แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 6
วงจรขยายมอสเฟต และการประยุกต์ใช้งาน

หัวข้อเนื้อหา

1. วงจรขยายมอสเฟต
2. วงจรขยายแบบซอสร่วม (Common source amplifier)
3. วงจรขยายแบบเกตร่วม (Common gate amplifier)
4. วงจรขยายแบบเดรนร่วม (Common drain amplifier)
5. การประยุกต์ใช้งานมอสเฟตในวงจรแบบต่าง ๆ

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่ออธิบายการทำงานของมอสเฟตเมื่อใช้งานในวงจรขยาย
2. เพื่ออธิบายการทำงานของมอสเฟตเมื่อประยุกต์ใช้งานวงจรอินเวอร์เตอร์ และวงจรสะท้อนกระแส

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. วิธีสอน
   1.1 วิธีสอนแบบบรรยาย
   1.2 วิธีสอนแบบอภิปราย
   1.3 แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ในวงจร
   1.4 วิธีสอนแบบเน้นการเรียนรู้ด้วยตนเอง
2. กิจกรรมการเรียนการสอน
   2.1 อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรขยายมอสเฟต
   2.2 อธิบายการทำงานวงจรขยายมอสเฟต
   2.3 แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณค่าต่าง ๆ ในวงจร
   2.4 นักศึกษาทำแบบฝึกหัด
   2.5 ให้การบ้านนักศึกษา

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์ 1
2. แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

การวัดผลและการประเมินผล

1. การเข้าเรียน
2. การบ้าน
3. สอบกลางภาค

4. สอบปลายภาค

บทที่ 6
วงจรขยายมอสเฟต และการประยุกต์ใช้งาน

6.1 วงจรขยายมอสเฟต

การประยุกต์ใช้งานของทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟตเป็นการนำไปใช้ในวงจรขยายและใช้เป็นสวิตช์ โดยแบ่งตามลักษณะการทำงานของมอสเฟตดังนี้

6.1.1 วงจรขยายมอสเฟต

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

ก. วงจรขยายแบบซอสร่วม (Common source amplifier)

ข. วงจรขยายแบบเดรนร่วม (Common drain amplifier)

ค. วงจรขยายแบบเกตร่วม (Common gate amplifier)

6.1.2 วงจรสวิตช์มอสเฟต

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

6.2 วงจรขยายแบบซอสร่วม (Common source amplifier)

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

เมื่อทำการวิเคราะห์แรงดันไบอัสให้กับวงจรขยายเรียบร้อยแล้วเราจะทำการวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กซึ่งเป็นการวิเคราะห์วงจรขยายเมื่อแรงดันอินพุตคือแรงดันเอซี ด้วยการลดวงจรแรงดังดีซีลงกราวด์ จากนั้นใช้วงจรเทียบเคียงสัญญาณขนาดเล็กวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดัน, ค่าความต้านทานอินพุต และค่าความต้านทานเอาต์พุต รูปที่ 6.2 แสดงวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กแบบซอสร่วม (Small Signal of Common Source) ซึ่งค่าอัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ g_m คือ ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (A/V)
ค่า g_m มีค่าเท่ากับ

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

ค่า g_m ที่เป็นฟังก์ชันกับ I_D เขียนสมการได้ว่า

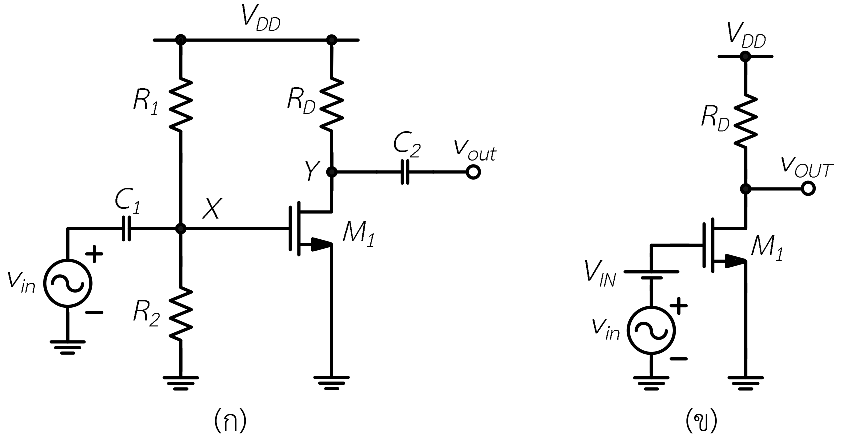
$$g_m = \sqrt{\left(K_n/2\right) I_D} \tag{6.3}$$

ค่า g_m ที่เป็นฟังก์ชันกับ V_{GS} เขียนสมการได้ว่า

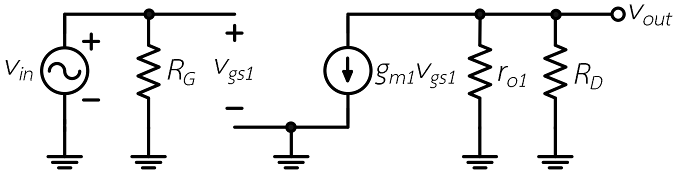
$$g_m = 2K_n\left(V_{GS} - V_{TH}\right) \tag{6.4}$$

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) วงขยายแบบซอสร่วม (ข) วงจรเทียบเคียงขยายแบบซอสร่วม



รูปที่ 6.2 วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กแบบซอสร่วม

ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตเท่ากับ

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

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

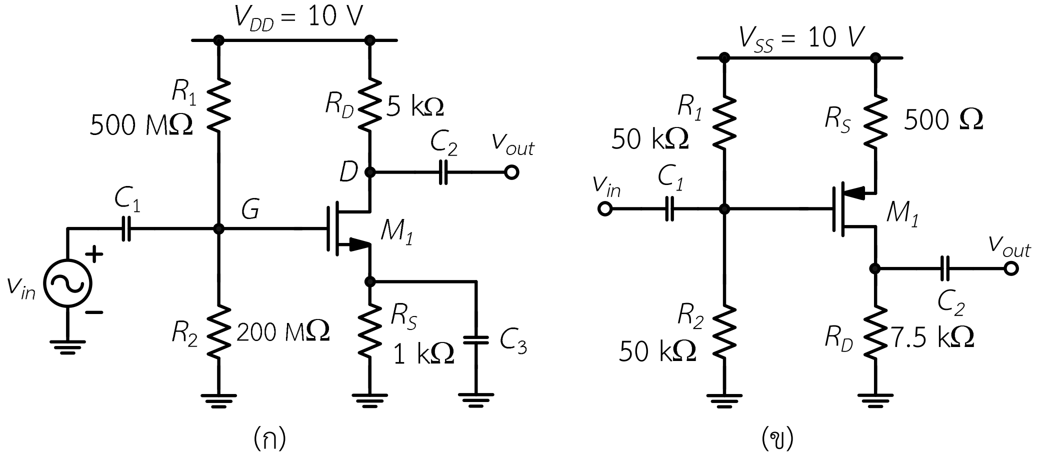
ตัวอย่างที่ 6.1 กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel ในวงจรขยายรูปที่ 6.3 (ก) มี V_{TH} = 1 V และ K_N = 1 mA/V^2 ทำการหาอัตราขยาย A_v ค่าความต้านทานอินพุต R_{in} และเอาต์พุต R_{out}

วิธีทำ จากตัวอย่างที่ 5.3 ในบทที่ 5 ค่ากระแส I_D = 0.91 mA นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

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

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

= 0.685 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 V และ K_P = 0.2 mA/V^2 ทำการหาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ จากตัวอย่างที่ 5.4 ค่ากระแส I_D = 0.11 mA นำกระแสเดรนมาหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ g_m มีค่าเท่ากับ

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

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

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

อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v \cong -\frac{R_D}{R_S} \tag{6.17}$$

$$= -\ 0.236 \text{ mA/V x } 3 \text{ k}\Omega \tag{6.18}$$

$$= 144$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = R_1 \,//\, R_2 \tag{6.19}$$

$$= 50 \text{ k}\Omega \,//\, 50 \text{ k}\Omega \tag{6.20}$$

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

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = R_D \tag{6.21}$$

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

6.3 วงจรขยายแบบเกตร่วม (Common gate amplifier)

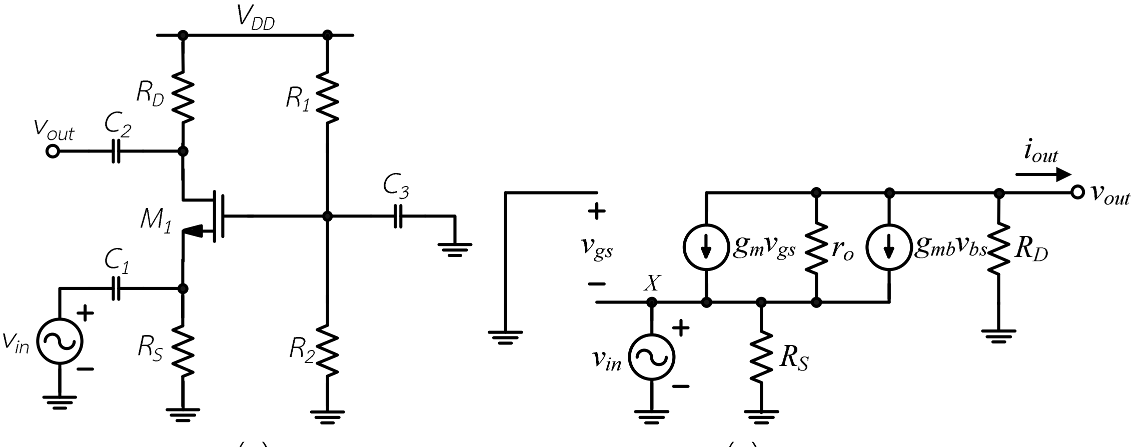
รูปที่ 6.4 (ก) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม มีอินพุตต่อที่ขาซอส และมีเอาต์พุตต่อที่ขาเดรน ขาเกตของวงจรต่อกับกราวด์ รูปที่ 6.4 (ข) แสดงวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กแบบเกตร่วม ทำการวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v = g_m R_D \tag{6.22}$$

ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตเท่ากับ

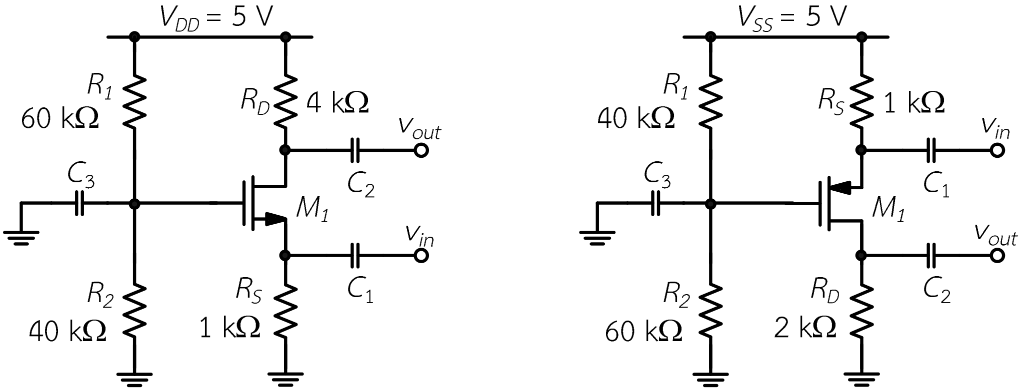
$$R_{in} = 1/g_m \tag{6.23}$$

$$R_{out} \approx R_D \tag{6.24}$$



(ก) (ข)

รูปที่ 6.4 (ก) วงจรขยายแบบเกตร่วม (ข) วงจรเทียบเคียงสัญญาณขนาดเล็ก



(ก) (ข)

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 V และ K_N = 0.1 mA/V^2 ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ ทำการหาค่าแรงดัน V_{R2} ได้ว่า

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

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

= 2 V

เมื่อแทนค่าแรงดัน V_G = 2 V ในสมการกระแส I_D กระแส I_D มีค่าเท่ากับ

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

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

$$= 0.1mA/V^2\left(2V - I_D - 0.7V\right)^2 \tag{6.29}$$

$$= 0.1\left(1.3V - I_D\right)^2 mA \tag{6.30}$$

$$I_D = 0.169 - 0.26I_D + 0.1I_D^2 \tag{6.31}$$

$$I_D^2 - 12.6I_D + 1.69 = 0 \tag{6.32}$$

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

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

I_D = 24.92 mA และ 0.3 mA

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

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

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

$$= 3.5\ V$$

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

$$g_m = \sqrt{\left(K_n/2\right)I_D} \qquad (6.37)$$

$$= \sqrt{\left(1/2\right)0.3} \qquad (6.38)$$

= 0.4 mA/V

อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

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

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

= 1.6

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

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

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

= 2.5 kΩ

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

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

= 4 kΩ

ตัวอย่างที่ 6.4 รูปที่ 6.5 (ข) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี V_{TH} = 0.8 V และ K_P = 0.2 mA/V^2 ทำการหาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

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

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

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

$$= 0.2mA/V^2\left(2V - I_D - 0.8V\right)^2 \quad (6.46)$$

$$= 0.2\left(1.2V - I_D\right)^2 mA \quad (6.47)$$

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

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

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

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

I_D = 28.8 mA และ 0.8 mA

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

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

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

$$= 2.6\ V$$

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

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

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

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

อัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v = g_m R_D \tag{6.56}$$

$$= 0.632 \text{ mA/V} \times 2 \text{ k}\Omega \tag{6.57}$$

$$= 1.26$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

$$R_{in} = 1/g_m \tag{6.58}$$

$$= 1/0.632 \text{ mA/V} \tag{6.59}$$

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

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

$$R_{out} = R_D \tag{6.60}$$

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

6.4 วงจรขยายแบบเดรนร่วม (Common drain amplifier)

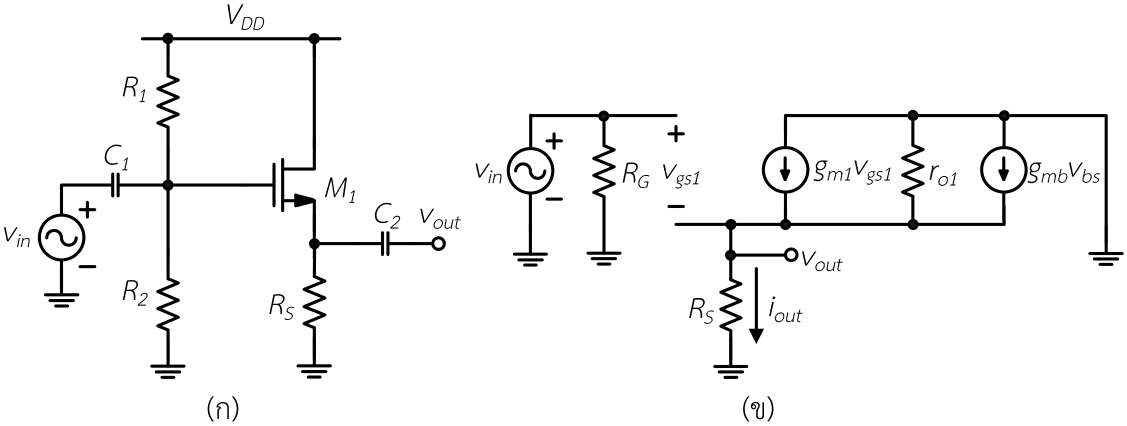
รูปที่ 6.6 (ก) แสดงวงจรขยายแบบเดรนร่วม สัญญาณอินพุตของวงจรขยายแบบเดรนร่วมต่อเข้าที่ขาเกต และมีสัญญาณเอาต์พุตออกที่ขาซอสเดรน ขาเดรนของวงจรต่อกับกราวด์ รูปที่ 6.6 (ข) แสดงวงจรเสมือนสัญญาณขนาดเล็ก ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์หาอัตราขยายแรงดันมีค่าเท่ากับ

$$A_v \approx 1 \tag{6.61}$$

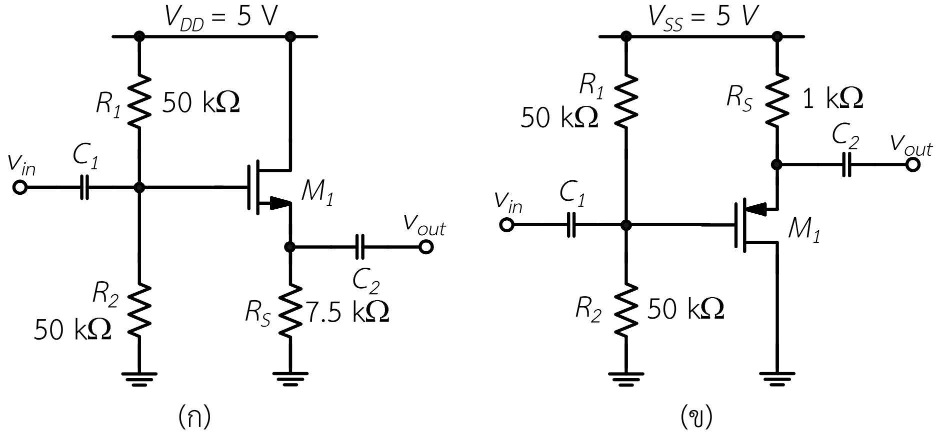
ค่าความต้านทานอินพุต และเอาต์พุตเท่ากับ

$$R_{in} = R_1 // R_2 \tag{6.62}$$

$$R_{in} = 1/g_m \tag{6.63}$$



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 V และ K_N = 0.1 mA/V^2 คำนวณหาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ ทำการหาค่าแรงดัน V_{R1} ได้ว่า

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

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

= 2.5 V

เมื่อแทนค่าแรงดัน V_G = 2.5 V ในสมการกระแส I_D กระแส I_D มีค่าเท่ากับ

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

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

$$= 0.1mA/V^2\left(2.5V - 7.5I_D - 0.7V\right)^2 \tag{6.68}$$

$$= 0.1\left(1.8V - 7.5I_D\right)^2 mA \tag{6.69}$$

$$I_D = 0.324 - 2.7I_D + 5.625I_D^2 \tag{6.70}$$

$$5.625I_D^2 - 3.7I_D + 0.324 = 0 \tag{6.71}$$

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

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

I_D = 0.554 mA และ 0.104 mA

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

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_S \tag{6.74}$$

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

$$= 4.22\ V$$

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

$$g_m = \sqrt{\left(K_n/2\right)I_D} \tag{6.76}$$

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

= 0.228 mA/V

อัตราขยายของวงจรเดรนร่วมมีค่าเท่ากับ

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

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

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

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

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

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 V และ K_P = 0.2 mA/V^2 ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

วิธีทำ เนื่องจากการไบอัสของวงจรในรูปที่ 6.7 (ก) เหมือนกับวงจรในรูปที่ 6.7 (ก) ดังนั้น V_G = 2.5 V เมื่อแทนค่าแรงดัน V_G = 2.5 V ในสมการกระแส I_D กระแส I_D มีค่าเท่ากับ

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

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

$$= 0.2mA/V^2\left(2.5V - I_D - 0.8V\right)^2 \quad (6.85)$$

$$= 0.2\left(1.7V - I_D\right)^2 mA \tag{6.86}$$

$$I_D = 0.578 - 0.68I_D + 0.2I_D^2 \tag{6.87}$$

$$2I_D^2 - 16.8I_D + 5.78 = 0 \tag{6.88}$$

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

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

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

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

$$V_{DS} = V_{DD} - I_DR_S \tag{6.91}$$

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

$$= 4.64\ V$$

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

$$g_m = \sqrt{\left(K_n/2\right)I_D} \tag{6.93}$$

$$= \sqrt{\left(1/2\right)0.36} \tag{6.94}$$

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

อัตราขยายของวงจรคอลเล็กเตอร์ร่วมมีค่าเท่ากับ

$$A_V \cong 1 \tag{6.95}$$

ค่าความต้านทานอินพุตหาได้จากสมการ

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

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

ค่าความต้านทานเอาต์พุตหาได้จากสมการ

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

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

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

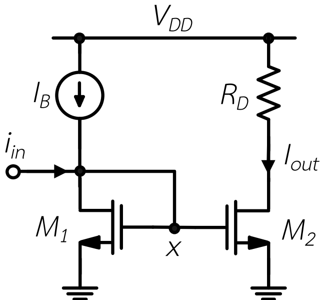
6.5 การประยุกต์ใช้งานมอสเฟตในวงจรแบบต่าง ๆ

6.5.1 วงจรสะท้อนกระแส (Current mirror)

รูปที่ 6.8 แสดงวงจรสะท้อนกระแส ลักษณะการทำงานของวงจร คือการสะท้อนกระแสอ้างอิง และกระแสอินพุตไปที่เอาต์พุตของวงจร ซึ่งกระแสทางด้านเอาต์พุตของวงจรสามารถเพิ่มขึ้น ลดลง หรือเท่ากับกระแสทางอินพุตนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของมอสเฟตที่เอาต์พุต วงจรสะท้อนกระแสนั้นต้องมีแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขาเกตกับซอสต้องเท่ากันตลอด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันตามวงจรอื่นที่นำมาต่อกับวงจรสะท้อนกระแส

การทำงานของวงจรสะท้อนกระแสอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากขาเกตกับเดรนของมอสเฟต M_1 ต่อถึงกัน ดังนั้น มอสเฟต M_1 ทำงานในโหมดอิ่มตัว กระแสที่ไหลผ่าน M_1 หาจากสมการกระแส

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



รูปที่ 6.8 วงจรสะท้อนกระแส

กระแสที่ไหลผ่านกระแสทางด้านเอาต์พุตหาจาก

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

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

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

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

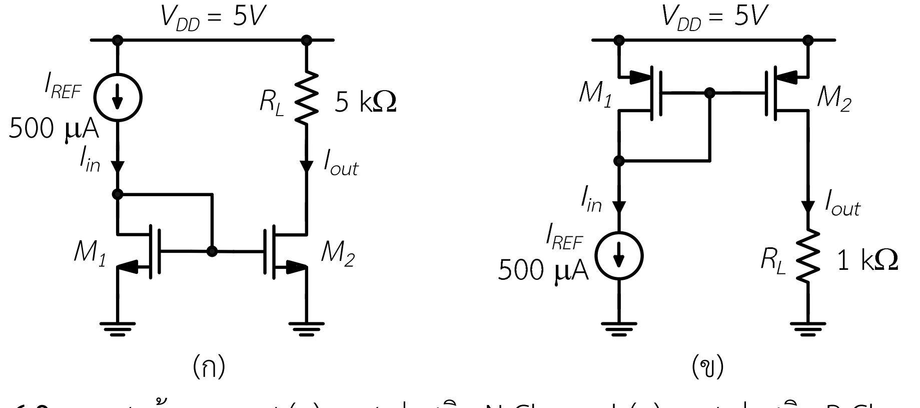
นำสมการ (6.102)/(6.101)

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

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

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

จากสมการที่ 6.104 เห็นได้ว่ากระแสทางเอาต์พุตของวงจรขึ้นอยู่กับค่าคงที่ (K_N) ของมอสเฟต M_2 ต่อ M_1 ถ้าค่าคงที่ของ M_2 มากกว่า M_1 กระแสเอาต์พุตมากกว่ากระแสอินพุต ในทางกลับกันถ้าค่าคงที่ของ 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 V และ K_N = 0.1 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 μA และคุณลักษณะของวงจรสะท้อนกระแส

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

$$= \sqrt{\frac{500\mu A}{0.1mA/V^2}} + 0.7V \tag{6.106}$$

= 2.93 V

กระแส I_{out} มีค่าเท่ากับ

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

$$= 0.1mA/V^2\left(2.93V - 0.7V\right)^2 \tag{6.108}$$

= 497.29 μA

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

วิธีทำ กระแส I_{in} = I_{REF} = 500 μA และคุณลักษณะของวงจรสะท้อนกระแส

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

$$= \sqrt{\frac{500\mu A}{0.2mA/V^2}} + 0.8V \tag{6.110}$$

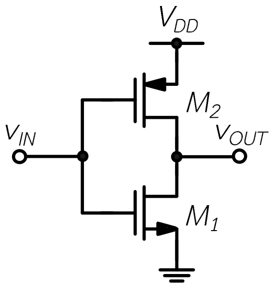
= 2.38 V

กระแส i_{out} มีค่าเท่ากับ

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

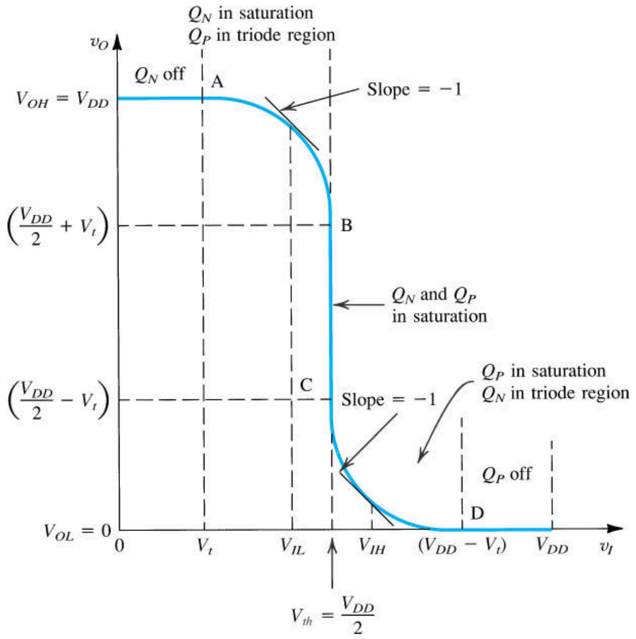
6.5.2 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ (CMOS Inverter)

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



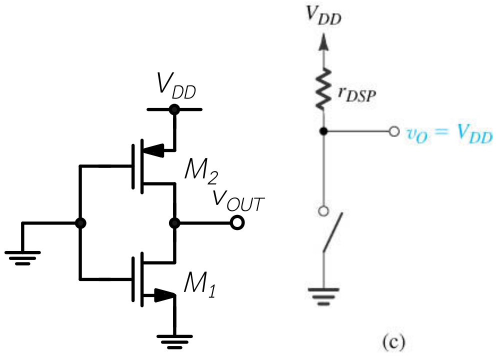
รูปที่ 6.10 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์

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 ทำงานในย่านอิ่มตัวขณะที่มอสเฟต M_2 ทำงานในย่านเชิงเส้น แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มแรงดันอินพุตเท่ากับ $V_{DD}/2$ ลักษณะการทำงานในช่วงที่ 3 มอสเฟต M_1 และ M_2 ทำงานในย่านอิ่มตัว 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 ทำงานในย่านอิ่มตัว ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อแรงดันเอาต์พุตมากกว่า $(V_{DD} - V_t)$ ส่งผลให้มอสเฟต M_2 ไม่นำกระแส ทำให้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับศูนย์



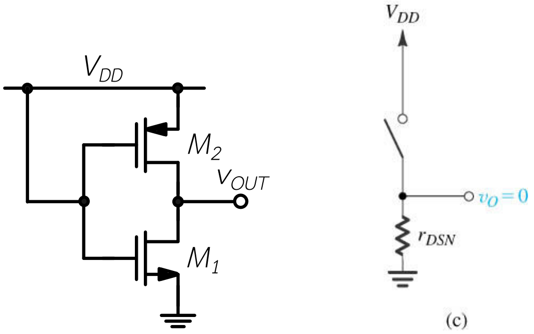
รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 6.12 แสดงวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ขณะที่อินพุตต่อลงกราวด์ การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ 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 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ขณะที่อินพุตต่อลงกราวด์

รูปที่ 6.13 แสดงวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ขณะที่อินพุตเท่ากับแหล่งจ่าย การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้ 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 V กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี V_{TH} = 0.7 V และ K_N = 0.1 mA/V^2 และมอสเฟตชนิด P-Channel มี V_{TH} = 0.8 V และ K_N = 0.2 mA/V^2 ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

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

$$v_{OUT} = \left(g_{mn}v_{IN} + g_{mp}v_{IN}\right)\left(r_{On} \,||\, r_{Op}\right) \tag{6.112}$$

อัตราขยาย A_v เท่ากับ

$$A_v = \left(g_{mn} + g_{mp}\right)\left(r_{On} \,||\, r_{Op}\right) \tag{6.113}$$

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

6.6 บทสรุป

มอสเฟต คืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปต่อเป็นวงจรขยายสัญญาณ และวงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ กระแสที่ไหลผ่านตัวมอสเฟตจะถูกควบคุมด้วยแรงดัน V_{GS} วงจรขยายด้วยมอสเฟตมีจำนวน 3 วงจร ได้แก่ วงจรขยายซอสร่วม วงจรขยายเกตร่วม และวงจรขยายเดรนร่วม อัตราขยายของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่า g_m ของมอสเฟต และค่า R_D การประยุกต์ใช้มอสเฟตเป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปใช้ในวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซ์ชิง และวงจรอินเวอร์เตอร์ ผลจากการทดลองวงจรขยายซอสร่วมแสดงสัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสอินพุต 180 องศา สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายเกตร่วมแสดงมีเฟสเดียวกับอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายเดรนร่วมมีเฟสเดียวกับอินพุต และมีขนาดประมาณเท่ากับสัญญาณอินพุต

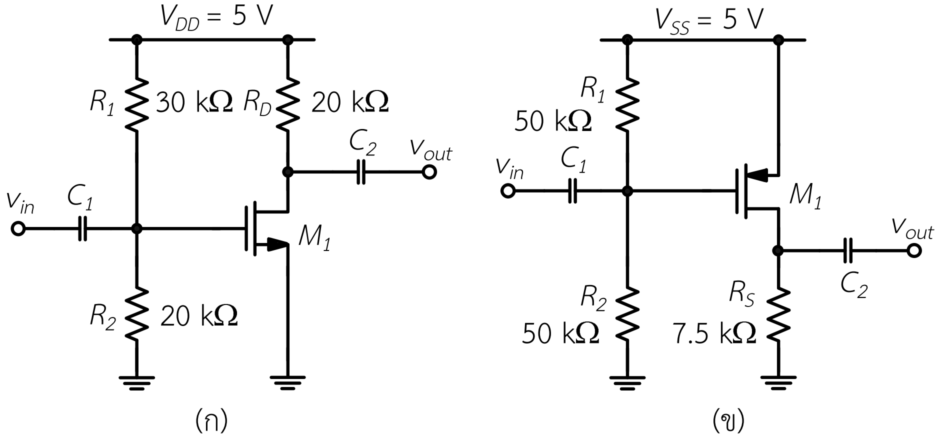
คำถามหลังการทดลอง

1. ให้อธิบายการทำงานวงจรขยายแบบซอสร่วม
2. จากการทดลองวงจรขยายแบบซอสร่วม สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใด
3. ให้อธิบายการทำงานวงจรขยายแบบเกตร่วม
4. จากการทดลองวงจรขยายแบบเกตร่วม สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใด
5. ให้อธิบายการทำงานวงจรขยายแบบเดรนร่วม
6. จากการทดลองวงจรขยายแบบเดรนร่วม สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร เพราะเหตุใด
7. ให้อธิบายการทำงานวงจรสะท้อนกระแส
8. จากการทดลองวงจรสะท้อนกระแส กระแสเอาต์พุตกับอินพุตเท่ากันหรือไม่ เพราะเหตุใด
9. ให้อธิบายการทำงานของมอสเฟตที่สังเกตได้จากการทดลอง
10. สัญญาณพัลส์ช่วงไดเข้าที่ขาเกตของมอสเฟตจะทำให้ LED สว่าง เพราะเหตุใด?
11. ให้อธิบายการทำงานวงจรอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 6.23
12. จากการทดลองวงจรอินเวอร์เตอร์แตกต่างจากวงจรมอสเฟตสวิตช์ในรูปที่ 6.24 อย่างไร

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel ในรูปที่ 6.25 (ก) มี V_{TH} = 1 V และ K_N = 0.1 mA/V^2 ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}

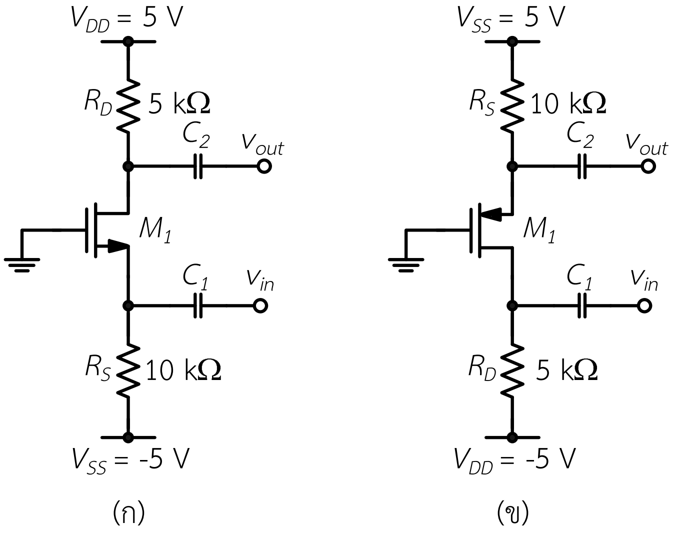
2. รูปที่ 6.25 (ข) แสดงวงจรขยายแบบซอสร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี V_{TH} = -1.2 V และ K_P = 0.2 mA/V^2 ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}



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

3. รูปที่ 6.26 (ก) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด N-Channel มี V_{TH} = 0.7 V และ K_N = 0.1 mA/V^2 ให้หาค่าอัตราขยาย A_v ค่าความต้านทานอินพุต R_{in} และเอาต์พุต R_{out}

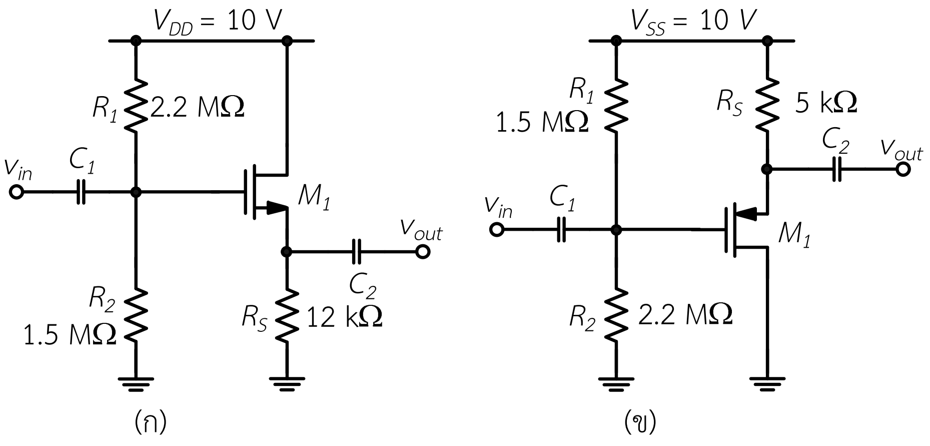
4. รูปที่ 6.26 (ข) แสดงวงจรขยายแบบเกตร่วม กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel มี V_{TH} = 0.8 V และ K_P = 0.2 mA/V^2 ให้หาค่า V_{GS} I_D V_{DS} A_v R_{in} และ R_{out}



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

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

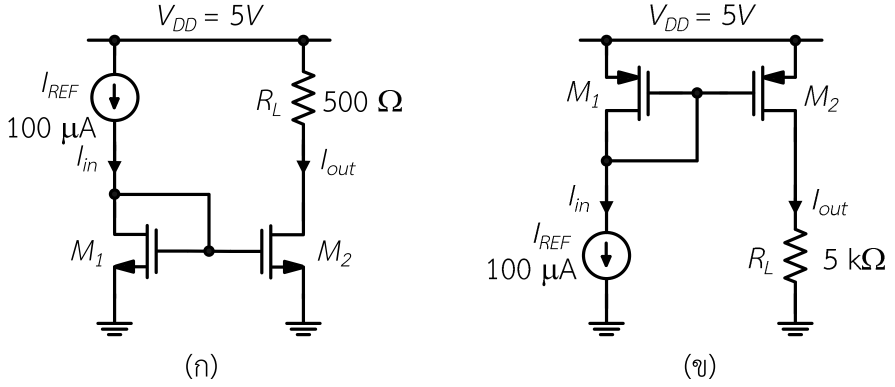
6. กำหนดให้มอสเฟตชนิด P-Channel ในรูปที่ 6.27 (ข) มี V_{TH} = 1.2 V และ K_P = 1 mA/V^2 ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}



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 V และ K_{N1} = 0.1 mA/V^2 และ K_{N2} = 0.4 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 V และ K_P = 0.2 mA/V^2 ให้หาค่า A_v R_{in} และ R_{out}



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