

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6 การทดลองวงจรขยายมอสเฟต และการประยุกต์ใช้งาน

หัวข้อเนื้อหา

1. วงจรขยายมอสเฟต
2. วงจรขยายแบบซอร์สร่วม (Common source amplifier)
3. วงจรขยายแบบเกตร่วม (Common gate amplifier)
4. วงจรขยายแบบเดรนร่วม (Common drain amplifier)
5. การประยุกต์ใช้งานมอสเฟตในวงจรแบบต่าง ๆ
6. การทดลองวงจรขยายด้วยมอสเฟต
7. การทดลองการประยุกต์มอสเฟตใช้วงจรต่าง ๆ

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อศึกษาการทำงานของมอสเฟตเมื่อใช้งานในวงจรขยาย
2. เพื่อศึกษาการทำงานของมอสเฟตเมื่อประยุกต์ใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรสะท้อนกระแส

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน
 - 1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย
 - 1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย
 - 1.3 วิธีสอนแบบปฏิบัติการ
 - 1.4 วิธีสอนแบบเน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง
2. กิจกรรมการเรียนการสอน
 - 2.1 อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรขยายมอสเฟต
 - 2.2 อธิบายขั้นตอนการทดลองวงจรขยายมอสเฟต
 - 2.3 อธิบายขั้นตอนการทดลองการประยุกต์ใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรสะท้อนกระแส
 - 2.4 อธิบายการบันทึกผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง
 - 2.5 นักศึกษาทำการทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผลการทดลอง และตอบคำถามท้ายการทดลอง

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ 1
2. ใบประกอบ
3. แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าเรียน
2. เอกสารปฏิบัติการ
3. สอบกลางภาค
4. สอบปลายภาค

บทที่ 6

การทดลองวงจรขยายมอสเฟต และการประยุกต์ใช้งาน

6.1 วงจรขยายมอสเฟต

การประยุกต์ใช้งานของทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟตเป็นการนำไปใช้ในวงจรขยายและใช้เป็นสวิตช์ โดยแบ่งตามลักษณะการทำงานของมอสเฟตดังนี้

6.1.1 วงจรขยายมอสเฟต

วงจรขยายมอสเฟต คือวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่มีขนาดเล็กให้มีขนาดมากขึ้น การวิเคราะห์วงจรขยายมอสเฟตใช้วงจรเทียบเคียงสัญญาณขนาดเล็ก (Small-signal equivalent circuit) วงจรขยายมอสเฟตถูกแบ่งออกตามลักษณะการต่อได้ 3 วงจร

- ก. วงจรขยายแบบซอร์สรวม (Common source amplifier)
- ข. วงจรขยายแบบเดรนรวม (Common drain amplifier)
- ค. วงจรขยายแบบเกตรวม (Common gate amplifier)

6.1.2 วงจรสวิตช์มอสเฟต

วงจรสวิตช์มอสเฟต คือวงจรที่นำมอสเฟตไปประยุกต์ใช้งานเป็นสวิตช์ตามจังหวะการทำงานของสัญญาณดิจิทัล หรือตามคำสั่งการทำงานของวงจรควบคุม การทำงานของมอสเฟตสวิตช์จะทำงานในย่านเชิงเส้น กล่าวคือ เมื่อทำการไบอัสให้มอสเฟตนำกระแส กระแส I_D จะไหลเป็นจำนวนมาก ขณะที่แรงดัน V_{DS} จะลดลงน้อยกว่า V_{DSAT} ส่งผลให้มอสเฟตเข้าสู่โหมดการทำงานในย่านเชิงเส้น

6.2 วงจรขยายแบบซอร์สรวม (Common source amplifier)

รูปที่ 6.1 (ก) แสดงวงจรขยายแบบซอร์สรวมซึ่งมีสัญญาณเข้าที่ขาเกต และมีสัญญาณออกที่ขาเดรน ขาซอสของวงจรต่อกับกราวด์ ซึ่งอาจจะต่อกับตัวต้านทานที่ขาซอสแล้วตัวต้านทานจึงต่อกับกราวด์ รูปที่ 6.1 (ข) แสดงวงจรเทียบเคียงขยายแบบซอร์สรวมซึ่งแรงดันไบอัสที่ขาเกตจะมีค่าเท่ากับค่าแรงดันที่ถูกแบ่งมาจากแรงดันไฟเลี้ยง และสัญญาณอินพุตที่เข้าจะเสมือนต่ออนุกรมกับแรงดันไบอัส การวิเคราะห์วงจรขยายสามารถทำได้ด้วยวิธีการทับซ้อน (Superposition) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่ละแหล่งจ่ายแล้วนำค่าแรงดันที่ได้มาบวกกัน เมื่อ $R_G = R_1 // R_2$

เมื่อทำการวิเคราะห์แรงดันไบอัสให้กับวงจรขยายเรียบร้อยแล้วเราจะทำการวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กซึ่งเป็นการวิเคราะห์วงจรขยายเมื่อแรงดันอินพุตคือแรงดันเอซี ด้วยการลดวงจรแรงดันดีซีลงกราวด์ จากนั้นใช้วงจรเทียบเคียงสัญญาณขนาดเล็กวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดัน, ค่าความต้านทานอินพุต และค่าความต้านทานเอาต์พุต รูปที่ 6.2 แสดงวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กแบบซอร์สรวม (Small Signal of Common Source) ซึ่งค่าอัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v = -g_m R_D \tag{6.1}$$

เมื่อ g_m คือ ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (AV)

ค่า g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \tag{6.2}$$

ค่า g_m ที่เป็นฟังก์ชันกับ I_D เขียนสมการได้ว่า

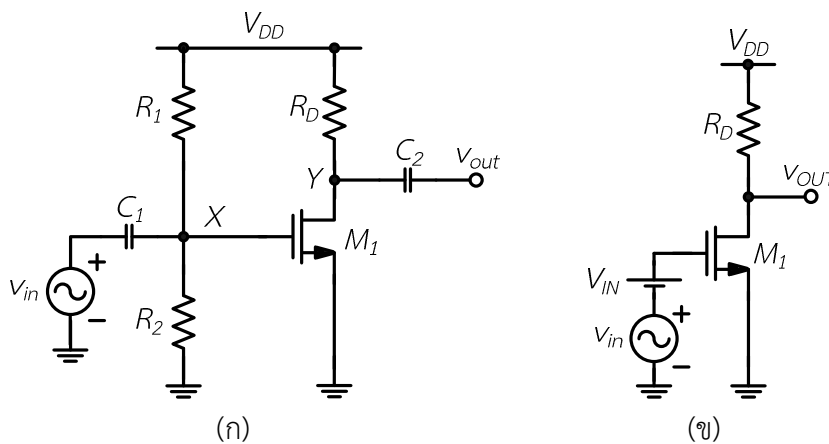
$$g_m = \sqrt{(K_n/2)I_D} \tag{6.3}$$

ค่า g_m ที่เป็นฟังก์ชันกับ V_{GS} เขียนสมการได้ว่า

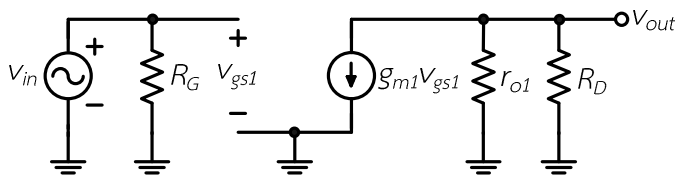
$$g_m = 2K_n (V_{GS} - V_{TH}) \tag{6.4}$$

ค่า g_m ที่เป็นฟังก์ชันกับ I_D และ V_{GS} เขียนสมการได้ว่า

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_{TH}} \tag{6.5}$$



รูปที่ 6.1 (ก) วงขยายแบบซอร์สร่วม (ข) วงจรเทียบเคียงขยายแบบซอร์สร่วม



รูปที่ 6.2 วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กแบบซอสร่วม

ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตเท่ากับ

$$R_{in} = R_1 // R_2 \tag{6.6}$$

$$R_{out} \approx R_D \tag{6.7}$$

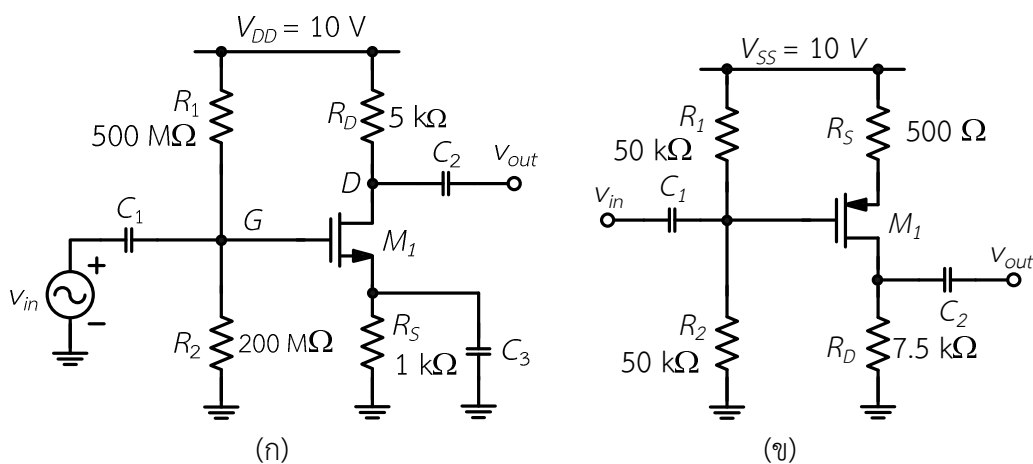
ตัวอย่างที่ 6.1 กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel ในวงจรขยายรูปที่ 6.3 (ก) มี $V_{TH} = 1\text{ V}$ และ $K_N = 1\text{ mA/V}^2$ ทำการหาอัตราขยาย A_v ค่าความต้านทานอินพุต R_{in} และเอาต์พุต R_{out}

วิธีทำ จากตัวอย่างที่ 5.3 ในบทที่ 5 ค่ากระแส $I_D = 0.91\text{ mA}$ นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{(K_n/2)I_D} \tag{6.8}$$

$$= \sqrt{(1/2)0.91} \tag{6.9}$$

$$= 0.685\text{ mA/V}$$



รูปที่ 6.3 วงจรขยายซอสร่วม (ก) มอสเฟตชนิด N-Channel และ (ข) มอสเฟตชนิด P-Channel

อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v = -g_m R_D \quad (6.10)$$

$$= -0.685 \text{ mA/V} \times 5 \text{ k}\Omega \quad (6.11)$$

$$= 3.425$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = R_1 // R_2 \quad (6.12)$$

$$= 500 \text{ M}\Omega // 200 \text{ M}\Omega \quad (6.13)$$

$$= 142.86 \text{ M}\Omega$$

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = R_D \quad (6.14)$$

$$= 5 \text{ k}\Omega$$

ตัวอย่างที่ 6.2 กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel ในรูปที่ 6.3 (ข) มี $V_{TH} = 0.8 \text{ V}$ และ $K_p = 0.2 \text{ mA/V}^2$ ทำการหาค่า A_v , R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ จากตัวอย่างที่ 5.4 ค่ากระแส $I_D = 0.11 \text{ mA}$ นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{(K_n/2)I_D} \quad (6.15)$$

$$= \sqrt{(1/2)0.11} \quad (6.16)$$

$$= 0.236 \text{ mA/V}$$

อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v \cong -\frac{R_D}{R_S} \quad (6.17)$$

$$= -0.236 \text{ mA/V} \times 3 \text{ k}\Omega \quad (6.18)$$

$$= 144$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = R_1 // R_2 \quad (6.19)$$

$$= 50 \text{ k}\Omega // 50 \text{ k}\Omega \quad (6.20)$$

$$= 25 \text{ k}\Omega$$

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = R_D \quad (6.21)$$

$$= 7.5 \text{ k}\Omega$$

6.3 วงจรขยายแบบเกตร่วม (Common gate amplifier)

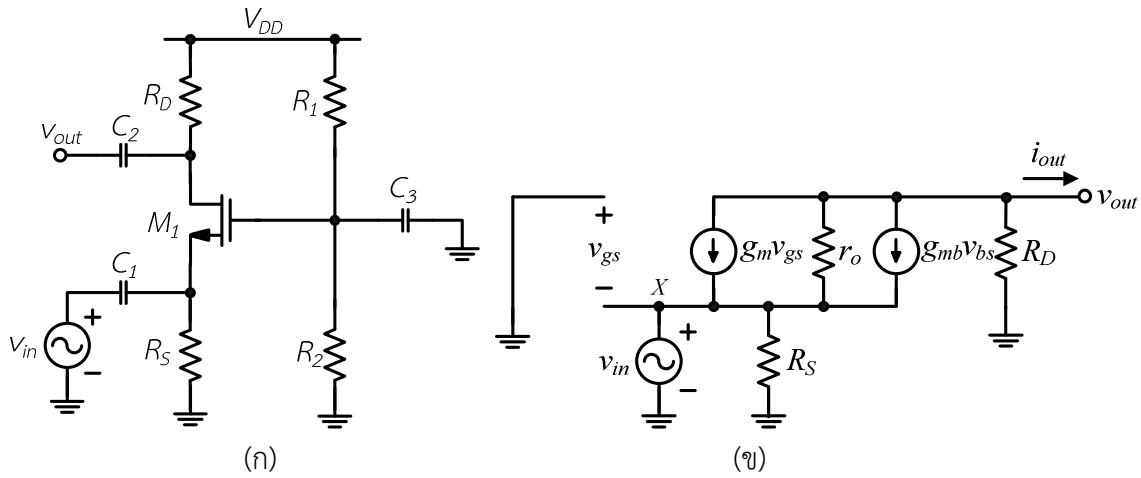
รูปที่ 6.4 (ก) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม มีอินพุตที่ขาซอส และมีเอาต์พุตที่ขาเดรน ขาเกตของวงจรต่อกับกราวด์ รูปที่ 6.4 (ข) แสดงวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กแบบเกตร่วม ทำการวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v = g_m R_D \quad (6.22)$$

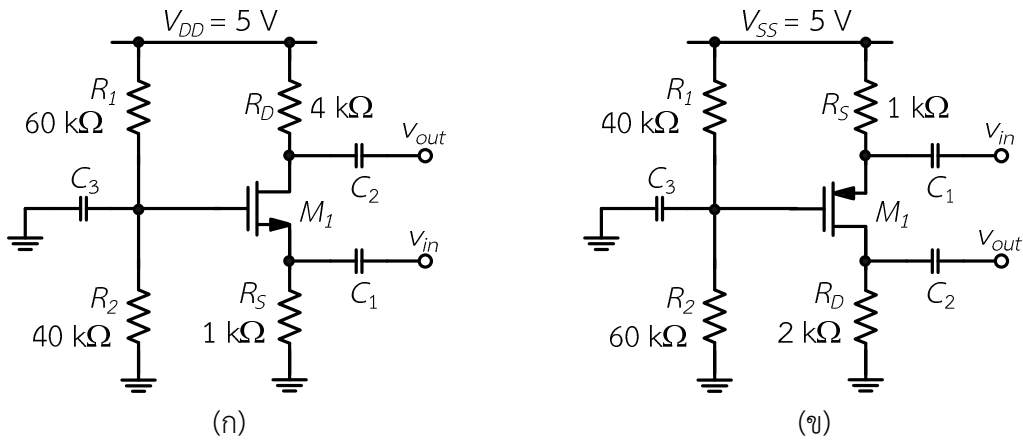
ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตเท่ากับ

$$R_{in} = 1/g_m \quad (6.23)$$

$$R_{out} \approx R_D \quad (6.24)$$



รูปที่ 6.4 (ก) วงจรขยายแบบเกตร่วม (ข) วงจรเทียบเคียงสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ 6.5 วงจรขยายแบบเกตร่วม (ก) มอสเฟตชนิด N-Channel (ข) มอสเฟตชนิด P-Channel

ตัวอย่างที่ 6.3 รูปที่ 6.5 (ก) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี $V_{TH} = 0.7 \text{ V}$ และ $K_N = 0.1 \text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v , R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ ทำการหาค่าแรงดัน V_{R2} ได้ว่า

$$V_G = V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD} \tag{6.25}$$

$$= \frac{40\text{k}\Omega}{60\text{k}\Omega + 40\text{k}\Omega} \times 5\text{V} \tag{6.26}$$

$$= 2 \text{ V}$$

เมื่อแทนค่าแรงดัน $V_G = 2 \text{ V}$ ในสมการกระแส I_D กระแส I_D มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_N (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (6.27)$$

$$I_D = K_N (V_G - I_D R_S - V_{TH})^2 \quad (6.28)$$

$$= 0.1 \text{ mA/V}^2 (2\text{V} - I_D - 0.7\text{V})^2 \quad (6.29)$$

$$= 0.1 (1.3\text{V} - I_D)^2 \text{ mA} \quad (6.30)$$

$$I_D = 0.169 - 0.26I_D + 0.1I_D^2 \quad (6.31)$$

$$I_D^2 - 12.6I_D + 1.69 = 0 \quad (6.32)$$

$$I_D = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.33)$$

$$I_D = \frac{12.6 \pm \sqrt{(-12.6)^2 - (4 \times 1.69)}}{2} \quad (6.34)$$

$$I_D = 24.92 \text{ mA และ } 0.3 \text{ mA}$$

เลือกค่ากระแส $I_D = 0.3 \text{ mA}$ เนื่องจากแทนค่า $V_{GS} = V_G - I_D R_S$ แล้วมากกว่า V_{TH} นำค่ากระแส I_D มาหาค่าแรงดัน V_{DS} ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) \quad (6.35)$$

$$= 5 \text{ V} - (0.3 \text{ mA} \times 5 \text{ k}\Omega) \quad (6.36)$$

$$= 3.5 \text{ V}$$

เนื่องจาก $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$ ทำให้มอสเฟตทำงานย่านอิ่มตัว ค่ากระแส $I_D = 0.3 \text{ mA}$ นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{(K_n/2)I_D} \quad (6.37)$$

$$= \sqrt{(1/2)0.3} \quad (6.38)$$

$$= 0.4 \text{ mA/V}$$

อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v = g_m R_D \quad (6.39)$$

$$= 0.4 \text{ mA/V} \times 4 \text{ k}\Omega \quad (6.40)$$

$$= 1.6$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = 1/g_m \quad (6.41)$$

$$= 1/0.4 \text{ mA/V} \quad (6.42)$$

$$= 2.5 \text{ k}\Omega$$

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = R_D \quad (6.43)$$

$$= 4 \text{ k}\Omega$$

ตัวอย่างที่ 6.4 รูปที่ 6.5 (ข) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี

$V_{TH} = 0.8 \text{ V}$ และ $K_p = 0.2 \text{ mA/V}^2$ ทำการหาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ เนื่องจากการไบอัสของวงจรในรูปที่ 6.5 (ก) เหมือนกับวงจรในรูปที่ 6.5 (ง) ดังนั้น $V_{R1} = 2 \text{ V}$ เมื่อแทนค่าแรงดัน $V_G = 2 \text{ V}$ ในสมการกระแส I_D กระแส I_D มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_N (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (6.44)$$

$$I_D = K_N (V_G - I_D R_S - V_{TH})^2 \quad (6.45)$$

$$= 0.2 \text{ mA} / \text{V}^2 (2\text{V} - I_D - 0.8\text{V})^2 \quad (6.46)$$

$$= 0.2 (1.2\text{V} - I_D)^2 \text{ mA} \quad (6.47)$$

$$I_D = 0.288 - 0.48 I_D + 0.2 I_D^2 \quad (6.48)$$

$$2 I_D^2 - 14.8 I_D + 2.88 = 0 \quad (6.49)$$

$$I_D = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.50)$$

$$I_D = \frac{14.8 \pm \sqrt{(-14.8)^2 - (4 \times 2 \times 2.88)}}{4} \quad (6.51)$$

$$I_D = 28.8 \text{ mA} \text{ และ } 0.8 \text{ mA}$$

เลือกค่ากระแส $I_D = 0.8 \text{ mA}$ เนื่องจากแทนค่า $V_{GS} = V_G - I_D R_S$ แล้วมากกว่า V_{TH} นำค่ากระแส I_D มาหาค่าแรงดัน V_{DS} ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S) \quad (6.52)$$

$$= 5 \text{ V} - (0.8 \text{ mA} \times 3 \text{ k}\Omega) \quad (6.53)$$

$$= 2.6 \text{ V}$$

เนื่องจาก $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$ ทำให้มอสเฟตทำงานย่านอิ่มตัว ค่ากระแส $I_D = 0.8 \text{ mA}$ นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{(K_n/2) I_D} \quad (6.54)$$

$$= \sqrt{(1/2) 0.8} \quad (6.55)$$

$$= 0.632 \text{ mA/V}$$

อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v = g_m R_D \quad (6.56)$$

$$= 0.632 \text{ mA/V} \times 2 \text{ k}\Omega \quad (6.57)$$

$$= 1.26$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = 1/g_m \quad (6.58)$$

$$= 1/0.632 \text{ mA/V} \quad (6.59)$$

$$= 1.58 \text{ k}\Omega$$

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = R_D \quad (6.60)$$

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

6.4 วงจรขยายแบบเดรนร่วม (Common drain amplifier)

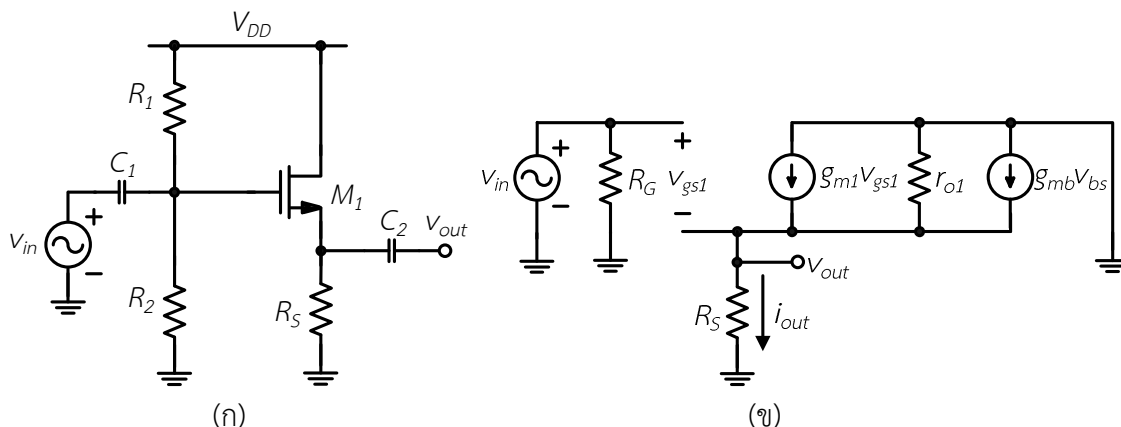
รูปที่ 6.6 (ก) แสดงวงจรขยายแบบเดรนร่วม สัญญาณอินพุตของวงจรขยายแบบเดรนร่วมต่อเข้ากับขาเกต และมีสัญญาณเอาต์พุตออกที่ขาซอสเดรน ขาเดรนของวงจรต่อกับกราวด์ รูปที่ 6.6 (ข) แสดงวงจรเสมือนสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v \approx 1 \quad (6.61)$$

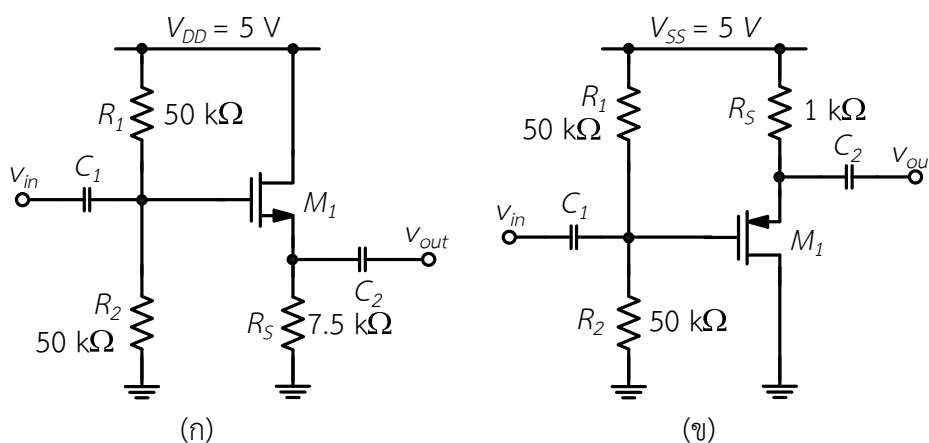
ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตเท่ากับ

$$R_{in} = R_1 // R_2 \quad (6.62)$$

$$R_{in} = 1/g_m \quad (6.63)$$



รูปที่ 6.6 (ก) วงจรขยายแบบเดรนร่วม และ (ข) วงจรเสมือนสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ 6.7 วงจรขยายแบบเดรนร่วม (ก) มอสเฟตชนิด N-Channel และ (ข) มอสเฟตชนิด P-Channel

ตัวอย่างที่ 6.5 กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel ของวงจรขยายแบบเดรนร่วม ในรูปที่ 6.7 (ก) มี $V_{TH} = 0.7 \text{ V}$ และ $K_N = 0.1 \text{ mA/V}^2$ คำนวณหาค่า A_v , R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ ทำการหาค่าแรงดัน V_{R1} ได้ว่า

$$V_G = V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{DD} \tag{6.64}$$

$$= \frac{50 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega + 50 \text{ k}\Omega} \times 5 \text{ V} \tag{6.65}$$

$$= 2.5 \text{ V}$$

เมื่อแทนค่าแรงดัน $V_G = 2.5 \text{ V}$ ในสมการกระแส I_D กระแส I_D มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_N (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (6.66)$$

$$I_D = K_N (V_G - I_D R_S - V_{TH})^2 \quad (6.67)$$

$$= 0.1 \text{ mA} / \text{V}^2 (2.5 \text{ V} - 7.5 I_D - 0.7 \text{ V})^2 \quad (6.68)$$

$$= 0.1 (1.8 \text{ V} - 7.5 I_D)^2 \text{ mA} \quad (6.69)$$

$$I_D = 0.324 - 2.7 I_D + 5.625 I_D^2 \quad (6.70)$$

$$5.625 I_D^2 - 3.7 I_D + 0.324 = 0 \quad (6.71)$$

$$I_D = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.72)$$

$$I_D = \frac{3.7 \pm \sqrt{(-3.7)^2 - (4 \times 5.625 \times 0.324)}}{11.25} \quad (6.73)$$

$$I_D = 0.554 \text{ mA} \text{ และ } 0.104 \text{ mA}$$

เลือกค่ากระแส $I_D = 0.104 \text{ mA}$ เนื่องจากแทนค่า $V_{GS} = V_G - I_D R_S$ แล้วมากกว่า V_{TH} นำค่ากระแส I_D มาหาค่าแรงดัน V_{DS} ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S \quad (6.74)$$

$$= 5 \text{ V} - (0.104 \text{ mA} \times 7.5 \text{ k}\Omega) \quad (6.75)$$

$$= 4.22 \text{ V}$$

เนื่องจาก $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$ ทำให้มอสเฟตทำงานย่านอิ่มตัว ค่ากระแส $I_D = 0.104 \text{ mA}$ นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{(K_n/2) I_D} \quad (6.76)$$

$$= \sqrt{(1/2)0.104} \quad (6.77)$$

$$= 0.228 \text{ mA/V}$$

อัตราขยายของวงจรเดรนร่วมมีค่าเท่ากับ

$$A_v \cong 1 \quad (6.78)$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = R_1 // R_2 \quad (6.79)$$

$$= 50 \text{ k}\Omega // 50 \text{ k}\Omega \quad (6.80)$$

$$= 25 \text{ k}\Omega$$

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = 1/g_m \quad (6.81)$$

$$= 1/0.228 \text{ mA/V} \quad (6.82)$$

$$= 4.38 \text{ k}\Omega$$

ตัวอย่างที่ 6.6 กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel ของวงจรขยายแบบตามแรงดันในรูปที่ 6.7 (ข) มี $V_{TH} = 0.8 \text{ V}$ และ $K_p = 0.2 \text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ เนื่องจากการไบอัสของวงจรในรูปที่ 6.7 (ก) เหมือนกับวงจรในรูปที่ 6.7 (ข) ดังนั้น $V_G = 2.5 \text{ V}$ เมื่อแทนค่าแรงดัน $V_G = 2.5 \text{ V}$ ในสมการกระแส I_D กระแส I_D มีค่าเท่ากับ

$$I_D = K_N (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (6.83)$$

$$I_D = K_N (V_G - I_D R_S - V_{TH})^2 \quad (6.84)$$

$$= 0.2 \text{ mA/V}^2 (2.5 \text{ V} - I_D - 0.8 \text{ V})^2 \quad (6.85)$$

$$= 0.2(1.7V - I_D)^2 \text{ mA} \quad (6.86)$$

$$I_D = 0.578 - 0.68I_D + 0.2I_D^2 \quad (6.87)$$

$$2I_D^2 - 16.8I_D + 5.78 = 0 \quad (6.88)$$

$$I_D = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2 - 4ac}}{2a} \quad (6.89)$$

$$I_D = \frac{16.8 \pm \sqrt{(-16.8)^2 - (4 \times 2 \times 5.78)}}{4} \quad (6.90)$$

$$I_D = 8.04 \text{ mA}, 0.36 \text{ mA}$$

เลือกค่ากระแส $I_D = 0.36 \text{ mA}$ เนื่องจากแทนค่า $V_{GS} = V_G - I_D R_S$ แล้วมากกว่า V_{TH} นำค่ากระแส I_D มาหาค่าแรงดัน V_{DS} ได้

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S \quad (6.91)$$

$$= 5 \text{ V} - (0.36 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega) \quad (6.92)$$

$$= 4.64 \text{ V}$$

เนื่องจาก $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TH}$ ทำให้มอสเฟตทำงานย่านอิ่มตัว ค่ากระแส $I_D = 0.36 \text{ mA}$ นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

$$g_m = \sqrt{(K_n/2)I_D} \quad (6.93)$$

$$= \sqrt{(1/2)0.36} \quad (6.94)$$

$$= 0.424 \text{ mA/V}$$

อัตราขยายของวงจรคอลเล็กเตอร์ร่วมมีค่าเท่ากับ

$$A_V \cong 1 \quad (6.95)$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = R_1 // R_2 \tag{6.96}$$

$$= 25 \text{ k}\Omega$$

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = 1/g_m \tag{6.97}$$

$$= 1/0.424 \text{ mA/V} \tag{6.98}$$

$$= 2.36 \text{ k}\Omega$$

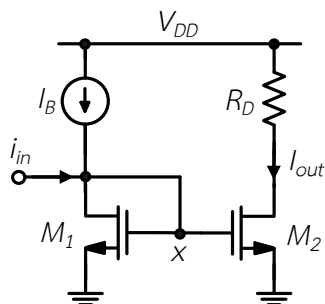
6.5 การประยุกต์ใช้งานมอสเฟตในวงจรแบบต่าง ๆ

6.5.1 วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror)

รูปที่ 6.8 แสดงวงจรสะท้อนกระแส ลักษณะการทำงานของวงจร คือการสะท้อนกระแสอ้างอิง และกระแสอินพุตไปที่เอาต์พุตของวงจร ซึ่งกระแสทางด้านเอาต์พุตของวงจรสามารถเพิ่มขึ้น ลดลง หรือเท่ากับกระแสทางอินพุตนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของมอสเฟตที่เอาต์พุต วงจรสะท้อนกระแสจำเป็นต้องมีแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเกตกับซอสต์ต้องเท่ากันตลอด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามวงจรอื่นที่นำมาต่อกับวงจรสะท้อนกระแส

การทำงานของวงจรสะท้อนกระแสอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากขาเกตกับเดรนของมอสเฟต M_1 ต่อถึงกัน ดังนั้น มอสเฟต M_1 ทำงานในโหมดอิมิตัว กระแสที่ไหลผ่าน M_1 หากจากสมการกระแส

$$I_B = K_n (V_{GS1} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS1}) \tag{6.99}$$



รูปที่ 6.8 วงจรสะท้อนกระแส

กระแสที่ไหลผ่านกระแสทางด้านเอาต์พุตหาจาก

$$I_{OUT} = K_n (V_{GS2} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS2}) \tag{6.100}$$

เราสามารถละเว้นค่า λ เนื่องจาก λ มีค่าน้อยมาก ซึ่งประมาณ 0.01 V^{-1} กระแสอ้างอิงและกระแสเอาต์พุตที่ได้คือ

$$I_{REF} = K_{N1} (V_{GS1} - V_{TH1})^2 \tag{6.101}$$

$$I_{out} = K_{N2} (V_{GS2} - V_{TH2})^2 \tag{6.102}$$

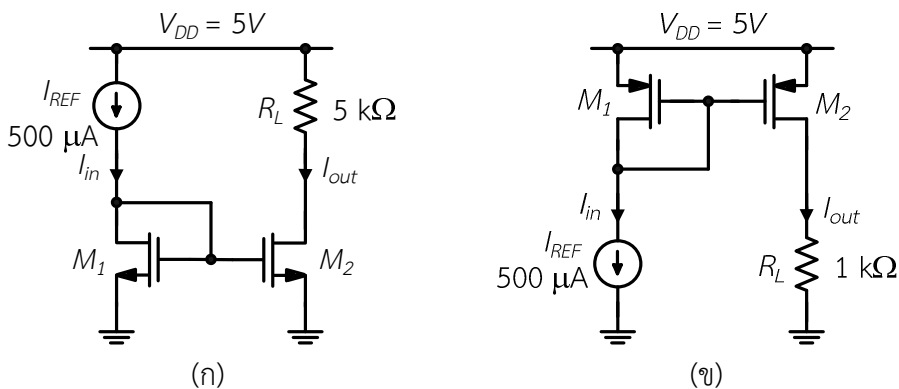
นำสมการ (6.102)/(6.101)

$$\frac{I_{out}}{I_{REF}} = \frac{K_{N2} (V_{GS2} - V_{TH2})^2}{K_{N1} (V_{GS1} - V_{TH1})^2} \tag{6.103}$$

จาก $V_{GS1} = V_{GS2}$ และ $V_{TH1} = V_{TH2}$ กระแสเอาต์พุตหาจาก

$$I_{out} = [K_{N2}/K_{N1}] I_{REF} \tag{6.104}$$

จากสมการที่ 6.104 เห็นได้ว่ากระแสทางเอาต์พุตของวงจรขึ้นอยู่กับค่าคงที่ (K_N) ของมอสเฟต M_2 ต่อ M_1 ถ้าค่าคงที่ของ M_2 มากกว่า M_1 กระแสเอาต์พุตมากกว่ากระแสอินพุต ในทางกลับกัน ถ้าค่าคงที่ของ M_2 น้อยกว่า M_1 กระแสเอาต์พุตน้อยกว่ากระแสอินพุต และถ้าขนาดของ M_2 เท่ากับ M_1 กระแสเอาต์พุตเท่ากับกระแสอินพุต



รูปที่ 6.9 วงจรสะท้อนกระแส (ก) มอสเฟตชนิด N-Channel (ข) มอสเฟตชนิด P-Channel

ตัวอย่างที่ 6.7 รูปที่ 6.9 (ก) แสดงวงจรสะท้อนกระแส กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel ของ มี $V_{TH} = 0.7 \text{ V}$ และ $K_N = 0.1 \text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า I_{in} I_{out} V_{GS1} V_{GS2} V_{DS2} A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ กระแส $I_{in} = I_{REF} = 500 \text{ } \mu\text{A}$ และคุณลักษณะของวงจรสะท้อนกระแส

$$V_{GS1} = V_{GS2} = \sqrt{\frac{I_{REF}}{K_{N1}}} + V_{TH1} \quad (6.105)$$

$$= \sqrt{\frac{500 \mu\text{A}}{0.1 \text{ mA/V}^2}} + 0.7 \text{ V} \quad (6.106)$$

$$= 2.93 \text{ V}$$

กระแส I_{out} มีค่าเท่ากับ

$$I_{out} = K_{N2} (V_{GS2} - V_{TH2})^2 \quad (6.107)$$

$$= 0.1 \text{ mA/V}^2 (2.93 \text{ V} - 0.7 \text{ V})^2 \quad (6.108)$$

$$= 497.29 \text{ } \mu\text{A}$$

ตัวอย่างที่ 6.8 รูปที่ 6.9 (ข) แสดงวงจรสะท้อนกระแส กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี $V_{TH} = 0.8 \text{ V}$ และ $K_{P1} = 0.2 \text{ mA/V}^2$ และ $K_{P2} = 0.4 \text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ กระแส $I_{in} = I_{REF} = 500 \text{ } \mu\text{A}$ และคุณลักษณะของวงจรสะท้อนกระแส

$$V_{SG1} = V_{SG2} = \sqrt{\frac{I_{REF}}{K_{P1}}} + V_{TH1} \quad (6.109)$$

$$= \sqrt{\frac{500 \mu\text{A}}{0.2 \text{ mA/V}^2}} + 0.8 \text{ V} \quad (6.110)$$

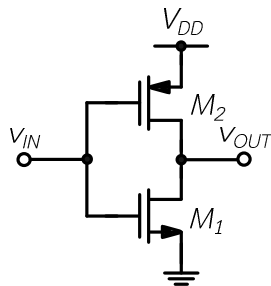
$$= 2.38 \text{ V}$$

กระแส i_{out} มีค่าเท่ากับ

$$I_{out} = [K_{P2}/K_{P2}] I_{REF} \tag{6.111}$$

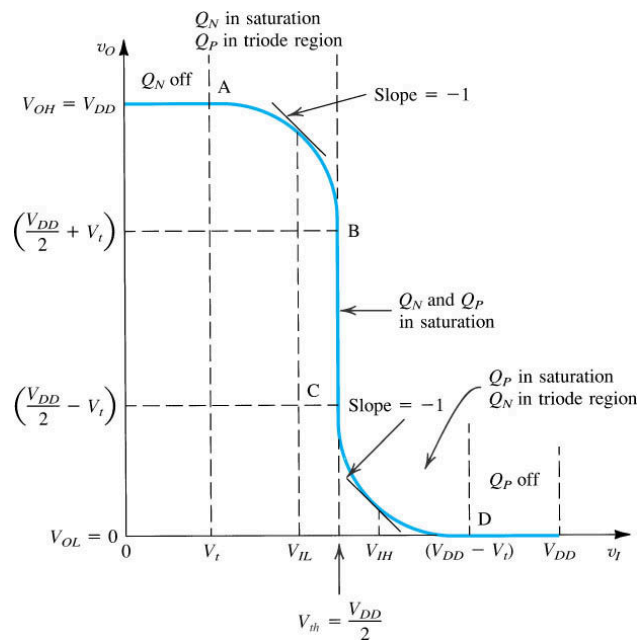
6.5.2 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ (CMOS Inverter)

รูปที่ 6.10 แสดงวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ (CMOS Inverter) ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟตชนิด NMOS (M_1) และ PMOS (M_2)



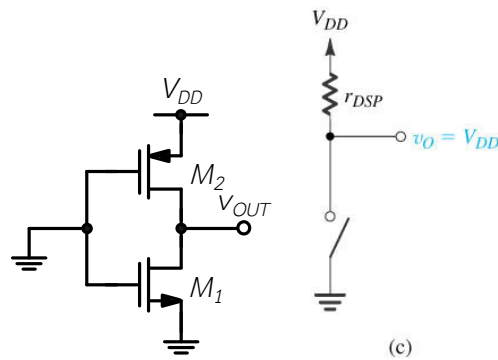
รูปที่ 6.10 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 6.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์ กราฟความสัมพันธ์ถูกแบ่งออกเป็น 5 ช่วงการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ ช่วงที่หนึ่งเป็นแรงดันเอาต์พุตขณะที่อินพุตเท่ากับศูนย์ มอสเฟต M_1 ไม่นำกระแส และมอสเฟต M_2 นำกระแส แรงดันเอาต์พุตเท่ากับแหล่งจ่าย เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตมากกว่า V_T อยู่ในช่วง $V_t < v_i < V_{DD}/2$ มอสเฟตลักษณะการทำงานในช่วงที่ 2 มอสเฟต M_1 และ M_2 นำกระแส มอสเฟต M_1 ทำงานในย่านอิมิตัวขณะที่มอสเฟต M_2 ทำงานในย่านเชิงเส้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตเท่ากับ $V_{DD}/2$ ลักษณะการทำงานในช่วงที่ 3 มอสเฟต M_1 และ M_2 ทำงานในย่านอิมิตัว ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับช่วง $(V_{DD}/2 + V_t)$ $v_o (V_{DD}/2 - V_t)$ เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตอยู่ในช่วง $V_{DD}/2 < v_i < (V_{DD} - V_t)$ ลักษณะการทำงานในช่วงที่ 4 มอสเฟต M_1 ทำงานในย่านเชิงเส้น ขณะที่มอสเฟต M_2 ทำงานในย่านอิมิตัว ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อแรงดันเอาต์พุตมากกว่า $(V_{DD} - V_t)$ ส่งผลให้มอสเฟต M_2 ไม่นำกระแส ทำให้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับศูนย์



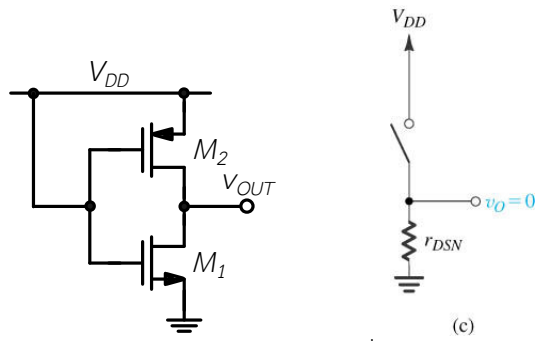
รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรมอสอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 6.12 แสดงวงจรมอสอินเวอร์เตอร์ขณะที่อินพุตต่อลงกราวด์ การทำงานของวงจรมอสอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้ เมื่ออินพุตเท่ากับศูนย์ ทำให้แรงดัน V_{GS1} เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้มอสเฟต M_1 ไม่นำกระแส (สวิตช์เปิดวงจร) ขณะเดียวกันแรงดัน V_{GS2} เท่ากับแหล่งจ่าย ส่งผลให้มอสเฟต M_2 นำกระแส (ช่วงที่ 1) จากลักษณะการทำงานดังกล่าว แรงดันเอาต์พุตเท่ากับแหล่งจ่าย



รูปที่ 6.12 วงจรมอสอินเวอร์เตอร์ขณะที่อินพุตต่อลงกราวด์

รูปที่ 6.13 แสดงวงจรมอสอินเวอร์เตอร์ขณะที่อินพุตเท่ากับแหล่งจ่าย การทำงานของวงจรมอสอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้ เมื่ออินพุตเท่ากับแหล่งจ่าย แรงดัน V_{GS1} เท่ากับแหล่งจ่าย ทำให้มอสเฟต M_1 นำกระแส ขณะเดียวกันแรงดัน V_{GS2} เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้มอสเฟต M_2 ไม่นำกระแส (สวิตช์เปิดวงจร) จากลักษณะการทำงานช่วงที่ 5 ดังที่กล่าวมา แรงดันเอาต์พุตเท่ากับศูนย์



รูปที่ 6.13 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ขณะที่อินพุตเท่ากับแหล่งจ่าย

ตัวอย่างที่ 6.9 จากวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6.10 แรงดัน $V_{DD} = 5\text{ V}$ กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี $V_{TH} = 0.7\text{ V}$ และ $K_N = 0.1\text{ mA/V}^2$ และมอสเฟตชนิด P-Channel มี $V_{TH} = 0.8\text{ V}$ และ $K_N = 0.2\text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v , R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ แรงดัน $V_{GS} = v_{IN}$ ทำการวิเคราะห์วงจรด้วยวงจรเสมือนสัญญาณขนาดเล็ก แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ

$$v_{OUT} = (g_{mn}v_{IN} + g_{mp}v_{IN})(r_{On} \parallel r_{Op}) \tag{6.112}$$

อัตราขยาย A_v เท่ากับ

$$A_v = (g_{mn} + g_{mp})(r_{On} \parallel r_{Op}) \tag{6.113}$$

ค่าความต้านทานอินพุตเท่ากับอนันต์ และค่าความต้านทานเอาต์พุตเท่ากับอนันต์ (สมมติให้ $r_{On} = r_{Op} = \infty$)

6.6 การทดลองวงจรขยายมอสเฟต

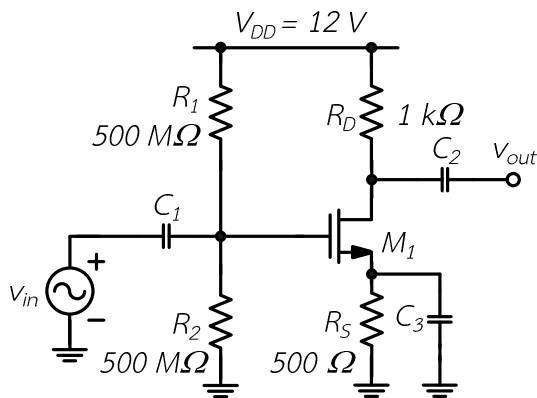
6.6.1 วงจรขยายแบบซอร์สรวม (Common source amplifier)

6.6.1.1 จากวงจรในรูปที่ 6.14 ให้คำนวณหาอัตราขยายแรงดัน (A_v) ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตของวงจร

$$A_v = \dots\dots\dots R_{in} = \dots\dots\dots R_{out} = \dots\dots\dots$$

6.6.1.2 ให้ต่อวงจรขยายแบบซอร์สรวมตามรูปที่ 6.18 และวัดกระแส I_D และแรงดัน V_{DS}

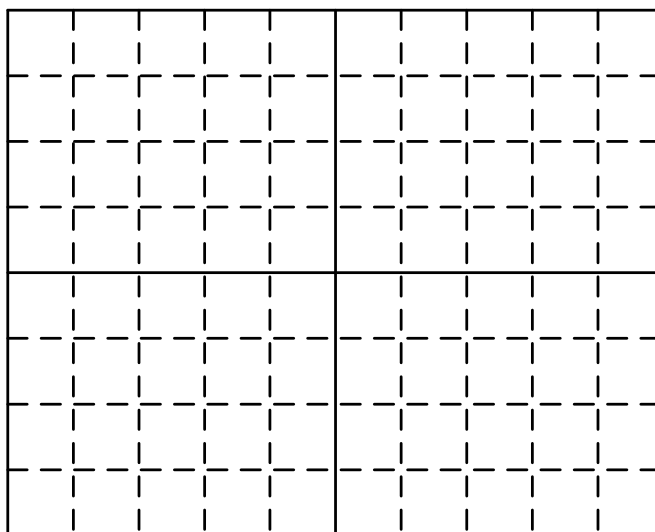
$$I_D = \dots\dots\dots V_{DS} = \dots\dots\dots$$



รูปที่ 6.14 วงจรขยายแบบซอร์สร่วม

6.6.1.3 ป้อนสัญญาณขนาด 100 mV_p มีความถี่ 1 kHz วัด และวาดภาพสัญญาณอินพุต เทียบกับเอาต์พุตลงในรูปแบบที่ 6.15 พร้อมทั้งระบุขนาดต่าง ๆ ให้ชัดเจน

$V_{IN} = \dots\dots\dots$ $V_{OUT} = \dots\dots\dots$ $i_L = \dots\dots\dots$



รูปที่ 6.15 ผลการทดลอง

6.6.1.4 ให้คำนวณหาค่าความต้านทานด้านอินพุต และเอาต์พุต (Input and Output impedance) อัตราการขยายแรงดัน (A_v) อัตราการขยายกระแส (A_i) และอัตราการขยายกำลัง (A_p) เมื่อต่อความต้านทาน $1 \text{ k}\Omega$ ที่เอาต์พุต

6.6.1.5 สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

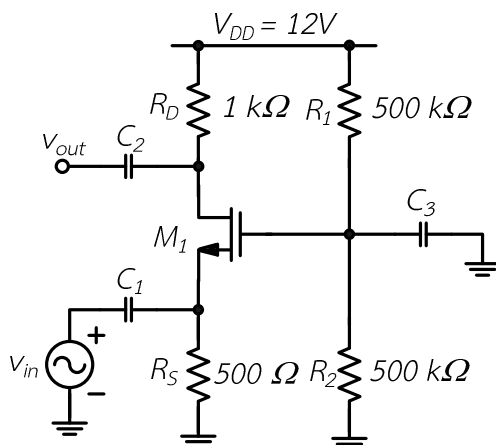
6.6.2 วงจรขยายแบบเกตร่วม (Common gate amplifier)

6.6.2.1 จากวงจรในรูปที่ 6.16 ให้คำนวณหาอัตราขยายแรงดัน (A_V) ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตของวงจร

$A_V = \dots\dots\dots R_{in} = \dots\dots\dots R_{out} = \dots\dots\dots$

6.6.2.2 ให้ต่อวงจรขยายแบบเกตร่วม ตามรูปที่ 6.16 และวัดกระแส I_D และแรงดัน V_{DS}

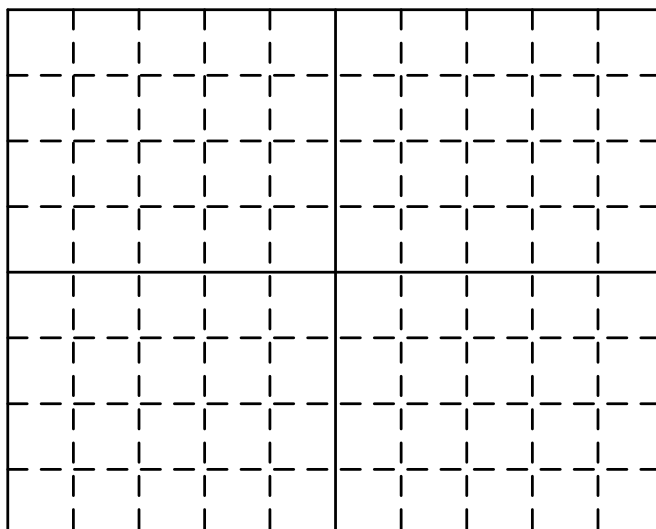
$I_D = \dots\dots\dots V_{DS} = \dots\dots\dots$



รูปที่ 6.16 วงจรขยายแบบเกตร่วม

6.6.2.3 ป้อนสัญญาณขนาด 100 mV_p มีความถี่ 1 kHz วัด และวาดภาพสัญญาณอินพุตเทียบกับเอาต์พุตลงในรูปที่ 6.17 พร้อมทั้งระบุขนาดต่าง ๆ ให้ชัดเจน

$V_{IN} = \dots\dots\dots V_{OUT} = \dots\dots\dots I_L = \dots\dots\dots$



รูปที่ 6.17 ผลการทดลอง

6.6.2.4 ให้คำนวณหาค่าความต้านทานด้านอินพุต และเอาต์พุต (Input and Output impedance) อัตราการขยายแรงดัน (A_V) อัตราการขยายกระแส (A_I) และอัตราการขยายกำลัง (A_P) เมื่อต่อตัวต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ ที่เอาต์พุต

6.6.2.5 สรุปลง

.....

.....

.....

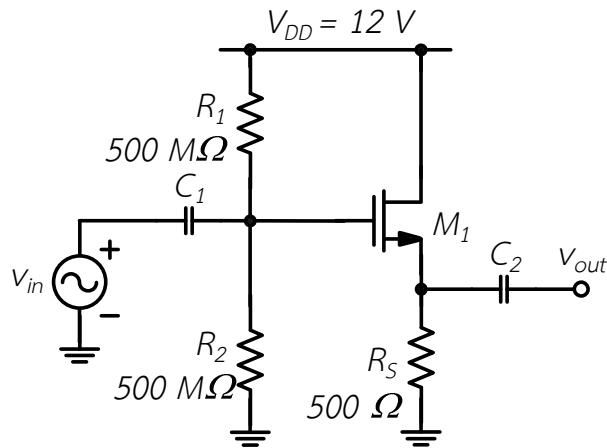
6.6.3 วงจรขยายแบบเดรนร่วม (Common drain amplifier)

6.6.3.1 จากวงจรในรูปที่ 6.18 ให้คำนวณหาอัตราการขยายแรงดัน (A_V) ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตของวงจร

$A_V = \dots\dots\dots R_{in} = \dots\dots\dots R_{out} = \dots\dots\dots$

6.6.3.2 ให้ต่อวงจรขยายแบบเดรนร่วมตามรูปที่ 6.18 และวัดกระแส I_D และแรงดัน V_{DS}

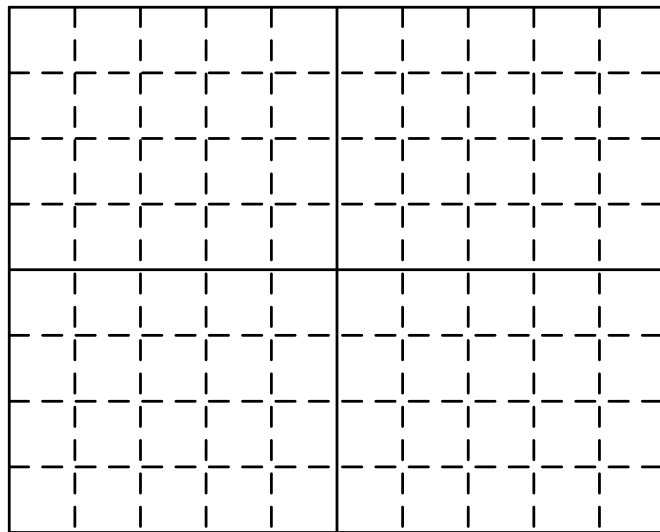
$I_D = \dots\dots\dots V_{DS} = \dots\dots\dots$



รูปที่ 6.18 วงจรขยายแบบเดรนร่วม

6.6.3.3 ป้อนสัญญาณขนาด $0.5 V_p$ มีความถี่ 1 kHz วัด และวาดภาพสัญญาณอินพุต เทียบกับเอาต์พุตลงในรูปที่ 6.19 พร้อมทั้งระบุขนาดต่าง ๆ ให้ชัดเจน

$V_{IN} = \dots\dots\dots$ $V_{OUT} = \dots\dots\dots$ $i_L = \dots\dots\dots$



รูปที่ 6.19 ผลการทดลอง

6.6.3.4 ให้คำนวณหาความต้านทานด้านอินพุต และเอาต์พุต (Input and Output impedance) อัตราการขยายแรงดัน (A_v) อัตราการขยายกระแส (A_i) และอัตราการขยายกำลัง (A_p) เมื่อต่อความต้านทาน 100Ω ที่เอาต์พุต

6.6.4.5 ให้เขียนตารางเพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานด้านอินพุต และเอาต์พุต อัตราการขยายแรงดัน อัตราการขยายกระแส และอัตราการขยายกำลังของวงจรขยายทั้ง 3 แบบ ที่ได้จากการทดลอง และการคำนวณ

6.6.3.6 สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

6.7 การทดลองการประยุกต์มอสเฟตใช้วงจรต่าง ๆ

6.7.1 วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror)

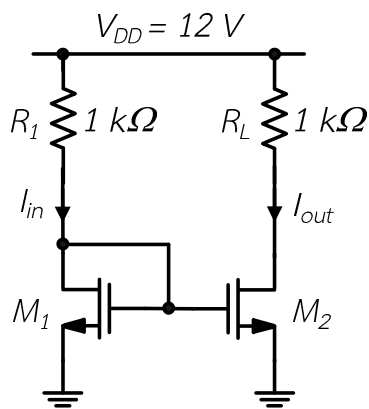
6.7.1.1 ให้คำนวณหาอัตราขยายกระแส (A_i) ค่าความต้านทานด้านอินพุต และเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 6.20

$A_i =$ $R_{in} =$ $R_{out} =$

6.7.1.2 ต่อวงจรสะท้อนกระแสตามรูปที่ 6.20 และวัดกระแส I_D , I_L และแรงดัน V_{DS}

$I_{D1} =$ $I_L =$

$V_{DS1} =$ $V_{DS2} =$



รูปที่ 6.20 วงจรสะท้อนกระแส

6.7.1.3 สรุปผลการทดลอง

.....

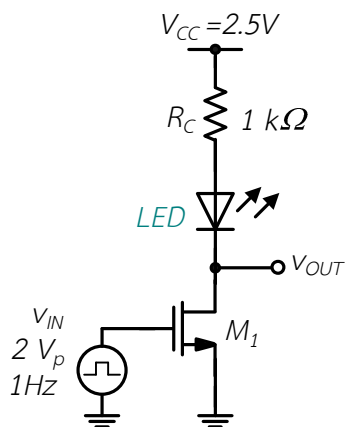
.....

.....

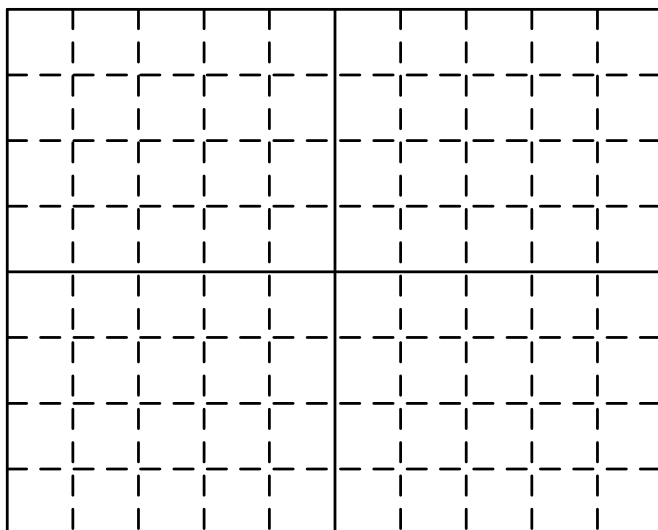
6.7.2 มอสเฟตสวิตช์ (MOSFET Switch)

6.7.2.1 ต่วงจรตามรูปที่ 6.21 โดยป้อนสัญญาณพัลส์แรงดัน 5 V_p ที่ความถี่ 1 Hz และ 100 Hz

6.7.2.2 ให้วัดแรงดันอินพุตเทียบกับแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ 100 Hz และ 1 kHz พร้อมทั้งวาดสัญญาณอินพุต และอินพุตลงในรูปที่ 6.22 และต้องระบุขนาดต่าง ๆ ของสัญญาณที่วาดให้ชัดเจน



รูปที่ 6.21 วงจรมอสเฟตสวิตช์



รูปที่ 6.22 ผลการทดลอง

6.7.2.3 สรุปผลการทดลอง

.....

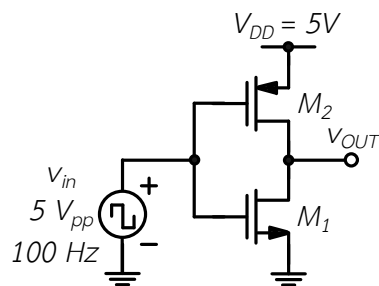
.....

.....

6.7.3. วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ (CMOS inverter)

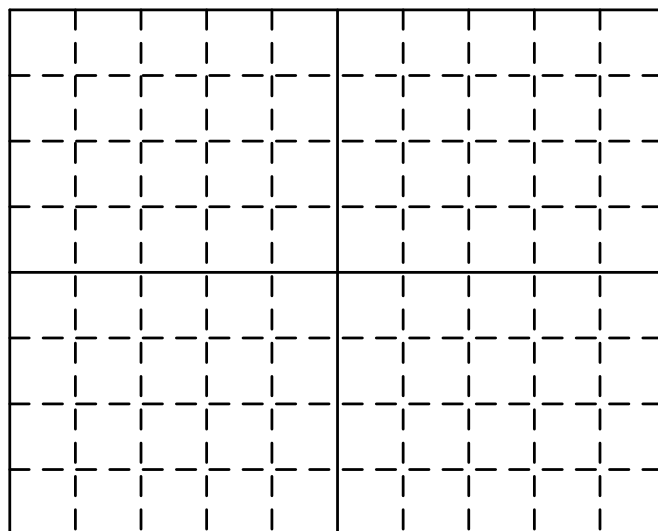
6.7.3.1 ให้ต่อวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 6.23

$I_D =$ $V_{DS} =$



รูปที่ 6.23 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์

6.7.3.2 ให้วัดแรงดันอินพุตเทียบกับแรงดันเอาต์พุต พร้อมทั้งวาดสัญญาณอินพุต และอินพุตโดยต้องระบุขนาดต่าง ๆ ของสัญญาณที่วาดให้ชัดเจน



รูปที่ 6.24 ผลการทดลอง

6.7.3.3 สรุปผลการทดลอง

6.8 บทสรุป

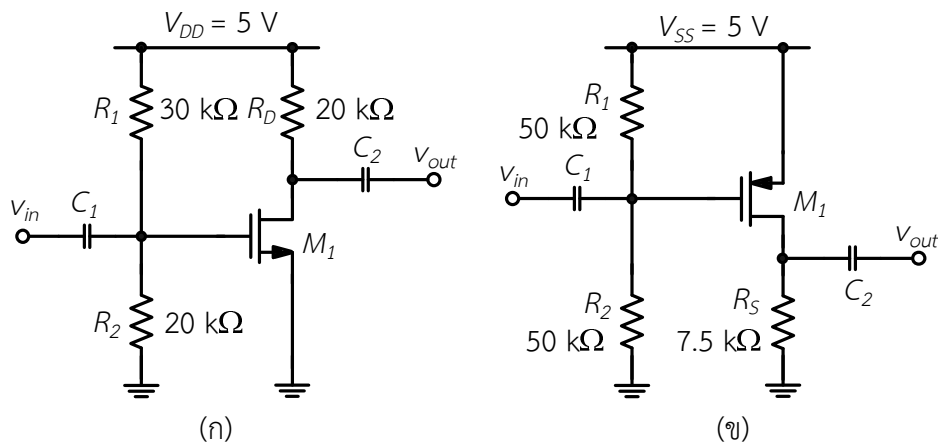
มอสเฟต คืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปต่อเป็นวงจรขยายสัญญาณ และวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ กระแสที่ไหลผ่านตัวมอสเฟตจะถูกควบคุมด้วยแรงดัน V_{GS} วงจรขยายด้วยมอสเฟตมีจำนวน 3 วงจร ได้แก่ วงจรขยายซอสร่วม วงจรขยายเกตร่วม และวงจรขยายเตรนร่วม อัตราขยายของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่า g_m ของมอสเฟต และค่า R_D การประยุกต์ใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปใช้ในวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ซิง และวงจรอินเวอร์เตอร์ ผลจากการทดลองวงจรขยายซอสร่วม แสดงสัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสอินพุต 180 องศา สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายเกตร่วมแสดงมีเฟสเดียวกับอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายเตรนร่วมมีเฟสเดียวกับอินพุต และมีขนาดประมาณเท่ากับสัญญาณอินพุต

คำถามหลังการทดลอง

1. ให้อธิบายการทำงานวงจรขยายแบบซอสร่วม
2. จากการทดลองวงจรขยายแบบซอสร่วม สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใด
3. ให้อธิบายการทำงานวงจรขยายแบบเกตร่วม
4. จากการทดลองวงจรขยายแบบเกตร่วม สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใด
5. ให้อธิบายการทำงานวงจรขยายแบบเตรนร่วม
6. จากการทดลองวงจรขยายแบบเตรนร่วม สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใด
7. ให้อธิบายการทำงานวงจรสะท้อนกระแส
8. จากการทดลองวงจรสะท้อนกระแส กระแสเอาต์พุตกับอินพุตเท่ากันหรือไม่ เพราะเหตุใด
9. ให้อธิบายการทำงานของมอสเฟตที่สังเกตได้จากการทดลอง
10. สัญญาณพัลส์ช่วงใดเข้าที่ขาเกตของมอสเฟตจะทำให้ LED สว่าง เพราะเหตุใด?
11. ให้อธิบายการทำงานวงจรอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6.23
12. จากการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์แตกต่างจากวงจรมอสเฟตสวิตซ์ในรูปที่ 6.24 อย่างไร

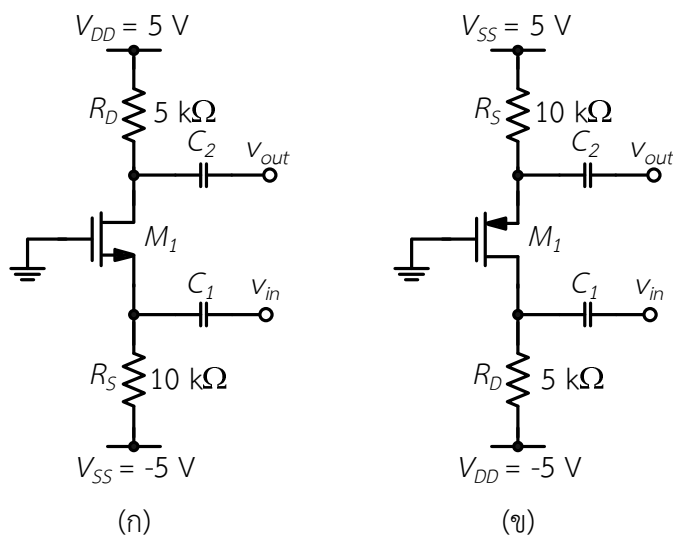
แบบฝึกหัดท้ายบท

- กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel ในรูปที่ 6.25 (ก) มี $V_{TH} = 1\text{ V}$ และ $K_N = 0.1\text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}
- รูปที่ 6.25 (ข) แสดงวงจรขยายแบบซอร์่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี $V_{TH} = -1.2\text{ V}$ และ $K_P = 0.2\text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}



รูปที่ 6.25 วงจรขยายแบบซอร์่วม (ก) ชนิด N-channel MOSFET และ (ข) ชนิด P-channel MOSFET

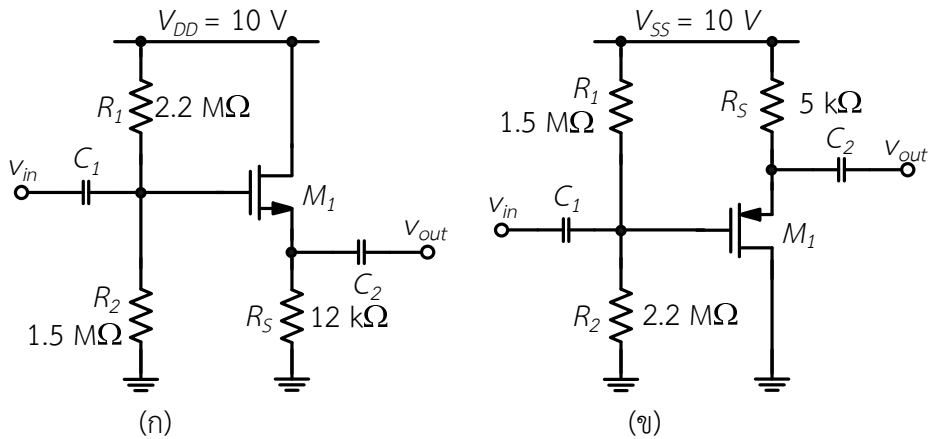
- รูปที่ 6.26 (ก) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี $V_{TH} = 0.7\text{ V}$ และ $K_N = 0.1\text{ mA/V}^2$ ให้หาค่าอัตราขยาย A_v ค่าความต้านทานอินพุต R_{in} และเอาต์พุต R_{out}
- รูปที่ 6.26 (ข) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี $V_{TH} = 0.8\text{ V}$ และ $K_P = 0.2\text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า V_{GS} I_D V_{DS} A_v R_{in} และ R_{out}



รูปที่ 6.26 วงจรแบบขยายเกตร่วม (ก) มอสเฟตชนิด N-Channel และ (ข) มอสเฟตชนิด P-Channel

5. กำหนดให้วงจรรูปที่ 6.27 (ก) วงจรแบบเดรนร่วม มี $K_N = 0.5 \text{ mA/V}^2$ และ $V_{TH} = 1 \text{ V}$ จงหาอัตราขยาย A_v ค่าความต้านทานอินพุต R_{in} และเอาต์พุต R_{out}

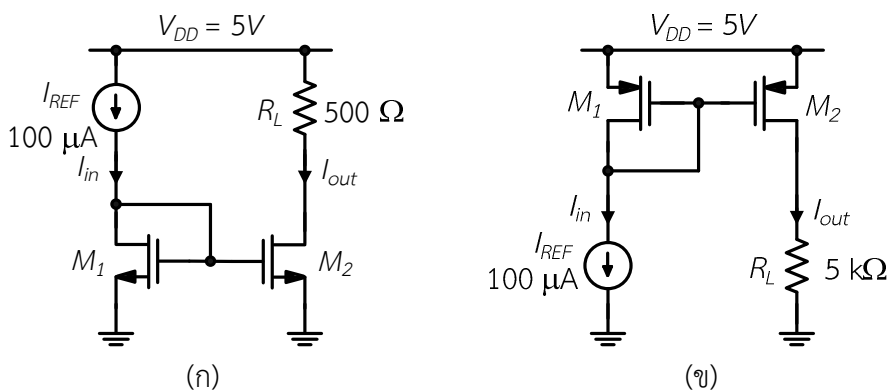
6. กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel ในรูปที่ 6.27 (ข) มี $V_{TH} = 1.2 \text{ V}$ และ $K_P = 1 \text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}



รูปที่ 6.27 วงจรขยายแบบเดรนร่วม (ก) มอสเฟตชนิด N-Channel และ (ข) มอสเฟตชนิด P-Channel

7. รูปที่ 6.28 (ก) แสดงวงจรสะท้อนกระแส กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี $V_{TH} = 0.7 \text{ V}$ และ $K_{N1} = 0.1 \text{ mA/V}^2$ และ $K_{N2} = 0.4 \text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า I_{in} I_{out} V_{GS1} V_{GS2} V_{DS2} A_v R_{in} และ R_{out}

8. รูปที่ 6.28 (ข) แสดงวงจรสะท้อนกระแส กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี $V_{TH} = 0.8 \text{ V}$ และ $K_P = 0.2 \text{ mA/V}^2$ ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}



รูปที่ 6.28 วงจรสะท้อนกระแส (ก) มอสเฟตชนิด N-Channel และ (ข) มอสเฟตชนิด P-Channel