9 เครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์
ELECTRONIC INSTRUMENT

9.1 บทนำ

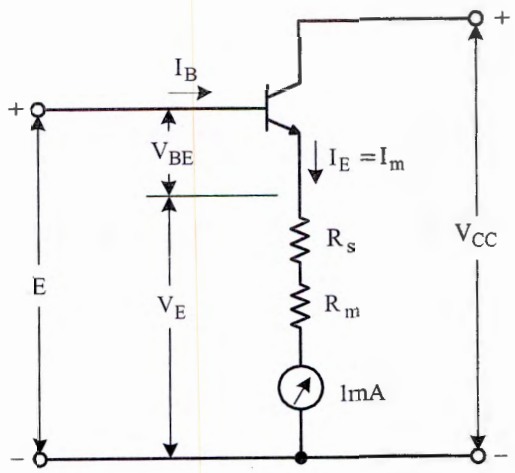
โวลต์มิเตอร์แบบเข็มชี้ ใช้ขดลวดหมุนจะมีข้อจำกัดในการวัดหลายอย่างเช่นมีความต้านทานอินพุตต่ำ ทำให้วัดแรงดันไฟฟ้าของวงจรที่มีความต้านทานสูงแล้วจะเกิดโหลดดิ้งมากหรือไม่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำๆได้ ดังนั้นจึงใช้โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Voltmeter : EVM) ไปวัดจะมีค่าความถูกต้องจากการวัดมากเพราะมีความต้านทานอินพุตสูงและมีวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า เช่น วงจรขยายสัญญาณด้วยทรานซิสเตอร์หรือออปแอมป์ โวลต์มิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะเป็นส่วนหนึ่งในเครื่องมือวัดแบบอิเล็กทรอนิกส์หรือเรียกว่าเครื่องมือวัดแบบอะนาลอกโดยจะมีหลายฟังก์ชันเพื่อใช้วัดได้ทั้งค่าความต้านทาน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ

9.2 วงจรโวลต์มิเตอร์แบบทรานซิสเตอร์ (Transistor Voltmeter Circuits)

9.2.1 โวลต์มิเตอร์แบบอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ (Emitter Follow Voltmeter)

วงจรทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ หรือแบบคอมมอนคอลเล็กเตอร์ (Common Collector) จะใช้ทำเป็นโวลต์มิเตอร์เพราะมีคุณสมบัติที่ดีดังนี้

1. อิมพีแดนซ์อินพุตสูง (High Input Impedance : Z_i)
2. อิมพีแดนซ์เอาต์พุตต่ำ (Low Output Impedance : Z_o)
3. อัตราขยายกระแสไฟฟ้าสูง (High Current Gain : $\gamma = \frac{I_E}{I_B}$)
4. อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าต่ำมาก (Lowest Voltage Gain : $A_V = \frac{V_{EC}}{V_{BC}} < 1$)



รูปที่ 9.1 วงจรพื้นฐานของโวลต์มิเตอร์แบบอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์

จากคุณสมบัติที่ดีของวงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์อินพุตสูง และอิมพีแดนซ์เอาต์พุตต่ำ จึงมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจำนวนมากไหลผ่านขดลวดหมุนเกิดการเบี่ยงเบนเข็มมิเตอร์ได้ดังรูปที่ 9.1 เป็นวงจรพื้นฐานของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้า E โดยมี R_s ทำหน้าที่บขยายย่านวัดต่ออนุกรมกับขาอิมิตเตอร์และขดลวดหมุน

ตัวอย่างที่ 9.1 วงจรพื้นฐานของโวลต์มิเตอร์แบบอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ ในรูปที่ 9.1 กำหนดให้ $V_{CC} = 20V$, $R_s + R_m = 9.3k\Omega$, $I_m = I_{fs} = 1mA$ และทรานซิสเตอร์มีค่า $h_{FE} = 100$ จงคำนวณหา

ก) ค่ากระแสไฟฟ้า I_m ของมิเตอร์เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้าอินพุต E=10V

ข) ค่าความต้านทานอินพุต R_i ของโวลต์มิเตอร์เมื่อมีและไม่มีทรานซิสเตอร์

วิธีทำ

ก) หากระแสไฟฟ้า I_m เมื่อ $E = 10V$

$$V_E = E - V_{BE} = 10V - 0.7V = 9.3V$$

$$I_m = \frac{V_E}{R_m + R_s} = \frac{9.3V}{9.3k\Omega} = 1mA \text{ .....\#}$$

ข) หาความต้านทานอินพุต R_i เมื่อมีทรานซิสเตอร์

$$I_B \approx \frac{I_m}{h_{FE}} \approx \frac{1mA}{100} = 10\mu A$$

$$R_i \approx \frac{E}{I_B} \approx \frac{10V}{1M\Omega} = 1M\Omega \text{ .....\#}$$

หาความต้านทานอินพุต R_i เมื่อไม่มีทรานซิสเตอร์

$$R_i = R_s + R_m = 9.3k\Omega \text{....\#}$$

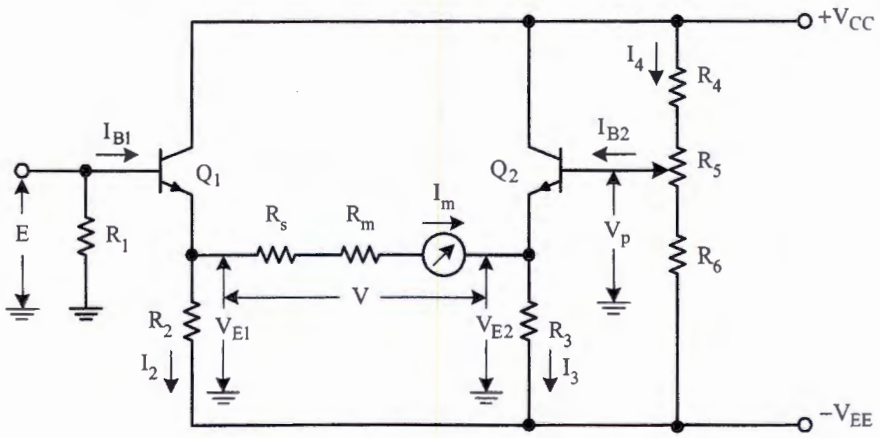
ตัวอย่างที่ 9.2 จากวงจรรูปที่ 9.1 จงคำนวณหากระแสไฟฟ้า I_m ของมิเตอร์ เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้า E=5V

วิธีทำ

$$V_E = E - V_{BE} = 5V - 0.7V = 4.3V$$

$$I_m = \frac{V_E}{R_m + R_s} = \frac{4.3V}{9.3k\Omega} = 0.46mA \text{ .....\#}$$

จากตัวอย่างที่ 9.1 มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้า E=10V ทำให้กระแสไฟฟ้า I_m=1mA แต่ตัวอย่างที่ 9.2 เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้า E=5V มิเตอร์ควรอ่านกระแสไฟฟ้า I_m=0.5mA แต่จะอ่านได้เพียง 0.46mA เท่านั้น ทั้งนี้เพราะแรงดันไฟฟ้า V_{BE} จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดจากการวัด จึงต้องต่อวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าให้วงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ดังรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 วงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ที่เพิ่มทรานซิสเตอร์ Q_2 และวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

วงจรอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ในรูปที่ 9.2 ขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ได้รับแรงดันไฟฟ้าไบอัสจาก R_1 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วยตัวต้านทาน R_4,R_5,R_6 จะปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัส V_p ให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_2 การต่อวงจรแบบนี้จะไม่มีแรงดันไฟฟ้า V_{BE} มาทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าที่จุดใดๆ

เมื่อไม่มีแรงดันไฟฟ้าอินพุต (E=0V) จะปรับแรงดันไฟฟ้า V_p=0V เพื่อให้กระแสไฟฟ้า I_m ของมิเตอร์เป็นศูนย์ ณ จุดนี้แรงดันไฟฟ้า $V_{E1} = V_{E2} = -0.7V$ ได้แรงดันไฟฟ้ามิเตอร์ $V = V_{E1} - V_{E2} = 0V$ และสมมุติว่านำมิเตอร์ไปวัดแรงดันไฟฟ้า E=5V คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า V ของมิเตอร์จะต้องได้ 5 V ดังนี้

$$V = V_{E1} - V_{E2} = (E - V_{BE1}) - V_{E2}$$
$$V = (5V - 0.7V) - (-0.7V) = 5V$$

ตัวอย่างที่ 9.3 วงจรโวลต์มิเตอร์อิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ในรูปที่ 9.2 กำหนดให้ $R_2 = R_3 = 3.9k\Omega$, $R_4 = 2.7k\Omega$, $R_5 = 1k\Omega, R_6 = 2.2k\Omega$ และ $R_s + R_m = 1k\Omega$ กระแสไฟฟ้า $I_m = I_{fs} = 1mA$ $V_{CC} = +12V, V_{EE} = -12V$ ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ชนิดซิลิกอนมี $h_{FE} = 100$ จงคำนวณหา

ก) กระแสไฟฟ้า I_{E1}, I_{E2} เมื่อ E=0V

ข) แรงดันไฟฟ้า V และกระแสไฟฟ้า I_m เมื่อ E=0.5V

ค) แรงดันไฟฟ้า V และกระแสไฟฟ้า I_m เมื่อ E=1V

ง) กระแสไฟฟ้า I_4

วิธีทำ

ก) หากระแสไฟฟ้า I_{E1}, I_{E2} เมื่อ E=0V

$$E = V_{BE1} + V_{R2} + V_{EE}$$
$$V_{R2} = E - V_{BE1} - V_{EE} = 0V - 0.7V - (-12V) = 11.3V$$
$$V_{R3} = V_{R2} = 11.3V$$
$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{V_{R2}}{R_2} = \frac{11.3V}{3.9k\Omega} \approx 2.9mA \text{ .....\#}$$

ข) หาแรงดันไฟฟ้า V เมื่อ E=0.5V

$$V_{E1} = E - V_{BE1} = 0.5V - 0.7V = -0.2V$$
$$V_{E2} = V_P - V_{BE2} = 0V - 0.7V = -0.7V$$
$$V = V_{E1} - V_{E2} = -0.2V - (-0.7V) = 0.5V \text{ .....\#}$$

หากระแสไฟฟ้า I_m เมื่อ E=0.5V

$$I_m = \frac{V}{R_s + R_m} = \frac{0.5V}{1k\Omega} = 0.5mA = \frac{1}{2}FSD \text{ .....\#}$$

ค) หาแรงดันไฟฟ้า V และกระแสไฟฟ้า I_m เมื่อ E=1V

$$V_{E1} = E - V_{BE1} = 1V - 0.7V = 0.3V$$
$$V_{E2} = V_P - V_{BE2} = 0V - 0.7V = -0.7V$$
$$V = V_{E1} - V_{E2} = 0.3V - (-0.7V) = 1V \text{ .....\#}$$

$$I_m = \frac{V}{R_s + R_m} = \frac{1V}{1k\Omega} = 1mA = FSD \text{ .....\#}$$

ง) หากระแสไฟฟ้า I_4 (สมมุติว่า $I_4 >> I_{B2}$)

$$I_4 = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_4 + R_5 + R_6}$$
$$I_4 \frac{12V - (-12V)}{27k\Omega + 1k\Omega + 2.2k\Omega} = 4.07k\Omega \text{ .....\#}$$

9.3 การเปลี่ยนย่านวัดของโวลต์มิเตอร์และความต้านทานอินพุต

(Voltmeter Range Changing and Input Resistance)

9.3.1 การเปลี่ยนย่านวัดของโวลต์มิเตอร์ (Voltmeter Range Changing)

การเปลี่ยนย่านวัดของโวลต์มิเตอร์จะใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าหรือเรียกว่าวงจรลดทอนอินพุต (Input Attenuaor) ดังรูปที่ 9.3 จะประกอบด้วยตัวต้านทาน R_a, R_b, R_c, R_1 ซึ่งทุกๆย่านวัดจะลดแรงดันไฟฟ้าอินพุต E ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า E_B=1V

การออกแบบวงจรเปลี่ยนย่านวัด

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range)}} \times R_1 \qquad \text{.....(9.1)}$$

$$R_{(Range)} = \frac{E}{E_B} \times R_1 \qquad \text{.....(9.2)}$$

เมื่อ E_B คือแรงดันไฟฟ้าที่ถูกลดทอน...V

E คือแรงดันไฟฟ้าอินพุต...V

$R_{(Range)}$ คือความต้านทานของย่านวัด...Ω

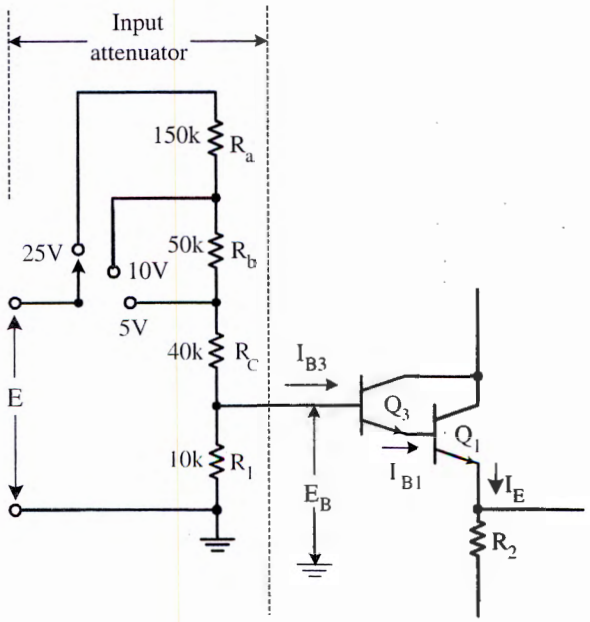
หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มิเตอร์วัดได้

$$V_m = V \times Range \qquad \text{.....(9.3)}$$

เมื่อ V_m คือแรงดันไฟฟ้าที่มิเตอร์วัดได้...V

V คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมิเตอร์...V

Range คือแรงดันไฟฟ้าของย่านวัด...V



รูปที่ 9.3 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าหรือเรียกว่าวงจรลดทอนอินพุต

ตัวอย่างที่ 9.4 จงคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า E_B ของวงจรเปลี่ยนย่านวัดในรูปที่ 9.3

วิธีทำ

จากสมการ (9.1) $$E_B = \frac{E}{R_{(Range)}} \times R_1$$

ย่านวัด 25V

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range25V)}} \times R_1 = \frac{E}{R_a + R_b + R_c + R_1} \times R_1$$

$$E_B = \frac{25V}{150k\Omega + 50k\Omega + 40k\Omega + 10k\Omega} \times 10k\Omega = 1V \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 10V

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range10V)}} \times R_1 = \frac{E}{R_b + R_c + R_1} \times R_1$$

$$E_B = \frac{10V}{50k\Omega + 40k\Omega + 10k\Omega} \times 10k\Omega = 1V \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 5V

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range5V)}} \times R_1 = \frac{E}{R_c + R_1} \times R_1$$

$$E_B = \frac{5V}{40k\Omega + 10k\Omega} \times 10k\Omega = 1V \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 9.5 วงจรเปลี่ยนย่านวัดในรูปที่ 9.3 เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้า E=7V จงคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า E_B ของย่านวัด 25V และ 10V

วิธีทำ

จากสมการ (9.2) $E_B = \frac{E}{R_{(Range)}} \times R_1$

ย่านวัด 25V

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range25V)}} \times R_1 = \frac{E}{R_a + R_b + R_c + R_1} \times R_1$$

$$E_B = \frac{7V}{150k\Omega + 50k\Omega + 40k\Omega + 10k\Omega} \times 10k\Omega = 0.28V \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 10V

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range10V)}} \times R_1 = \frac{E}{R_b + R_c + R_1} \times R_1$$

$$E_B = \frac{7V}{50k\Omega + 40k\Omega + 10k\Omega} \times 10k\Omega = 0.7V \text{ .....\#}$$

จากตัวอย่างที่ 9.5 ย่านวัด 25V ได้แรงดันไฟฟ้า E_B=0.28V และย่านวัด 10V ได้แรงดันไฟฟ้า E_B=0.7V โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้า E_B จะถูกป้อนให้วงจรโวลต์มิเตอร์ ดังนั้นในการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า V ที่ตกคร่อมมิเตอร์จะต้องได้ค่าเท่ากับค่า E_B ของแต่ละย่านวัดและมิเตอร์จะอ่านค่าได้เท่าไรให้คำนวณด้วยสมการ (9.3) อีกทีหนึ่ง

ตัวอย่างที่ 9.6 วงจรเปลี่ยนย่านวัดในรูปที่ 9.3 ถ้ากำหนดให้ $R_a + R_b + R_c + R_1 = 1M\Omega$ และให้มีย่านวัดเป็น 250V,100V,50V แต่ละย่านวัดลดแรงดันไฟฟ้า E_B=1V จงคำนวณหาค่า R_a, R_b, R_c, R_1

วิธีทำ

ย่านวัด 250V หา R_1

$$R_{(Range25V)} = R_a + R_b + R_c + R_1 = 1M\Omega$$

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range25V)}} \times R_1$$

$$R_1 = \frac{E_B}{E} \times R_{(Range250V)} = \frac{1V}{250V} \times 1M\Omega = 4k\Omega \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 50V หา R_c

$$R_{(Range50V)} = R_c + R_1$$

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range50V)}} \times R_1$$

$$R_{(Range50V)} = \frac{E}{E_B} \times R_1 = \frac{50V}{1V} \times 4k\Omega = 200k\Omega$$

$$R_c = R_{(Range50V)} - R_1 = 200k\Omega - 4k\Omega = 196k\Omega \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 100V หา R_b,R_a

$$R_{(Range100V)} = R_b + R_c + R_1$$

$$E_B = \frac{E}{R_{(Range100V)}} \times R_1$$

$$R_{(Range100V)} = \frac{E}{E_B} \times R_1 = \frac{100V}{1V} \times 4k\Omega = 400k\Omega$$

$$R_b = R_{(Range100V)} - R_{(Range50V)}$$

$$R_b = 400k\Omega - 200k\Omega = 200k\Omega \text{ .....\#}$$

$$R_a = R_{(Range250V)} - R_{(Range100V)}$$

$$R_a = 1M\Omega - 400k\Omega = 600k\Omega \text{ .....\#}$$

9.3.2 ความต้านทานอินพุต (Input Resistance : R_i)

จากวงจรเปลี่ยนย่านวัดในรูปที่ 9.3 การเพิ่มค่าความต้านทานอินพุตทำได้โดยการต่อทรานซิสเตอร์ Q_3 แบบดาร์ลิงตัน (Darlington) กับทรานซิสเตอร์ Q_1 ถ้าทรานซิสเตอร์ทุกตัวมี $h_{FE}=100$ หาความต้านทานอินพุต R_i ดังนี้

จาก $$I_{B1} \approx \frac{I_E}{h_{FE1}}$$

และ $$I_{B3} \approx \frac{I_{B1}}{h_{FE3}} = \frac{I_E}{h_{FE1} \times h_{FE3}}$$

จากตัวอย่างที่ 9.3 คำนวณกระแสไฟฟ้า I_{E1}=2.9mA

ที่ทรานซิสเตอร์ Q_3 คำนวณกระแสไฟฟ้า I_{B3}

$$I_{B3} = \frac{2.9\text{mA}}{100 \times 100} = 0.29\mu\text{A}$$

ที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 คำนวณหากระแสไฟฟ้า I_{B1}

$$I_{B1} \approx \frac{I_E}{h_{FE}} = \frac{2.9\text{mA}}{100} = 29\mu\text{A}$$

ถ้าแรงดันไฟฟ้า E_B=1V เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้าไหลเต็มสเกล จะเปรียบเทียบความต้านทานอินพุตระหว่างทรานซิสเตอร์ Q_1, Q_3 ได้ดังนี้

ความต้านทานอินพุต R_i ของ Q_1

$$R_i = \frac{E_B}{I_{B1}} = \frac{1\text{V}}{29\mu\text{A}} = 34\text{k}\Omega$$

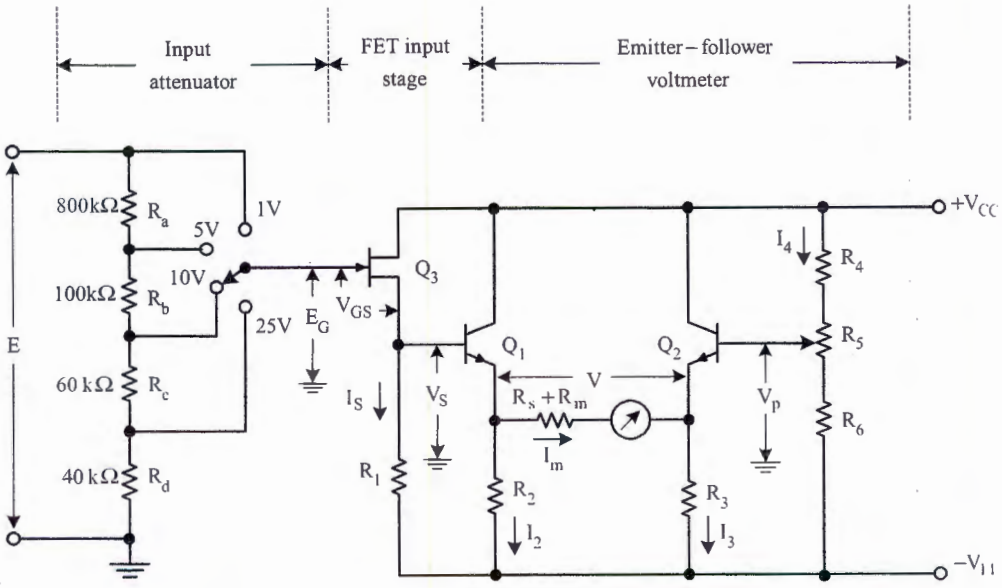
ความต้านทานอินพุต R_i ของ Q_3

$$R_i = \frac{E_B}{I_{B3}} = \frac{1\text{V}}{0.29\mu\text{A}} = 3.4\text{M}\Omega$$

จากการคำนวณเปรียบเทียบความต้านทานอินพุต R_i ของทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_3 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มทรานซิสเตอร์ Q_3 จะทำให้เพิ่มความต้านทานอินพุต R_i เมื่อนำมิเตอร์ไปวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจะทำให้ค่าวัดได้มีความถูกต้องมากเพราะเกิดผลโหลดดิ้งน้อย

9.3.3 โวลต์มิเตอร์แบบเฟตอินพุต (FET Input Voltmeter)

การเพิ่มความต้านทานอินพุตให้โวลต์มิเตอร์อาจทำได้โดยเปลี่ยนทรานซิสเตอร์ Q_3 เป็นแบบเฟตดังรูปที่ 9.4 และจัดวงจรเปลี่ยนย่านวัดเป็นแบบใหม่เพื่อให้ความต้านทานอินพุตของทุกย่านวัดมีค่าคงที่ตลอด



รูปที่ 9.4 โวลต์มิเตอร์ที่มีอินพุตเป็นเฟตและวงจรเปลี่ยนย่านวัด

วงจรรูปที่ 9.4 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าอินพุต E ให้วงจรเปลี่ยนย่านวัดถ้าเปลี่ยนเป็นย่านวัดใดๆก็ตามจะต้องลดแรงดันไฟฟ้า E_G=1V เสมอและความต้านทาน R_{in} ของปลายสายวัดแรงดันไฟฟ้า E สามารถออกแบบให้มีความต้านทานค่าสูงๆได้ตามต้องการและทุกย่านวัดจะเป็นค่าเดียวกัน

การออกแบบวงจรเปลี่ยนย่านวัด

$$E_G = \frac{E}{R_{in}} \times R_{(Range)} \qquad \text{.....(9.4)}$$

$$R_{(Range)} = \frac{E_G}{E} \times R_{in} \qquad \text{.....(9.5)}$$

เมื่อ R_{ir} คือความต้านทานอินพุตของปลายสายวัด...Ω

$R_{(Range)}$ คือความต้านทานของย่านวัด...Ω

E คือแรงดันไฟฟ้าอินพุต...V

E_G คือแรงดันไฟฟ้าที่ถูกลดทอน...V

ตัวอย่างที่ 9.7 โวลต์มิเตอร์แบบเฟตอินพุตดังรูปที่ 9.4 กำหนดให้ดังนี้ $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 5.6k\Omega$ $R_3 = 5.6k\Omega, R_4 = 1.2k\Omega, R_5 = 2k\Omega, R_6 = 2.7k\Omega$ และ $R_s + R_m = 1k\Omega$ กระแสไฟฟ้า $I_m = 1mA$ ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $V_{CC} = +12V, V_{EE} = -12V$ และทรานซิสเตอร์มีค่า $h_{FE} = 100$ เฟตมีค่าแรงดันไฟฟ้า $V_{GS} = -5V$ เมื่อ $E_G = 0V$ จงคำนวณหาค่า $V_P, I_S, I_{E1}, I_{E2}, I_B, I_4$

วิธีทำ

เมื่อ E_G=0V

หา V_p

$$V_S = E_G - V_{GS} = 0V - (-5V) = 5V$$

$$V_P = V_S = 5V \text{ .....\#}$$

หา I_S เมื่อ $I_B << I_S$

$$V_{R1} = V_S - V_{EE} = 5V - (-12V) = 17V$$

$$I_S = \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{17V}{10k\Omega} = 1.7mA \text{ .....\#}$$

หา I_{E1},I_{E2}

$$V_{R2} = V_S - V_{BE} - V_{EE} = 5V - 0.7V - (-12V) = 16.3V$$

$$I_{E1} = I_2 = \frac{V_{R2}}{5.6k\Omega} = 2.9mA \text{ .....\#}$$

$$I_{E2} = I_{E1} = 2.9mA \text{ .....\#}$$

หา I_B

$$I_3 = \frac{I_E}{h_{FE}} = \frac{2.9mA}{100} = 29\mu A \text{ .....\#}$$

หา I_4 เมื่อ $I_B << I_4$

$$I_4 = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_4 + R_5 + R_6} = \frac{12V - (-12V)}{1.2k\Omega + 2k\Omega + 2.7k\Omega} = 4.1mA \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 9.8 จากตัวอย่างที่ 9.7 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า E=7.5V และตั้งย่านวัด 10V จงคำนวณหา

ก) กระแสไฟฟ้า I_m

ข) ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มิเตอร์วัดได้

วิธีทำ

ก) หา I_m

$$E_G = \frac{E}{R_a + R_b + R_c + R_d} \times (R_c + R_d)$$

$$E_G = \frac{7.5V}{800k\Omega + 100k\Omega + 60k\Omega + 40k\Omega} \times (60k\Omega + 40k\Omega) = 0.75V$$

$$V_S = E_G - V_{GS} = 0.75V - (-5V) = 5.75V$$

$$V_{E1} = V_S - V_{BE} = 5.75V - 0.7V = 5.05V$$

$$V_{E2} = V_P - V_{BE} = 5V - 0.7V = 4.3V$$

$$V = V_{E1} - V_{E2} = 5.05V - 4.3V = 0.75V$$

$$I_m = \frac{V}{R_s + R_m} = \frac{0.75V}{1k\Omega} = 0.75mA \text{ .....\#}$$

ข) หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มิเตอร์วัดค่าได้

$$V_m = V \times Range$$

$$V_m = 0.75 \times 10V = 7.5V \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 9.9 จากวงจรในรูปที่ 9.4 จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า E_G ของแต่ละย่านวัด

วิธีทำ

จากสมการ (9.4)

$$E_G = \frac{E}{R_{in}} \times R_{(Range)} = \frac{E}{R_a + R_b + R_c + R_d} \times R_{(Range)}$$

$$E_G = \frac{E}{800k\Omega + 100k\Omega + 60k\Omega + 40k\Omega} \times R_{(Range)}$$

$$E_G = \frac{E}{1M\Omega} \times R_{(Range)}$$

ย่านวัด 5V

$$E_G = \frac{5V}{1M\Omega} \times (100k\Omega + 60k\Omega + 40k\Omega) = 1V \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 10V

$$E_G = \frac{10V}{1M\Omega} \times (60k\Omega + 40k\Omega) = 1V \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 25V

$$E_G = \frac{25V}{1M\Omega} \times (40k\Omega) = 1V \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 9.10 จากวงจรรูปที่ 9.4 กำหนดให้ $R_{in} = R_a + R_b + R_c + R_d = 2M\Omega$ ทุกย่านวัดจะลดแรงดันไฟฟ้า $E_G = 1V$ จงคำนวณหาค่า R_a, R_b, R_c, R_d

วิธีทำ

จากสมการ (9.5) $$R_{(Range)} = \frac{E_G}{E} \times R_{in}$$

แทนค่าจะได้ $$R_{(Range)} = \frac{1V}{E} \times 2M\Omega$$

ย่านวัด 5V หา R_a

$$R_{(Range5V)} = R_b + R_c + R_d = \frac{1V}{5V} \times 2M\Omega = 400k\Omega$$

$$R_a = R_{in} - R_{(Range5V)}$$

$$R_a = 2M\Omega - 400k\Omega = 1.6M\Omega \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 10V หา R_b

$$R_{(Range10V)} = R_c + R_d = \frac{1V}{10V} \times 2M\Omega = 200k\Omega$$

$$R_b = R_{(Range5V)} - R_{(Range10V)}$$

$$R_b = 400k\Omega - 200k\Omega = 200k\Omega \text{ .....\#}$$

ย่านวัด 25V หา R_c, R_d

$$R_{(Range25V)} = R_d = \frac{1V}{25V} \times 2M\Omega = 80k\Omega \text{ .....\#}$$

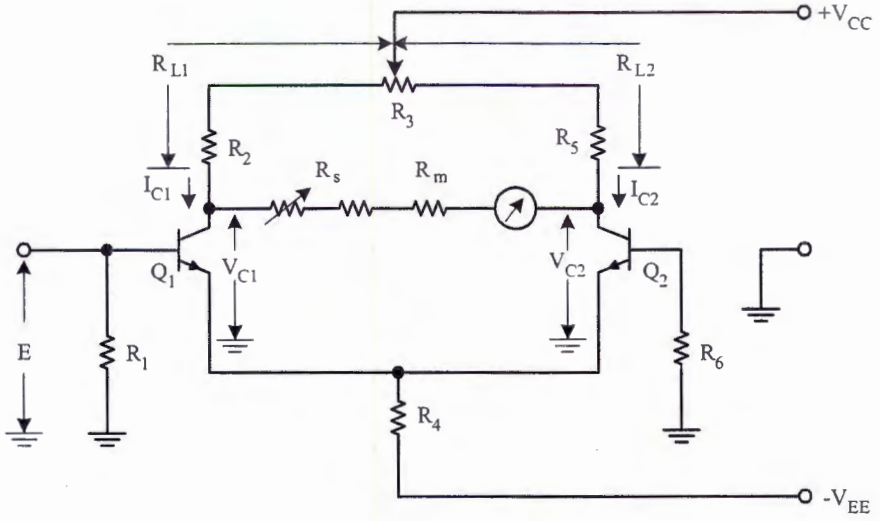
$$R_c = R_{(Range10V)} - R_{(Range25V)}$$

$$R_c = 200k\Omega - 80k\Omega = 120k\Omega \text{ .....\#}$$

9.3.4 โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยทรานซิสเตอร์

(Transistor Difference Amplifier Voltmeter)

โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยทรานซิสเตอร์จะมี Q_1 และ Q_2 ต่อกันเป็นวงจรขยายความแตกต่างหรือบางทีเรียกว่าวงจรขยายแบบอิมิตเตอร์คัพเปิ้ล (Emitter Coupled Amplifier) เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขาเบสของ Q_2 เป็นศูนย์ และที่ขาเบสของ Q_1 ได้รับแรงดันไฟฟ้าอินพุต E ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าระหว่างขาเบสทั้งสองจะถูกป้อนให้วงจรและถูกขยายได้แรงดันไฟฟ้ามิเตอร์ V ตกคร่อมบนขดลวดหมุนเป็นไปตามสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าอินพุต E



รูปที่ 9.5 วงจรโวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยทรานซิสเตอร์

เมื่อขาเบสของ Q_1 และ Q_2 มีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ (E=0V)

หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวต้านทาน R_4

$$V_{R4} = 0V - V_{BE} - V_{EE} \qquad \text{.....(9.6)}$$

หากระแสไฟฟ้า I_{R4}

$$I_{E1} + I_{E2} = \frac{V_{R4}}{R_4} \qquad \text{.....(9.7)}$$

หากระแสไฟฟ้า I_C

$$I_{C1} = I_{C2} \approx \frac{I_{E1} + I_{E2}}{2} \qquad \text{.....(9.8)}$$

หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_{L1}

$$V_{RL1} = I_{C1} R_{L1}$$
$$R_{L1} = \left(R_2 + \frac{R_3}{2} \right) \qquad \text{.....(9.9)}$$

หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_{L2}

$$V_{RL2} = I_{C2} R_{L2}$$
$$R_{L2} = \left(R_5 + \frac{R_3}{2} \right) \qquad \text{.....(9.10)}$$

หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม V_C

$$V_{C1} = V_{CC} - V_{RL1}$$
$$V_{C2} = V_{CC} - V_{RL2} \qquad \text{.....(9.11)}$$

หาแรงดันไฟฟ้ามิเตอร์ V

$$V = V_{C1} - V_{C2} \qquad \text{.....(9.12)}$$

หาอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าของ Q_1

$$A_V = \frac{h_{FE} R_L}{h_{ie}} \qquad \text{.....(9.13)}$$

เมื่อ A_V คืออัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

h_{FE} คืออัตราขยายกระแสไฟฟ้า

h_{ie} คือความต้านทานระหว่างขาเบสกับขาอิมิตเตอร์...Ω

$$h_{ie} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \approx 1k\Omega - 2k\Omega$$

หาแรงดันไฟฟ้ามิเตอร์ V

$$V = A_V E \qquad \text{.....(9.14)}$$

เมื่อ V คือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมิเตอร์...V

A_V คืออัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

E คือแรงดันไฟฟ้าอินพุต...V

ตัวอย่างที่ 9.11 โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 9.5 กำหนดให้ $R_2 = R_5 = 4.7k\Omega$, $R_3 = 500\Omega, R_4 = 3.3k\Omega, V_{CC} = +15V, V_{EE} = -15V$ จงคำนวณหากระแสไฟฟ้า I_C และแรงดันไฟฟ้า V_C เมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต E=0V

วิธีทำ

เมื่อ E=0V จะทำให้ $V_{B1}=V_{B2}=0V$ ด้วย

หา I_{C1}, I_{C2}

$$E = V_{BE} + (I_{E1} + I_{E2})R_4 + V_{EE}$$

$$I_{E1} + I_{E2} = \frac{E - V_{BE} - V_{EE}}{R_4} = \frac{0V - 0.7V - (-15V)}{3.3k\Omega} = 4.33mA$$

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{4.33mA}{2} = 2.17mA$$

$$I_{C1} = I_{C2} \approx I_E = 2.17mA \text{ .....\#}$$

หา V_C

$$V_{RL1} = V_{RL2} = I_C\left(R_2 + \frac{R_3}{2}\right)$$

$$V_{RL1} = V_{RL2} = 2.17mA\left(4.7k\Omega + \frac{500\Omega}{2}\right)$$

$$V_{RL1} = V_{RL2} = 10.7V$$

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

$$V_{C1} = V_{C2} = 15V - 10.7V = 4.3V \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 9.12 จากตัวอย่างที่ 9.11 ถ้ากำหนดให้ทรานซิสเตอร์มี $h_{FE} = 80, h_{ie} = 1.5k\Omega$, $I_m = I_{fs} = 100\mu A$ เท่ากับกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $R_m = 1.2k\Omega$ จงคำนวณหาค่าอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า A_V แรงดันไฟฟ้า V และ R_s ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเต็มสเกลเมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต E=10mV

วิธีทำ

หา A_V, V

$$A_V = \frac{h_{FE}R_L}{h_{ie}} = \frac{h_{FE}\left(R_2 + \frac{R_3}{2}\right)}{h_{ie}}$$

$$A_V = \frac{80(4.7k\Omega + 250\Omega)}{1.5k\Omega} = 264 \text{ .....\#}$$

$$V = A_V E = 264 \times 10mV = 2.64V \text{ .....\#}$$

หา R_s

$$V = I_m(R_s + R_m)$$

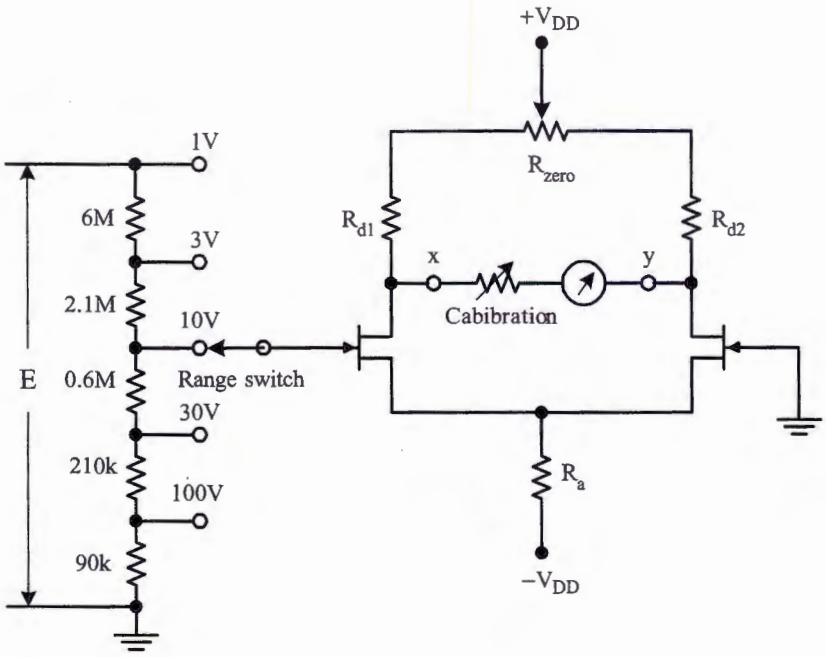
$$R_s = \frac{V}{I_m} - R_m$$

$$R_s = \frac{2.64V}{100\mu A} - 1.2k\Omega - 25.2k\Omega \text{ .....\#}$$

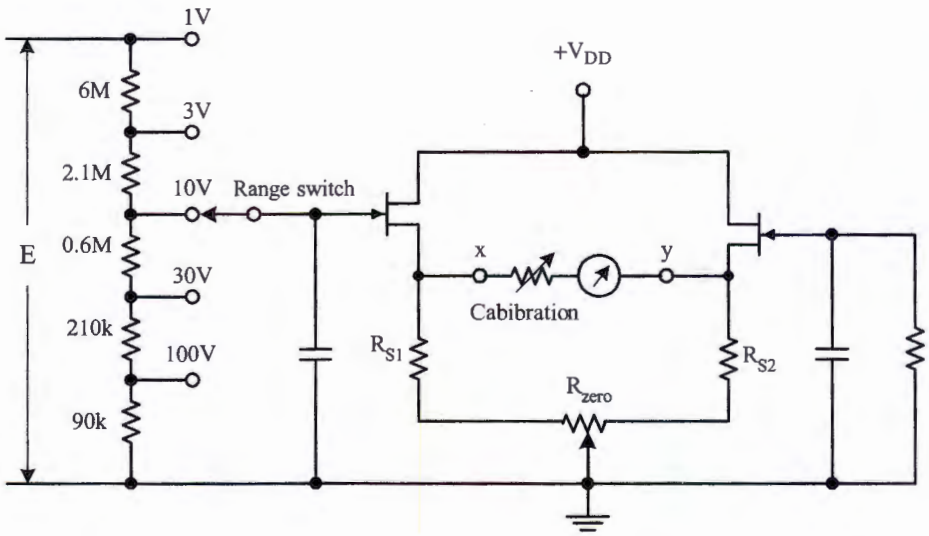
9.3.5 โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยเฟต

(FET Difference Amplifier Voltmeter)

โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยเฟตจะมีความต้านทานอินพุตสูงมาก วงจรพื้นฐานดังรูปที่ 9.6 จะมีขดลวดหมุนต่ออยู่ระหว่างขาเดรน (Drain) ของเฟตและป้อนแรงดันไฟฟ้าอินพุตให้วงจรเปลี่ยนย่านวัดซึ่งทุกย่านวัดจะลดแรงดันไฟฟ้า $E_G = 1V$ R_{zero} จะใช้ปรับแรงดันไฟฟ้ามิเตอร์เท่ากับศูนย์เมื่อยังไม่มีแรงดันไฟฟ้าอินพุตป้อนเข้ามา ส่วนการปรับแต่ง (Calibration) ด้วยโปเทนชิโนมิเตอร์ใช้ปรับให้กระแสไฟฟ้าเต็มสเกล

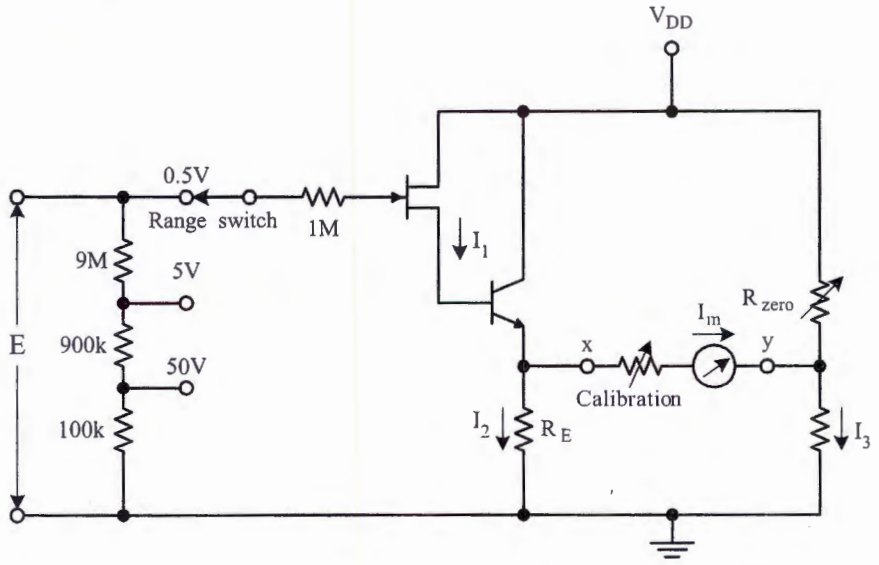


รูปที่ 9.6 โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยเฟตที่มีวงจรเปลี่ยนย่านวัด



รูปที่ 9.7 โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยเฟตแบบซอสฟอลโลเวอร์

รูปที่ 9.7 โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างด้วยเฟตต่อวงจรเป็นแบบซอสฟอลโลเวอร์ (Source Follower) และรูปที่ 9.8 ต่อเฟตกับทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขยายแบบดาร์ลิงตัน



รูปที่ 9.8 โวลต์มิเตอร์แบบต่อเฟตกับทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขยายแบบดาร์ลิงตัน

9.4 ดีซีโวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายออปแอมป์

(Operational Amplifier DC Voltmeter)

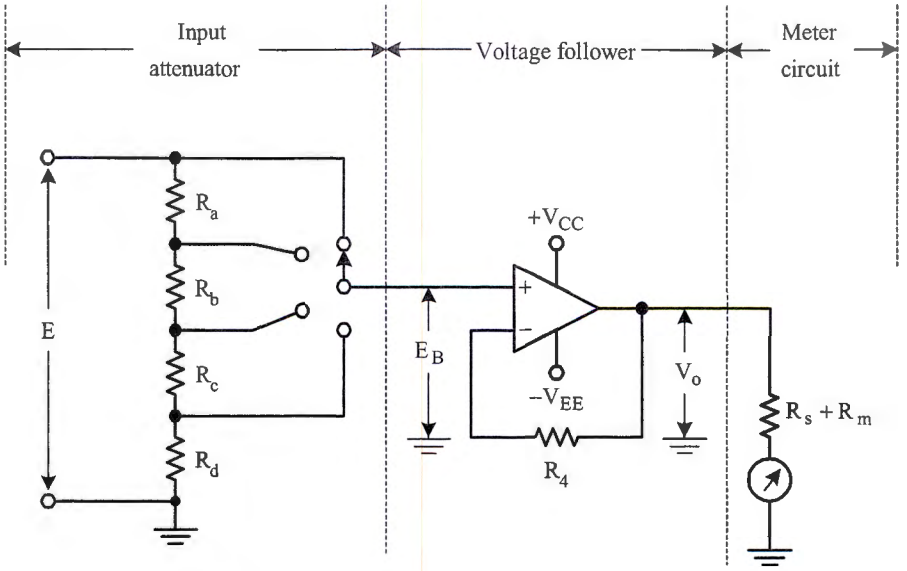
9.4.1 ดีซีโวลต์มิเตอร์แบบออปแอมป์เป็นวงจรขยายตามแรงดันไฟฟ้า

(Op-Amp Voltage Follower DC Voltmeter)

วงจรขยายตามแรงดันไฟฟ้าจะมีความต้านทานอินพุตสูงแต่ความต้านทานเอาต์พุตต่ำจึงมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตไหลมากพอที่จะป้อนให้ขดลวดหมุนมีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกลได้ แรงดันไฟฟ้าอินพุต E ป้อนเข้าวงจรเปลี่ยนย่านวัดลดทอนเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุต E_B แล้วป้อนให้ขานอนอินเวอร์ติ้งได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_O เท่ากับแรงดันไฟฟ้าอินพุต E_B

หาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

$$V_O = E_B = I_m(R_s + R_m) \qquad \text{.....(9.15)}$$



รูปที่ 9.9 ดีซีโวลต์มิเตอร์แบบใช้ออปแอมป์เป็นวงจรขยายตามแรงดันไฟฟ้า

9.4.2 ดีซีโวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายออปแอมป์

(Op-Amp Amplifier DC Voltmeter)

โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายออปแอมป์ จะจัดเป็นวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าไม่กลับเฟส (Noninverting Amplifier) ดังรูปที่ 9.10 จะสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำๆได้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต E ถูกป้อนเข้ามาจะถูกขยายให้มีค่ามากขึ้นและได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_O ตกคร่อม R_3 และ R_4 แรงดันไฟฟ้า V_{R3} จะถูกป้อนกลับให้ออปแอมป์ที่ขาอินเวอร์ติ้งและแรงดันไฟฟ้าอินพุต E จะเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ R_3 ด้วย

หาอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

$$A_V = \frac{V_O}{E} = \frac{R_4}{R_3} + 1 \qquad \text{.....(9.16)}$$

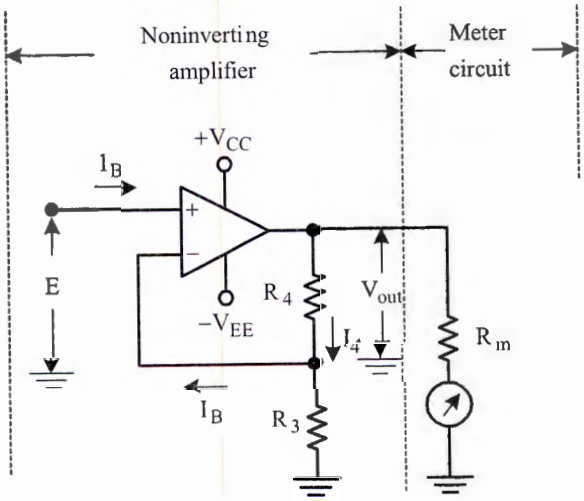
หาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

$$V_O = E\left(\frac{R_4}{R_3} + 1\right) \qquad \text{.....(9.17)}$$

หาค่า R_3, R_4

$$R_3 = \frac{E}{I_4} = \frac{V_{R3}}{I_4} \qquad \text{.....(9.18)}$$

$$R_4 = \frac{V_O - E}{I_4} \qquad \text{.....(9.19)}$$



รูปที่ 9.10 ดีซีโวลต์มิเตอร์แบบใช้ออปแอมป์เป็นวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าไม่กลับเฟส

ตัวอย่างที่ 9.13 โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายออปแอมป์ในรูปที่ 9.10 เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้าอินพุตค่า E=20mV เป็นค่าสูงสุดที่ทำให้กระแสไฟฟ้ามิเตอร์ I_m=100μA เท่ากับกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล ถ้าออปแอมป์มีกระแสไฟฟ้าอินพุตไบอัส I_B=0.2μA และ R_m=10kΩ จงคำนวณหาค่าของ R_3 และ R_4

วิธีทำ

เพราะว่า $I_4 >> I_B$ ให้ $I_4 = 1000 I_B$

$$I_4 = 1000 \times 0.2\mu A$$
$$I_4 = 0.2mA$$

หา R_3, R_4

$$V_O = I_m R_m = 100\mu A \times 10k\Omega = 1V$$
$$R_3 = \frac{E}{I_4} = \frac{20mV}{0.2mA} = 100\Omega \text{ .....\#}$$
$$R_4 = \frac{V_O - E}{I_4} = \frac{1V - 20mV}{0.2mA} = 4.9k\Omega \text{ .....\#}$$

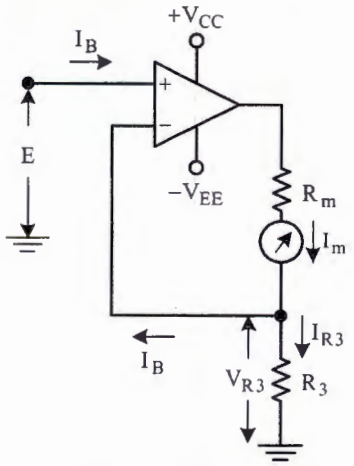
9.4.3 โวลต์มิเตอร์แบบออปแอมป์เป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

(Voltage to Current Converter Op-Amp DC Voltmeter)

จากวงจรรูปที่ 9.10 นำขดลวดหมุนแทนใน R_4 จะทำให้กระแสไฟฟ้า I_m เท่ากับกระแสไฟฟ้า I_{R3} ซึ่งจะมีค่ามากกว่า I_B อย่างมาก

หากระแสไฟฟ้า I_{R3}

$$I_{R3} = I_m = \frac{E}{R_3} \qquad \text{.....(9.20)}$$

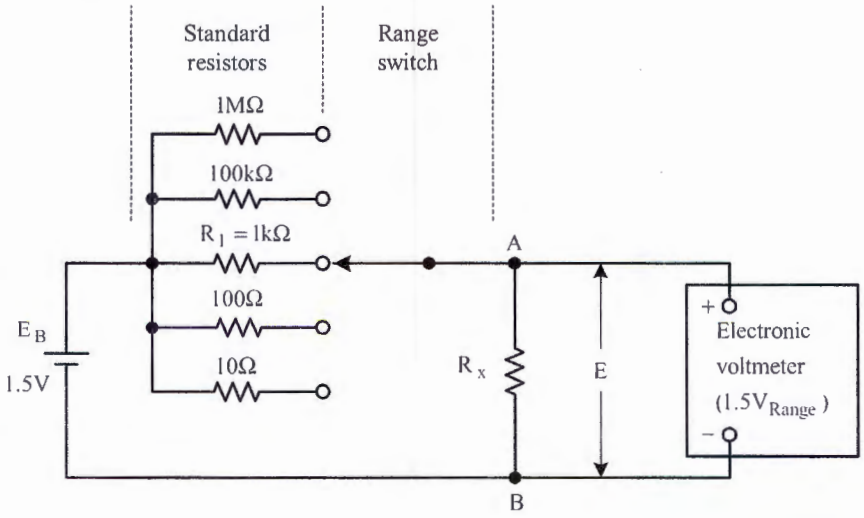


รูปที่ 9.11 ดีซีโวลต์มิเตอร์แบบใช้ออปแอมป์เป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

9.5 โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Ohmmeter)

9.5.1 โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบอนุกรม (Series Electronic Ohmmeter)

โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบอนุกรม จะเป็นส่วนหนึ่งในเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ดังรูปที่ 9.12 จะมี 5 ย่านวัดคือ R×1MΩ, R×100kΩ, R×1kΩ, R×100Ω และ R×10Ω แต่ละย่านวัดจะมีตัวต้านทานมาตรฐานประจำย่านวัดซึ่งถูกป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้า E_B=1.5V โดยจุด A และจุด B เป็นจุดต่อตัวต้านทานไม่ทราบค่า R_x และโวลต์มิเตอร์ตั้งย่านวัด 1.5V วัดแรงดันไฟฟ้า E ที่ตกคร่อม R_x



รูปที่ 9.12 โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบอนุกรมในเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์

9.5.2 สเกลหน้าปัดของโอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบอนุกรม (Scale Marking of Ohmmeter)

เมื่อสวิตช์เลือกต่อกับย่านวัด R×1kΩ ซึ่งมีตัวต้านทานประจำย่านวัดคือ R_1=1kΩ จะพิจารณาสเกลความต้านทานจากแรงดันไฟฟ้า E ที่ตกคร่อม R_x ดังนี้

1. เมื่อ $R_x = \infty\Omega$ โดยเปิดวงจรที่จุด A และจุด B ย่านวัด 1.5V ของโวลต์มิเตอร์จะวัดแรงดันไฟฟ้า $E = E_B = 1.5V$ ทำให้เข็มชี้เต็มสเกลดังนั้นตำแหน่งของ $\infty\Omega$ จะอยู่ด้านขวามือของสเกล

2. เมื่อ $R_x = 0\Omega$ โดยลัดวงจรที่จุด A และจุด B โวลต์มิเตอร์จะวัดแรงดันไฟฟ้า $E = E_B = 0V$ ดังนั้นตำแหน่ง 0Ω อยู่ด้านซ้ายมือของสเกล

3. เมื่อ R_x = ค่าใดๆ จะพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม E บน R_x ดังสมการ

$$E = \left(\frac{E_B}{R_1 + R_x}\right) \times R_x \qquad \text{.....(9.21)}$$

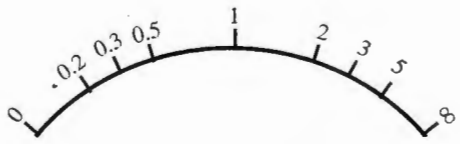
หา R_x จากสมการ (9.21)

$$E = \left(\frac{E_B}{R_1 + R_x}\right) \times R_x$$

$$\frac{E}{E_B} = \frac{R_x}{R_1 + R_x}$$

$$\frac{E_B}{E} = \frac{R_1 + R_x}{R_x} = \frac{R_1}{R_x} + 1$$

$$R_x = \frac{R_1}{\frac{E_B}{E} - 1} \qquad \text{.....(9.22)}$$



รูปที่ 9.13 สเกลความต้านทานของโอห์มมิเตอร์

9.5.3 ความต้านทานกึ่งกลางสเกล (Half Scale Resistance : R_h)

ที่ย่านวัด R×1kΩ มีตัวต้านทานประจำย่านวัด $R_1 = 1k\Omega$ ความต้านทานกึ่งกลางสเกลมีค่าเท่ากับ $R_x = R_1 = 1k\Omega$ ได้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมคือ

$$E = \left(\frac{E_B}{R_1 + R_x}\right) \times R_x = \left(\frac{1.5V}{1k\Omega + 1k\Omega}\right) \times 1k\Omega = 0.75V$$

แรงดันไฟฟ้า $E = 0.75V$ มิเตอร์จะชี้ค่ากึ่งกลางสเกลจึงให้เป็นสเกล 1 ในทำนองเดียวกันทุกย่านวัดถ้าค่า R_x เท่ากับค่าตัวต้านทานประจำย่านวัดแล้วจะได้แรงดันไฟฟ้า E=0.75V มิเตอร์จะชี้ค่ากึ่งกลางสเกลเหมือนกันจึงทำให้ทุกย่านวัดใช้สเกล 1 ร่วมกัน

ตัวอย่างที่ 9.14 โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบอนุกรม รูปที่ 9.12 จงหาตำแหน่งสเกลของค่าความต้านทานที่ $\frac{1}{3},\frac{1}{2},\frac{2}{3}$ ของค่าเต็มสเกล

วิธีทำ

จากสมการ (9.22) $$R_x = \frac{R_1}{\frac{E_B}{E} - 1}$$

ที่ตำแหน่งของค่าเต็มสเกลคือ FSD

จะได้ $$E = E_B$$

ที่ $\frac{1}{3}$ FSD จะได้ $$E = \frac{E_B}{3}$$

$$R_x = \frac{R_1}{\frac{E_B \times 3}{E_B} - 1} = \frac{R_1}{2}$$

$$R_x = 0.5R_1 \ldots..\#$$

ที่ $\frac{1}{2}$ FSD จะได้ $$E = \frac{E_B}{2}$$

$$R_x = \frac{R_1}{\frac{E_B \times 2}{E_B} - 1}$$

$$R_x = 1R_1 \ldots..\#$$

ที่ $\frac{2}{3}$ FSD จะได้ $$E = \frac{2E_B}{3}$$

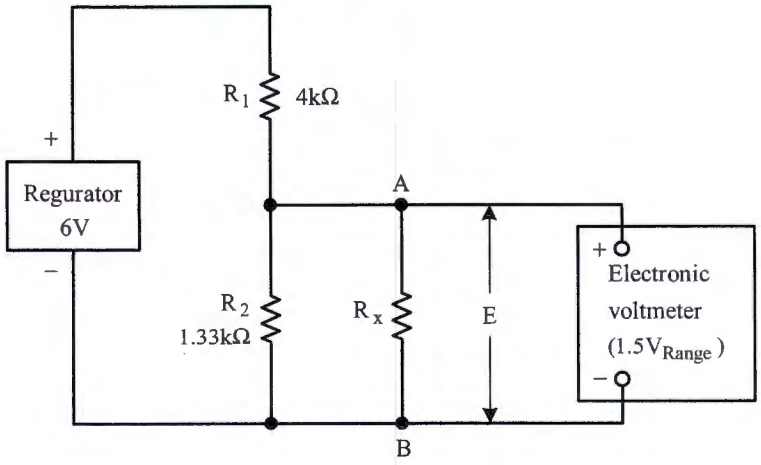
$$R_x = \frac{R_1}{\frac{E_B \times 3}{2E_B} - 1}$$

$$R_x = 2R_1 \ldots..\#$$

จากตัวอย่างที่ 9.14 จะนำค่า R_x ที่คำนวณได้ไปกำหนดตำแหน่งสเกลจะได้ดังรูปที่ 9.13 ซึ่งเป็นสเกลแบบล็อก (Logarithmic Scale) โดยสเกลช่วงท้ายจะหยาบมาก ดังนั้นการอ่านค่าให้มีความถูกต้องมากนั้นจะต้องอยู่ในช่วงใกล้ค่ากึ่งกลางสเกล

9.5.4 โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบขนาน (Shunt Electronic Ohmmeter)

โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบขนานดังรูปที่ 9.14 จะประกอบด้วยตัวต้านทานมาตรฐานที่มีค่าเที่ยงตรง (Precision Resistor) R_1 และ R_2 ต่ออนุกรมกันจะป้อนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Regurator) 6V และใช้โวลต์มิเตอร์ตั้งย่านวัด 1.5V วัดแรงดันไฟฟ้า E ตกคร่อม R_x ซึ่งต่อขนานกับ R_2 โดย R_x ต่อกับจุด A และ B



รูปที่ 9.14 โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบขนานในเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์

9.5.5 สเกลหน้าปัดของโอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบขนาน

1. เมื่อ $R_x = \infty\Omega$ โดยเปิดวงจรที่จุด A และ B โวลต์มิเตอร์จะวัดแรงดันไฟฟ้า E ตกคร่อม R_2 ได้ $E = 1.5V$ ดังนี้

$$E = \frac{E_B}{R_1 + R_2} \times R_2$$

$$E = \frac{6V}{4k\Omega + 1.33k\Omega} \times 1.33k\Omega$$

$$E = 1.5V$$

ได้แรงดันไฟฟ้า E=1.5V เมื่อวัดด้วยโวลต์มิเตอร์ตั้งย่านวัด 1.5V ทำให้มิเตอร์ชี้เต็มสเกล ดังนั้น $R_x = \infty\Omega$ ได้ตำแหน่ง $\infty\Omega$ อยู่ด้านขวามือของสเกล

2. เมื่อ $R_x = 0\Omega$ โดยลัดวงจรที่จุด A และ B โวลต์มิเตอร์จะวัดแรงดันไฟฟ้า $E = 0V$ ดังนั้น $R_x = 0\Omega$ ได้ตำแหน่ง 0Ω อยู่ด้านซ้ายมือของสเกล

3. เมื่อ R_x = ค่าใดๆ จะพิจารณาจากโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้า E ตกคร่อม $R_2 // R_x$ มีค่าเท่าไรดังสมการ

$$E = \frac{E_B}{R_1 + R_2 // R_x} \times R_2 // R_x \qquad \text{.....(9.23)}$$

9.5.6 ความต้านทานกึ่งกลางสเกล (R_h)

ค่าความต้านทานกึ่งกลางสเกลจะเป็นค่าที่บอกว่าเป็นย่านวัดอะไรของโอห์มมิเตอร์แบบขนานโดยค่าความต้านทานกึ่งกลางสเกล $R_h = R_x = R_1 // R_2$

ในรูปที่ 9.14 จะได้ $R_h = R_x = R_1 // R_2 = 4k\Omega // 1.33k\Omega = 1k\Omega$ ดังนั้นจะได้เป็นย่านวัด $R \times 1k\Omega$ คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า E ที่ตกคร่อม $R_2 // R_x$ จะได้เท่ากับ 0.75V

จากสมการ (9.23) $$E = \frac{6V}{4k\Omega + 1.33k\Omega // 1k\Omega} \times 1.33k\Omega // 1k\Omega$$

$$E = 0.75V$$

เมื่อวัดด้วยโวลต์มิเตอร์ตั้งย่านวัด 1.5V จะต้องได้ $E = 0.75V$ ดังนั้น ตำแหน่งของ $R_x = 1k\Omega$ จึงเป็นค่าความต้านทานกึ่งกลางสเกลและ $R_x = 1k\Omega = R_1 // R_2$ จะเป็นย่านวัด $R \times 1k\Omega$ ของโอห์มมิเตอร์

จากหลักการดังกล่าวเมื่อเพิ่มหรือลดค่าความต้านทานของ R_1, R_2 ให้เป็น 10 เท่าแล้วได้ $R_x = R_1 // R_2$ ตามค่าที่เพิ่มหรือลดจะได้ย่านวัดใหม่ของโอห์มมิเตอร์ตามต้องการ เช่นเมื่อเพิ่มค่าความต้านทาน R_1, R_2 อีก 10 เท่าแล้วจะได้ค่า $R_1 = 40k\Omega, R_2 = 13.30k\Omega$ คำนวณหาค่าย่านวัดใหม่ของโอห์มมิเตอร์ได้ดังนี้

จะได้ $$R_x = R_1 // R_2 = 40k\Omega // 13.30k\Omega$$

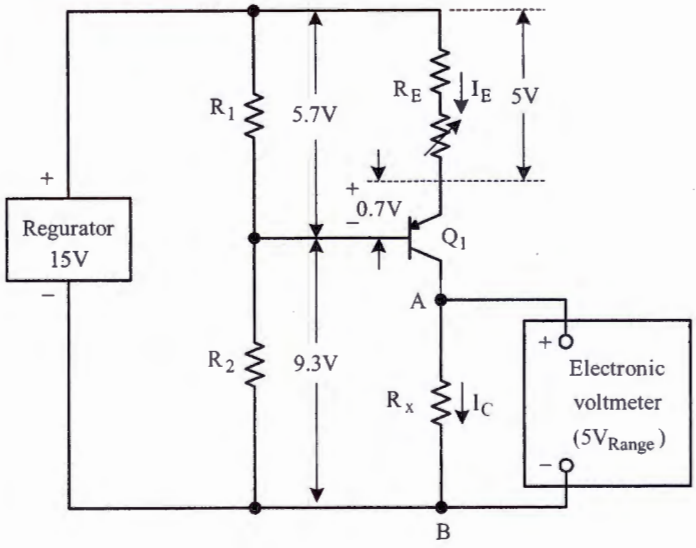
$$R_x = 9.9k\Omega \approx 10k\Omega$$

และ $$E = \frac{6V}{40k\Omega + 13.30k\Omega // 10k\Omega} \times 13.30k\Omega // 10k\Omega = 0.75V$$

โอห์มมิเตอร์จะมีย่านวัดใหม่เป็น $R \times 10k\Omega$ และมีค่าความต้านทานกึ่งกลางสเกลเท่ากับ $10k\Omega$ ซึ่งเท่ากับค่า R_x นั่นเอง

9.5.7 โอห์มมิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์แบบลิเนียร์ (Linear Electronic Ohmmeter)

วงจรรูปที่ 9.15 ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะทำงานเป็นวงจรกระแสไฟฟ้าคงที่ (Constant Current Circuit) ถูกกำหนดด้วยตัวต้านทาน R_1, R_2 และ R_E โดย R_1 และ R_2 เป็นวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าได้ค่า 5.7V ตกคร่อม R_1 จ่ายให้ขาเบสของทรานซิสเตอร์ ได้แรงดันไฟฟ้าที่ขาอิมิตเตอร์คือ $V_E = V_{R1} - V_{BE} = 5.7V - 0.7V = 5V$ จะได้กระแสไฟฟ้าอิมิตเตอร์ $I_E \approx I_C = \frac{V_E}{R_E} = \frac{5V}{R_E}$ ไหลผ่าน R_x มีค่าคงที่ และนำโวลต์มิเตอร์ตั้งย่านวัด 5V วัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_x ซึ่งจะมีค่าคงที่ด้วย



รูปที่ 9.15 วงจรโอห์มมิเตอร์แบบลิเนียร์

สมมุติปรับค่า R_E ให้กระแสไฟฟ้า $I_C = 1mA$ ถ้าโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้า R_x ได้ 5V คำนวณหาค่า R_x ได้ดังนี้

$$R_x = \frac{V_{RX}}{I_C} = \frac{5V}{1mA} = 5k\Omega$$

ถ้าโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้า R_x ได้ 3V ย่อมได้ $R_x = 3k\Omega$ นั่นคือจะได้สเกลแรงดันไฟฟ้า 0V ถึง 5V ทำเป็นสเกลความต้านทานแบบลิเนียร์ 0Ω ถึง $5k\Omega$ ดังนั้น จึงนำตัวต้านทานมาตรฐาน R_E หลายๆค่ามาทำเป็นย่านวัดได้ตามต้องการ

ตัวอย่างที่ 9.15 จงคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_x ของโอห์มมิเตอร์แบบขนานดังรูปที่ 9.14 เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้า $V_{Rx} = 5V$ แล้วทำให้กระแสไฟฟ้า $I_C = 100\mu A, 10mA$

วิธีทำ

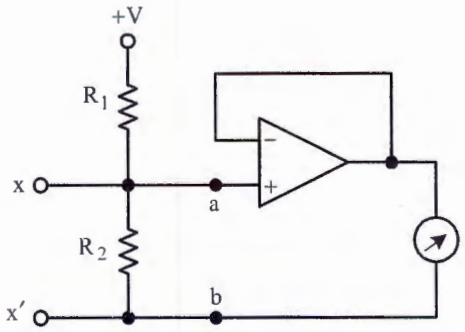
$$R_x = \frac{V_{Rx}}{I_C}$$

$$R_x = \frac{5V}{100\mu A} = 50k\Omega \text{ .....\#}$$

$$R_x = \frac{5V}{50mA} = 500\Omega \text{ .....\#}$$

9.6 โอห์มมิเตอร์แบบออปแอมป์ (Op-Amp Ohmmeter)

วงจรโอห์มมิเตอร์แบบออปแอมป์ดังรูปที่ 9.16 ต่อออปแอมป์เป็นวงจรขยายตามแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 1 การที่ออปแอมป์มีความต้านทานอินพุตสูงมากจึงเสมือนแยก (Isolation) ขดลวดหมุนและวงจรวัดความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x ออกจากกัน ซึ่งจุด x และ จุด x′ เป็นจุดวัดความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x ของโอห์มมิเตอร์



รูปที่ 9.16 วงจรพื้นฐานของโอห์มมิเตอร์

พิจารณาวงจรวัดความต้านทานด้วยทฤษฎีเทวินิน (Thevenin Theorem) เพื่อหาวงจรเทียบเท่าเทวินินที่จุด a และ b

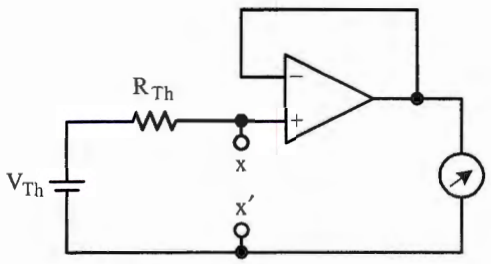
หาค่าแรงดันไฟฟ้าเทียบเท่าของเทเวนิน V_{Th} ที่จุด a และ b ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม R_2

จะได้ $$V_{Th} = \frac{V}{R_1 + R_2} \times R_2 \qquad \text{.....(9.24)}$$

หาค่าความต้านทานเทียบเท่าของเทวินิน V_{Th} ที่จุด A และ B โดยการลัดวงจรที่แหล่งจ่าย +V

จะได้ $$R_{Th} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{.....(9.25)}$$

แทนวงจรรูปที่ 9.16 ด้วยวงจรเทียบเท่าเทวินินได้ดังรูปที่ 9.17



รูปที่ 9.17 วงจรเทียบเท่าเทวินินของวงจรพื้นฐานโอห์มมิเตอร์

9.6.1 สเกลหน้าปัดของโอห์มมิเตอร์แบบออปแอมป์

1. เมื่อ $R_x = 0\Omega$ โดยลัดวงจรที่จุด x และ x′ ทำให้แรงดันไฟฟ้าอินพุตของออปแอมป์เป็น 0V ดังนั้นตำแหน่ง 0Ω จึงอยู่ด้านซ้ายของสเกล

2. เมื่อ $R_x = \infty\Omega$ โดยเปิดวงจรที่จุด x และ x′ ทำให้แรงดันไฟฟ้าอินพุตของออปแอมป์เท่ากับ V_{Th} มิเตอร์จะชี้เต็มสเกล ดังนั้นตำแหน่ง ∞Ω จึงอยู่ด้านขวาของสเกล

3. เมื่อ $R_x = R_{Th}$ มิเตอร์จะชี้กึ่งกลางสเกล ดังนั้นตำแหน่งของความต้านทานกึ่งกลางสเกล R_h จะทำให้ได้ความต้านทาน $R_x = R_{Th} = R_h$

ตัวอย่างที่ 9.16 โอห์มมิเตอร์ดังรูปที่ 9.17 ขดลวดหมุนมีความต้านทานภายใน $R_m = 2k\Omega$ กระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $I_{fs} = 50\mu A$ ให้ค่าความต้านทานกึ่งกลางสเกล $R_h = 100\Omega$

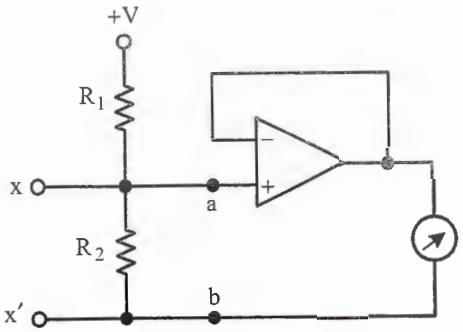
จงคำนวณหาค่า

ก) แรงดันไฟฟ้า V_O ที่ FSD และ 0.5FSD

ข) ตัวต้านทาน R_1, R_2

ค) แรงดันไฟฟ้า V

ง) แรงดันไฟฟ้า V_{Th} และตัวต้านทาน R_{Th}



วิธีทำ

ก) หา V_O ที่ FSD

$$V_O = I_{fs}R_m = 50\mu A \times 2k\Omega = 100mV \text{ .....\#}$$

หา V_O ที่ 0.5FSD

$$V_O = 0.5I_{fs}R_m = (0.5 \times 50\mu A) \times 2k\Omega = 50mV \text{ .....\#}$$

ข) หา R_1, R_2

จะได้ $R_{Th} = R_h = R_1 // R_2 = 100\Omega$

เพราะว่า $R_1 = R_2$

$$R_1 // R_2 = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(R_1)^2}{2R_1} = 100\Omega$$

$$R_1 = R_2 = 2 \times 100\Omega = 200\Omega \text{ .....\#}$$

ค) หา V

จาก $V_{Th} = \frac{V}{R_1 + R_2} \times R_2$

$$V = \frac{V_{Th}(R_1 + R_2)}{R_2}$$

$$V = \frac{100mV(200\Omega + 200\Omega)}{200\Omega} = 200mV \text{ .....\#}$$

ง) หา V_{Th} และ R_{Th}

เนื่องจากเป็นวงจรนี้อัตราขยายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1

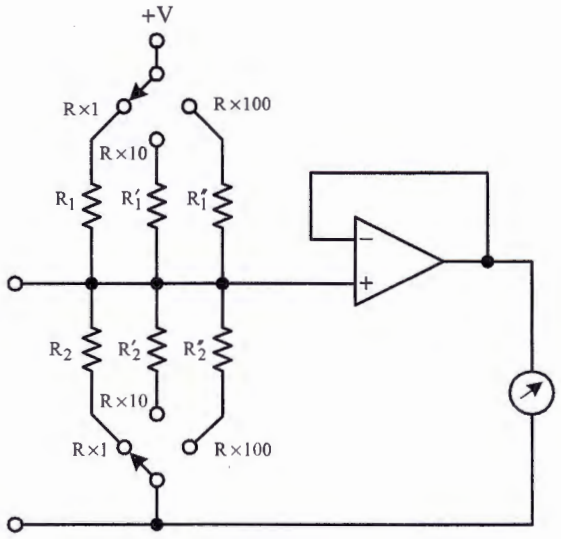
จะได้ $V_{Th} = V_O = 100mV \text{ .....\#}$

$$R_{Th} = R_1 // R_2 = 200\Omega // 200\Omega = 100\Omega \text{ .....\#}$$

9.6.2 โอห์มมิเตอร์หลายย่านวัดแบบออปแอมป์

(Multi-Range Op-Amp Ohmmeter)

เมื่อต้องการทำเป็นโอห์มมิเตอร์แบบหลายย่านวัดแล้วจะพิจารณาจากตำแหน่งค่าความต้านทานกึ่งกลางสเกล R_h ดังรูปที่ 9.18 เป็นโอห์มมิเตอร์ที่ประกอบด้วยย่านวัด $R\times1, R\times10, R\times100$



รูปที่ 9.18 โอห์มมิเตอร์ออปแอมป์แบบหลายย่านวัด

จากวงจรรูปที่ 9.18 พิจารณาแต่ละย่านวัดได้ดังนี้

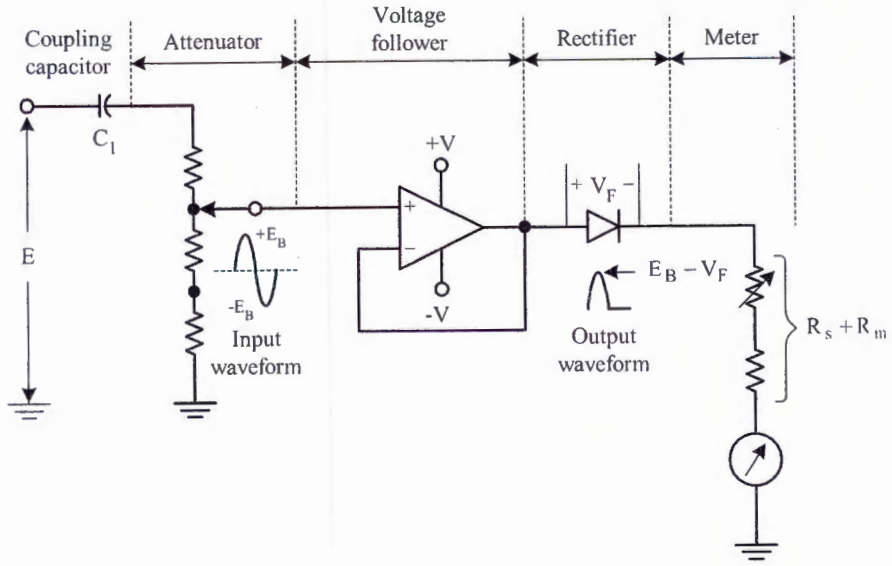
ย่านวัด $R\times1$ ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_2 = 20\Omega$ หาค่า $R_{Th} = R_1 // R_2 = 10\Omega$ จะต้องให้ $R_x = 10\Omega$ จึงทำให้มิเตอร์ชี้ที่กึ่งกลางสเกลได้สเกลของความต้านทานกึ่งกลางสเกลเป็น $R_h = 10\Omega$

ย่านวัด $R\times10$ ถ้ากำหนดให้ $R'_1 = R'_2 = 200\Omega$ หาค่า $R_{Th} = R'_1 // R'_2 = 100\Omega$ จะต้องให้ $R_x = 100\Omega$ จึงทำให้มิเตอร์ชี้ที่กึ่งกลางสเกลได้สเกลของความต้านทานกึ่งกลางสเกลเป็น $R_h = 100\Omega$ จะเห็นว่าเป็น 10 เท่าของย่านวัด $R\times1$ คือ $10\Omega\times10$

ย่านวัด $R\times100$ ถ้ากำหนดให้ $R''_1 = R''_2 = 2k\Omega$ หาค่า $R_{Th} = R''_1 // R''_2 = 1k\Omega$ จะต้องให้ $R_x = 1k\Omega$ จึงทำให้มิเตอร์ชี้ที่กึ่งกลางสเกลได้สเกลของความต้านทานกึ่งกลางสเกลเป็น $R_h = 1k\Omega$ จะเห็นว่าเป็น 100 เท่าของย่านวัด $R\times1$ คือ $10\Omega\times100$

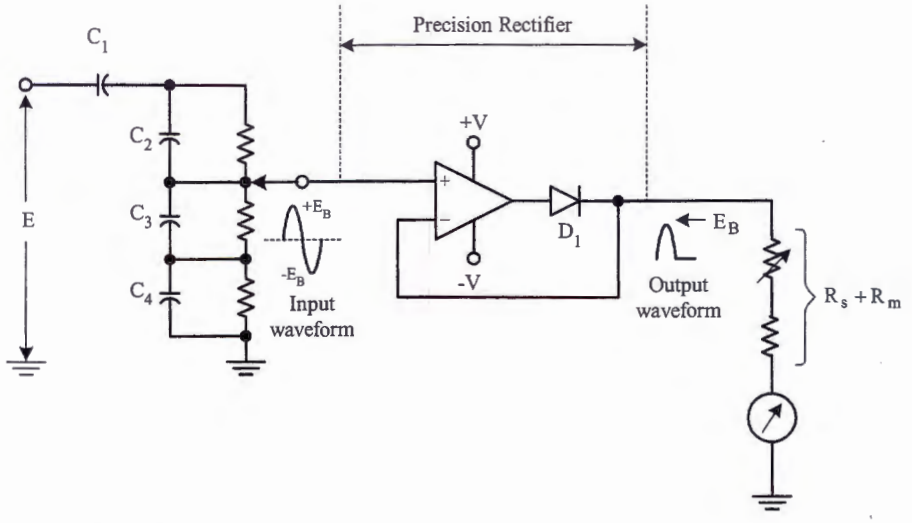
9.7 เอซีโวลต์มิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ (AC Electronic Voltmeter : AC EVM)

จากดีซีอิเล็กทรอนิกส์โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายตามแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 9.9 จะทำเป็นเอซีโวลต์มิเตอร์ด้วยการต่อไดโอดอนุกรมกับขดลวดหมุนดังรูปที่ 9.19 จะเป็นเอซีโวลต์มิเตอร์แบบเรียงกระแสไฟฟ้าครึ่งคลื่น เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ E จะผ่าน C_1 ที่มีหน้าที่กัน (Block) ไม่ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเข้ามา แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ E จะถูกลดทอนลงเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุต E_B ป้อนให้ออปแอมป์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของออปแอมป์จะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอินพุต E_B การจัดวงจรเช่นนี้จะมีปัญหาค่าผิดพลาดจากแรงดันไฟฟ้า V_F ของไดโอดเพราะว่าแรงดันไฟฟ้า V_O ที่ตกคร่อมมิเตอร์จะมีค่าเท่ากับ $E_B - V_F = E_B - 0.7V$ ถ้า $E_B < 0.7V$ จะไม่สามารถวัดแรงดันค่าต่ำๆได้เลย

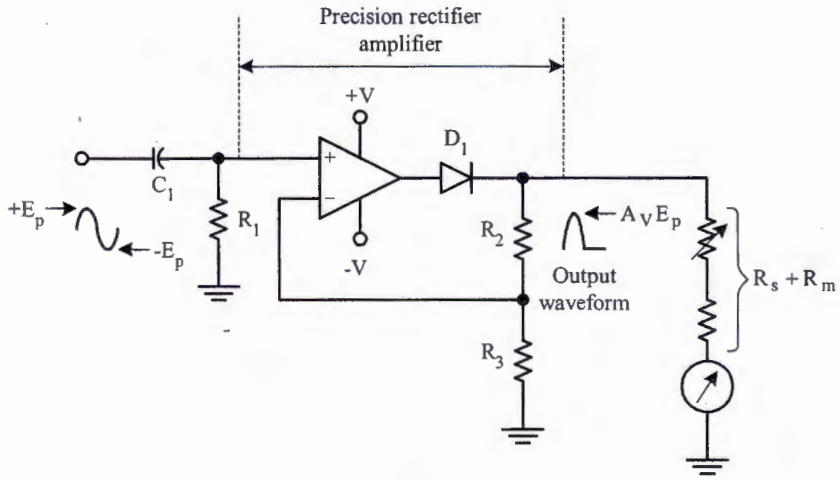


รูปที่ 9.19 เอซีโวลต์มิเตอร์แบบออปแอมป์เป็นวงจรขยายตามแรงดันไฟฟ้า

การป้องกันไม่ให้เกิดค่าผิดพลาดจากแรงดันไฟฟ้า V_F แก้ไขด้วยการย้ายจุดต่อสายสัญญาณการป้อนกลับจากเอาต์พุตของออปแอมป์ไปเปลี่ยนมาต่อที่ขาแคโธด (Cathode) ของไดโอดดังรูปที่ 9.20 จะได้แรงดันไฟฟ้า $V_O = E_B$ ตกคร่อมที่มิเตอร์จะมีความถูกต้องจากการวัดจึงเรียกว่าวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าที่มีความเที่ยงตรง (Precision Rectifier) สังเกตว่าจะมี C_2, C_3, C_4 ต่อคร่อมตัวต้านทานของวงจรลดทอนเพื่อชดเชยให้สัญญาณอินพุตไม่ให้ผิดเพื้อนเรียกว่าคาปาซิเตอร์ชดเชย (Compensation Capacitor)

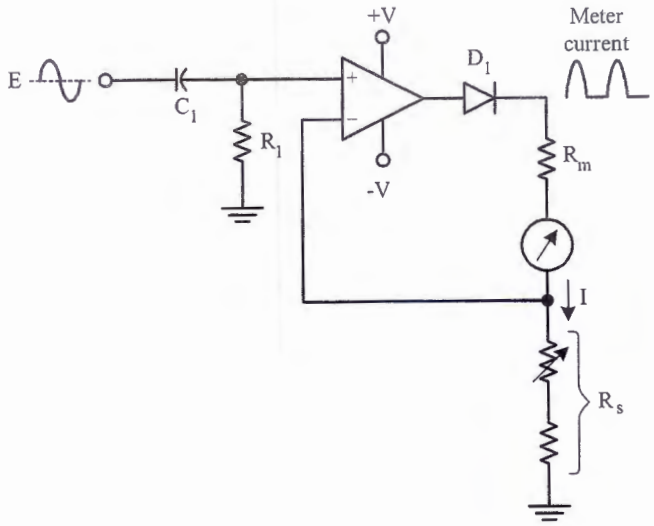


รูปที่ 9.20 เอซีโวลต์มิเตอร์แบบเรียงกระแสไฟฟ้าครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง



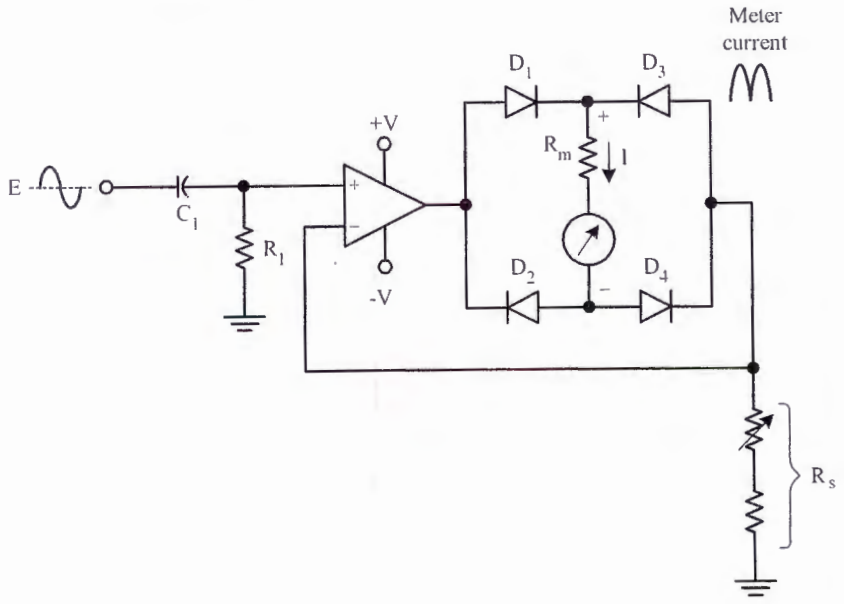
รูปที่ 9.21 เอซีโวลต์มิเตอร์แบบออปแอมป์มีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า

วงจรรูปที่ 9.21 เป็นเอซีโวลต์มิเตอร์ที่มีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า $A_V = \frac{R_2}{R_3} + 1$ แรงดันไฟฟ้าอินพุต E_P ป้อนให้วงจรได้ $V_O = A_V E_P$ ตกคร่อมมิเตอร์



รูปที่ 9.22 เอซีโวลต์มิเตอร์แบบเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

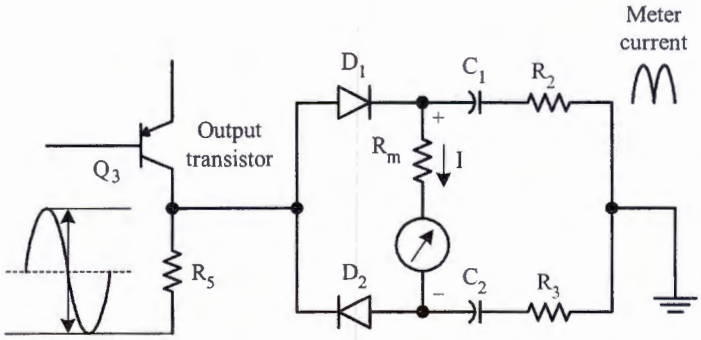
วงจรรูปที่ 9.22 เป็นวงจรเอซีโวลต์มิเตอร์ที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าต่อขดลวดหมุนแทน R_2 เมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุตครึ่งไซเกิลบวก E_P ถูกป้อนเข้ามาจะทำให้ไดโอดได้รับแรงดันไฟฟ้าไบอัสตรงจึงมีกระแสไฟฟ้า I_P ไหลผ่าน R_3 จะได้ $I_P = \frac{E_P}{R_3}$ และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $I_{av} = 0.318 I_P$



รูปที่ 9.23 เอซีโวลต์มิเตอร์เรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์

วงจรรูปที่ 9.23 เป็นเอซีโวลต์มิเตอร์เรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบบริดจ์ โดยที่ไดโอด D_1, D_4 จะได้รับแรงดันไฟฟ้าไบอัสตรงขณะที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตครึ่งไซเกิลบวกถูกป้อนเข้ามาและ D_2, D_3 จะได้รับแรงดันไฟฟ้าไบอัสตรงขณะที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตครึ่งไซเกิลลบถูกป้อนเข้ามาจะได้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย $I_{av} = 0.636I_P$

ส่วนรูปที่ 9.24 เอซีโวลต์มิเตอร์ที่เรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบครึ่งบริดจ์โดยจะใช้ไดโอด D_1, D_2 เพียง 2 ตัวและมีทรานซิสเตอร์ Q_3 จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ R_5 ได้แรงดันไฟฟ้าป้อนให้วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น นอกจากนี้ C_1, C_2 มีไว้เพื่อกันกระแสไฟฟ้ากระแสตรงจากมิเตอร์และให้กระแสไฟฟ้ากระแสสลับผ่านไปได้



รูปที่ 9.24 เอซีโวลต์มิเตอร์เรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นแบบครึ่งบริดจ์

ตัวอย่างที่ 9.17 วงจรเอซีโวลต์มิเตอร์แบบเรียงกระแสครึ่งคลื่นดังรูปที่ 9.21 ขดลวดหมุนมีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $I_{fs} = 1mA$ และความต้านทานภายในขดลวด $R_m = 1.2k\Omega$ จงคำนวณหา

ก) ค่า R_3 ที่ทำให้เข็มชี้เต็มสเกลเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 100mV(rms)

ข) กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย I_{av} จะไหลเท่าไรเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 50mV(rms)

วิธีทำ

ก) หา R_3 เมื่อ $E = 100V_{rms}$

$$I_{av} = I_{fs} = 0.318I_P$$

$$I_P = \frac{i_{fs}}{0.318} = \frac{1mA}{0.318} = 3.14mA$$

$$E_{rms} = 0.707E_P$$

$$E_P = \frac{E_{rms}}{0.707} = \frac{100V_{rms}}{0.707} = 141.4mV$$

$$R_3 = \frac{E_P}{I_P} = \frac{141.4mV}{3.14mA} = 45\Omega \text{ .....\#}$$

ข) หา I_{av} เมื่อ $E = 50V_{rms}$

$$E_P = \frac{E_{rms}}{0.707} = \frac{50V_{rms}}{0.707} = 70.7mV$$

$$I_P = \frac{E_P}{R_3} = \frac{70.7mV}{45\Omega} = 1.57mA$$

$$I_{av} = 0.318I_P = 0.318 \times 1.57mA$$

$$I_{av} = 0.5mA = \frac{1}{2}FSD \text{ .....\#}$$

แบบฝึกหัดที่ 9

1. วงจรโวลต์มิเตอร์พื้นฐานแบบอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ดังรูปที่ 9.1 กำหนดให้ค่า $V_{CC} = 12V$, $R_m = 1k\Omega, I_{fs} = 2mA$ ทรานซิสเตอร์มีค่า $h_{FE} = 80$ จงคำนวณหาค่า R_s ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเต็มสเกลเมื่อ $E = 5V$ และค่าความต้านทานอินพุต R_i

2. วงจรโวลต์มิเตอร์แบบอิมิตเตอร์ฟอลโลเวอร์ ดังรูปที่ 9.2 ให้ $R_1 = 12k\Omega, R_2 = R_3 = 2.7k\Omega$, $R_4 = R_6 = 3.3k\Omega, R_5 = 500\Omega$ และ $R_s + R_m = 10k\Omega$ ใช้มิเตอร์มี $I_{fs} = 100\mu A$ ป้อนแรงดันไฟฟ้า $\pm 9V$ ทรานซิสเตอร์มี $h_{FE} = 75$ จงคำนวณหา $V_P, I_{B1}, I_{B2}, I_2, I_3, I_4$ เมื่อ $E = 0V$

3. จงคำนวณหาการเบี่ยงเบนของเข็มมิเตอร์ในวงจรข้อ 2 เมื่อป้อนอินพุต 0.6V,0.75V และ 1V

4. แรงดันไฟฟ้าอินพุต $E = 3.5V$ ป้อนให้วงจรลดทอนดังรูปที่ 9.4 จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า E_{Ci} ของแต่ละย่านวัด

5. โวลต์มิเตอร์แบบเฟตอินพุตในรูปที่ 9.4 มีอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ $R_1 = 6.8k\Omega, R_2 = R_3 = 4.7k\Omega$, $R_4 = 1.5k\Omega, R_5 = 500\Omega, R_6 = 3.3k\Omega, R_m + R_s = 20k\Omega$ มิเตอร์มี $I_{fs} = 50\mu A$ และป้อนค่าแรงดันไฟฟ้า $\pm 10V$ ทรานซิสเตอร์มี $h_{FE} = 80$ เฟตมีแรงดันไฟฟ้า $V_{GS} = -3V$ จงคำนวณหาค่า V_P, I_S, I_2, I_3 และ I_4 เมื่อแรงดันไฟฟ้าอินพุต $E = 0V$

6. จงคำนวณหาการเบี่ยงเบนของเข็มมิเตอร์ของวงจรในข้อ 5 เมื่อตั้งย่านวัด 5V และป้อนแรงดัน $E = 1V, 3V$ และ $4V$

7. โวลต์มิเตอร์แบบวงจรขยายความแตกต่างในรูปที่ 9.5 มีอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ $R_1 = R_2 = 15k\Omega$, $R_{L1} = R_{L2} = 3.9k\Omega, R_E = 3.3k\Omega, R_s = 33k\Omega$ และ $R_m = 750\Omega$ กระแสไฟฟ้า $I_{fs} = 50\mu A$ ป้อนแรงดันไฟฟ้า $\pm 12V$ จงคำนวณหาระดับแรงดันของทรานซิสเตอร์เมื่อ $E = 0V$

8. จากวงจรในข้อ 7 ถ้าทรานซิสเตอร์มี $h_{FE} = 100, h_{ie} = 1.2k\Omega$ จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอินพุต E ที่ทำให้เข็มมิเตอร์เบี่ยงเบนเต็มสเกล

9. โวลต์มิเตอร์ใช้ออปแอมป์เป็นวงจรขยายตามแรงดันไฟฟ้ารูปที่ 9.9 ถ้าให้ $R_a = 800k\Omega$, $R_d = 40k\Omega$ ถ้าใช้มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้า $I_{fs} = 50\mu A$, $R_m = 750\Omega$ จงคำนวณหาค่า R_s ที่ทำให้เข็มมิเตอร์ชี้เต็มสเกลเมื่อป้อนแรงดัน $E = 10V$ และตั้งย่านวัด 10V

10. โวลต์มิเตอร์ใช้ออปแอมป์เป็นวงจรขยายไม่กลับเฟสตามรูปที่ 9.10 กระแสไฟฟ้าอินพุตไบอัส $I_B = 300nA$ ใช้มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้า $I_{fs} = 50\mu A, R_m = 100k\Omega$ จงคำนวณหาค่าของ R_3, R_4 ที่ทำให้เข็มมิเตอร์ชี้เต็มสเกลเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าอินพุต 300mV

11. โวลต์มิเตอร์ใช้ออปแอมป์เป็นวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าตามรูปที่ 9.11 โดยใช้มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $I_{fs} = 37.5\mu A, R_m = 900\Omega$ และถ้า $R_3 = 80k\Omega$ จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ทำให้ FSD และ 0.5FSD

12. จงคำนวณหา R_3 ตัวใหม่และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรในข้อ 11 ที่ทำให้ได้ FSD เมื่อ $E = 1V$

13. จากวงจรโอห์มมิเตอร์แบบอนุกรมตามรูปที่ 9.12 จงคำนวณหาค่าตำแหน่งสเกลความต้านทานที่ 25% และ 75% ของค่าเต็มสเกล

14. จงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของการเบี่ยงเบนของมิเตอร์ในวงจรรูปที่ 9.12 ถ้าสวิตช์ต่อตัวต้านทานมาตรฐาน $100k\Omega$ และ $R_x = 166k\Omega$

15. จงคำนวณหาการเบี่ยงเบนของมิเตอร์ในโอห์มมิเตอร์แบบขนานรูปที่ 9.14 เมื่อ $R_x = 2k\Omega$ และ $R_x = 300\Omega$

16. ตัวต้านทาน $16.67k\Omega$ ถูกแทนค่า R_E ในวงจรโอห์มมิเตอร์แบบลิเนียร์รูปที่ 9.15 จงคำนวณหาค่าตัวต้านทานที่ถูกวัดเมื่อโวลต์มิเตอร์อ่านค่าได้ 3.9V

17. โวลต์มิเตอร์ใช้ออปแอมป์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าครึ่งคลื่นตามรูปที่ 9.20 ใช้มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $I_{fs} = 500\mu A, R_m = 450\Omega$ จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า E_{rms} ที่ทำให้เข็มมิเตอร์ชี้เต็มสเกล

18. อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรข้อ 17 ให้นำมาต่อใหม่เป็นวงจรตามรูปที่ 9.22 ให้ $R_3 = R_s$ จงคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุต E_{rms} ค่าใหม่ที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนเต็มสเกล

19. เอซีโวลต์มิเตอร์ในวงจรรูปที่ 9.21 มีอุปกรณ์ดังนี้ $R_1 = 22k\Omega, R_2 = 2.25k\Omega, R_3 = 6.8k\Omega$ และถ้า $R_s + R_m = 1k\Omega$ มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $I_{fs} = 300\mu A$ จงคำนวณหาค่า E_{rms} ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ทำให้เข็มมิเตอร์ชี้ค่า 0.5FSD

20. โวลต์มิเตอร์ใช้ออปแอมป์เป็นวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าเต็มคลื่นตามวงจรรูปที่ 9.23 ถ้าใช้มิเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเต็มสเกล $I_{fs} = 500\mu A, R_m = 460\Omega$ และ $R_3 = 450\Omega$ ซึ่งเหมือนข้อ 17 และ 18 จงคำนวณหาค่า RMS ของแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ทำให้เข็มมิเตอร์ชี้เต็มสเกล