

Name	นายโสภณ สุสมบุรณ	Student ID	6201011631188	Section : <u>7</u>
Table		Period	Mon : 09.00 - 12.00	Semester
Lecturer	KPS			

วัตถุประสงค์ :

เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ และเข้าใจในเรื่องดังต่อไปนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) กระแสเบส (I_B) และแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของทรานซิสเตอร์ **BJT**
2. การคำนวณอัตราขยายกระแสดีซี (β_{dc})
3. การเขียนกราฟคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ **BJT**
4. การใช้เครื่อง **Curve Tracer** วัดค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ **BJT**
5. การจัดวงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์ **BJT**

อุปกรณ์การทดลอง :

- | | |
|---|-----------|
| 1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม LTspice IV | 1 ชุด |
| 2. ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N3904 | 1 ตัว |
| 3. ตัวต้านทาน 1 kΩ, 330 kΩ ค่าละ | 1 ตัว |
| 4. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบ Dual DC Power Supply | 1 เครื่อง |
| 5. มัลติมิเตอร์ | 2 เครื่อง |
| 6. แผงวงจร (Prototype Board) | 1 แผง |

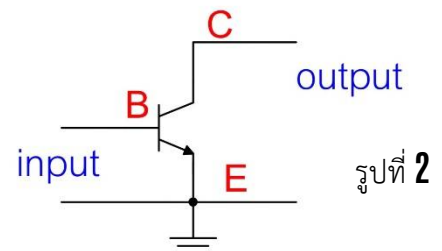
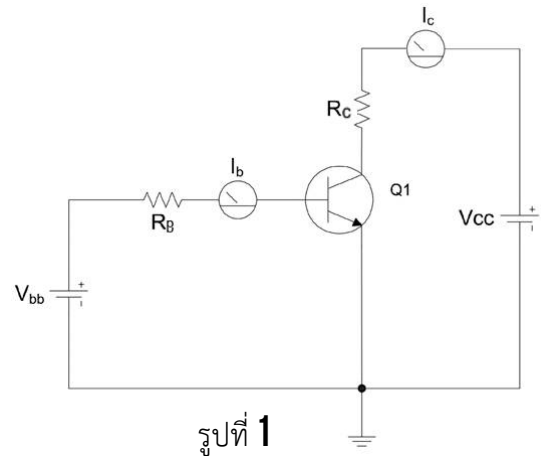
3.1 Bipolar Junction Transistor (BJT) Characteristic

ทฤษฎี

ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อยู่ในประเภท **Active Device** (ในขณะที่ R, L, C จัดเป็นอุปกรณ์ประเภท **Passive Device** หรือ **Lump Element**) ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้หากนำไปใช้งานจำเป็นจะต้องมีการนำแหล่งจ่ายกำลังไฟตรงมาจัดวงจรให้อยู่ในสภาพที่ตื่นตัว (**Active**) ก่อน จึงจะสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ ดังนั้นผู้ที่ออกแบบจำเป็นจะต้องรู้คุณสมบัติ รวมทั้งวิธีการที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ตื่นตัวด้วยการจัดวงจรไบอัส (**DC Bias** หรือการกำหนดจุดทำงาน **Operating Point**) ให้ถูกต้องเหมาะสมกับลักษณะของงานด้วย

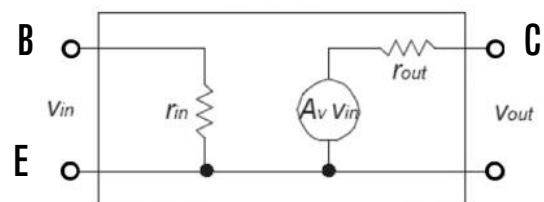
คุณสมบัติทางไฟกระแสตรงของ BJT

พื้นฐานการจัดวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์จะแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป้าหมายของการจัดวงจรเช่นนี้คือ ทำให้มีกระแสเบส I_b ไหลอยู่ ตลอดเวลาค่าหนึ่ง (ขึ้นอยู่กับเราว่าจะกำหนดเท่าใด) ส่งผลทำให้มี กระแสคอลเลคเตอร์ I_c ไหลด้วยเช่นกัน จากวงจรนี้สามารถหาค่าอัตราขยายกระแสดีซี β_{dc} ได้โดยคำนวณจากผลหารระหว่างกระแส I_c กับกระแส I_b ได้เป็น $\beta_{dc} = \frac{I_c}{I_b}$



คุณสมบัติทางไฟกระแสสลับของ BJT

จากการจัดวงจรในรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาวงจรจะพบว่าทางด้านอินพุตของวงจรประกอบด้วยขาเบส (B) และขาอิมิตเตอร์ (E) ส่วนทางเอาต์พุตประกอบด้วยขาอิมิตเตอร์และขาคอลเลคเตอร์ (C) ดังในรูปที่ 2 และนำมาเขียนเป็น **Thevenin's Equivalent** ในรูปที่ 3 โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อัตราการขยายแรงดัน **Voltage Gain** ($A_v = v_{out} / v_{in}$)



การหาค่าอัตราขยายกระแสเอซี (β_{ac})

ค่าอัตราขยายกระแสจะคำนวณจากกราฟคุณสมบัติเอาต์พุตโดยจะคำนวณโดยเริ่มจากการจัดวงจรเพื่อให้ค่าของแรงดันไบอัส V_{ce} เปลี่ยนได้หลาย ๆ ค่า แล้วทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์ (ΔI_c) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบส (ΔI_b) โดยที่แรงดัน V_{CE} มีค่าคงที่ นั่นคือ

$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \bigg|_{V_{CE} \text{ constant}} = \frac{I_{c2} - I_{c1}}{I_{b2} - I_{b1}}$$

แต่ในทางปฏิบัติพบว่าปริมาณของกระแสคอลเลคเตอร์ส่งผลต่อค่าของ β_{ac} หรืออัตราขยายกระแสด้วย

วิธีการทดลอง I การพล็อตกราฟคุณสมบัติของ BJT

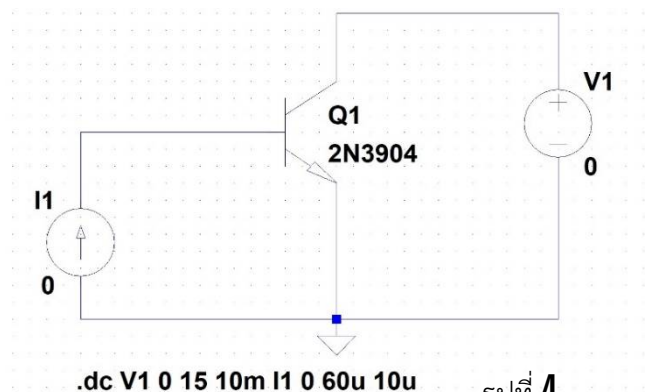
1. เขียนวงจรตามรูปที่ 4 เพื่อจำลองการทำงานด้วย LTspice IV ในโหมด DC Sweep

1.1 วิธีการกำหนดเบอร์ของทรานซิสเตอร์ Q1

- โดยคลิกปุ่มขวาของเมาส์บนตัวทรานซิสเตอร์กดปุ่ม **Pick New Transistor** ดังรูปที่ 5 และเลือกเป็นเบอร์ **2N3904**



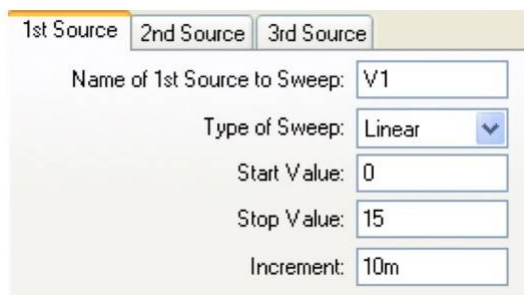
รูปที่ 5



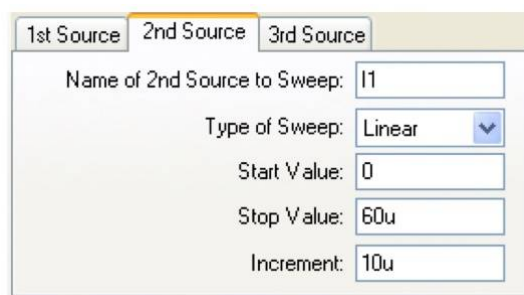
รูปที่ 4

1.2 วิธีการจำลอง กำหนดในเมนู **Simulate > Edit Simulation Cmd** ในโหมด **DC Sweep** และ

- กำหนดค่า **1st Source** เป็น **V1** และกำหนดค่าดังรูปที่ 6
- กำหนดค่า **2nd Source** เป็น **I1** และกำหนดค่าดังรูปที่ 7



รูปที่ 6

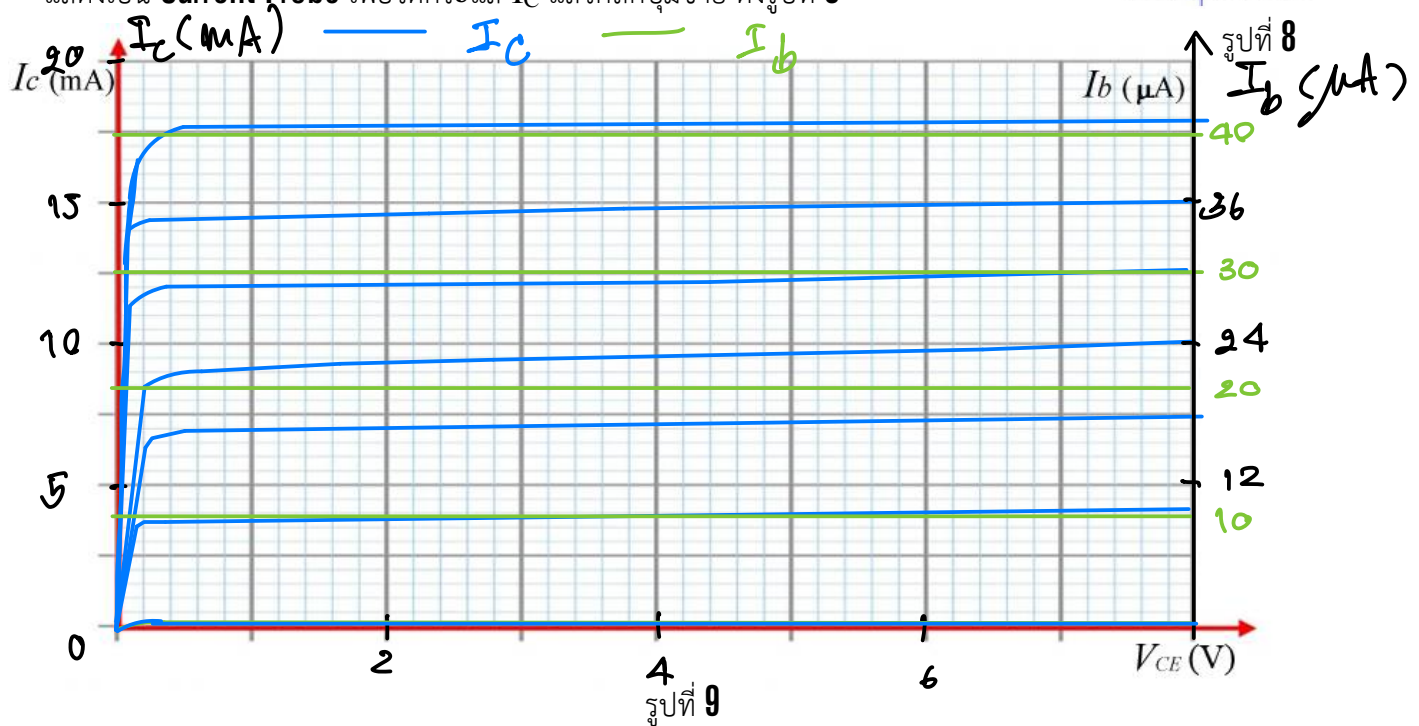
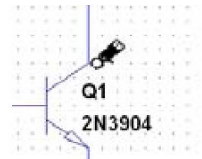


รูปที่ 7

วิธีการวัดค่าเพื่อพล็อตกราฟคุณสมบัติของ BJT

- เมื่อกดปุ่ม Run แล้วให้เลื่อนเมาส์ไปที่ขา C ของทรานซิสเตอร์จน CURSOR

แสดงเป็น Current Probe เพื่อวัดกระแส I_C แล้วคลิกปุ่มซ้าย ดังรูปที่ 8

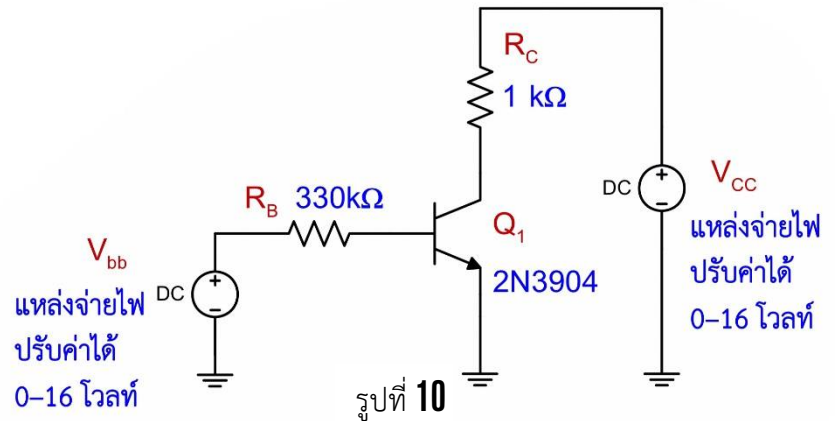


2. บันทึกกราฟที่ได้ในรูปที่ 9

3. ให้เลือกตัวต้านทานจากกล่องอุปกรณ์ ค่าตามที่ได้แสดงไว้ในวงจรรูปที่ 10 มาวัดค่าจริงด้วยโอห์มมิเตอร์

- ตัวต้านทาน R_C 1 k Ω (แถบสี น้ำตาล ดำ แดง ทอง) วัดค่าด้วยโอห์มมิเตอร์ =
- ตัวต้านทาน R_B 330 k Ω (แถบสี ส้ม ส้ม เหลือง ทอง) วัดค่าด้วยโอห์มมิเตอร์ =

4. ต่อยังจตามรูปที่ 10 ลงบนโปรโตบอร์ด



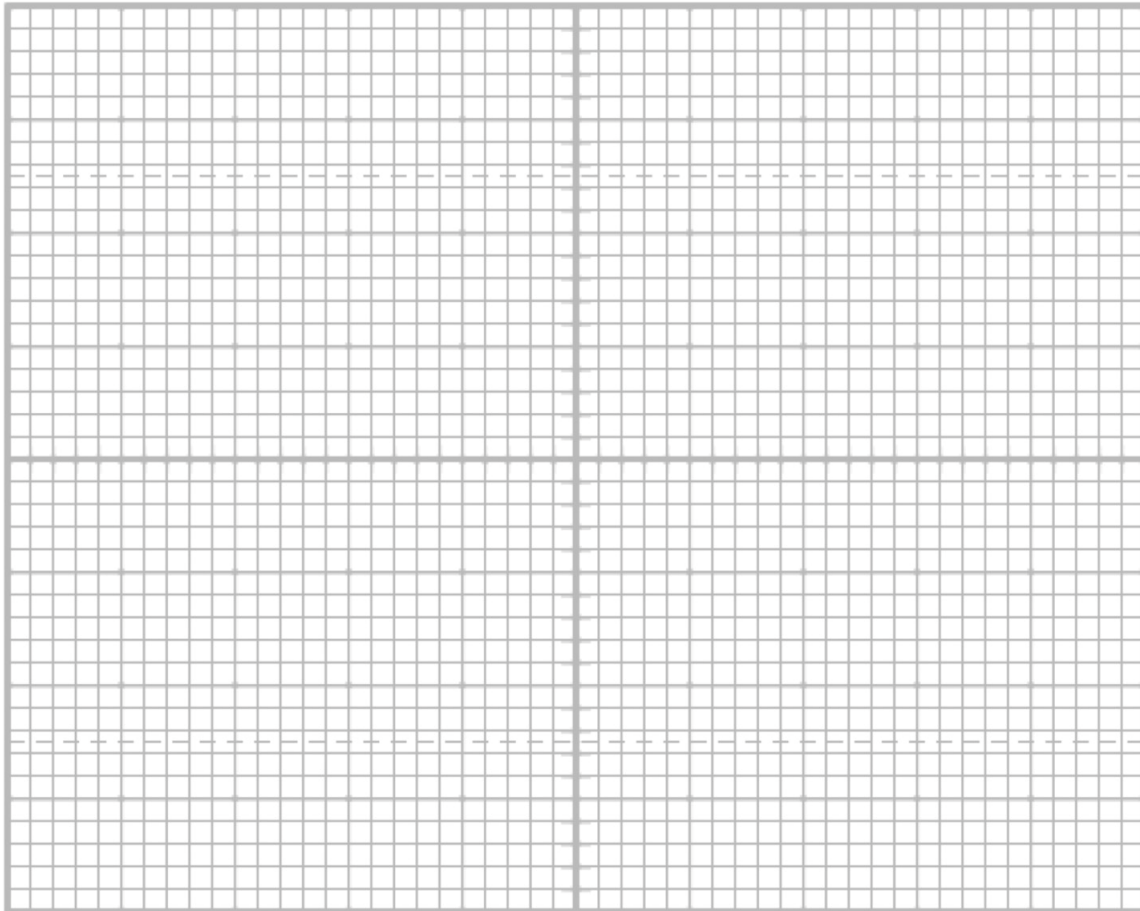
(น.ศ. ควรตรวจสอบขาทรานซิสเตอร์ก่อนต่อวงจรเนื่องจากตำแหน่งขาของทรานซิสเตอร์ของแต่ละผู้ผลิตอาจแตกต่างกัน)

5. ป้อนแรงดันไฟเลี้ยง V_{bb} ให้กับวงจร โดยตั้งค่าไว้ประมาณ 3 โวลต์
6. ใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดัน V_{RB} ซึ่งตกคร่อม R_B จากนั้นปรับ V_{bb} จนกระทั่งแรงดัน V_{RB} มีค่าประมาณ 3.3 V (ปรับให้ได้ค่ากระแสเบสประมาณ $I_B = V_{RB} / R_B = 10 \mu A$ โดยคำนึงถึงค่าตัวต้านทานที่วัดได้ในข้อ 3 ด้วย)
7. ป้อนแหล่งจ่าย V_{CC} ให้วงจร และใช้โวลต์มิเตอร์วัดแรงดัน V_{CE} ระหว่างขา **C** และ **E** ทำการปรับ V_{CC} จนทำให้ V_{CE} ของทรานซิสเตอร์มีค่าเป็น 2 V
8. ใช้โวลต์มิเตอร์ทำการวัดแรงดันตกคร่อม R_C (V_{RC}) และบันทึกค่าที่ได้ในตารางที่ 1
9. ทำการทดลองในข้อ 6 – 8 ตามค่าที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ **1**

V_{R_B} (V) วัดค่า	I_B (μ A) คำนวณ	V_{CE} (V) วัดค่า	V_{R_C} (V) วัดค่า	I_C (mA) คำนวณ	β คำนวณ
3.3	10	2			
3.3	10	4			
3.3	10	6			
3.3	10	8			
3.3	10	10			
3.3	10	12			
3.3	10	14			
3.3	10	16			
6.6	20	2			
6.6	20	4			
6.6	20	6			
6.6	20	8			
6.6	20	10			
6.6	20	12			
6.6	20	14			
9.9	30	2			
9.9	30	4			
9.9	30	6			
9.9	30	8			
9.9	30	10			
13.2	40	2			
13.2	40	4			
13.2	40	6			
13.2	40	8			
16.5	50	2			
16.5	50	4			
16.5	50	6			

บันทึกผลการจำลอง (การพล็อตกราฟในแต่ละแกนขอให้ น.ศ. ระบุตัวแปรของหน่วยของค่าที่วัดได้)



รูปที่ 11

วิเคราะห์ผลการทดลอง จากกราฟในรูปที่ 11 (ให้อธิบายจุดทำงานของไดโอด เช่น ON, Cutoff, ส่วนใดของกราฟที่บ่งบอกความเป็น r_{ac} , R_{dc} โดยให้ น.ศ. เลือกจุดบนกราฟมา 1 จุดเพื่อแสดงวิธีการหาค่าดังกล่าว)

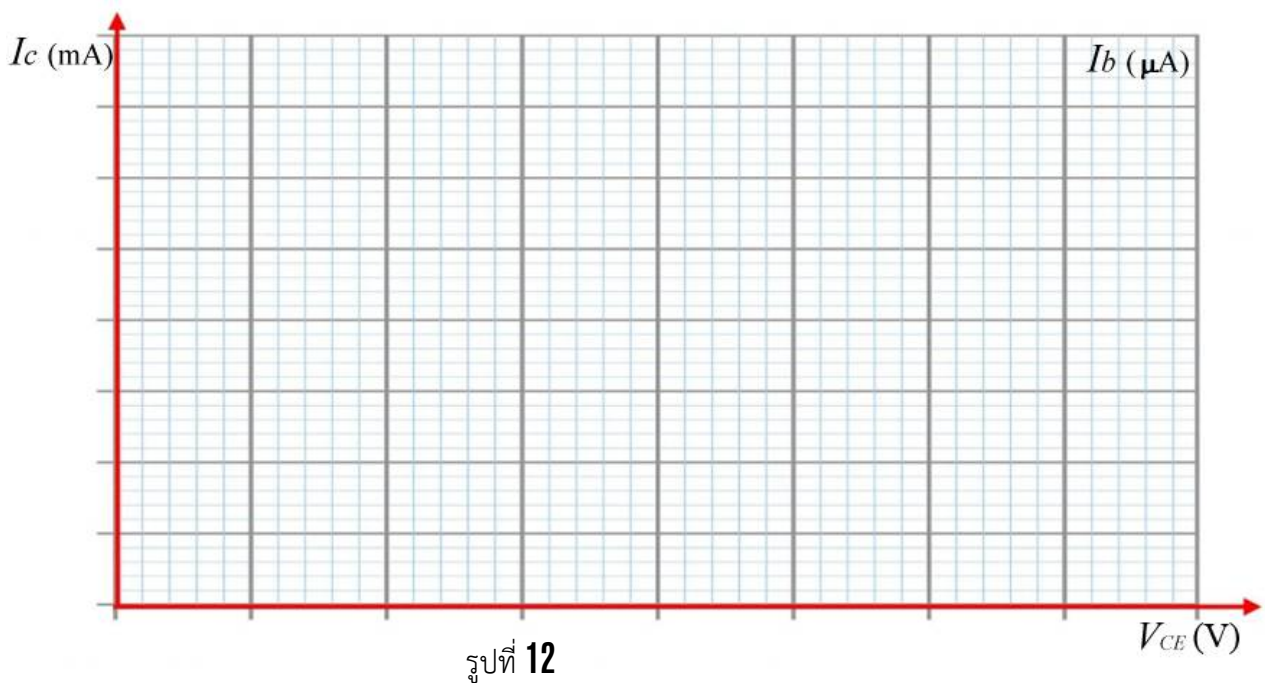
(แนะนำให้เปรียบเทียบ **VI-Curve** ระหว่างตัว R กับ Diode จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน)

10. คำนวณค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) จากสูตร $I_C = \frac{V_{RC}}{R_C}$ โดยใช้ค่าของ R_C ที่วัดได้จากข้อ 3

11. นำค่า I_C , V_{CE} และ I_B ที่ได้จากตารางที่ 1 ไปวาดกราฟของคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 12 โดย

- ให้ค่ากระแสคอลเลคเตอร์ I_C เป็นแกนตั้ง
- ให้แรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ V_{CE} เป็นแกนนอน
- เส้นกราฟแต่ละเส้นแสดงค่าของกระแส I_B ซึ่งจะมีค่าต่างกัน จำนวน 5 เส้น
- พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C และ V_{CE} ที่ค่ากระแสเบส I_B ต่าง ๆ บนระนาบ X - Y

(น.ศ. ดูแนวทางการเขียนกราฟได้จากผลการจำลองในรูปที่ 9)



.....ลายเซ็นอาจารย์ผู้ควบคุม

หมายเหตุ ให้ น.ศ. กำหนดค่าสเกลของแต่ละแกนกราฟตามความเหมาะสมที่จะทำให้สามารถอ่านค่าจากกราฟได้อย่างเหมาะสม

3.2 วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสกลับ

วัตถุประสงค์ เพื่อให้ผู้เรียนมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องดังต่อไปนี้

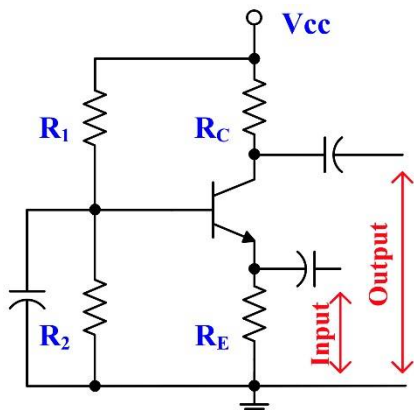
1. พื้นฐานการจัดวงจรเพื่อกำหนดจุดทำงาน (Operating Point) ให้กับทรานซิสเตอร์
2. การจัดวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter Amplifier)
3. การจัดวงจรขยายแบบคอลเลคเตอร์ร่วม (Common Collector Amplifier)
4. การจัดวงจรขยายแบบเบสร่วม (Common Base Amplifier)

เครื่องมือและอุปกรณ์

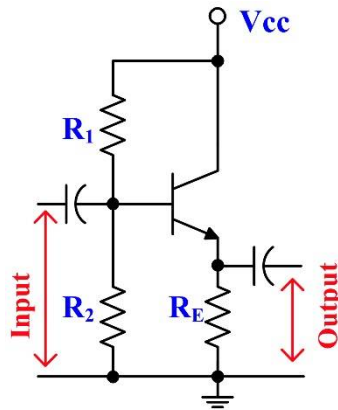
- | | |
|---|-------------|
| 1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม LTspice IV | 1 ชุด |
| 2. ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N3904 | 1 ตัว |
| 3. ตัวต้านทาน 12 Ω , 20 Ω , 30 Ω , 39 Ω , 56 Ω , 10 k Ω , 11 k Ω , 18 k Ω , 27 k Ω | ค่าละ 1 ตัว |
| 4. ตัวต้านทาน 1.2 k Ω | ค่าละ 2 ตัว |
| 5. ตัวเก็บประจุ 220 μ F | 2 ตัว |
| 6. ตัวเก็บประจุ 47 μ F (หรือใช้ค่ามากกว่านี้ก็ได้) | ค่าละ 1 ตัว |
| 7. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแบบปรับค่าได้ | 1 เครื่อง |
| 8. มัลติมิเตอร์ | 2 เครื่อง |
| 9. ออสซิลโลสโคป | 1 เครื่อง |
| 10. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) | 1 เครื่อง |
| 11. แผงวงจร (Prototype Board) | 1 แผง |

ทฤษฎี

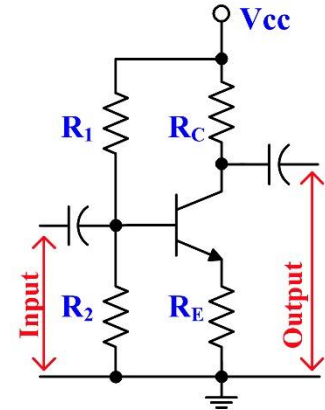
การจัดวงจรให้ทรานซิสเตอร์แบบ BJT ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณไฟกระแสสลับสามารถจัดวงจรได้ 3 รูปแบบ คือ วงจรขยายแบบอิมิตอร์ร่วม (Common Emitter Amplifier) วงจรขยายแบบคอลเลคเตอร์ร่วม (Common Collector Amplifier) และวงจรขยายแบบเบสร่วม (Common Base Amplifier) ดังรูปที่ 13



วงจรขยายแบบเบสร่วม



วงจรขยายแบบคอลเลคเตอร์ร่วม

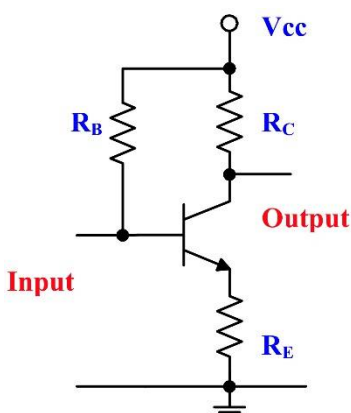


วงจรขยายแบบอิมิตอร์ร่วม

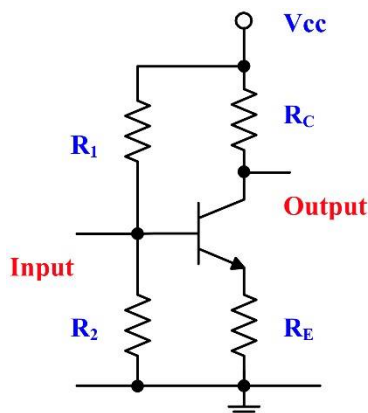
รูปที่ 13

วงจรขยายแบบอิมิตอร์ร่วม (Common Emitter Amplifier)

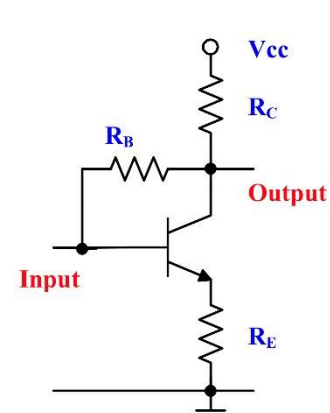
ข้อเด่นของวงจรขยายแบบอิมิตอร์ร่วม คือ มีอัตราขยายแรงดัน (A_v) ที่สูง แต่การที่มีอัตราขยายแรงดันที่สูงนี้ กลับส่งผลกระทบต่อความเสถียร (Stability) จึงได้มีการออกแบบวงจรขยายแบบอิมิตอร์ร่วมที่มีหลากหลายเทคนิคเพื่อให้ได้ทั้งอัตราขยายแรงดันขยายที่สูงและความเสถียรที่สามารถยอมรับได้ในเวลาเดียวกัน ส่วนการจัดวงจรที่นิยมมีอยู่หลายแนวทาง ดังแสดงในรูปที่ 14 ซึ่งแต่ละวงจรก็จะมีจุดเด่น จุดด้อยที่แตกต่างกัน



Common Emitter Amplifier with Emitter Stabilized Bias



Common Emitter Amplifier with Voltage Divider Bias



Common Emitter Amplifier with Collector Feedback Bias

รูปที่ 14

พื้นฐานการออกแบบวงจรขยายแบบ Common Emitter Amplifier with Voltage Divider Bias

ข้อกำหนดพื้นฐานของการออกแบบวงจรคือ

- แรงดัน $V_{BE} = 0.6 - 0.7 \text{ V}$ สำหรับทรานซิสเตอร์แบบซิลิกอน
- เมื่อทรานซิสเตอร์ทำงานในแบบ **Current Amplification** จะมีค่า β สูง (โดยทั่วไป $\approx 100 - 300$)
- เนื่องจาก $I_C \gg I_B$ ดังนั้นอาจจะประมาณค่า $I_C = I_E$ ได้

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณมีได้หลายแนวทาง แต่ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้ลำดับขั้นตอนคล้าย ๆ กันดังนี้

- กำหนดหรือเลือกค่าแรงดันแหล่งจ่าย V_{CC} ที่เราต้องการ
- เลือกเบอร์ ชนิดทรานซิสเตอร์ และ ค่าของ β จาก **Data Sheet** ของผู้ผลิต
- จากข้อมูลใน **Data Sheet** ให้เลือกค่ากระแส $I_{C(SAT)} \leq I_{C(MAX)}$
(โดยปกติใน **Data Sheet** ค่าของ $I_{C(MAX)}$ จะเกิดขึ้นเมื่อ $V_{CE} \approx 0.2 \text{ V}$ ขณะทำงานในช่วงอิ่มตัว)
- กำหนดค่า I_{CQ} (กระแส I_C ที่จุด **Q point**) โดยให้ $I_{CQ} \leq 0.5 I_{C(SAT)}$
- กำหนดค่าของ V_{CE} โดยให้มีค่าอยู่ในช่วง $0.33 V_{CC} \leq V_{CE} \leq 0.5 V_{CC}$ (สำหรับ **Class A**)
- กำหนดแรงดัน V_E (แรงดันตกคร่อม R_E) ให้มีค่าเป็น $V_E = 0.1 V_{CC}$ (หรือ $0.1 V_{CC} \leq V_E \leq 0.2 V_{CC}$)
- คำนวณหา R_E จากค่า V_E และ I_E
- คำนวณหา R_C จากค่า V_{RC} และ I_C โดยที่ $V_{RC} = V_{CC} - V_{CE} - V_E$
- คำนวณหา R_2 โดย $R_2 = 0.1 \beta R_E$ (หรือให้อยู่ในช่วง $0.1 \beta R_E \leq R_2 \leq 0.2 \beta R_E$)
- คำนวณหา V_B โดย $V_B = V_{BE} + V_E$
- คำนวณหา R_1 โดย

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{CC} - V_B}{V_B} \right)$$

คำนวณหาค่าอื่น ๆ ตามต้องการ (หากจำเป็นหรืออยากรู้รายละเอียด) เช่น I_B , I_E , I_{R1} และ I_{R2} เป็นต้น

ตัวอย่างการออกแบบวงจรขยายแบบ Common Emitter Amplifier with Voltage Divider Bias

การวิเคราะห์ที่โฟตรงสำหรับกำหนดจุดทำงานให้ทรานซิสเตอร์

ตัวอย่างนี้เป็นหนึ่งในหลาย ๆ แนวทางที่นิยมใช้ในการออกแบบวงจรแบบอิมิตอร์ร่วม อาจจะไม่เหมาะสมต่อ

วงจรขยายชนิดอื่น ๆ

ขั้นตอนที่ 1 : เลือกทรานซิสเตอร์เบอร์ **2N3904** ซึ่งข้อมูลจาก **Data sheet** พบว่า

- $h_{fe} (\beta)$ มีค่าในช่วง 100 - 300 (เมื่อกระแส I_C ประมาณ 10 mA)

เราจะกำหนดค่าไว้เป็น $\beta = 200$ (เลือกออกแบบที่ค่ากึ่งกลาง)

- V_{CEO} (Maximum) 40V เพื่อความปลอดภัยต้องมีค่า $V_{CC} \leq 0.5V_{CEO}$
เราจะกำหนดไว้เป็น **15V** (ถ้าจะใช้กับแบตเตอรี่ก็เลือกเป็น 12 V)

- I_C (Maximum) 200 mA แต่เนื่องจากค่าทดสอบของผู้ผลิตอยู่ที่ประมาณ

1 - 10 mA เราจึงเลือกให้ $I_C = 4$ mA ซึ่งอยู่ใกล้ ๆ กึ่งกลางและไม่มากเกินไป

(การเลือกให้ $I_C = 4$ mA จะทำให้ได้ $I_B = 20$ μ A เพราะ $\beta = 200$ ขนาด

สัญญาณ I_B น่าจะโตพอที่เราสามารถวัดดูค่าได้ชัดเจนด้วยเครื่องมือที่มีอยู่)

- $V_{CE(sat)}$ 0.2V (เมื่อกระแส I_C ประมาณ 10 mA) เราเลือกให้ $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ตาม **Data Sheet**

- $V_{BE(sat)}$ 0.65 - 0.85 V (เมื่อกระแส I_C ประมาณ 10 mA) เราจะกำหนดค่าไว้เป็น **0.70 V**

***** นักศึกษาควรเปิดเอกสาร **Data Sheet** อ่านประกอบไปด้วยจะช่วยฝึกการอ่าน **Data Sheet** ให้ชำนาญขึ้น *****

ขั้นตอนที่ 2: หาค่า I_B $I_B = I_C / \beta = 4 \text{ mA} / 200 = 20 \text{ } \mu\text{A}$

ขั้นตอนที่ 3: กำหนดค่าของ V_{CE} ในที่นี้เราเลือกให้ค่า V_{CE} มีค่าเป็น **1** ใน **3** ของแหล่งจ่าย

นั่นคือ

$$\frac{V_{CC}}{3} < V_{CE} < \frac{V_{CC}}{2} \text{ เราจึงเลือกให้ค่า } V_{CE} = 5V$$

ขั้นตอนที่ 4: หาค่า R_C

ในตัวอย่างนี้เป็นกรณีที่เราเลือกให้แรงดัน $V_{RE} = V_{RC}$ ทำให้ได้ $R_C = R_{E1} + R_{E2}$ ด้วย

$$\text{ดังนั้น } I_C(R_C + R_{E1} + R_{E2}) + V_{CE} = V_{CC}$$

$$\text{หรือ } R_C = \left(\frac{V_{CC} - V_{CE}}{2I_C} \right)$$

$$R_C = \left(\frac{15 - 5}{2 \times 0.004} \right) = 1250 \text{ } \Omega$$

โดยค่าความต้านทานที่มีขายในท้องตลาดคือ **1.2 k Ω** เราจึงเลือกค่า $R_C = 1.2 \text{ k}\Omega$

เราจึงเลือกใช้ $R_C = R_{E1} + R_{E2} = 1.2 \text{ k}\Omega$

ดังนั้นแรงดันตกคร่อม $R_{E1} + R_{E2}$ และ R_C จึงมีค่าเป็น

$$\frac{(V_{CC} - V_{CE})}{2} = \left(\frac{15 - 5}{2} \right) = 5 \text{ V}$$

ขั้นตอนที่ 5: หาค่า R_1 และ R_2

ก) R_1 และ R_2 เป็นวงจรแบ่งแรงดัน เพื่อป้อนให้กับขา B ของทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมด **Active** ต้องมีค่า V_{BE} เป็น **0.7 V** (ค่าจาก **Data Sheet**)

ข) การทำงานของวงจรแบ่งแรงดันนี้ต้องเสถียร (กระแสที่ไหลผ่านวงจรแบ่งแรงดันไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหากกระแส I_C เกิดการเปลี่ยนแปลง)

ดังนั้น ค่าของตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ในวงจรแบ่งแรงดันนี้จะต้องสูงกว่าค่าของ R_C , R_{E1} และ R_{E2}

จากรูปที่ 17 $I_1 = I_2 + I_B$

V_{CC}

และ $V_{BE} + V_E = I_2 R_2$ หรือ $0.7V + 5V = I_2 R_2$

$\therefore V_{BE} = 5.7V$

R_1

แต่ $(I_2 + I_B)R_1 + I_2 R_2 = V_{CC} = 15V$

I_1

$(I_2 + I_B)R_1 + 5.7V = 15V$

I_B

$(I_2 + I_B)R_1 = 9.3V$

I_2

V_E

เพื่อให้แน่ใจว่าวงจรแบ่งแรงดันจะมีความเสถียร จึงเลือกให้ค่าของ $I_2 \gg I_B$

ในที่นี้เลือกให้ $I_2 = 25I_B$ และ $I_1 = 0.52 \text{ mA} \cong 0.5 \text{ mA}$

ดังนั้น $I_2 = 25 \times 20 \mu A = 0.5 \text{ mA}$

R_{E1}

R_{E2}

จึงได้ค่า $R_1 = \frac{9.3V}{0.5 \text{ mA}} = 18.6 \text{ k}\Omega$

ในที่นี้เราเลือกค่า R (ที่มีในห้องแล็บ) เป็น **18 k Ω**

รูปที่ 17

$R_2 = \frac{5.7V}{0.5 \text{ mA}} = 11.4 \text{ k}\Omega$

V_{CC}

ในที่นี้เราเลือกค่า R (ที่มีในห้องแล็บ) เป็น **11 k Ω**

R_1
18 k Ω

R_C
1.2 k Ω

V_C

V_E

R_2
11 k Ω

R_{E1}

R_{E2}

รูปที่ 18

การวิเคราะห์เฟสสำหรับกำหนดอัตราการขยายสัญญาณไฟกระแสลับ (Gain)

จากวงจรในรูปที่ 18 จะถูกนำมาดัดแปลงเพิ่มเติมอุปกรณ์เข้าไปอีก 4 ตัวเพื่อให้สามารถใช้งานกับสัญญาณกระแสลับแสดงดังรูปที่ 19

- C_{in} ทำหน้าที่เป็นคัปปลิงคาปาซิเตอร์ (Coupling Capacitor)

ด้านอินพุตที่จะยอมให้เฉพาะส่วนของไฟกระแสลับเท่านั้นผ่านจาก

V_{in} เข้ามาในวงจรได้

- C_{out} ทำหน้าที่เป็นคัปปลิงคาปาซิเตอร์ (Coupling Capacitor)

ด้านเอาต์พุตที่จะยอมให้เฉพาะส่วนของไฟกระแสลับเท่านั้น

ผ่านออกจากวงจรไปยังด้าน V_{out} ได้

- C_E ทำหน้าที่เป็นบายพาสคาปาซิเตอร์ (Bypass Capacitor)

ที่ขาอิมิตอร์มันจะเป็นเส้นทางลัดให้เฉพาะส่วนของไฟกระแสลับไหลลงกราวด์ได้โดยไม่ต้องผ่าน R_{E2}

- R_{E1} ทำหน้าที่ตัวกำหนดอัตราการขยายแรงดันไฟสลับ (AC Voltage Gain) ของวงจร

ขั้นตอนที่ 1: การเลือกค่า R_{E1}

ก) พิจารณากระแส i_{in} และแรงดัน V_{in}

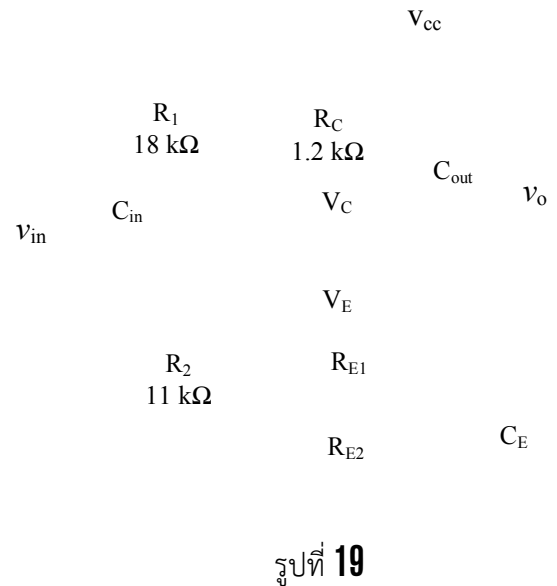
เนื่องจาก V_{in} ถูกป้อนในหัววงจรในสถานะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่แล้วในโหมด **Active** จึงทำให้ไม่มีแรงดัน V_{in} ที่จะตกคร่อม **p-n junction** ขา **B** และ **E** ดังนั้นในรูปของกระแสอินพุตจึงเขียนได้เป็น

$$\text{ดังนั้น } v_{in} = i_{in}R_{in} = i_b r_{\pi} + (i_b + \beta i_b)R_{E1}$$

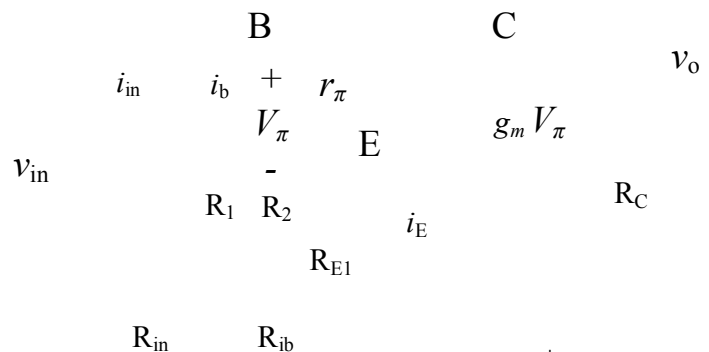
$$\text{โดยที่ } R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{ib}$$

$$\text{เมื่อ } R_{ib} = r_{\pi} + (1 + \beta)R_{E1}$$

$$r_{\pi} = \frac{V_T \beta}{I_C} = \frac{0.026 \times 200}{4} = 1.3 \text{ k}\Omega$$



รูปที่ 19



รูปที่ 20

ข) พิจารณาแรงดัน v_{out}

เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของไฟกระแสสลับซึ่งตัวแบตเตอรี่ V_{CC} จะมีสถานะเหมือนลัดวงจรลงกราวด์ ดังนั้นจะพบว่า

$$v_{out} = -(\beta i_b) R_C$$

เมื่อ $(1+\beta)R_{E1} \gg r_\pi$ และแทนค่า i_b จากข้อ ก) แล้วจะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{R_C}{R_{E1}} = \text{AC Voltage Gain}$$

ในการทดลองนี้เราจะลองกำหนดให้วงจรขยายมีค่าเป็น **30** เท่านั้นคือ

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = 30$$

จึงหาค่า R_{E1} ได้เป็น $R_{E1} = \frac{R_C}{\text{gain}} = \frac{1200}{30} = 40 \Omega$ ในที่นี้เราเลือกค่า R_{E1} (ที่มีในห้องแลบ) เป็นค่า **39 Ω**

จากค่า $R_{E1} + R_{E2}$ ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ของการวิเคราะห์ไฟตรงจะได้ว่า

$$1200 = 40 + R_{E2}$$

$$R_{E2} = 1.16 \text{ k}\Omega$$

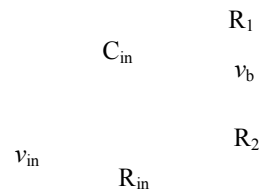
ดังนั้นจึงได้ว่า

$$R_{ib} = 9.139 \text{ k}\Omega$$

และ

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

รูปที่ 21



ขั้นตอนที่ 2: การเลือกค่า C_{in} และ C_{out}

การเลือกค่าของ C_{in} ทำได้โดยพิจารณาจากวงจรด้านอินพุตดังรูปที่ 21

ตัวต้านทาน R_{in} และ C_{in} ต้องวงจรร่วมกันเป็นวงจรแบ่งแรงดัน ทำให้สามารถหาแรงดันตกคร่อม C_{in} ได้เป็น

$$|v_{C_{in}}| = |v_{in}| \frac{\frac{1}{\omega C_{in}}}{\sqrt{R_{in}^2 + \frac{1}{\omega^2 C_{in}^2}}}$$

โดย $\omega = 2\pi f$

และค่าความต้านทานต่อไฟฟ้ากระแสสลับของ C_{in} หาได้จาก $x_c = \frac{1}{2\pi f C_{in}}$

การเลือกค่า C_{in} จึงขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่เราต้องการให้ผ่านเข้าสู่วงจรขยาย ในที่นี้เราจะ

พิจารณาที่ความถี่ **20 Hz (สมมติให้วงจรนี้ใช้ขยายสัญญาณความถี่เสียง)**

สัญญาณอินพุตความถี่ **20 Hz** จะต้องทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ C_{in} ไม่เกิน **1%** ของ V_{in} นั่นคือ

$$\text{ดังนั้น } v_{C_{in}} = 0.01v_{in}$$

$$0.01 = \frac{v_{C_{in}}}{v_{in}} = \frac{\frac{1}{\omega C_{in}}}{\sqrt{R_{in}^2 + \frac{1}{\omega^2 C_{in}^2}}} = \frac{\frac{1}{(2\pi \times 20)C_{in}}}{\sqrt{3900^2 + \frac{1}{(2\pi \times 20)^2 C_{in}^2}}}$$

เมื่อแก้สมการจะทำให้ได้ C_{in} ประมาณ **204 μF** ในที่นี้เราสามารถหาค่า C_{in} ที่มีในห้องแลป ที่ค่ามากกว่านี้ได้

ในการทดลองนี้ให้ใช้ค่า **220 μF**

ส่วนค่า C_{out} ใช้หลักการหาเช่นเดียวกันกับ C_{in} ในที่นี้เราเลือกใช้เป็นค่าเดียวกันกับ C_{in} คือ **220 μF**

ขั้นตอนที่ 3 : การเลือกค่า C_E

เนื่องจากเราต้องการให้ตัวเก็บประจุที่ขาอีมิเตอร์ (C_E) ทำหน้าที่ลัดวงจร R_{E2} ในส่วนของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับของตัวเก็บประจุนี้จะต้องมีค่าต่ำ ๆ เมื่อเทียบกับ R_{E2} โดยค่าของ C_E หาได้จากสมการ

$$\text{โดยที่ } C_E = \frac{\tau}{R_{E2}}$$

$$f = 20\text{Hz}, \quad \tau = \frac{1}{f} \text{ และ } R_{E2} \approx 1200 \Omega$$

$$C_E = \frac{0.05}{1200} = 41.67 \mu F$$

ในที่นี้เราเลือกใช้ C_E ให้มีค่า **47 μF** หรือสูงกว่า (ปัจจัยที่นำมาพิจารณาคือราคาของตัวเก็บประจุ)

เมื่อได้ค่าอุปกรณ์ทุกตัวครบแล้ว จึงทำการทดลองต่อวงจรเพื่อทดสอบการทำงานของวงจรต่อไป

วิธีการทดลอง | จำลองการทำงานของวงจรด้วย LTspice IV

1. เขียนวงจรตามรูปที่ 22 ด้วยโปรแกรม LTspice IV โดยใช้ค่าของอุปกรณ์ R_1 , R_2 , R_C , R_{E1} , R_{E2} , C_{in} , C_{out} และ C_E ที่ได้จากการออกแบบวงจร (หน้าที่ 11 - 16)

2. จำลองการทำงานในโหมด DC op pnt (DC Operating Point) บันทึกค่า

แรงดันไบอัสของวงจร

$$R_C = 1.2 \text{ k}\Omega \quad R_{E1} = 39 \text{ }\Omega \quad R_{E2} = 1.16 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 18.6 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 11.4 \text{ k}\Omega \quad C_{in} = 220 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C_{out} = 220 \text{ }\mu\text{F} \quad C_e = 47 \text{ }\mu\text{F}$$

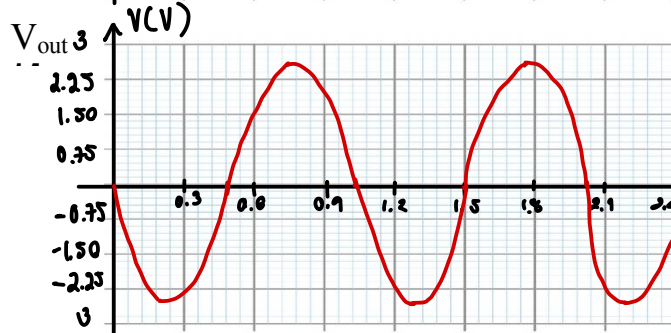
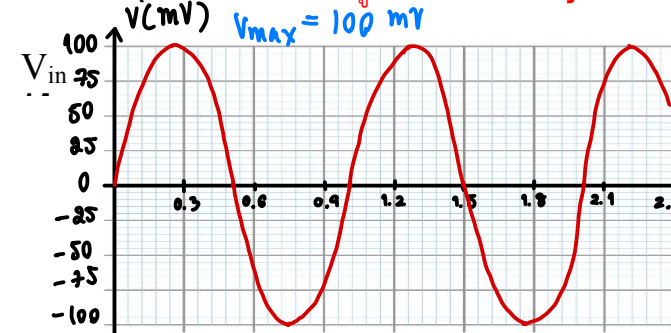
$$V_c = 10.096 \text{ V} \quad V_e = 4.91 \text{ V} \quad V_b = 5.607 \text{ V}$$

$$I_{RC} = 4.08 \text{ mA} \quad I_{RE2} = 4.09 \text{ mA} \quad I_b = 20 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_{R1} = 0.5 \text{ mA} \quad I_{R2} = 0.49 \text{ mA} \quad \beta_{Q\text{-point}} = 200$$

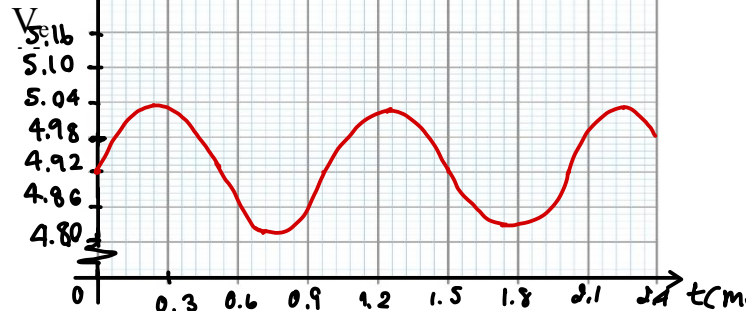
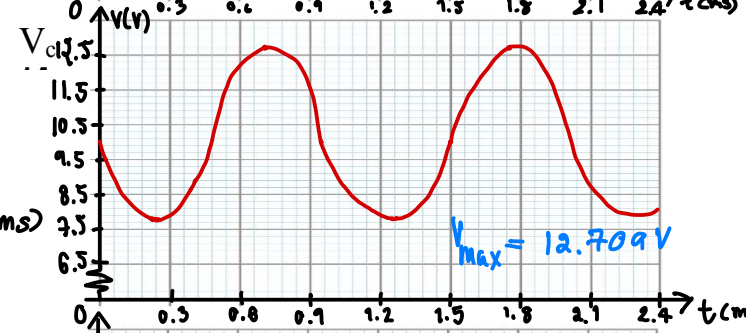
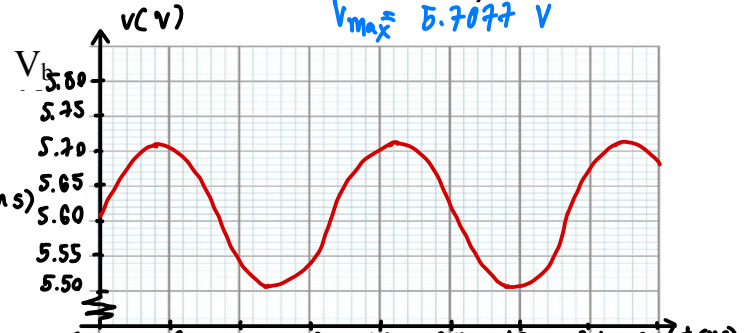
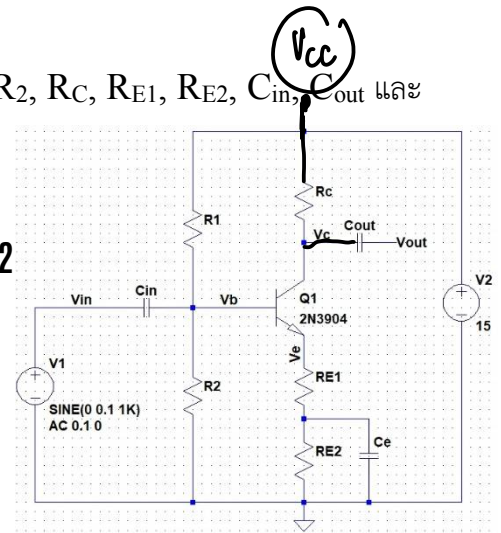
3. จำลองการทำงานในโหมด Transient โดยให้ $V_1 = 0.1 \text{ V}_P$ 1 kHz บันทึกกราฟคลื่นสัญญาณ V_{in} , V_{out} , V_b , V_c และ V_e

(ให้เขียนกราฟแสดงรูปคลื่นช่วง 1-2 Cycle เพื่อให้เห็นรายละเอียดครบถ้วนและขนาดที่เหมาะสม)



อัตราขยายแรงดันของวงจร (V_{out}/V_{in}) = 25.8 เท่า

รูปที่ 22



$V_{max} = 5.0012$

4. ทดลองเปลี่ยนค่า R_{E1} ในรูปที่ 23 จำลองการทำงานในโหมด Transient และบันทึกรูปสัญญาณ V_c เพื่อเปรียบเทียบกับในกรณีดังต่อไปนี้ (ขอให้เขียนกราฟด้วยสเกลเดียวกันทุกกรณี)

ก) $R_{E1} = 50 \Omega$

อัตราการขยายแรงดันของวงจร

$(V_{out}/V_{in}) = 21.2$ เท่า

ข) $R_{E1} = 39 \Omega$ (ผลการทดลองในข้อ 3)

อัตราการขยายแรงดันของวงจร

$(V_{out}/V_{in}) = 25.8$ เท่า

ค) $R_{E1} = 20 \Omega$

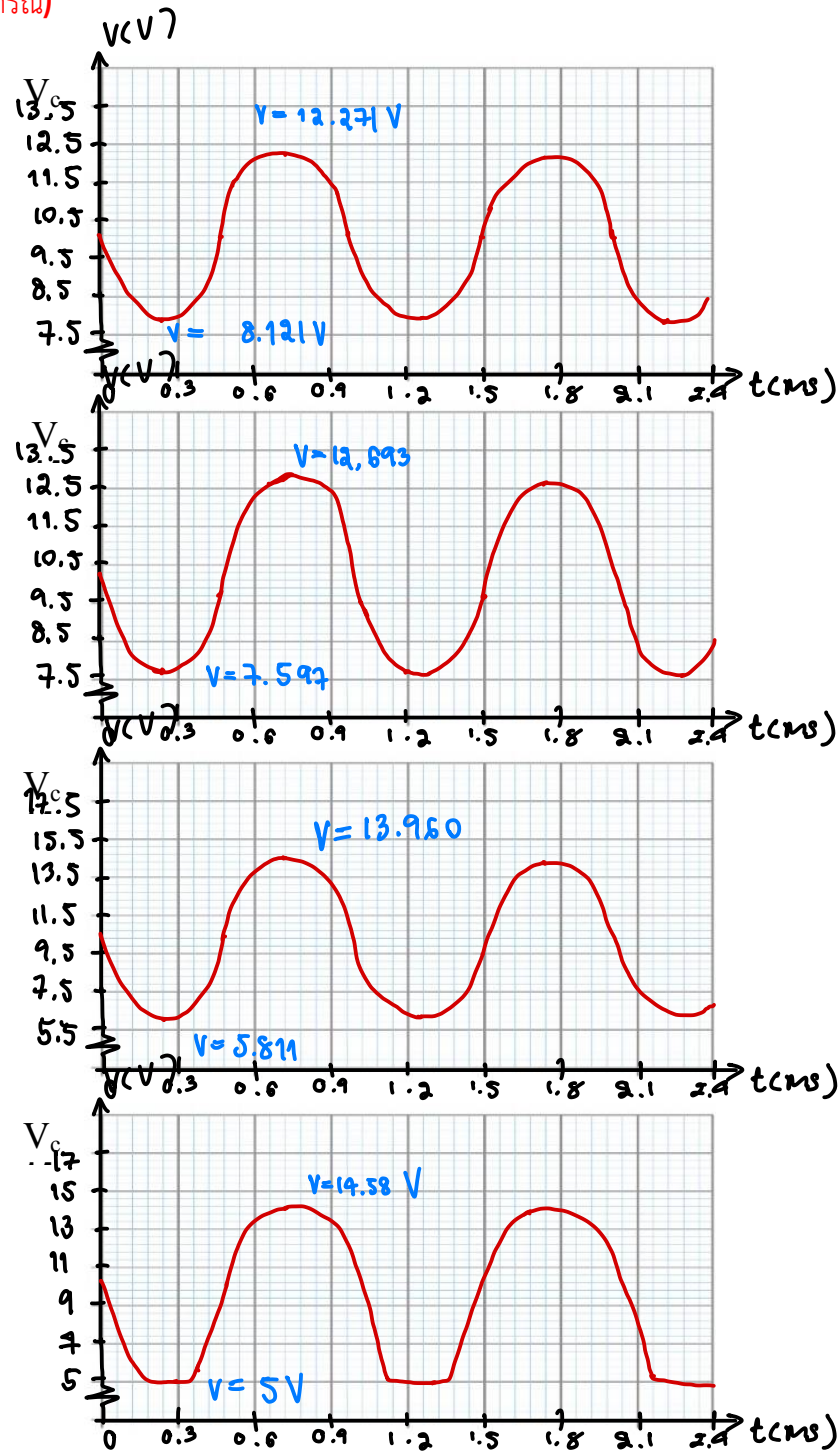
อัตราการขยายแรงดันของวงจร

$(V_{out}/V_{in}) = 31.7$ เท่า

ง) $R_{E1} = 12 \Omega$

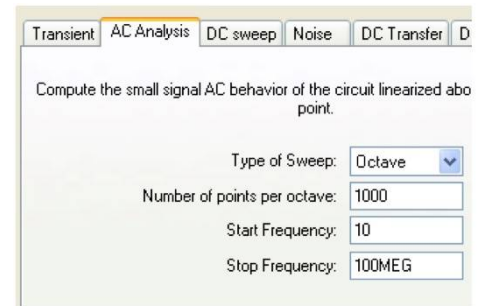
อัตราการขยายแรงดันของวงจร

$(V_{out}/V_{in}) = 46.2$ เท่า

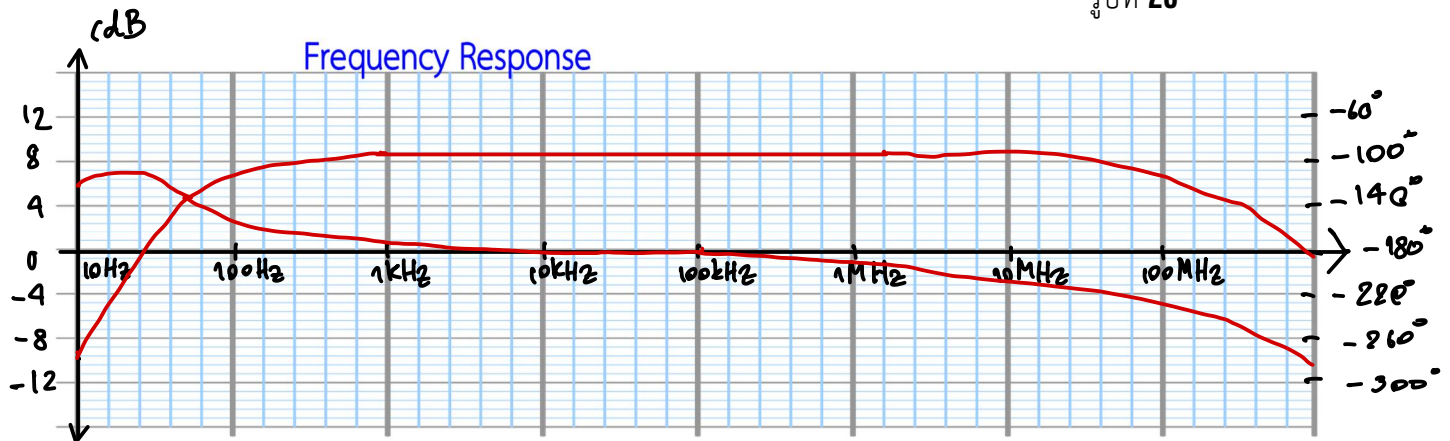


เปลี่ยนค่า R_{E1} กลับคืนค่าเดิม แล้วจำลองการทำงานในโหมด

AC Analysis ดังรูปที่ 23 โดยให้ $V_{in} = 0.1 V_p$ ความถี่ 10 Hz - 100 MHz
บันทึกกราฟที่ V_{out} เพื่อดูการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response)
ของวงจรว่าขยายสัญญาณได้ดีในช่วงความถี่ที่ออกแบบหรือไม่



รูปที่ 23

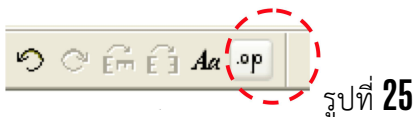


.....ลายเซ็นอาจารย์ผู้ควบคุม

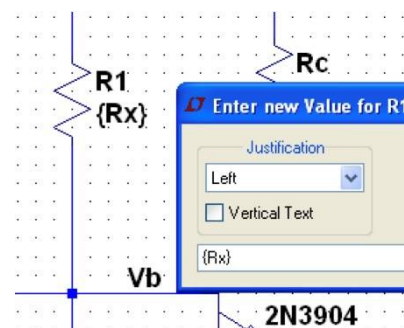
5. ทดลองเปลี่ยนจุดทำงาน (Operating Point) ด้วยการเปลี่ยนค่า R_1 ให้
เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ ขั้นตอนดังนี้

ก) เปลี่ยนค่าของ R_1 ให้มีค่าเป็น $\{Rx\}$ ดังรูปที่ 24

ข) คลิกที่เมนู **Spice Directive** ดังรูปที่ 25

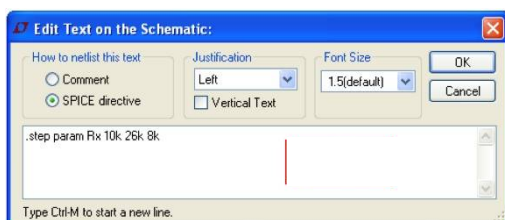


รูปที่ 25



รูปที่ 24

จากนั้นเขียนคำสั่ง **.command** เพื่อกำหนดค่า R_x ดังรูปที่ 26



รูปที่ 26

.step param Rx 10k 26k 8k
คำอธิบายคำสั่ง :
ให้ค่า R_x เปลี่ยนค่าได้ตั้งแต่ 10 kΩ ไป
จนถึง 26 kΩ โดยเปลี่ยนสเต็ปละ 8 kΩ

6) จำลองการทำงานในโหมด Transient โดยให้ $V_1 = 0.1 V_P$ 1 kHz บันทึกกราฟคลื่นสัญญาณ V_{in} , V_b และ V_c (ให้แยกกราฟและเขียนรูป 1-2 Cycle เพื่อให้เห็นรายละเอียดครบถ้วนและขนาดที่เหมาะสม)

ให้อธิบายผลการทดลองอันเนื่องจากการเปลี่ยนค่า R_1

ก) ให้อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นกับสัญญาณ V_b และบอกสาเหตุ

เมื่อค่า R_1 สูงขึ้น ส่งผลให้ แวลต์ V_b ลดลง
เนื่องจาก ตัวต้านทานรับค่าได้อัตราส่วน
กับตัวต้าน R_c เสือ V_c Voltage divider
 $V_b = V_c (R_1 / (R_1 + R_c))$ ที่นี้ เมื่อ R_1 สูงขึ้น
ค่า V_b จะลดลงนั่นเอง

ข) ให้อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นกับสัญญาณ V_c และบอกสาเหตุ
ค่า V_c สูงขึ้นตามค่า R_1 ที่เพิ่ม เนื่องจาก
 $V_c = V_{cc} - I_c R_c$ โดยที่ I_c หาได้จาก

$$I_c = \beta I_b$$

ค) อัตราการขยายแรงดันของวงจร (V_{out}/V_{in}) = _____ เท่า
ทั้ง 3 กรณีเท่ากันหรือไม่ / เพราะเหตุใด

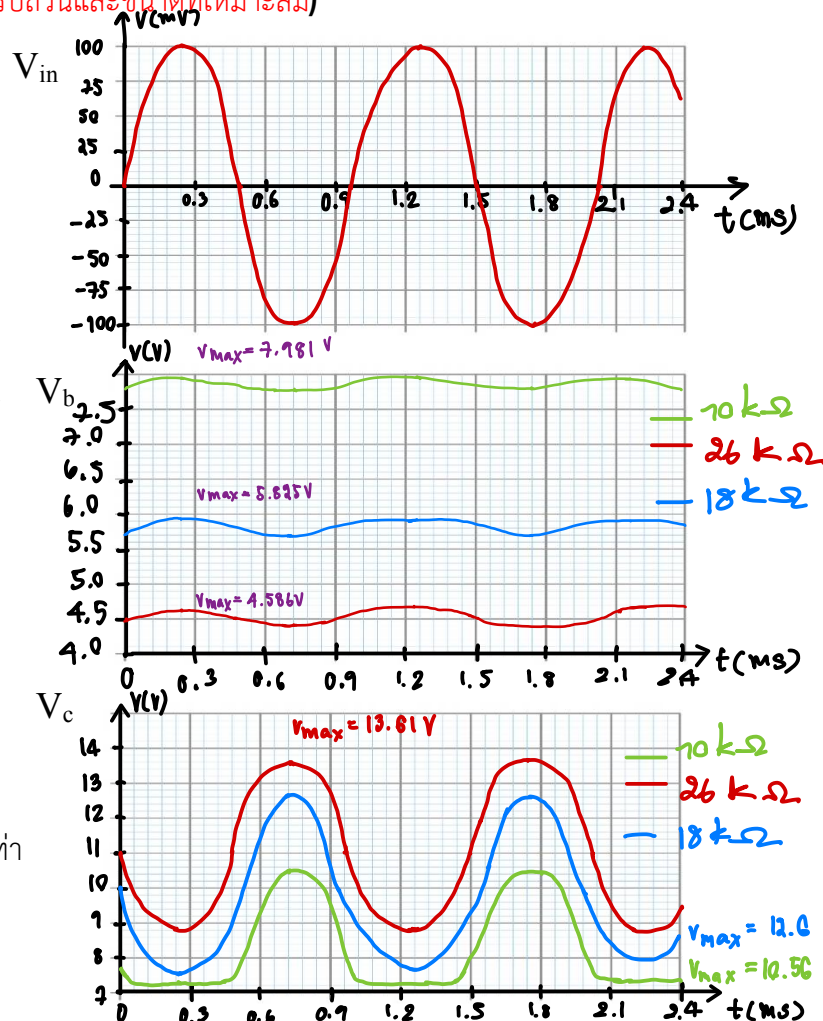
$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|_{R_1=10k\Omega} = 27.33 \text{ เท่า}$$

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|_{R_1=18k\Omega} = 26.11 \text{ เท่า}$$

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|_{R_1=26k\Omega} = 24.02 \text{ เท่า}$$

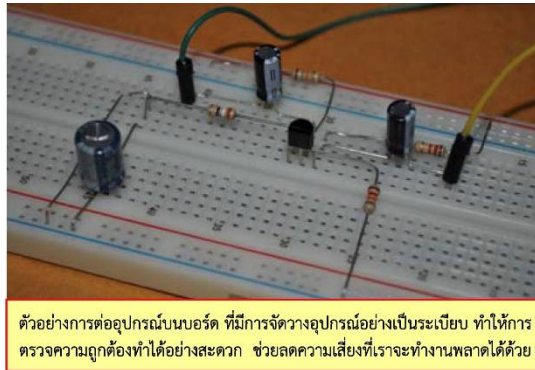
ไม่เท่ากัน เนื่องจาก V_b และ V_c ที่เกิดจาก R_1 แต่ละค่า
ไม่เท่ากัน และจากความสัมพันธ์ของกระแส $I_c = \beta I_b$
ส่งผลให้ แวลต์ Output แตกต่างกันไปแต่ละค่าของ R_1
จึงมี ratio ระหว่าง V_{out} / V_{in} แตกต่างกันไปนั่นเอง.

ลายเซ็นอาจารย์ผู้ควบคุม



วิธีการทดลอง II ต่อวงจรทดลองจริงบนโปรโตบอร์ด

- วัดค่าตัวต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์บันทึกลงในตารางที่ 2 แล้วต่อวงจรในรูปที่ 27 ลงบนโปรโตบอร์ด (Prototype Board) โดยใช้อุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วในตอนจำลองด้วย LTspice IV



รูปที่ 27

- ยังไม่ต้องป้อน V_{in} ให้ทำการวัดแรงดันไบอัส (DC) ที่จุดต่าง ๆ บันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 2 และ 3 ตารางที่ 2 ค่าของความต้านทานที่วัดได้จากโอห์มมิเตอร์และค่า β จากตารางที่ 1

$R_1 =$	Ω	$R_2 =$	Ω
$R_C =$	Ω	$R_{E1} =$	Ω
$R_{E2} =$	Ω	β ($I_C = 4 \text{ mA}$) =	

ตารางที่ 3 จุดทำงาน Q-Point ของวงจร

(คำแนะนำ การวัดกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ให้ใช้วิธี วัดแรงดันตกคร่อมแล้วหารด้วยค่าของตัวต้านทานที่ได้ในตารางที่ 1)

พารามิเตอร์ในวงจร	ค่าที่ได้จากการจำลอง	ค่าที่ได้จากการวัด	% ความแตกต่าง
V_B (วัดที่ขา B เทียบกราวด์)			
V_C (วัดที่ขา C เทียบกราวด์)			
V_E (วัดที่ขา E เทียบกราวด์)			
I_C $(V_{CC} - V_C)/R_C$			
I_E $V_e / (R_{E1} + R_{E2})$			
I_{R1} $(V_{CC} - V_B)/R_1$			
I_{R2} V_B/R_2			

ให้ใช้ค่าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานอินพุต (R_{in}) ค่าความต้านทานเอาต์พุต (R_{out}) ของวงจร

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{ib}, \quad R_{ib} = r_{\pi} + (1 + \beta)R_{E1}, \quad r_{\pi} = \frac{V_T \beta}{I_C}, \quad R_{out} = R_C$$

3. ป้อนแรงดัน V_{in} รูปไซน์ขนาด **100 mV_p 1kHz** ให้กับวงจร แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดรูปคลื่นของสัญญาณ V_{in} , V_b , V_c และ V_e และบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลอง

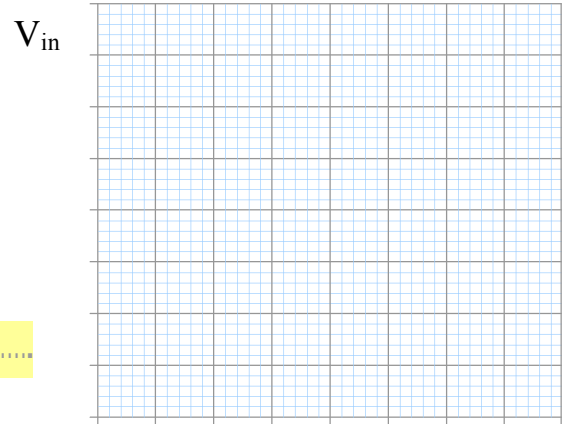
ก) V_{in} (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**)

$$V_{in} (AC) = \dots\dots\dots V_p$$

$$\text{- Frequency} = \dots\dots\dots \text{Hz}$$

$$\text{- Phase} = \dots\dots\dots^\circ \text{ (เทียบกับ } V_{in} \text{)}$$

$$\text{CH.1} = \dots\dots\dots \text{V/Div} \quad \text{CH.2} = \dots\dots\dots \text{V/Div} \quad \text{Timebase} = \dots\dots\dots$$



ข) V_B (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

$$V_B \text{ มีระดับ DC} = \dots\dots\dots \text{V}$$

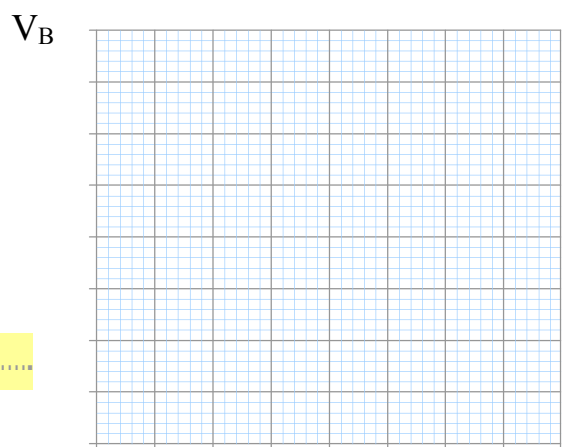
ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**

$$V_B \text{ มีระดับ AC} = \dots\dots\dots V_p$$

$$\text{- Frequency} = \dots\dots\dots \text{Hz}$$

$$\text{- Phase} = \dots\dots\dots^\circ \text{ (เทียบกับ } V_{in} \text{)}$$

$$\text{CH.1} = \dots\dots\dots \text{V/Div} \quad \text{CH.2} = \dots\dots\dots \text{V/Div} \quad \text{Timebase} = \dots\dots\dots$$



ค) V_C (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

$$V_C \text{ มีระดับ DC} = \dots\dots\dots \text{V}$$

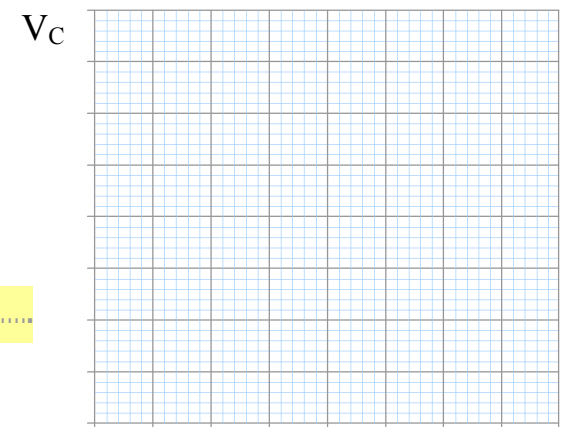
ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**

$$V_C \text{ มีระดับ AC} = \dots\dots\dots V_p$$

$$\text{- Frequency} = \dots\dots\dots \text{Hz}$$

$$\text{- Phase} = \dots\dots\dots^\circ \text{ (เทียบกับ } V_{in} \text{)}$$

$$\text{CH.1} = \dots\dots\dots \text{V/Div} \quad \text{CH.2} = \dots\dots\dots \text{V/Div} \quad \text{Timebase} = \dots\dots\dots$$



ง) V_E (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

V_E มีระดับ DC = V

ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**

V_E มีระดับ AC = V_p

- Frequency = Hz

- Phase = ° (เทียบกับ V_{in})

CH.1 = V/Div CH.2 = V/Div Timebase =

V_E



จ) อัตราการขยายแรงดันไฟกระแสสลับ = เท่า หาได้จาก

(อธิบายวิธีการหา)

4. ให้เปลี่ยนจุดทำงาน (Q-Point) ของวงจรด้วยการเปลี่ยนค่า R_1 ตามตาราง แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดรูปคลื่นสัญญาณและบันทึกผลการทดลองลงในกราฟเดียวกัน (ให้ใช้สีต่างกัน)

รูปคลื่นของ V_B ทั้ง 3 กรณีของค่า R_1

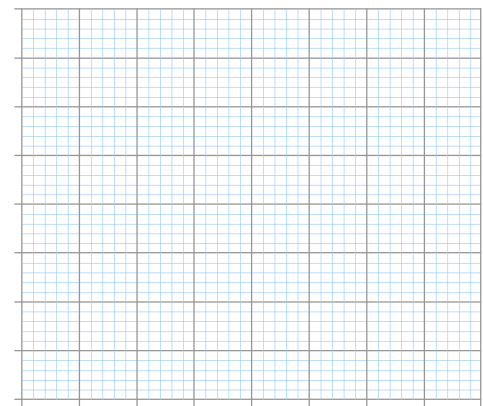
CH.1 = V/Div CH.2 = V/Div Timebase =

ผลการทดลอง

ก) ค่าของ V_b (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$	$R_1 = 18 \text{ k}\Omega$ ***	$R_1 = 27 \text{ k}\Omega$
มีระดับ DC = V	มีระดับ DC = V	มีระดับ DC = V
มีระดับ AC = V _p	มีระดับ AC = V _p	มีระดับ AC = V _p

หมายเหตุ *** ให้ใช้ค่าจากการทดลองในข้อ 3 ไม่ต้องทดลองซ้ำ



รูปคลื่นของ V_C ทั้ง 3 กรณีของค่า R_1

CH.1 = V/Div CH.2 = V/Div Timebase =

ข) ค่าของ V_c (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$	$R_1 = 18 \text{ k}\Omega$ ***	$R_1 = 27 \text{ k}\Omega$
มีระดับ DC = V	มีระดับ DC = V	มีระดับ DC = V
มีระดับ AC = V _p	มีระดับ AC = V _p	มีระดับ AC = V _p

หมายเหตุ *** ให้ใช้ค่าจากการทดลองในข้อ 3 ไม่ต้องทดลองซ้ำ



รูปคลื่นของ V_E ทั้ง 3 กรณีของค่า R_1

CH.1 = V/Div CH.2 = V/Div Timebase =

ค) ค่าของ V_c (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$	$R_1 = 18 \text{ k}\Omega$ ***	$R_1 = 27 \text{ k}\Omega$
มีระดับ DC = V	มีระดับ DC = V	มีระดับ DC = V
มีระดับ AC = V_p	มีระดับ AC = V_p	มีระดับ AC = V_p

หมายเหตุ *** ให้ใช้ค่าจากการทดลองในข้อ 3 ไม่ต้องทดลองซ้ำ



ง) อัตราการขยายแรงดันไฟกระแสสลับ = เท่า (เมื่อ $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$)
 = เท่า (เมื่อ $R_1 = 18 \text{ k}\Omega$) ***
 = เท่า (เมื่อ $R_1 = 27 \text{ k}\Omega$)

จ) เกิดอะไรขึ้นกับสัญญาณที่ V_c เพราะเหตุใด

.....

5. เปลี่ยนค่า R_1 กลับไปเป็นค่า **18 k Ω** ดังเดิม ให้เปลี่ยนค่า R_{E1} ตามที่กำหนดด้านล่าง แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดรูปคลื่นสัญญาณและบันทึกผลการทดลอง

ผลการทดลอง

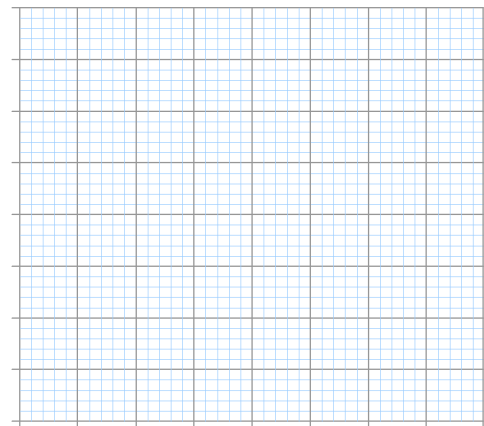
ก) ค่าแรงดันอินพุต V_{in} (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**)

$V_{in} = \dots\dots\dots V_p$

Frequency = Hz

Phase = ° (เทียบกับ V_{in})

CH.1= V/Div CH.2 = V/Div Timebase =



ข) เมื่อ $R_{E1} = 50 \Omega$ วัดค่าแรงดันเอาต์พุตทั้งส่วนที่เป็นไฟตรงและไฟสลับ

$V_{out, DC}$ (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

มีระดับ DC = V

$V_{out, AC}$ (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**)

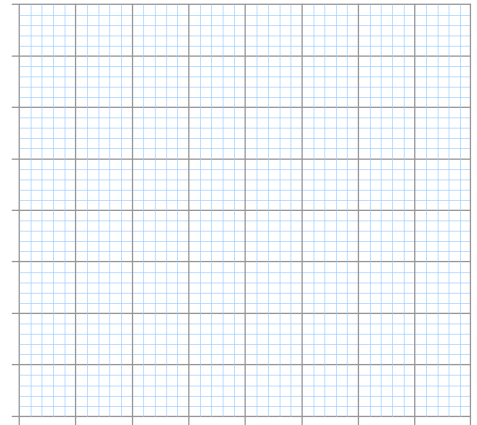
มีระดับ AC = V_p

Frequency = Hz

Phase = $^{\circ}$ (เทียบกับ V_{in})

อัตราการขยายแรงดัน = เท่า

CH.1= V/Div CH.2 = V/Div Timebase =



ค) เมื่อ $R_{E1} = 20 \Omega$ วัดค่าแรงดันเอาต์พุตทั้งส่วนที่เป็นไฟตรงและไฟสลับ

$V_{out, DC}$ (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

มีระดับ DC = V

$V_{out, AC}$ (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**)

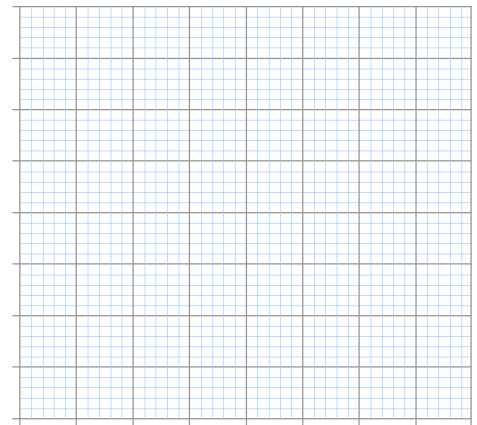
มีระดับ AC = V_p

Frequency = Hz

Phase = $^{\circ}$ (เทียบกับ V_{in})

อัตราการขยายแรงดัน = เท่า

CH.1= V/Div CH.2 = V/Div Timebase =



ง) เมื่อ $R_{E1} = 12 \Omega$ วัดค่าแรงดันเอาต์พุตทั้งส่วนที่เป็นไฟตรงและไฟสลับ

$V_{out, DC}$ (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **DC Coupling**)

มีระดับ DC = V

$V_{out, AC}$ (ปรับอินพุตออสซิลโลสโคปเป็น **AC Coupling**)

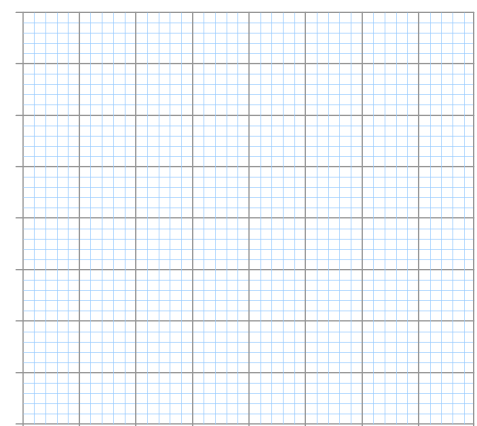
มีระดับ AC = V_p

Frequency = Hz

Phase = $^{\circ}$ (เทียบกับ V_{in})

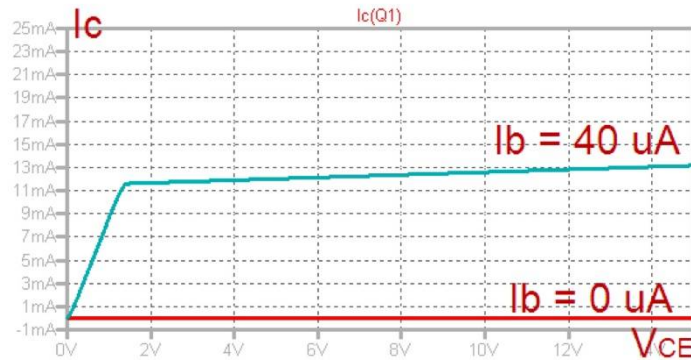
อัตราการขยายแรงดัน = เท่า

CH.1= V/Div CH.2 = V/Div Timebase =



คำถามท้ายการทดลอง

1. จากตารางที่ 1 ค่าของ β ต่ำสุด และ สูงสุดที่ได้จากการวัดอยู่ที่จุดใดของกราฟ (ระบุค่าของ I_B , I_C , V_{CE}) และให้อธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้ได้ค่าเช่นนั้น
2. จากตารางที่ 1 ค่าของ β ที่จุดใดของกราฟ (ระบุค่าของ I_B , I_C , V_{CE}) ที่เหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุด เพราะเหตุใด
3. จากกราฟดังรูป



a) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง I_B , I_C และ V_{CE}

b) ระบุพื้นที่ของ สภาวะการทำงานแบบอิ่มตัว (**Saturate Area**) สภาวะการทำงานแบบปกติ (**Active Area**) และ สภาวะหยุดการทำงาน (**Cutoff Area**) ของรูปกราฟในข้อ 3 พร้อมอธิบาย

4. ให้อธิบายความหมายของคำว่า ค่าความต้านทานอินพุต (R_{in}) ค่าความต้านทานเอาต์พุต (R_{out}) ของวงจร (แนะนำให้ใช้แนวคิด แบบ **Two Port Network** มาอธิบาย)

5. ในการต่อวงจรขยายแบบอิมิตอร์ร่วมในรูปที่ 27

5.1 ถ้าไม่มี R_{EI} จะเกิดอะไรขึ้นกับคุณสมบัติของวงจรขยายนี้ เพราะเหตุใด

5.2 จากผลการทดลองเปลี่ยนค่า $(R_1 || R_2)$, R_{EI} ในวงจร น.ศ. สามารถสรุปความสำคัญของตัวต้านทานทั้งสองได้อย่างไร และปัจจัยใดที่ น.ศ. คิดว่าสำคัญที่สุดในการเลือกค่าตัวต้านทานนี้พร้อมบอกเหตุผล

5.3 ถ้าไม่มี C_e จะเกิดอะไรขึ้นกับคุณสมบัติของวงจรขยายนี้ พร้อมบอกเหตุผล

6. ให้เขียนรายงาน**แสดงวิธีการออกแบบและผลจำลองการทำงานวงจรที่ได้ออกแบบด้วย LTspice IV** ของวงจรขยายแบบเบสร่วมและวงจรขยายแบบคอลเลคเตอร์ร่วม (**ไม่ต้องต่อวงจรจริงบนโปรโตบอร์ด**)