบันอิเล็กทรอนิกส์ กรุงเทพมหานคร. 2552.
- นภัทร วัจนเทพพินท์. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. สกายบุ๊กส์. 2538.
- ทรงพล กาญจนชูชัย. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556.
- ธนนต์ ศรีสกุล. พื้นฐานการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพฯ: วิดีทัศน์ กรู๊ป. 2552.
- สุคนธ์ พุ่มศรี. การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: ศูนย์ส่งเสริมอาชีพ, 2558.
- สายัณต์ ชื่นอารมณ. วิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพฯ:ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ. 2552.
- Albert Malvino and David J. Bates. **Electronic Principles**. Seventh Edition. New York: McGraw-Hill. 2007.
- Robert Boylestad and Louis Nashelsky. **Electronic Devices And Circuit Theory**, Seventh Edition: New Jersey. Prentice Hall.

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

	ใบงานที่ 8.1	หน่วยที่ 8
	รหัสวิชา 3105-1003 วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์	สอนครั้งที่ 1
	ชื่อหน่วย การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค (Multistage Amplifier Circuit)	คาบรวม 10
ชื่อเรื่อง	การเชื่อมต่อสัญญาณ(Coupling) แบบใช้ตัวเก็บประจุใน วงจรขยายสัญญาณหลายภาค	จำนวนคาบ 3

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. ต่วงจรขยายสัญญาณหลายภาคเพื่อทดลองตามใบงานได้อย่างถูกต้อง
2. วัด อ่านค่า แรงดันและกระแสในวงจรตามที่ใบงานกำหนดได้อย่างถูกต้อง
3. คำนวณหาค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายหลายภาคได้อย่างถูกต้อง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (จิตพิสัย) ที่มีการบูรณาการตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

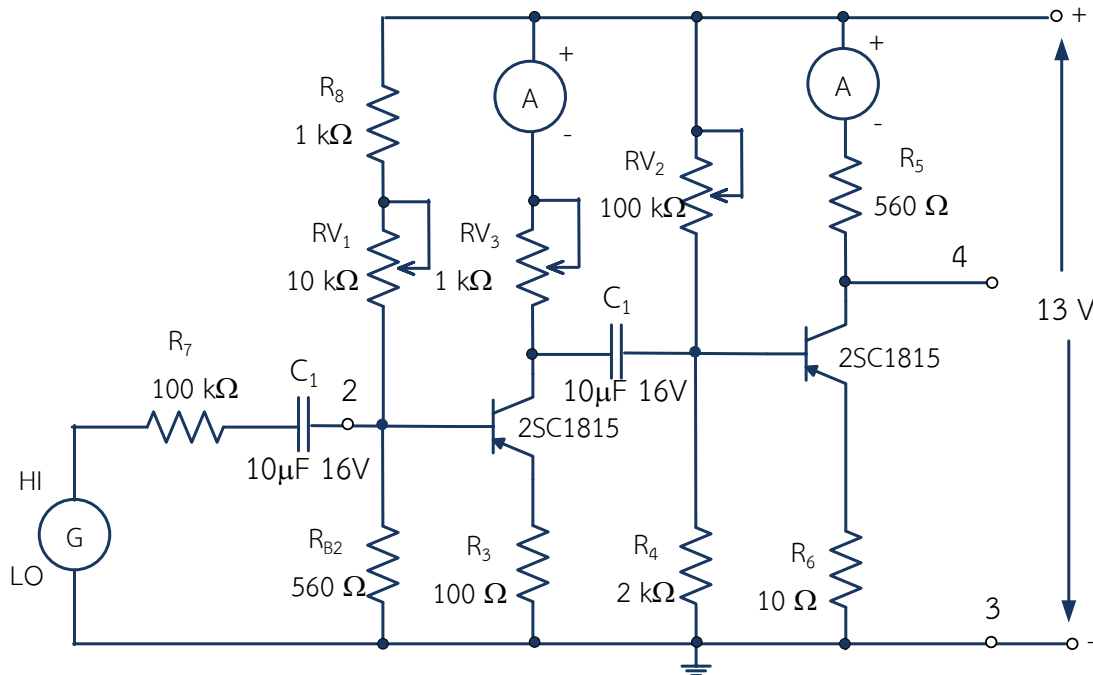
1. ความรับผิดชอบ
2. ความมีวินัย
3. การตรงต่อเวลา
4. ความมีมนุษยสัมพันธ์
5. ความรู้และทักษะวิชาชีพ
6. ความสนใจใฝ่หาความรู้
7. การพึ่งตัวเอง
8. มีความเพียร
9. รู้รักสามัคคี
10. การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | |
|--|---------------|
| 1. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์หรือแอนะล็อกมัลติมิเตอร์ | 2 เครื่อง |
| 2. แหล่งจ่ายไฟตรงแบบปรับค่าได้ 0-30 V 3 A | 1 เครื่อง |
| 3. ออสซิลอสโคป | 1 เครื่อง |
| 4. ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 5. ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ V_{R1} 10 k Ω , V_{R2} 100 k Ω , V_{R3} 1 k Ω อย่างละ | 1 ตัว |
| 6. ตัวต้านทานค่าคงที่ R_2 560 k Ω , R_3 100 Ω , R_4 2.2 k Ω , R_5 560 Ω ,
R_6 10 k Ω , R_7 100 k Ω , R_8 1 k Ω | อย่างละ 1 ตัว |
| 7. ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 10 μ F 16 V | อย่างละ 1 ตัว |
| 8. ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2sc1815 | 2 ตัว |
| 9. แผงประกอบวงจรและสายต่อวงจร | 1 ชุด |

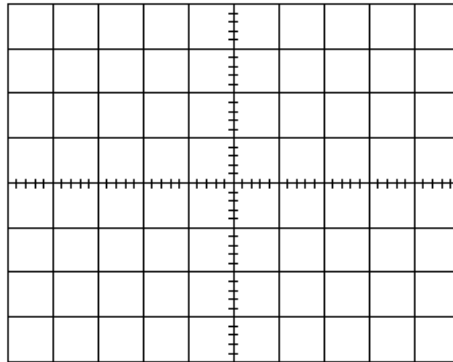
ลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติใบงาน

1. ต่อดังตามรูปที่ 1

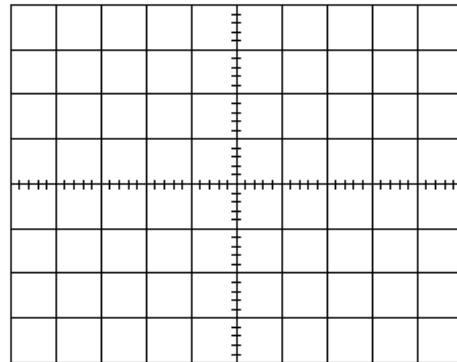


รูปที่ 1 แสดงวงจรประกอบทดสอบข้อที่ 1

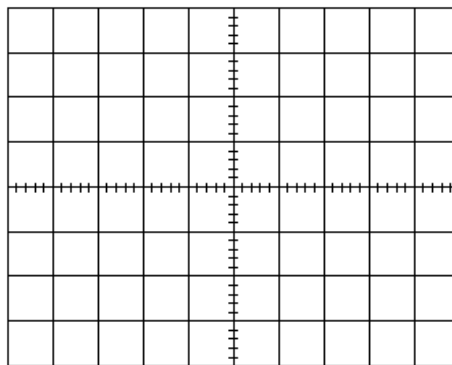
2. กำหนดจุด Q - point โดยให้ $I_{CQ1} = I_{CQ2} = 5 \text{ mA}$; และ $V_{CEQ1} = V_{CEQ2} = 10 \text{ V}$ ให้ตั้งค่า V_{R3} มีค่าเป็นครึ่งหนึ่ง โดยปรับ V_{R1} จนกระทั่ง $I_{CQ1} = 5 \text{ mA}$ และปรับ V_{R3} ให้ได้ $V_{CQ1} = 10 \text{ V}$ และ V_{R2} ให้ได้ $I_{CQ2} = 5 \text{ mA}$
3. วัดค่าความต้านทานไบอัส V_{R1} , V_{R2} , V_{R3} ของตัวต้านทานปรับค่าได้ทั้ง 3 ตัว บันทึกผล
 $V_{R3} = \dots\dots\dots$
 $V_{R2} = \dots\dots\dots$
 $V_{R3} = \dots\dots\dots$
4. วัดแรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับวงจร จุดที่ 2, 3, 4, เทียบกับจุดที่ 1 บันทึกผล
5. ปรับออสซิลโลสโคปให้ CH1 = 20 mV/div ; CH2 = 5 mV/div
6. ตั้ง Function Gen. ให้ป้อนสัญญาณ sine = 40 mV_{p-p} ความถี่ 1 kHz
7. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณที่จุด 2, จุด 3 และจุดที่ 4 ในขณะที่ R3 และ R6 ถูกลัดวงจร บันทึกรูปสัญญาณ



สัญญาณ จุดที่ 2



สัญญาณ จุดที่ 3



สัญญาณ จุดที่ 4

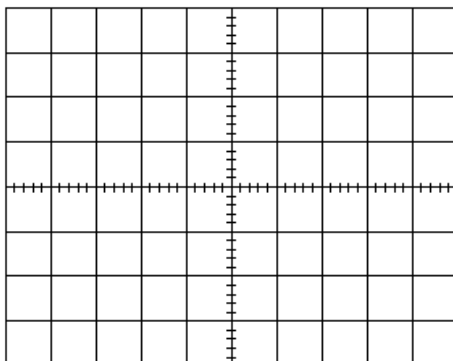
8. จากผลการวัดสัญญาณขณะที่ R3 และ R6 ถูกลัดวงจร คำนวณหาค่าอัตราขยายของวงจร

$$Av_1 = \dots\dots\dots$$

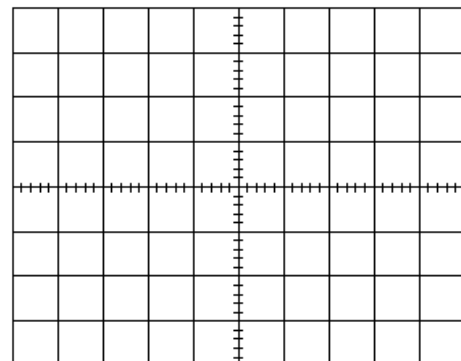
$$Av_2 = \dots\dots\dots$$

$$Av_t = \dots\dots\dots$$

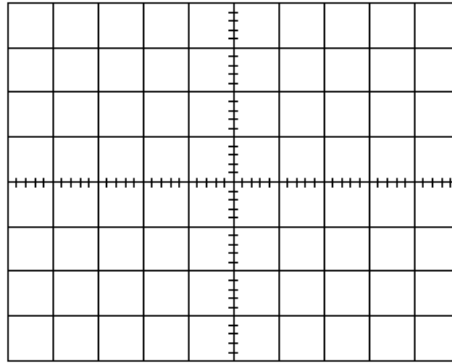
9. ทำตามขั้นตอน 4-7 ซ้ำอีกครั้งโดยต่อ R3 และ R6 ในวงจรโดยไม่ต้องลัดวงจร บันทึกผล



สัญญาณ จุดที่ 2



สัญญาณ จุดที่ 3



สัญญาณ จุดที่ 4

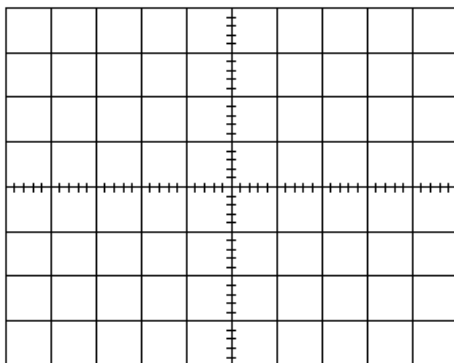
10. อัตราการขยายของวงจรที่มีความต้านทานที่ขา Emitter (ต่อ R3 และ R6)

$$Av_1 = \dots\dots\dots$$

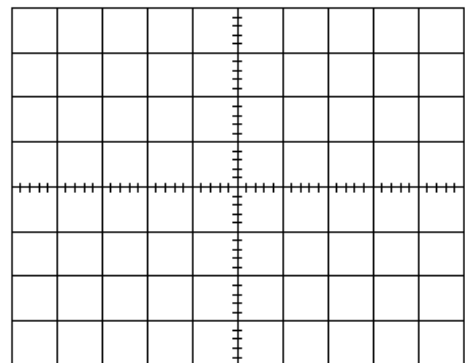
$$Av_2 = \dots\dots\dots$$

$$Av_t = \dots\dots\dots$$

11. วัดมุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตของแต่ละภาค



เอาต์พุต ภาคที่ 1



เอาต์พุต ภาคที่ 2

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามการทดลอง

1. การต่อตัวต้านที่ขา Emitter กับไม่ต่อตัวต้านทาน มีผลอย่างไรกับการทำงานของวงจรขยาย

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. อธิบายสัญญาณเอาต์พุตของ Av_1 , Av_2 , และ Av_t

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

	ใบงานที่ 8.2	หน่วยที่ 8
	รหัสวิชา 3105-1003 วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์	สอนครั้งที่ 2
	ชื่อหน่วย การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณหลายภาค (Multistage Amplifier Circuit)	คาบรวม 10
ชื่อเรื่อง	การเชื่อมต่อสัญญาณ (Coupling) แบบต่อตรงในวงจรขยาย สัญญาณหลายภาค	จำนวนคาบ 3

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. ต่วงจรขยายสัญญาณหลายภาคเพื่อทดลองตามใบงานได้อย่างถูกต้อง
2. วัด อ่านค่า แรงดันและกระแสในวงจรตามที่ใบงานกำหนดได้อย่างถูกต้อง
3. คำนวณหาค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายหลายภาคได้อย่างถูกต้อง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (จิตพิสัย) ที่มีการบูรณาการตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

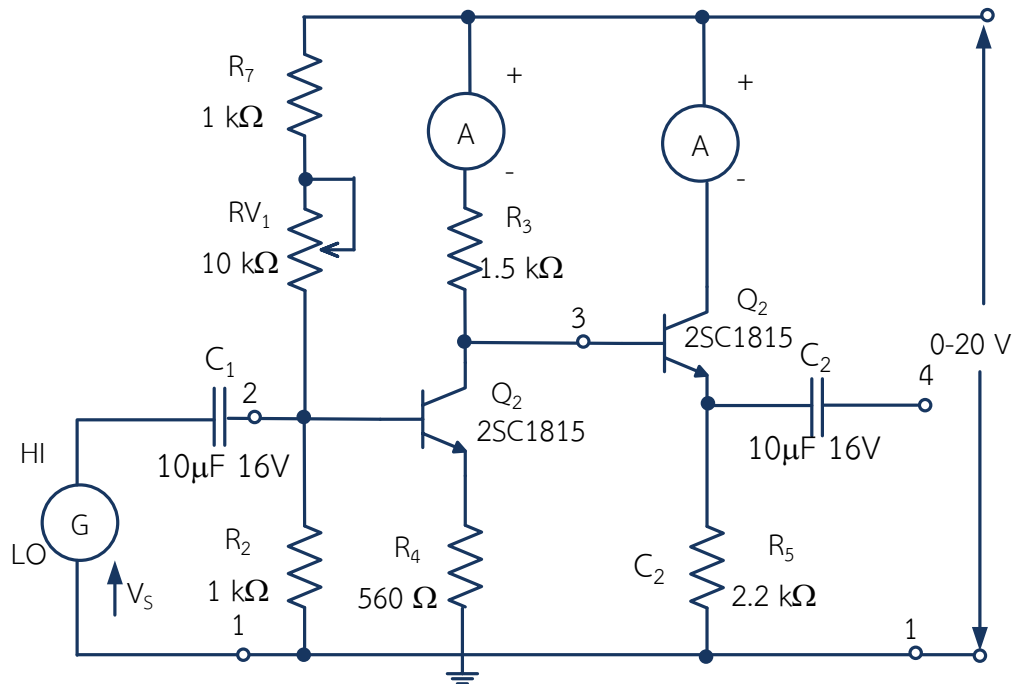
1. ความรับผิดชอบ
2. ความมีวินัย
3. การตรงต่อเวลา
4. ความมีมนุษยสัมพันธ์
5. ความรู้และทักษะวิชาชีพ
6. ความสนใจใฝ่หาความรู้
7. การพึ่งตัวเอง
8. มีความเพียร
9. รู้รักสามัคคี
10. การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | |
|---|-----------|
| 1. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์หรือแอนะล็อกมัลติมิเตอร์ | 2 เครื่อง |
| 2. แหล่งจ่ายไฟตรงแบบปรับค่าได้ 0-30 V 3 A | 1 เครื่อง |
| 3. ออสซิลอสโคป | 1 เครื่อง |
| 4. ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 5. ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ V_{R1} 10 k Ω , V_{R2} 1 k Ω อย่างละ | 1 ตัว |
| 6. ตัวต้านทานค่าคงที่ R_1 1 k Ω , R_2 1 k Ω , R_3 1.5 k Ω , R_4 560 Ω ,
R_5 2.2 k Ω อย่างละ | 1 ตัว |
| 7. ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 10 μ F 16 V อย่างละ | 1 ตัว |
| 8. ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2sc1815 | 2 ตัว |
| 9. แผงประกอบวงจรและสายต่อวงจร | 1 ชุด |

ลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติใบงาน

1. ต้องวงจรตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงวงจรประกอบการทดลองข้อที่ 1

2. กำหนดจุด Q - point โดยให้ $I_{CQ1} = 5 \text{ mA}$, $I_{CQ2} = 5.5 \text{ mA}$ และ $V_{ceq1} = 10 \text{ V}$, $V_{ceq2} = 9 \text{ V}$ วัดค่าความต้านทานไบอัส ของตัวต้านทานปรับค่าได้ V_{R1} และคำนวณค่า $R_1 = R_1 + V_{R1}$ เปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณได้ บันทึกผล

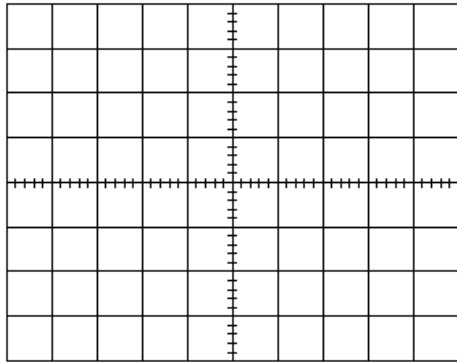
$$R_1 = \dots\dots\dots \Omega$$

3. คำนวณหาคุณสมบัติของวงจร A_{V1} , A_{V2} , A_{Vt}
4. สังเกตการเปลี่ยนแปลงของจุด Q- point ของ Q2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง V_{R1} บันทึกผล

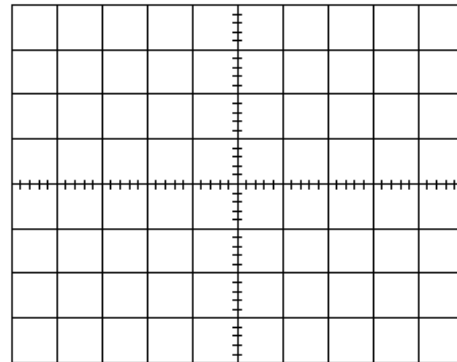
.....

.....

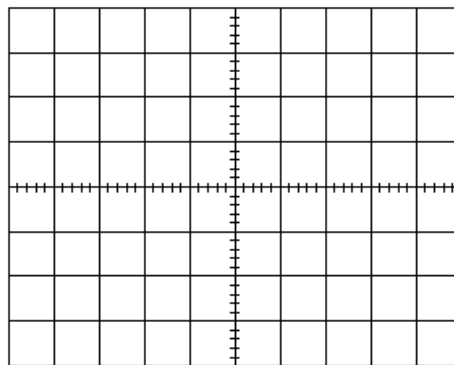
5. วัดแรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับวงจร จุดที่ 2, 3, 4, เทียบกับจุดที่ 1 บันทึกผล
6. ปรับออสซิลโลสโคปให้ CH1 = 20 mV/div ; CH2 = 5 mV/div ตั้ง Function Gen. ให้ป้อนสัญญาณ sine = 3 V_{p-p} ที่ความถี่ 1 kHz
7. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณที่จุด 2, จุด 3 และจุดที่ 4 บันทึกผลสัญญาณ



สัญญาณ จุดที่ 2



สัญญาณ จุดที่ 3



สัญญาณ จุดที่ 4

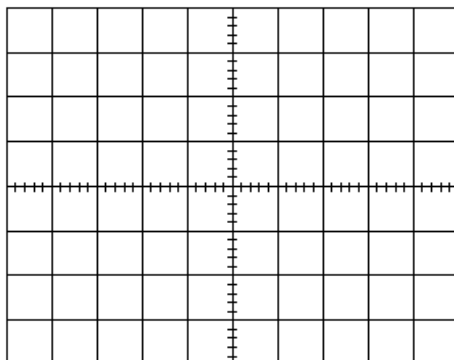
8. จากผลการวัดสัญญาณ คำนวณหาค่าอัตราขยายของวงจร

$$Av_1 = \dots\dots\dots$$

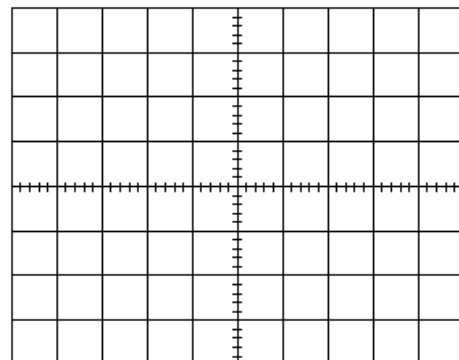
$$Av_2 = \dots\dots\dots$$

$$Av_t = \dots\dots\dots$$

9. วัดมุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตของแต่ละภาค



เอาต์พุต ภาคที่ 1



เอาต์พุต ภาคที่ 2

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามการทดลอง

1. เปรียบเทียบค่าอัตราขยายของวงจรที่ใช้การเชื่อมต่อโดยตรงกับวงจรที่ใช้การเชื่อมต่อโดยตัวเก็บประจุ

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้ของสัญญาณเอาต์พุต Av_1 , Av_2 , และ Av_t

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....