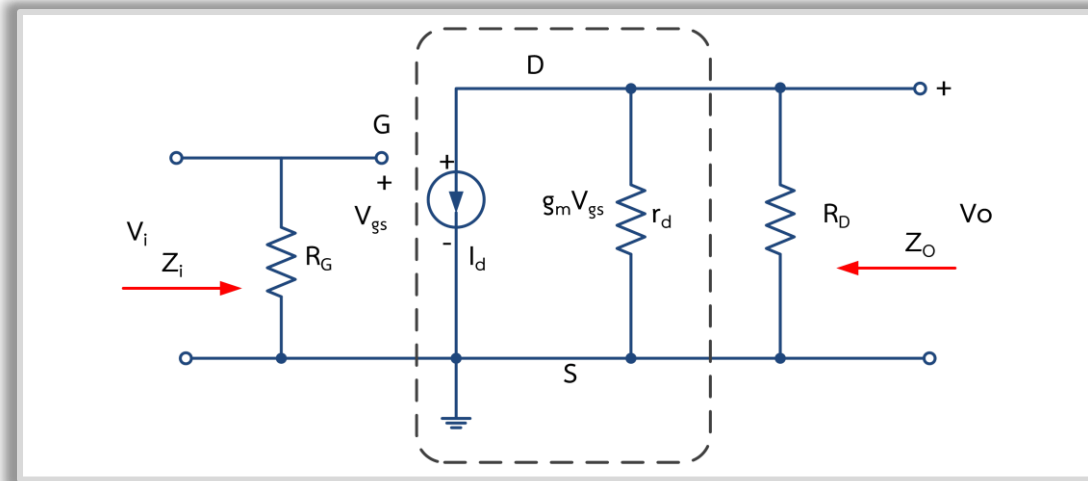
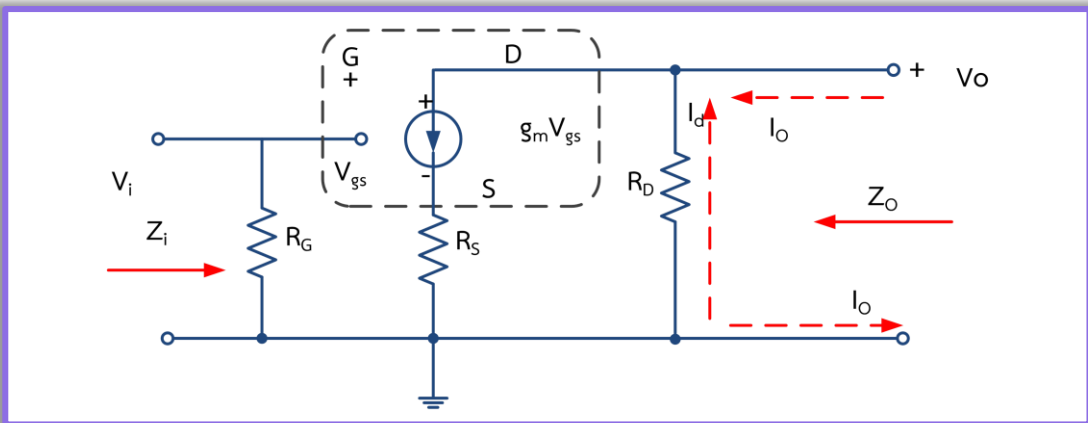


หน่วยที่ 7 การวิเคราะห์การทำงานและการออกแบบ
วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต
(FET Small Signal Analysis And Design Circuit)



โดย

นายเอกนรินทร์ พลาชีวะ

แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคฉะเชิงเทรา

สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา

กระทรวงศึกษาธิการ

หน่วยที่ 7

การวิเคราะห์การทำงานและการออกแบบ

วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต

(FET Small Signal Analysis And Design Circuit)

สาระสำคัญ

การวิเคราะห์วงจรขยายด้วยวงจรสมมูลของเจฟเฟตทางด้านไฟสลับ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) และค่าอัตราขยายทางด้านแรงดัน (AV) ในการวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของมอสเฟต จะถูกแทนที่ด้วยวงจรสมมูลกระแสสลับ โดยในวงจรสมมูลนี้จะประกอบด้วยตัวพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ทรานคอนดักแตนซ์ (g_m) มีหน่วยเป็น ซีเมนต์ (S) แรงดันที่ใช้ควบคุม V_{gs} มีหน่วยเป็นโวลท์ (V) และความต้านทานเอาต์พุต (r_d) มีหน่วยเป็น โอห์ม และยังจะต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ เช่น y_{os} , g_{m0} เป็นต้น ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจาก Data Sheet ของมอสเฟตแต่ละตัว

จุดประสงค์การเรียนรู้

จุดประสงค์ทั่วไป

เพื่อให้มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับ แบบจำลองเจฟเฟต (FET-Model) วงจรขยายสัญญาณ เฟตแบบคอมมอนเกต วงจรขยายสัญญาณเฟตแบบคอมมอนเดรน แบบจำลองมอสเฟต (mosfet-Model) การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของดีฟลิชั่นมอสเฟต การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต การออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. คำนวณหาค่าองค์ประกอบของการวิเคราะห์วงจรสมมูลเจฟเฟตได้อย่างถูกต้อง
2. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรขยายสัญญาณแบบคอมมอนเกตได้อย่างถูกต้อง
3. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรขยายสัญญาณแบบคอมมอนเดรนได้อย่างถูกต้อง
4. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของดีฟลิชั่นมอสเฟตได้อย่างถูกต้อง
5. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตได้อย่างถูกต้อง
6. คำนวณหาค่าความต้านทานเพื่อออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟตได้อย่างถูกต้อง

หัวข้อเนื้อหา

- 7.1 แบบจำลองเจเฟต (FET-Model)
- 7.2 วงจรขยายสัญญาณเฟตแบบคอมมอนเกต
- 7.3 วงจรขยายสัญญาณเฟตแบบคอมมอนเดรน
- 7.4 แบบจำลองมอสเฟต (mosfet-Model)
- 7.5 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของดีฟลิชั่นมอสเฟต
- 7.6 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต
- 7.7 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต

แบบทดสอบก่อนเรียน

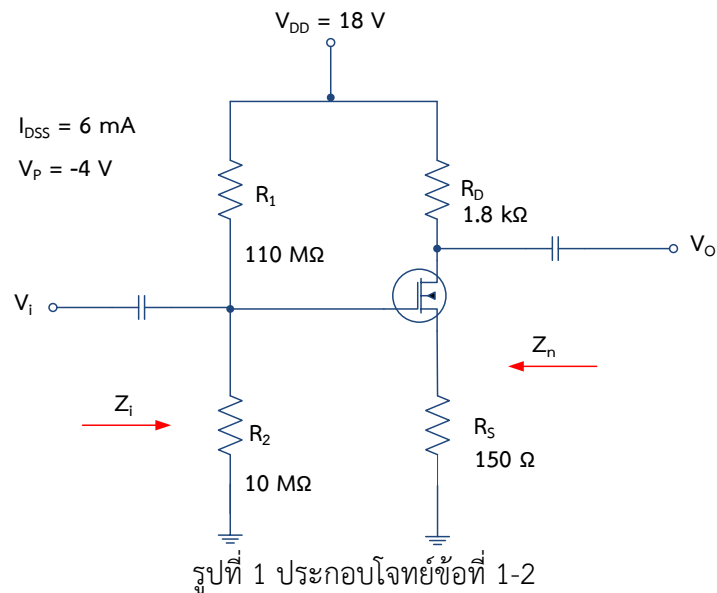
หน่วยที่ 7 การวิเคราะห์การทำงาน และการออกแบบวงจรขยาย

สัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต (FET Small Signal Analysis And Design Circuit)

คำชี้แจง

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

ใช้รูปที่ 1 ตอบคำถามข้อที่ 1-2



1. จากรูปที่ 7 จงคำนวณหาค่า g_{m0} มีค่าตรงกับข้อใด
 - ก. 3 mS
 - ข. 4 mS
 - ค. 5 mS
 - ง. 4.62 mS
 - จ. 5.62 mS

2. จากรูปที่ 7 จงคำนวณหาค่า Z_i มีค่าตรงกับข้อใด

ก. $8 \text{ M}\Omega$

ข. $9 \text{ M}\Omega$

ค. $10 \text{ M}\Omega$

ง. $8.17 \text{ M}\Omega$

จ. $9.17 \text{ M}\Omega$

3. ข้อใดคือค่า g_m เมื่อ $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$, $V_P = -5 \text{ V}$ และ $V_{GSQ} = \frac{V_P}{4}$

ก. 2.4 mS

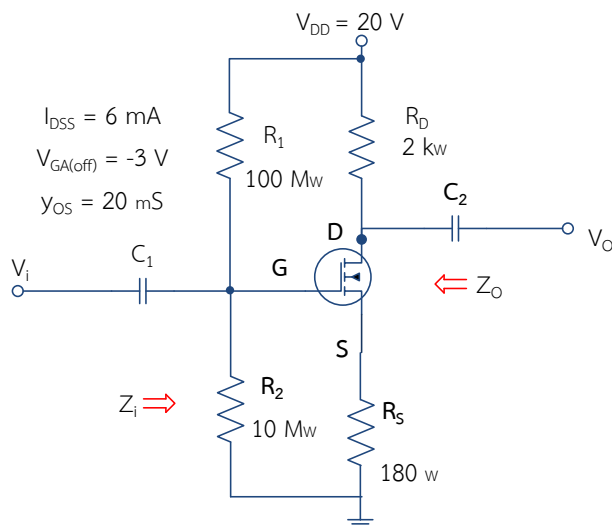
ข. 2.6 mS

ค. 2.8 mS

ง. 3.2 mS

จ. 3.8 mS

4. จากวงจรในรูปที่ 2 กำหนดให้ $V_{GS} = 0.5 \text{ V}$, $I_D = 6 \text{ mA}$ จงคำนวณหาอินพุตอิมพีแดนซ์



รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของดีฟิชั่นมอสเฟต ประกอบโจทย์ข้อที่ 4

ก. $8.11 \text{ M}\Omega$

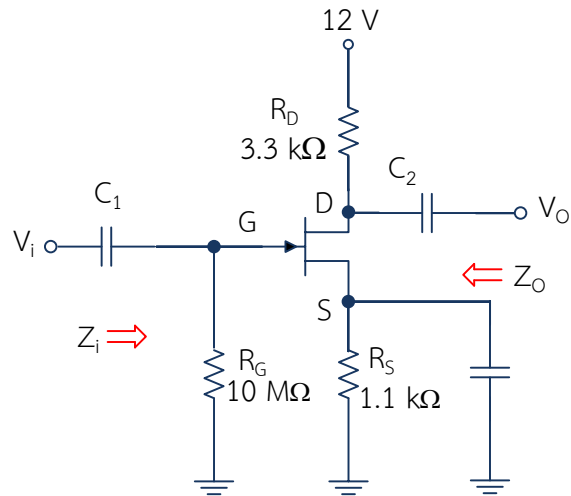
ข. $9.09 \text{ M}\Omega$

ค. $10 \text{ M}\Omega$

ง. $11 \text{ M}\Omega$

จ. $12 \text{ M}\Omega$

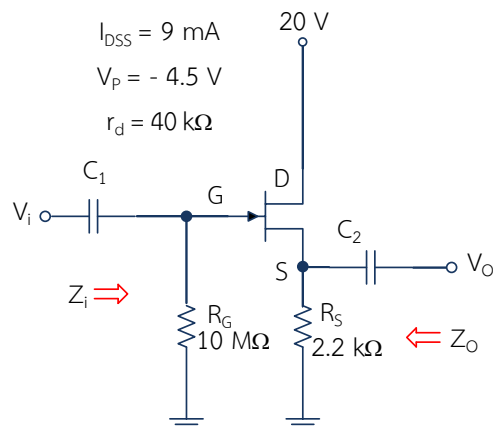
5. จากรูปที่ 3 ข้อใดคือค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)



รูปที่ 3 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 5

- ก. $3 \text{ M}\Omega$
- ข. $5 \text{ M}\Omega$
- ค. $10 \text{ M}\Omega$
- ง. $15 \text{ M}\Omega$
- จ. $18 \text{ M}\Omega$

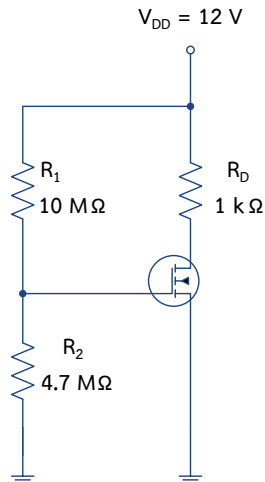
6. จากรูปที่ 4 ข้อใดคือค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)



รูปที่ 4 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 6

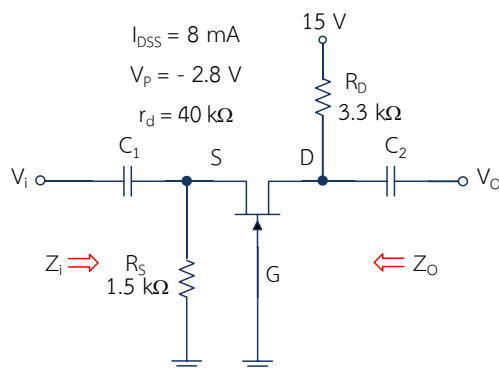
- ก. 326Ω
- ข. 341Ω
- ค. 353Ω
- ง. 393Ω
- จ. 412Ω

7. จากวงจรในรูปที่ 4 กำหนดค่าดังนี้ $I_{D(on)} = 3 \text{ mA}$ ที่ $V_{GS} = 6 \text{ V}$ และ $V_{GS(th)} = 2 \text{ V}$ จงคำนวณหาว่า V_{GS} มีค่าตรงกับข้อใด



รูปที่ 5 วงจรไบอัสเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตแบบแบ่งแรงดัน ประกอบโจทย์ข้อที่ 7

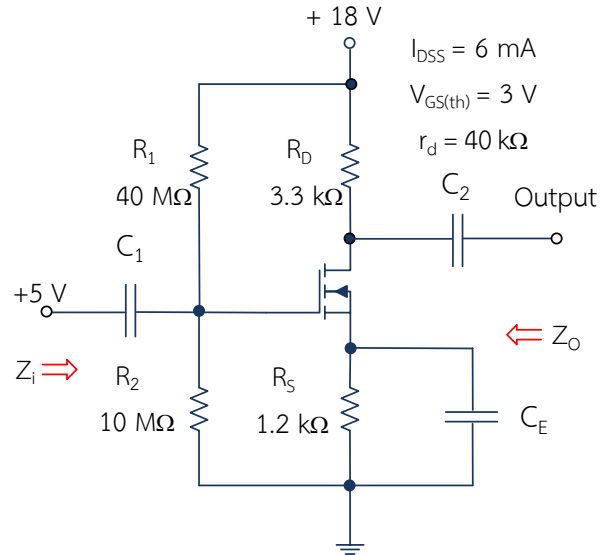
- ก. 2.25 V
 ข. 3.84 V
 ค. 4.91 V
 ง. 5.28 V
 จ. 6.51 V
8. จากรูปที่ 6 ข้อใดคือค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)



รูปที่ 6 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 8

- ก. 5.66
 ข. 5.71
 ค. 6.02
 ง. 6.73
 จ. 7.41

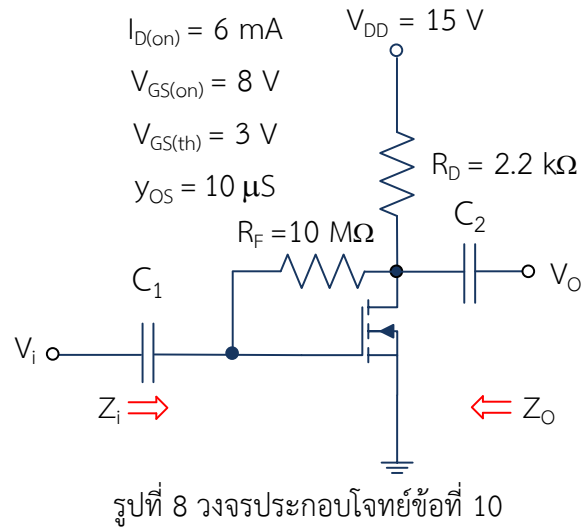
9. จากรูปที่ 6 กำหนดให้ $V_{GS} = 4.66 \text{ V}$, $I_{DQ} = 3 \text{ mA}$, $k = 0.4 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$ และมีสัญญาณที่ใช้ $V_i = 0.8 \text{ mV}$ จงคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับข้อใด



รูปที่ 7 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 9

- ก. - 2.67 V
- ข. - 2.99 V
- ค. - 3.12 V
- ง. - 3.51 V
- จ. - 4.08 V

10. จากวงจรกำหนดให้ $V_{GS} = 6 \text{ V}$, $I_D = 3 \text{ mA}$, $k = 0.3 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$ จงคำนวณหาค่าของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_O) ขณะที่ไม่มีผลกระทบ r_d ตรงกับข้อใด



- ก. $2.2 \text{ k}\Omega$
- ข. $19 \text{ k}\Omega$
- ค. $22 \text{ k}\Omega$
- ง. $1 \text{ M}\Omega$
- จ. $10 \text{ M}\Omega$

หน่วยที่ 7

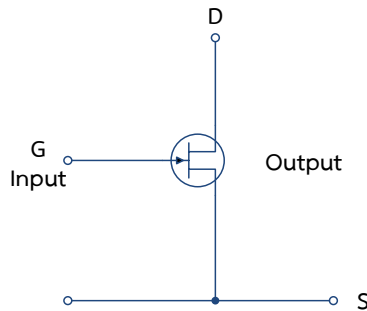
การวิเคราะห์การทำงานและการออกแบบ

วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต

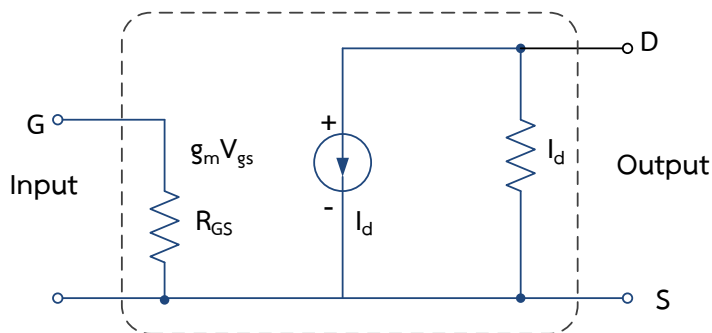
(FET Small Signal Analysis And Design Circuit)

เนื้อหาสาระ

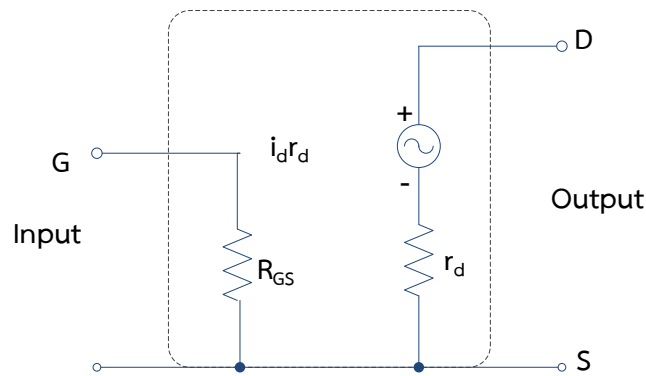
เจฟตเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะการทำงานเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน โดยสัญญาณที่ป้อนเข้าไประหว่างเกตและซอร์ส คือ V_{gs} จะได้กระแสออกมาเป็น $g_m V_{gs}$ โดยความต้านทานอินพุตของแหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมมีค่าสูงมาก (ในอุดมคติเท่ากับอนันต์) ดังนั้นเราสามารถเขียนวงจรสมมูลของเจฟตได้ดังรูป



รูปที่ 7.1 N-Channel J-FET

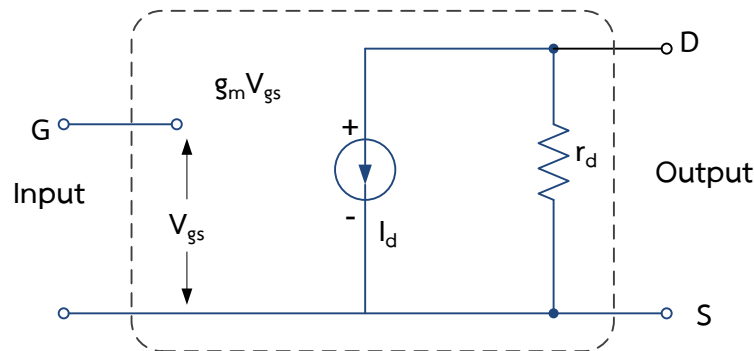


รูปที่ 7.2 วงจรสมมูลเฟตแบบนอร์ตัน



รูปที่ 7.3 วงจรสมมูลเฟตแบบเทวินิน

จากรูปที่ 7.2 และรูปที่ 7.3 แสดงวงจรสมมูลของเจฟตเป็นวิธีการพิจารณาจากภายนอกเข้าไปใช้หลักการของทฤษฎีโครงข่าย 4 จุด (4 Terminal Network) สามารถเขียนได้ทั้งแบบนอร์ตัน และเทวินินแต่นิยมเขียนแบบนอร์ตันส่วน R_{GS} มีค่าสูงมากจึงถือว่า ไม่มีความต้านทานสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 วงจรสมมูลเฟตแบบนอร์ตัน

จากรูปที่ 7.4 ทางด้านอินพุตอิมพีแดนซ์ของเจฟตเป็น Open Circuit ที่ขั้วเกตกับซอร์สและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ r_d เมื่อพิจารณาที่ขั้วเกตกับซอร์สจะเห็นแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วเกตกับซอร์สคือ V_{GS} วงจรสมมูลเจฟตนี้คือ วงจรคอมมอนซอร์ส (Common Source) วงจรนี้จะควบคุมการขยายด้วยแรงดันที่ขั้วเกตกับขั้วซอร์ส ซึ่งจะส่งผลไปควบคุมกระแสที่เดรนที่เอาต์พุตของวงจร ขนาดของกระแสจะถูกควบคุมโดยสัญญาณ V_{GS} และค่าพารามิเตอร์ g_m ของเจฟตที่จะใช้ในวงจร

วิธีการเขียนวงจรสมมูลเจฟตของวงจรขยายเจฟต

1. ลัวงจรที่แหล่งไฟฟ้าไฟตรงลงกราวด์
2. ลัวงจรตัวเก็บประจุ

3. ปล่อยขาเกตลอยไว้และเปลี่ยนรอยต่อขาเดรนกับขาซอร์สให้เป็นวงจรสมมูลเฟตแบบนอร์ตันหรือแบบเทวินิน

7.1 ค่าพารามิเตอร์และความหมายพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเฟต

อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) คือค่าความต้านทานทางดำนอินพุตมีค่าสูงมากจึงเปรียบเทียบกับ Open Circuit

$$Z_i = \infty \Omega \quad \dots 7.1$$

สำหรับ J-FET จะมีค่าประมาณ $1 \text{ G}\Omega \times (1 \times 10^9)$ และ MOSFET จะมีค่าประมาณ $1,000 \text{ T}\Omega$ (1×10^{15}) เอห์พตอิมพีแดนซ์ (Z_o) คือค่าความต้านทานทางดำนเอห์พต จากค่าในคู่มือซึ่งจะปรากฏค่า g_{os} หรือ y_{os} มีหน่วยเป็น μS โดยค่า y_{os} เป็นค่าพารามิเตอร์เป็นองค์ประกอบของ Admittance Equivalent Circuit ซับสริป o บอกว่าเป็นเอห์พตและซับสริป s บอกว่าเป็นซาซอร์ส

$$Z_o = r_d = \frac{1}{g_{os}} = \frac{1}{y_{os}} \quad \dots 7.2$$

$$r_d = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \quad \dots 7.3$$

จากสมการที่ 7.3 หาค่า r_d ที่ V_{GS} เป็นค่าคงที่

ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) คือค่าความนำในการส่งผ่านซึ่งหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเดรน (ΔI_D) ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกตและซอร์ส (ΔV_{GS}) เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$g_m = \frac{\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเดรน}}{\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกตและซอร์ส}}$$

หรือ

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \quad \dots 7.4$$

หรือจะหาค่า g_m ได้จาก

$$g_m = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right] \quad \dots 7.5$$

หรือจะหาค่า g_m ได้จาก

$$g_m = g_{m0} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right] \quad \dots 7.6$$

แต่หากไม่ทราบค่า g_{m0} ก็สามารถหาค่า g_m ได้เช่นกัน โดยใช้ค่าของ I_{DSS} และ $V_{GS(off)} = V_P$ ได้ดังสมการ

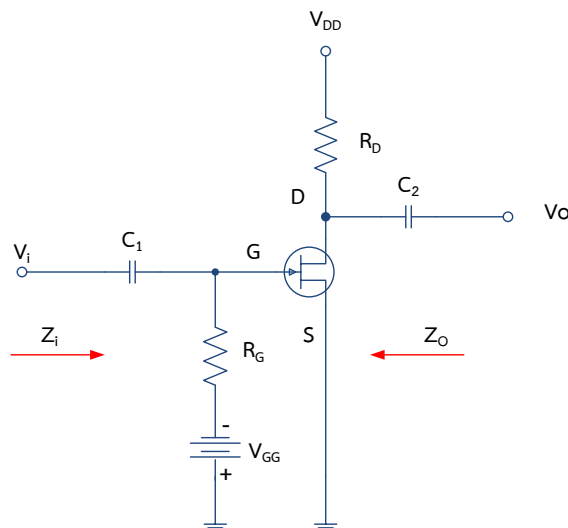
$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|}$$

...7.7

ซึ่งค่า $V_{GS(off)}$ อยู่ในเครื่องหมาย Absolute จึงไม่ต้องใช้เครื่องหมายในการคำนวณทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) มีหน่วยเป็น Micro Siemens (μS) หรือ Microamps / Volt ($\mu A/V$)

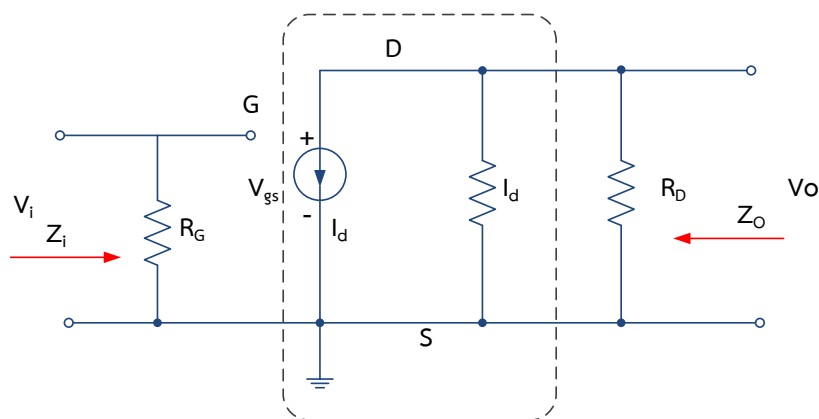
7.2 วงจรขยายสัญญาณเจเฟตแบบ Fixed Bias

จากวงจรในรูปที่ 7.5 แสดงวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเจเฟตจัดรูปแบบการไบอัสแบบ Fixed Bias การวิเคราะห์วงจรขยายด้วยวงจรสมมูลของเจเฟตทางด้านไฟสลับ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) และค่าอัตราขยายทางด้านแรงดัน (A_v)



รูปที่ 7.5 วงจร Fixed Bias

จากวงจรในรูปที่ 7.5 สามารถเขียนวงจรสมมูลเจเฟตได้ดังในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 วงจรสมมูลเจเฟตของวงจร Fixed Bias

7.2.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

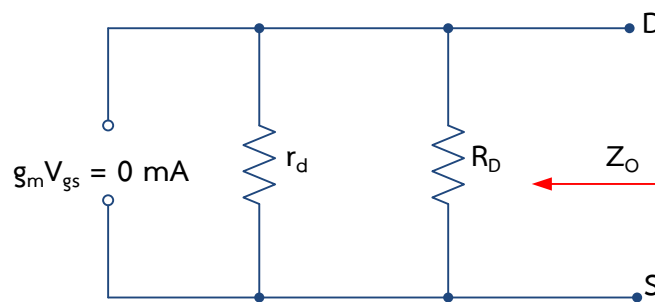
จากวงจรสมมูลเจฟตของวงจร Fixed Bias ในรูปที่ 7.6 จะเห็นว่าเป็นค่าความต้านทาน R_G ดังนั้น

$$Z_i = R_G$$

...7.8

7.2.2 ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

ปรับค่า $V_i = 0$ V จะทำให้ $V_{gs} = 0$ V ด้วย ซึ่งจะทำให้ค่า $g_m V_{gs} = 0$ mA จะทำให้กระแสเดรน ไม่มี ดังนั้นจะหาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

รูปที่ 7.7 วงจรสำหรับวิเคราะห์ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

$$Z_o = R_D // r_d$$

...7.9

แต่ค่าของ r_d จะมีค่ามากกว่า R_D มากๆ (10 : 1) จึงหาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์โดยประมาณได้ดังนี้

$$Z_o \cong R_D$$

7.2.3 ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)

จากรูปที่ 7.6 สามารถเขียนสมการ (Z_o) ได้ดังนี้

$$V_o = -g_m V_{gs} (r_d // R_D)$$

แต่

$$V_{gs} = V_i$$

ทำให้ได้ว่า

$$V_o = -g_m V_i (r_d // R_D)$$

ดังนั้นจากสมการการหาค่าอัตราขยายแรงดัน

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

จะได้ว่า

$$A_v = \frac{-g_m V_i (r_d // R_D)}{V_i}$$

...7.11

$$A_v = -g_m (r_d // R_D)$$

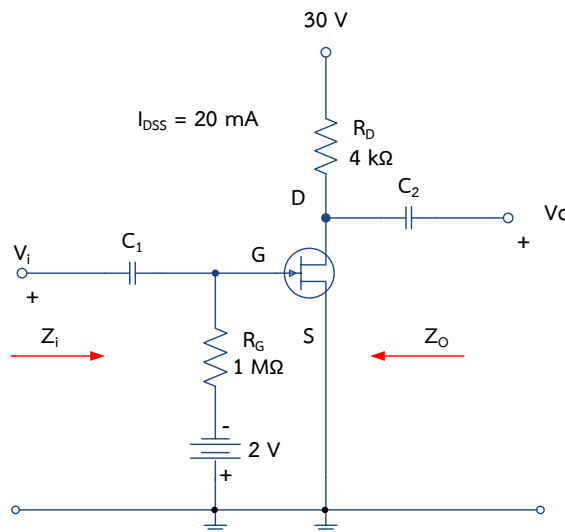
และถ้า $r_d \geq 10R_D$ จะได้ว่า

$$A_V = -g_m R_D \quad \dots 7.12$$

เครื่องหมายลบที่ได้จากสูตร A_V บอกให้ทราบว่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมีเฟสตรงกันข้ามกัน 180°

ตัวอย่างที่ 7.1 จากวงจรในรูปที่ 7.8 กำหนดให้ $V_{GSQ} = -4 \text{ V}$ และ $I_{DQ} = 5.5 \text{ mA}$ โดย $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$ และ $V_P = -6 \text{ V}$ มีค่า $y_{os} = 20 \text{ } \mu\text{S}$ จงคำนวณหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- (1) g_m
- (2) r_d
- (3) Z_i
- (4) Z_o
- (5) A_V



วิธีทำ

(1) หาค่า g_m

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}$$

$$g_{m0} = \frac{2(20 \text{ mA})}{6 \text{ V}}$$

$$g_{m0} = 6.6 \text{ mS}$$

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P} \right)$$

$$g_m = 6.6 \text{ mS} \left(1 - \frac{-4 \text{ V}}{-6 \text{ V}} \right)$$

$$g_m = 9.9 \text{ mS}$$

ตอบ

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

(2) หาค่า r_d

$$r_d = \frac{1}{y_{os}}$$

$$r_d = \frac{1}{20 \mu S}$$

$$r_d = 50 \text{ k}\Omega$$

ตอบ(3) หาค่า Z_i

$$Z_i = R_G$$

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

ตอบ(4) หาค่า Z_o

$$Z_o = R_D // r_d$$

$$Z_o = 4 \text{ k}\Omega // 50 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = 3.70 \text{ k}\Omega$$

ตอบ(5) หาค่า A_v

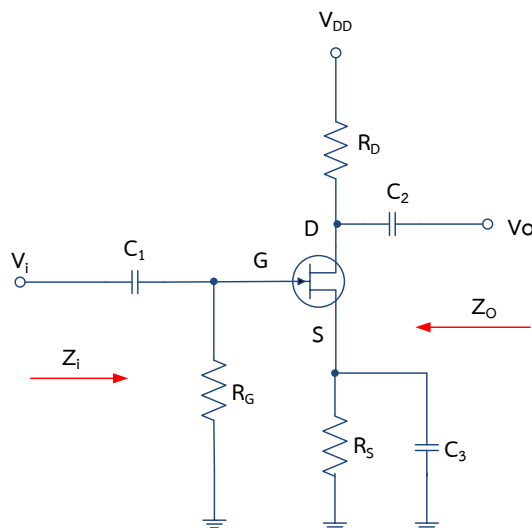
$$A_v = -g_m (r_d // R_D)$$

$$A_v = -(9.9 \text{ mA})(50 \text{ k}\Omega // 4 \text{ k}\Omega)$$

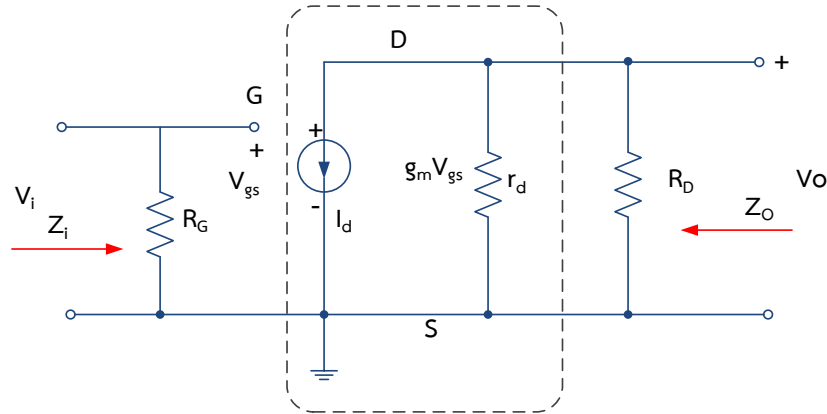
$$A_v = -36.63$$

ตอบ7.3 วงจรขยายสัญญาณเจฟตแบบ Self Bias กรณีมีตัวเก็บประจุ C_3 บายพาสที่ R_S

จากวงจร Fixed Bias ดังแสดงในรูปที่ 7.5 จะมีแหล่งจ่ายไฟอยู่ 2 แหล่งจ่าย แต่ในวงจร Self Bias จะใช้แหล่งจ่ายไฟเพียงแหล่งเดียวดังแสดงในรูปที่ 7.9

รูปที่ 7.9 วงจร Self Bias กรณีมีตัวเก็บประจุ C_3 ต่อบายพาสที่ R_S

จากวงจรในรูปที่ 7.9 วงจร Self Bias กรณีมีตัวเก็บประจุ C_3 ต่อบายพาสที่ R_S ดังนั้นสามารถเขียนวงจรสมมูลเจฟต์ได้ดังในรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 วงจรสมมูลเจฟต์ของวงจร Self Bias

วงจรสมมูลเจฟต์ของวงจร Self Bias ในรูปที่ 7.10 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

7.3.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

จากวงจรสมมูลเจฟต์ของวงจร Self Bias ในรูปที่ 7.10 จะเห็นว่าเป็นค่าความต้านทาน R_G ดังนั้น

$$Z_i = R_G$$

...7.13

7.3.2 ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

$$Z_o = R_D // r_d$$

...7.14

และถ้า $r_d \geq 10R_D$ จะได้ว่า

$$Z_o \cong R_D$$

...7.15

7.3.3 ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)

$$A_v = -g_m (r_d // R_D)$$

...7.16

และถ้า $r_d \geq 10R_D$ จะได้ว่า

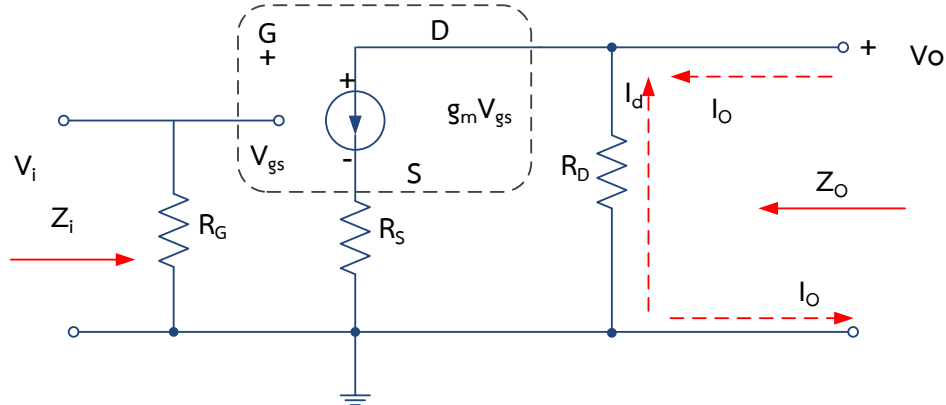
$$A_v = -g_m R_D$$

...7.17

เครื่องหมายลบที่ได้จากสูตร A_v บอกให้ทราบว่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมีเฟสตรงกันข้ามกัน 180°

7.4 วงจรขยายสัญญาณเจฟfetแบบ Self Bias กรณีปลดตัวเก็บประจุ C_3 บายพาสที่ R_S ออก

ถ้าปลด C_3 ในวงจรที่ 7.9 ออกสามารถเขียนวงจรสมมูลเจฟfetได้ดังรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 วงจรสมมูลเจฟfetของวงจร Self Bias กรณีปลดตัวเก็บประจุ C_3 บายพาสที่ R_S ออก

วงจรสมมูลเจฟfetของวงจร Self Bias กรณีปลดตัวเก็บประจุ C_3 บายพาสที่ R_S ออกดังแสดงในรูปที่ 7.11 สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

7.4.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

จากวงจรสมมูลเจฟfet ในรูปที่ 7.11 จะเห็นว่าค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) เป็นค่าความต้านทาน R_G ดังนั้น

$$Z_i = R_G$$

...7.18

7.4.2 ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

$$Z_o = \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{V_i = 0 \text{ V}}$$

จากวงจรสมมูลเจฟfet ในรูปที่ 7.11 ปรับให้ $V_i = 0 \text{ V}$ เป็นผลให้แรงดันตกคร่อม R_G มีค่าเท่ากับ 0 V ประยุกต์ใช้กฎ Kirchhoff's current จะได้ว่า

$$I_o + I_D = g_m V_{gs}$$

และ

$$V_{gs} = -(I_o + I_D)R_S$$

ดังนั้นแทนสมการจะได้ว่า

$$I_o + I_D = -g_m (I_o + I_D)R_S$$

$$I_o + I_D = -g_m I_o R_S - g_m I_D R_S$$

$$I_o + g_m I_o R_S = -g_m I_D R_S - I_D$$

$$I_o [1 + g_m R_S] = -I_D [1 + g_m R_S]$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

เนื่องจาก

$$I_o = -I_D$$

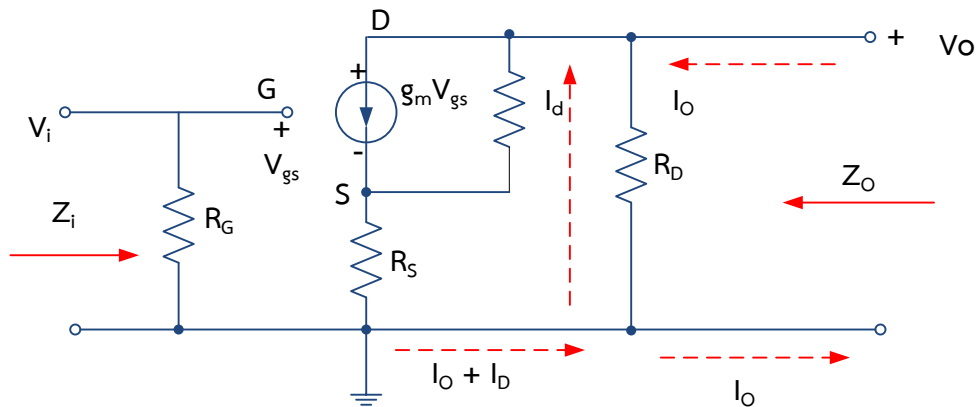
$$V_o = -I_D R_D$$

$$V_o = I_o R_D$$

$$R_D = \frac{V_o}{I_o}$$

$$Z_o = R_D = \frac{V_o}{I_o} \bigg|_{r_d = \infty \Omega} \quad \dots 7.19$$

ถ้าเพิ่มผลของ r_d เข้ามาในวงจรสมมูลเจฟตของวงจร Self Bias ปลดตัวเก็บประจุ C_3 บายพาสที่ R_S ออก ดังแสดงรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 วงจรสมมูลเจฟตของวงจร Self Bias

กรณีปลดตัวเก็บประจุ C_3 บายพาสที่ R_S ออกและเพิ่มผลของ r_d เข้ามา

จาก

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} \bigg|_{V_i = 0}$$

$$Z_o = -\frac{I_D R_D}{I_o}$$

ประยุกต์ใช้กฎ Kirchhoff's Current Law ค่ากระแส I_o ในเทอมของ I_D จะได้ว่า

$$I_o = g_m V_{gs} + I_{rd} - I_D$$

แต่

$$V_{r_d} = V_o + V_{gs}$$

และ

$$I_o = g_m V_{gs} + \frac{V_o + V_{gs}}{r_d} - I_D$$

$$I_o = \left(g_m + \frac{1}{r_d} \right) V_{gs} - \frac{I_D R_D}{r_d} - I_D \quad ; \quad V_o = -I_D R_D$$

และเมื่อ

$$V_{gs} = -(I_D + I_o) R_S$$

ดังนั้นจะได้ I_o ดังนี้

$$I_o = - \left(g_m + \frac{1}{r_d} \right) (I_D + I_o) R_S - \frac{I_D R_D}{r_d} - I_D$$

$$I_o \left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} \right] = -I_D \left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right]$$

$$I_o = \frac{-I_D \left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right]}{1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d}}$$

และ

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} = \frac{-I_D R_D}{\frac{-I_D \left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right]}{1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d}}}$$

ดังนั้นจะได้ Z_o ดังนี้

$$Z_o = \frac{\left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} \right]}{\left[1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \right]} R_D \quad \dots 7.20$$

สำหรับ $r_d \geq 10R_D$;

$$\left(1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} \right) \gg \frac{R_D}{r_d}$$

และ

$$1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d} + \frac{R_D}{r_d} \cong 1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_d}$$

ดังนั้นได้ว่า

$$Z_o \cong R_D$$

...7.21

7.4.3 ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_V)

จากวงจรสมมูลเจฟต ในรูปที่ 7.12 ประยุกต์ใช้กฎ Kirchhoff's Voltage Law จะได้

$$V_i - V_{gs} - V_{R_S} = 0$$

$$V_{gs} = V_i - I_D R_S$$

หาแรงดันตกคร่อม r_d ใช้กฎ Kirchhoff's Voltage Law จะได้ว่า

$$V_{r_d} = V_o - V_{R_S}$$

และ

$$I = \frac{V_{r_d}}{r_d} = \frac{V_o - V_{R_S}}{r_d}$$

จากกฎ Kirchhoff's Current Law จะได้ว่า

$$I_D = g_m V_{gs} + \frac{V_o - V_{R_S}}{r_d}$$

แทนค่า V_{gs} ด้วย $V_i - I_D R_S$ และแทนค่า V_o และ V_{R_S} จะได้ว่า

$$I_D = g_m [V_i - I_D R_S] + \frac{(-I_D R_D) - (I_D R_S)}{r_d}$$

$$I_D \left[1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d} \right] = g_m V_i$$

$$I_D = \frac{g_m V_i}{1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d}}$$

ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตจะได้ว่า

$$V_o = -I_D R_D = - \frac{g_m V_i R_D}{1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d}}$$

ดังนั้น A_V หาได้ดังนี้

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

$$A_V = \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d}} \quad \dots 7.22$$

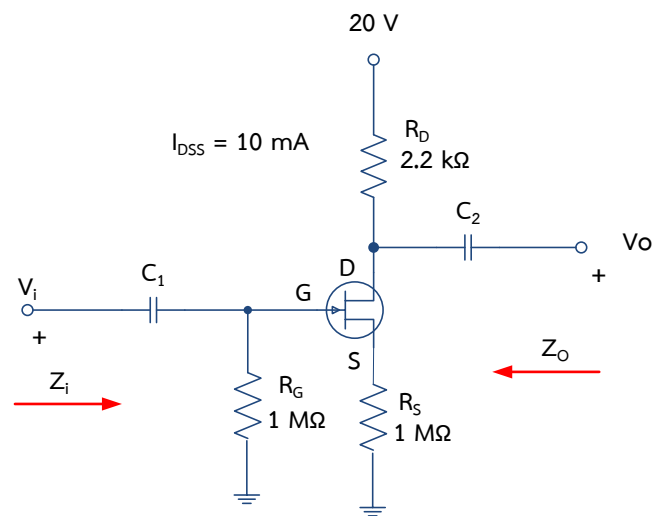
และถ้า $r_d \geq 10(R_D + R_S)$;

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} \cong - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S} \quad \dots 7.23$$

เครื่องหมายลบที่ได้จากสูตร A_V บอกให้ทราบว่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมีเฟสตรงกันข้ามกัน 180°

ตัวอย่างที่ 7.2 จากวงจรในรูปที่ 7.13 กำหนดให้ $V_{GSQ} = -2\text{ V}$, $I_{DQ} = 3\text{ mA}$ และมี $I_{DSS} = 10\text{ mA}$ และ $V_p = -4\text{ V}$ มีค่า $g_{os} = 40\text{ }\mu\text{S}$ จงคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- (1) g_m
- (2) r_d
- (3) Z_i
- (4) Z_o โดยคิดค่า r_d และไม่คิดค่า r_d
- (5) A_v โดยคิดค่า r_d และไม่คิดค่า r_d



รูปที่ 7.13 วงจร Self Bias กรณีสปดตัวเก็บประจุ C_3 บายพาสที่ R_5 ออก

วิธีทำ

- (1) หาค่า g_m

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_p|}$$

$$g_{m0} = \frac{2(10\text{ mA})}{|-4\text{ V}|}$$

$$g_{m0} = 5\text{ mS}$$

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_p} \right)$$

$$g_m = (5\text{ mS}) \left(1 - \frac{-2\text{ V}}{-4\text{ V}} \right)$$

$$g_m = 2.50\text{ mS}$$

ตอบ

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

(2) หาค่า r_d

$$r_d = \frac{1}{y_{os}}$$

$$r_d = \frac{1}{40 \mu S}$$

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

ตอบ(3) หาค่า Z_i

$$Z_i = R_G$$

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

ตอบ(4) หาค่า Z_o โดยคิดค่า r_d

$$(r_d = 25 \text{ k} \Omega) > (10R_D = 22 \text{ k} \Omega)$$

ดังนั้น

$$Z_o = R_D$$

$$Z_o = 2.2 \text{ k} \Omega$$

ตอบหาค่า Z_o โดยไม่คิดค่า r_d ($r_d = \infty \Omega$)

$$Z_o = R_D$$

$$Z_o = 2.2 \text{ k} \Omega$$

ตอบ(5) หาค่า A_v โดยคิดค่า r_d

$$A_v = \frac{-g_m R_D}{1 + g_m R_S + \frac{R_D + R_S}{r_d}}$$

$$A_v = - \frac{(2.5 \text{ mS})(2.2 \text{ k} \Omega)}{1 + (2.5 \text{ mS})(1 \text{ k} \Omega) + \frac{(2.2 \text{ k} \Omega) + (1 \text{ k} \Omega)}{25 \text{ k} \Omega}}$$

$$A_v = -8.12$$

ตอบหาค่า A_v โดยไม่คิดค่า r_d

$$A_v = - \frac{g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$

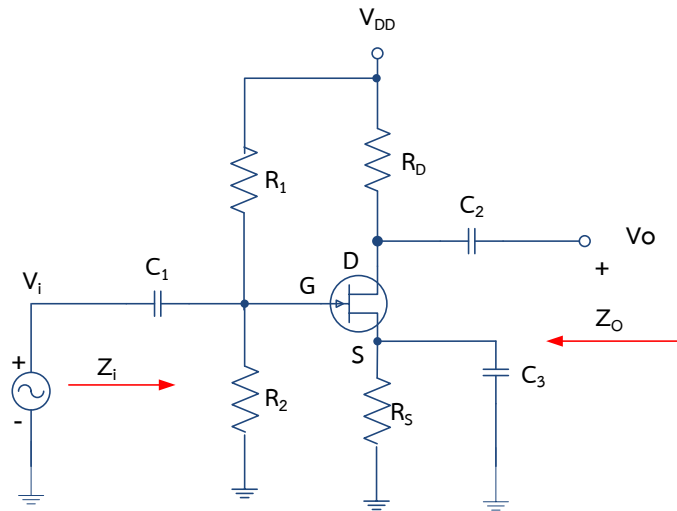
$$A_v = - \frac{(2.5 \text{ mS})(2.2 \text{ k} \Omega)}{1 + (2.5 \text{ mS})(1 \text{ k} \Omega)}$$

$$A_v = -8$$

ตอบ

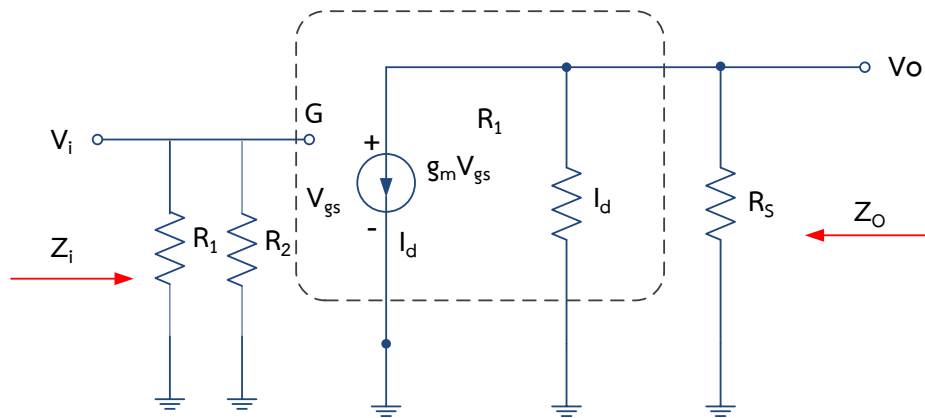
7.5 วงจรขยายสัญญาณเจฟfetแบบ Voltage Divider

เป็นวงจรที่นิยมใช้งานมากในด้านวงจรขยายสัญญาณทางด้านสัญญาณเสียง วงจรขยายแบบนี้ เป็นวงจรที่มีเสถียรภาพในการขยายคงที่ภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสิ่งแวดลอมดังแสดง ในรูปที่ 7.14



รูปที่ 7.14 วงจร Voltage Divider

จากรูปที่ 7.14 การเขียนวงจรสมมูลของเจฟfetจะแสดงในรูปที่ 7.15



รูปที่ 7.15 แสดงวงจรสมมูลของเจฟfetแบบ Voltage Divider

7.5.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

$$Z_i = R_1 // R_2 \quad \dots 7.24$$

7.5.2 ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

เมื่อกำหนดให้ $V_i = 0$ V จะทำให้ V_{gs} และ $g_m V_{gs}$ มีค่าเป็น 0 V ดังนั้นจะทำให้ได้ Z_o ดังนี้

$$Z_o = r_d // R_D \quad \dots 7.25$$

สำหรับ $r_d \geq 10R_D$;

$$Z_o \cong R_D \quad \dots 7.26$$

7.5.3 ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_V)

จากรูปที่ 7.15 แสดงวงจรสมมูลของเจฟตแบบ Voltage Divider

$$V_{gs} = V_i$$

และ

$$V_o = -g_m V_{gs} (r_d // R_D)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

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

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-g_m V_{gs} (r_d // R_D)}{V_{gs}}$$

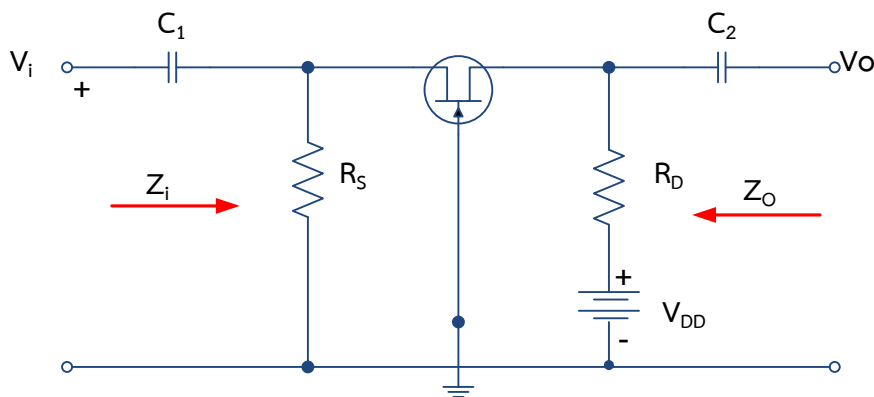
$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = -g_m (r_d // R_D) \quad \dots 7.27$$

สำหรับ $r_d \geq 10R_D$;

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = -g_m R_D \quad \dots 7.28$$

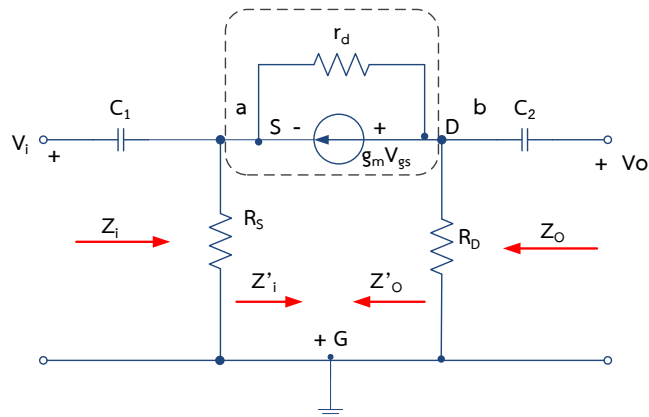
7.6 วงจรขยายสัญญาณเจฟตแบบคอมมอนเกต

วงจรขยายแบบคอมมอนเกตเมื่อพิจารณาแล้วจะเหมือนกับการให้ไบอัสทรานซิสเตอร์แบบคอมมอนเบสดังแสดงในรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 วงจรขยายแบบคอมมอนเกต

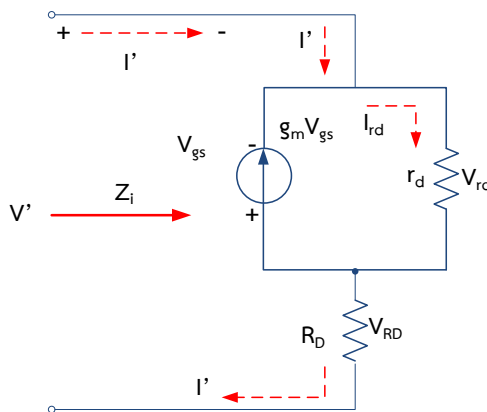
จากวงจรที่ 7.16 สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 7.17



รูปที่ 7.17 วงจรสมมูลของวงจรขยายแบบคอมมอนเกต

7.6.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

จากวงจรในรูปที่ 7.16 เมื่อพิจารณาวงจรหาค่า Z_i จะเห็นว่ามีค่าเท่ากับ R_S ขนานกับ Z'_i จะได้เท่ากับ $Z_i = R_S // Z'_i$ จึงเขียนรูปวงจรใหม่เพื่อการพิจารณาการหาค่า Z'_i ดังแสดงในรูปที่ 7.18

รูปที่ 7.18 วงจรสมมูลของวงจรขยายแบบคอมมอนเกตเพื่อการพิจารณาการหาค่า Z'_i

จากรูปที่ 7.18 $V' = -V_{gs}$ จากกฎของ Kirchhoff's Voltage Law จะได้ว่า

$$V' - V_{r_d} - V_{R_D} = 0$$

$$V_{r_d} = V' - V_{R_D}$$

แทนค่า V_{R_D} ด้วย $I' R_D$

$$V_{r_d} = V' - I' R_D$$

จากกฎของ Kirchhoff's Current Law ที่จุด a จะได้ว่า

$$I' + g_m V_{gs} = I_{r_d}$$

$$I' = I_{r_d} - g_m V_{gs}$$

$$I' = \frac{V_{r_d}}{r_d} - g_m V_{gs}$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

$$i' = \frac{V' - i' R_D}{r_d} - g_m V_{gs}$$

หรือสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$i' = \frac{V'}{r_d} - \frac{i' R_D}{r_d} - g_m (-V')$$

$$i' + \frac{i' R_D}{r_d} = \frac{V'}{r_d} + g_m V'$$

$$i' \left[1 + \frac{R_D}{r_d} \right] = V' \left[g_m + \frac{1}{r_d} \right]$$

และ

$$Z_i' = \frac{V'}{i'} = \frac{1 + \frac{R_D}{r_d}}{g_m + \frac{1}{r_d}}$$

...7.29

หรือ

$$Z_i = \frac{V'}{V_i} = \frac{r_d + R_D}{1 + g_m r_d}$$

...7.30

และสามารถหาค่า Z_i ได้ดังนี้

$$Z_i = R_S // Z_i'$$

$$Z_i = R_S // \left[\frac{r_d + R_D}{1 + g_m r_d} \right]$$

...7.31

ถ้า $r_d \geq 10R_D$ จากสมการที่ 7.28 จะได้ค่าประมาณดังนี้ $R_D/r_d \ll 1$ และ $1/r_d \ll g_m$

$$Z_i' = \frac{\left[1 + \frac{R_D}{r_d} \right]}{\left[g_m + \frac{1}{r_d} \right]} \cong \frac{1}{g_m}$$

ดังนั้น

$$Z_i = R_S // \frac{1}{g_m}$$

...7.32

7.6.2 ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

แทนค่า $V_i=0$ V ทำให้ R_s เป็นลัดวงจรจะทำให้ค่า V_{gs} เป็นศูนย์โวลต์ซึ่งจะเป็นผลให้ $g_m V_{gs}=0$ และจะทำให้ $r_d//R_D$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$Z_o=R_D//r_d \quad \dots 7.33$$

สำหรับกรณีที่ ถ้า $r_d \geq 10R_D$

จะได้

$$Z_o=R_D \quad \dots 7.34$$

7.6.3 ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)

จากวงจรในรูปที่ 7.16 $V_i=-V_{gs}$

และ $V_o \cong I_D R_D$

หาค่าแรงดันตกคร่อม r_d

$$V_{r_d}=V_o-V_i$$

และ

$$I_{r_d}=\frac{V_o-V_i}{r_d}$$

จากกฎของ Kirchhoff 's Current Law ที่จุด b จะได้ว่า

$$I_{r_d}+I_D+g_m V_{gs}=0$$

และ

$$I_D=-I_{r_d}-g_m V_{gs}$$

$$I_D=-\left[\frac{V_o-V_i}{r_d}\right]-g_m [-V_i]$$

$$I_D=\frac{-V_o+V_i}{r_d}+g_m V_i$$

$$I_D=\frac{V_i-V_o}{r_d}+g_m V_i$$

ดังนั้น

$$V_o=I_D R_D=\left[\frac{V_i-V_o}{r_d}+g_m V_i\right] R_D$$

$$V_o=I_D R_D=\left[\frac{V_i}{r_d}-\frac{V_o}{r_d}+g_m V_i\right] R_D$$

$$\begin{aligned}
 V_o &= \frac{V_i R_D}{r_d} - \frac{V_o R_D}{r_d} + g_m V_i R_D \\
 V_o + \frac{V_o R_D}{r_d} &= \frac{V_i R_D}{r_d} + g_m V_i R_D \\
 V_o \left[1 + \frac{R_D}{r_d} \right] &= V_i \left[\frac{R_D}{r_d} + g_m R_D \right] \\
 \frac{V_o}{V_i} &= \frac{\left[\frac{R_D}{r_d} + g_m R_D \right]}{\left[1 + \frac{R_D}{r_d} \right]} \\
 A_v &= \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left[\frac{R_D}{r_d} + g_m R_D \right]}{\left[1 + \frac{R_D}{r_d} \right]} \quad \dots 7.35
 \end{aligned}$$

สำหรับกรณีที่ ถ้า $r_d \geq 10R_D$ ในสมการที่ 7.34 จะไม่นำค่า R_D/r_d มาคิดคำนวณจะได้สมการดังนี้

$$A_v \cong g_m R_D$$

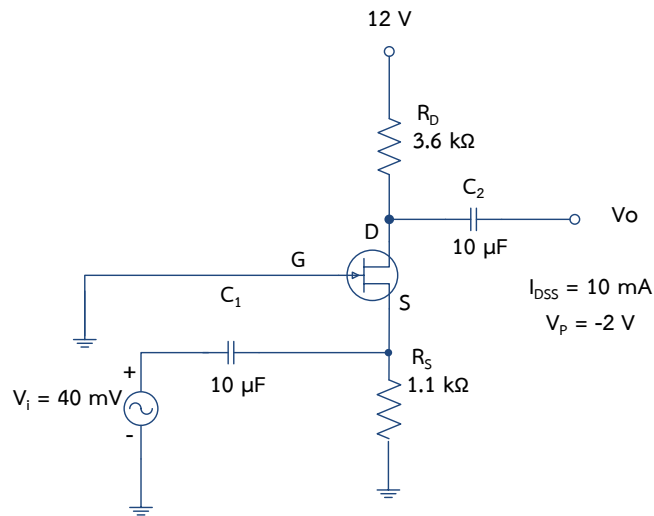
ค่า A_v เป็นบวกแสดงว่าแรงดัน V_o และ V_i มีเฟสเหมือนกัน (In Phase)

ตัวอย่างที่ 7.3 จากวงจรในรูปที่ 7.19 ถ้า $V_{GSQ} = -1.2 \text{ V}$ และ $I_{DQ} = 6 \text{ mA}$ จงคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังนี้

- (1) g_m
- (2) r_d
- (3) หาค่า Z_i ในสภาวะที่คิดและไม่คิดค่า r_d
- (4) หาค่า Z_o ในสภาวะที่คิดและไม่คิดค่า r_d
- (5) หาค่า V_o ในสภาวะที่คิดและไม่คิดค่า r_d

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)



รูปที่ 7.19 วงจรขยายสัญญาณเจฟตแบบคอมมอนเกต

วิธีทำ (1) หาค่า g_m

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}$$

$$g_{m0} = \frac{2(15 \text{ mA})}{|-2\text{V}|}$$

$$g_{m0} = 15 \text{ mS}$$

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P} \right)$$

$$g_m = (15 \text{ mS}) \left(1 - \frac{-1.2 \text{ V}}{-2 \text{ V}} \right)$$

$$g_m = 25 \text{ mS}$$

ตอบ(2) หาค่า r_d

$$r_d = \frac{1}{g_{os}}$$

$$r_d = \frac{1}{50 \mu\text{S}}$$

$$r_d = 20 \text{ k}\Omega$$

ตอบ(3) หาค่า Z_i ในสถานะที่คิดและไม่คิดค่า r_d Z_i ในสถานะที่คิด r_d

$$Z_i = R_S // \left[\frac{r_d + R_D}{1 + g_m r_d} \right]$$

$$Z_i = 1.1 \text{ k}\Omega // \left[\frac{20 \text{ k}\Omega + 3.6 \text{ k}\Omega}{1 + (25 \text{ mS})(20 \text{ k}\Omega)} \right]$$

$$Z_i = 1.1 \text{ k}\Omega // \left[\frac{23.6 \text{ k}\Omega}{501} \right]$$

$$Z_i = 1.1 \text{ k}\Omega // 47.1 \text{ k}\Omega$$

$$Z_i = 1.07 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

Z_i ในสถานะที่ไม่คิด r_d

$$Z_i = R_S // \frac{1}{g_m}$$

$$Z_i = 1.1 \text{ k}\Omega // \frac{1}{25 \text{ mS}}$$

$$Z_i = 1.1 \text{ k}\Omega // 40 \text{ k}\Omega$$

$$Z_i = 1.07 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

(4) หาค่า Z_o ในสถานะที่คิดและไม่คิดค่า r_d

Z_o ในสถานะที่คิด r_d

$$Z_o = R_D // r_d$$

$$Z_o = 3.6 \text{ k}\Omega // 20 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = 3.05 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

Z_o ในสถานะที่ไม่คิด r_d

$$Z_o = R_D$$

$$Z_o = 3.6 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

(5) หาค่า V_o ในสถานะที่คิดและไม่คิดค่า r_d

V_o ในสถานะที่คิด r_d

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left[\frac{R_D}{r_d} + g_m R_D \right]}{\left[1 + \frac{R_D}{r_d} \right]}$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left[\frac{3.6 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} + (25 \text{ mS})(3.6 \text{ k}\Omega) \right]}{\left[1 + \frac{3.6 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} \right]}$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{[0.18+90]}{[1+0.18]}$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = 76.42$$

$$V_o = A_V V_i$$

$$V_o = (76.42) (40 \text{ mV})$$

$$V_o = 3.05 \text{ mV}$$

ตอบ

V_o ในสถานะที่ไม่คิด r_d

$$A_V = g_m R_D$$

$$A_V = (25 \text{ mS}) (3.6 \text{ k}\Omega)$$

$$A_V = 90$$

และ

$$V_o = A_V V_i$$

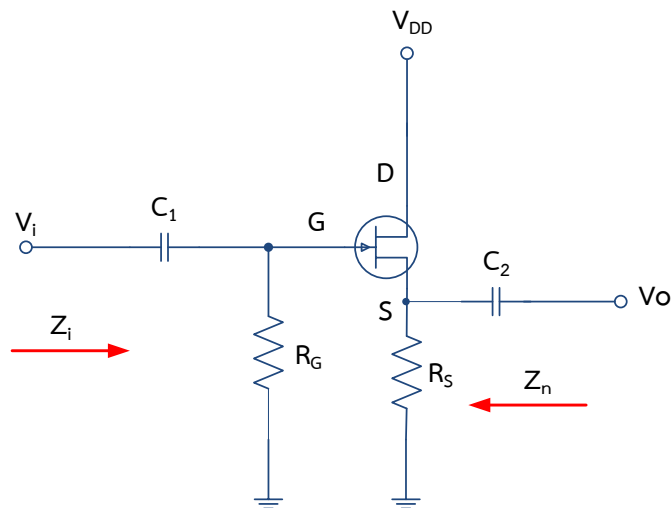
$$V_o = (90) (40 \text{ mV})$$

$$V_o = 3.6 \text{ V}$$

ตอบ

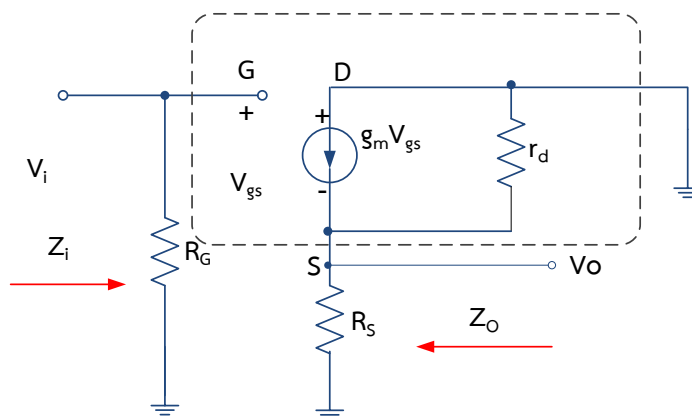
7.7 วงจรขยายสัญญาณเจฟfetแบบคอมมอนเดรน

วงจรคอมมอนเดรนหรือ Source Follower จะเหมือนกับวงจร Emitter Follower ในการให้ไบอัสทรานซิสเตอร์ ซึ่งในวงจรขยายแบบนี้จะมีอัตราขยายไม่เกิน 1 ลักษณะการต่อวงจรแสดงในรูปที่ 7.29



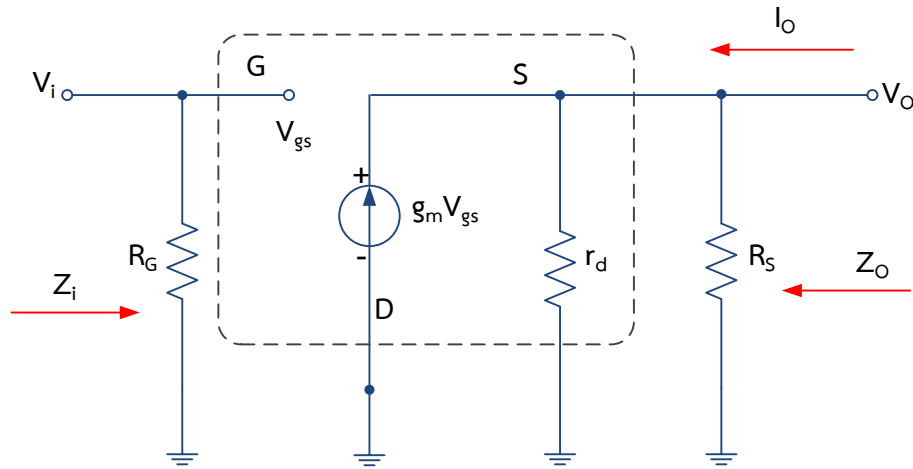
รูปที่ 7.29 วงจรคอมมอนเดรน หรือ Source Follower

จากวงจรในรูปที่ 7.29 สามารถเขียนวงจรสมมูลเจฟfetได้ดังรูปที่ 7.30



รูปที่ 7.30 วงจรสมมูลเจฟfetวงจรคอมมอนเดรนหรือ Source Follower

จากวงจรที่ 7.30 สามารถเขียนเป็นสมมูลให้พิจารณาได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.31



รูปที่ 7.31 วงจรสมมูลเจฟตวงจรรวมมอนเดรนหรือ Source Follower

7.7.1 ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (\$Z_i\$)

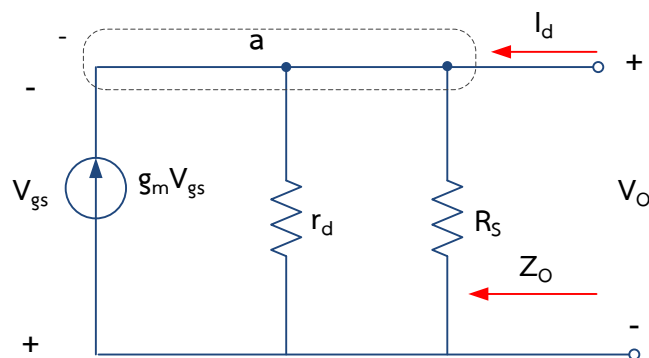
จากรูปที่ 7.31

$$Z_i = R_G$$

...7.36

7.7.2 ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (\$Z_o\$)

เมื่อปรับให้ \$V_i = 0\$ V จะทำให้ที่ขาเกตเป็นกราวด์และ \$V_{gs}\$ กับ \$V_o\$ ขนานกันวงจรเป็นผลให้ \$V_o = -V_{gs}\$ ดังแสดงในรูปที่ 7.32



รูปที่ 7.32 แสดงวงจรสมมูลที่ส่งผลให้ \$V_o = -V_{gs}\$

จากกฎของ Kirchhoff's Current Law ที่จุด a จะได้ว่า

$$I_o + g_m V_{gs} = I_{r_d} + I_{R_S}$$

$$I_o + g_m V_{gs} = \frac{V_o}{r_d} + \frac{V_o}{R_S}$$

$$I_o = \left[\frac{V_o}{r_d} + \frac{V_o}{R_S} \right] - g_m V_{gs}$$

$$I_o = \left[\frac{V_o}{r_d} + \frac{V_o}{R_S} \right] - g_m [-V_o]$$

$$I_o = \left[\frac{V_o}{r_d} + \frac{V_o}{R_S} \right] + g_m V_o$$

$$I_o = V_o \left[\frac{1}{r_d} + \frac{1}{R_S} + g_m \right]$$

และ

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o}$$

$$Z_o = \frac{V_o}{V_o \left[\frac{1}{r_d} + \frac{1}{R_S} + g_m \right]}$$

$$Z_o = \frac{1}{\left[\frac{1}{r_d} + \frac{1}{R_S} + \frac{1}{1/g_m} \right]}$$

จะได้

$$Z_o = r_d // R_S // 1/g_m \quad \dots 7.37$$

สำหรับกรณีที่ ถ้า $r_d \geq 10R_S$;

$$Z_o \cong R_S // 1/g_m \quad \dots 7.38$$

7.7.3 ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)

หาค่า V_o ได้จาก

$$V_o = g_m V_{gs} (r_d // R_S)$$

จากกฎของ Kirchhoff's Voltage Law หาค่าพารามิเตอร์ในรูปที่ 7.31 จะได้

$$V_i = V_{gs} + V_o$$

และ

$$V_{gs} = V_i - V_o$$

ดังนั้น

$$V_o = g_m (V_i - V_o) (r_d // R_S)$$

$$V_o = g_m V_i (r_d // R_S) - g_m V_o (r_d // R_S)$$

$$V_o + g_m V_o (r_d // R_S) = g_m V_i (r_d // R_S)$$

$$V_o [1 + g_m (r_d // R_S)] = g_m V_i (r_d // R_S)$$

ดังนั้น

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m(r_d // R_S)}{1 + g_m(r_d // R_S)}$$

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m(r_d // R_S)}{1 + g_m(r_d // R_S)} \quad \dots 7.39$$

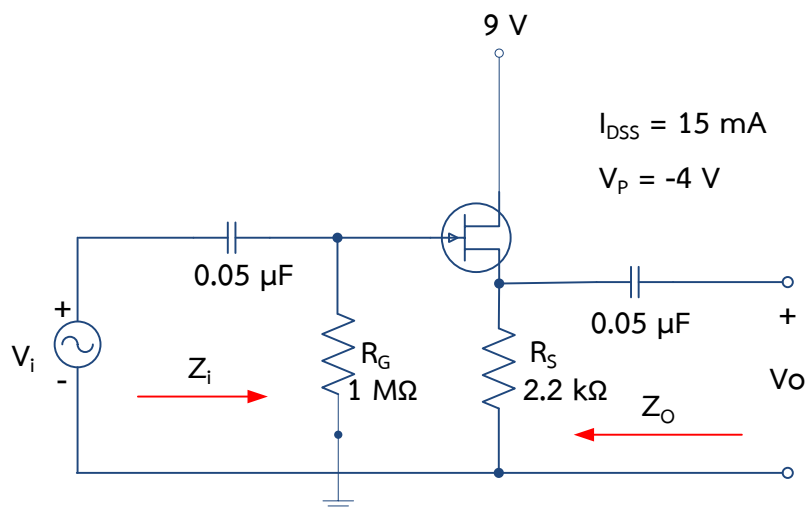
กรณีที่ไม่มี r_d หรือ $r_d \geq 10R_S$;

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \quad \dots 7.40$$

ค่า A_V เป็นบวกเพราะว่าเฟสของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมีเฟสเหมือนกัน

ตัวอย่างที่ 7.4 จากวงจรในรูปที่ 7.33 ถ้า $V_{GSQ} = -2.5$ V และ $I_{DQ} = 5.5$ mA จงคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังนี้

- (1) g_m
- (2) r_d
- (3) Z_i
- (4) Z_o เมื่อคิดค่า r_d และไม่คิดค่า r_d
- (5) A_V เมื่อคิดค่า r_d และไม่คิดค่า r_d



รูปที่ 7.33 วงจรคอมมอนเดรน

วิธีทำ (1) หาค่า g_m

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|}$$

$$g_{m0} = \frac{2(15 \text{ mA})}{|-4\text{V}|}$$

$$g_{m0} = 7.5 \text{ mS}$$

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P} \right)$$

$$g_m = (7.5 \text{ mS}) \left(1 - \frac{-2.5 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right)$$

$$g_m = 2.81 \text{ mS}$$

ตอบ(2) หาค่า r_d

$$r_d = \frac{1}{g_{os}}$$

$$r_d = \frac{1}{25 \mu\text{S}}$$

$$r_d = 40 \text{ k}\Omega$$

ตอบ(3) หาค่า Z_i

$$Z_i = R_G$$

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

ตอบ(4) หาค่า Z_o เมื่อคิดค่า r_d และไม่คิดค่า r_d Z_o เมื่อคิดค่า r_d

$$Z_o = r_d // R_S // 1/g_m$$

$$Z_o = 40 \text{ k}\Omega // 2.2 \text{ k}\Omega // (1/2.28 \text{ mS})$$

$$Z_o = 40 \text{ k}\Omega // 2.2 \text{ k}\Omega // 438.6 \Omega$$

$$Z_o = 362.52 \Omega$$

ตอบ Z_o เมื่อไม่คิดค่า r_d

$$Z_o \cong R_S // 1/g_m$$

$$Z_o \cong 2.2 \text{ k}\Omega // 1/2.28 \text{ mS}$$

$$Z_o \cong 2.2 \text{ k}\Omega // 438.6 \Omega$$

$$Z_o \cong 365.69 \Omega$$

ตอบจะสังเกตได้ว่าเมื่อคิดค่า r_d และไม่คิดค่า r_d จะได้ค่า Z_o ใกล้เคียงกัน(5) หาค่า A_v เมื่อคิดค่า r_d และไม่คิดค่า r_d A_v เมื่อคิดค่า r_d

$$A_V = \frac{g_m(r_d // R_S)}{1 + g_m(r_d // R_S)}$$

$$A_V = \frac{2.81 \text{ mS}(40 \text{ k}\Omega // 2.2 \text{ k}\Omega)}{1 + 2.81 \text{ mS}(40 \text{ k}\Omega // 2.2 \text{ k}\Omega)}$$

$$A_V = \frac{2.81 \text{ mS}(2.09 \text{ k}\Omega)}{1 + 2.81 \text{ mS}(2.09 \text{ k}\Omega)}$$

$$A_V = \frac{5.87}{1 + 5.87}$$

$$A_V = 0.85$$

ตอบซึ่งค่า A_V น้อยกว่า 1 A_V เมื่อไม่คิดค่า r_d

$$A_V = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S}$$

$$A_V = \frac{(2.81 \text{ mS})(2.2 \text{ k}\Omega)}{1 + (2.81 \text{ mS})(2.2 \text{ k}\Omega)}$$

$$A_V = \frac{6.182}{1 + 6.182}$$

$$A_V = 0.86$$

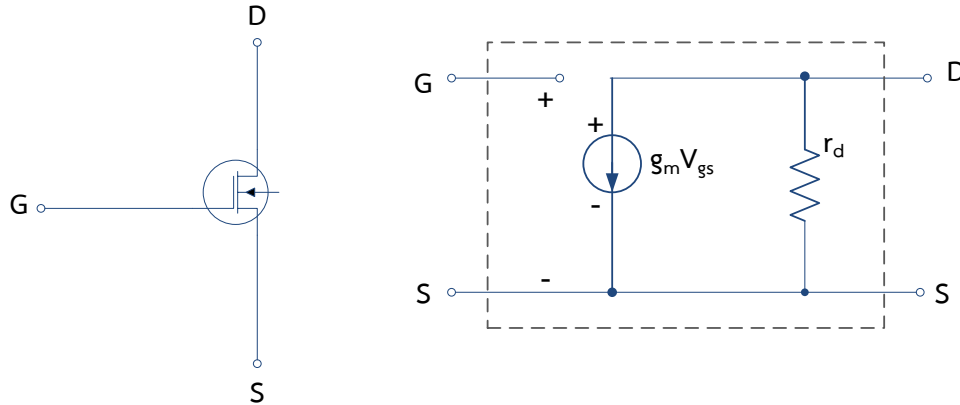
ตอบซึ่งค่าอัตราขยายแรงดัน A_V เมื่อคิดและไม่คิดค่า r_d มีค่าเท่ากัน

ในการวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของมอสเฟต จะถูกแทนที่ด้วยวงจรสมมูลกระแสลับ โดยในวงจรสมมูลนี้จะประกอบด้วยตัวพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ทรานคอนดักแตนซ์ (g_m) มีหน่วยเป็นซีเมนต์ (S) แรงดันที่ใช้ควบคุม V_{gs} มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) และความต้านทานเอาต์พุต (r_d) มีหน่วยเป็นโอห์ม และยังจะต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ เช่น y_{os} , g_{m0} เป็นต้น ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจาก Data Sheet ของมอสเฟตแต่ละตัว

หลักการวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของมอสเฟตจะขึ้นอยู่กับวิธีการจัดไบอัสของวงจรขยายมอสเฟต เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กมีอยู่ 3 ค่า ได้แก่ อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) และอัตราขยายแรงดัน (A_V)

7.8 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของดีฟิชั่นมอสเฟต

แบบจำลองวงจรสมมูลกระแสสลับของดีฟิชั่นมอสเฟตดังแสดงในรูปที่ 7.34



(ก) สัญลักษณ์ของดีฟิชั่นมอสเฟต N-Channel (ข) วงจรสมมูลกระแสสลับของดีฟิชั่นมอสเฟต
รูปที่ 7.34 วงจรสมมูลกระแสสลับของดีฟิชั่นมอสเฟต

จากรูปที่ 7.34 (ข) เป็นวงจรสมมูลของดีฟิชั่นมอสเฟตจะเห็นว่าทางด้านอินพุตอิมพีแดนซ์ของเฟตเป็น Open Circuit ที่ขั้วเกตกับซอร์ส และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่ากับ r_d เมื่อพิจารณาที่ขั้วเกตกับซอร์ส จะเห็นแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วเกตกับซอร์สคือ V_{GS} เกตกับขั้วซอร์ส ซึ่งจะส่งผลไปควบคุมกระแสที่เดรนที่เอาต์พุตของวงจร ขนาดของกระแสจะถูกควบคุมโดยสัญญาณ V_{GS} และค่าพารามิเตอร์ g_m ของเฟตที่จะใช้ในวงจร

วิธีการเขียนวงจรสมมูลมอสเฟตของวงจรขยายมอสเฟต

1. ลัตวงจรที่แหล่งไฟฟ้ากระแสตรงลงกราวด์
2. ลัตวงจรตัวเก็บประจุ
3. ปล่อยขาเกตลอยไว้และเปลี่ยนรอยต่อขาเดรนกับขาซอร์สให้เป็นวงจรสมมูล

เฟตแบบนอร์ตัน ในหลักการทำงานของดีฟิชั่นมอสเฟตจะพบว่า V_{GS} สามารถมีศักยภาพเป็นบวกสำหรับ N-Channel และมีศักยภาพเป็นลบสำหรับ P-Channel ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากเจเฟต ซึ่งจะส่งผลให้ g_m มีค่ามากกว่า g_{m0} ดังจะแสดงให้เห็นในตัวอย่างการวิเคราะห์ทางไฟสลับของดีฟิชั่นมอสเฟตดังต่อไปนี้

7.8.1 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟสลับวงจรสมมูลดีฟิชั่นมอสเฟต

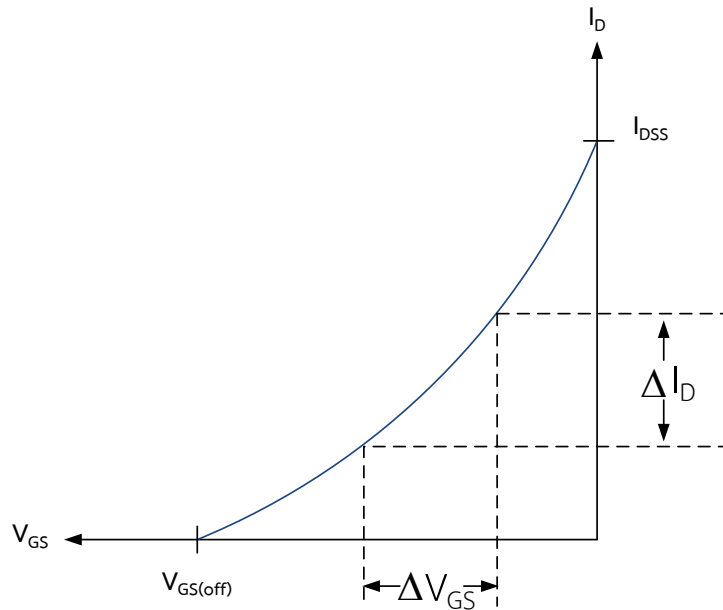
7.8.1.1 ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ (g_m) คือค่าความนำในการส่งผ่านหรือการถ่ายโอนซึ่งหาได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุตต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสอินพุต ค่า g_m ของดีฟิชั่นมอสเฟตหาได้จากสมการดังนี้

$$g_m = g_{m0} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right] \quad \dots 7.41$$

และ

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|} \quad \dots 7.42$$

โดยค่า g_{m0} คือ ค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ถ่ายโอนเมื่อ $V_{GS}=0$ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของค่า g_m
การหาค่า g_m สามารถหาได้จากสมการที่ 7.43 และจากกราฟในรูปที่ 7.35



รูปที่ 7.35 การหาค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ถ่ายโอน

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} \quad \dots 7.43$$

เมื่อ ΔI_D คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุดการทำงาน มีหน่วยเป็นแอมป์แปร์ (A)

ΔV_{GS} คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดการทำงาน มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

7.8.1.2 ค่าความต้านทานเอาต์พุต (r_d) คือค่าความต้านทานเอาต์พุตทางด้านไฟสลัปที่ระหว่างขาเดรนกับขาซอร์ส โดยสามารถหาค่าได้จากอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุต ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเอาต์พุต สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$r_d = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \quad \dots 7.44$$

เมื่อ r_d คือ ค่าความต้านทานเอาต์พุตหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ΔV_{DS} คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เดรนและซอร์ส มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

ΔI_D คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสเดรน มีหน่วยเป็นแอมป์แปร์ (A)

และนอกจากนี้ยังสามารถหาค่าได้จาก Data Sheet ของดีฟิชั่นมอสเฟต โดยจะบอกเป็นค่าเอาต์พุตแอตมิตแตนซ์ (y_{os}) ซึ่งเป็นค่าความนำทางเอาต์พุต ชับสรีป o บอกว่าเป็นเอาต์พุตและชับสรีป s บอกว่าเป็นซาซอร์สในวงจรสมมูล หากต้องการรู้ค่าความต้านทานต้องใช้สมการดังนี้

$$r_d = \frac{1}{y_{os}} \quad \dots 7.45$$

เมื่อ r_d คือ ค่าความต้านทานเอาต์พุตหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

y_{os} คือ ค่าความต้านทานเอาต์พุตที่เป็นส่วนประกอบของแอตมิตแตนซ์จากค่าใน Data Sheet มีหน่วยเป็นซีเมนต์ (S)

7.8.2 องค์ประกอบการวิเคราะห์ทางไฟสลัวงจรสมมูลดีฟิชั่นมอสเฟต

7.8.2.1 อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) คือค่าความต้านทานทางด้านอินพุตมีค่าสูงมากจึงเปรียบเทียบกับ Open Circuit

$$Z_i = \infty \Omega$$

7.8.2.2 เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o) คือค่าความต้านทานทางด้านเอาต์พุตหาได้จากค่าแอตมิตแตนซ์ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

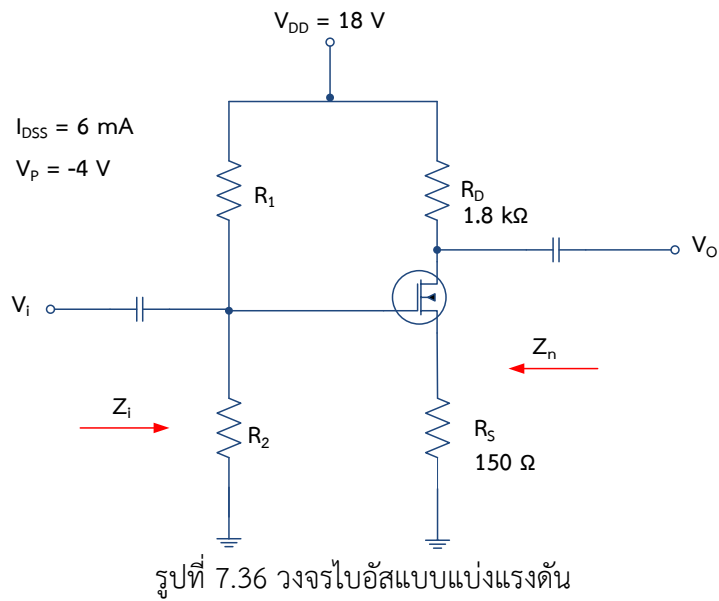
$$Z_o = r_d = \frac{1}{y_{os}}$$

ตัวอย่างที่ 7.5 จากวงจรในรูปที่ 7.36 กำหนดให้ $V_{GS}=0.5 \text{ V}$, $I_D=8 \text{ mA}$ จงคำนวณหาค่า

- (1) ค่าของ g_m เปรียบเทียบกับ g_{m0}
- (2) หาค่าของ r_d
- (3) เขียนวงจรสมมูลกระแสกลับ
- (4) ค่า Z_i
- (5) ค่า Z_o
- (6) ค่า A_v

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)



วิธีทำ (1) ค่าของ g_m ได้จากสมการที่ 7.41 และหาค่า g_{m0} ได้จากสมการที่ 7.42
จากสมการที่ 7.42 ค่า $V_{GS(off)} = V_p$ แทนค่าลงในสมการได้ดังนี้

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{|V_{GS(off)}|}$$

$$g_{m0} = \frac{2(6 \text{ mA})}{4 \text{ V}}$$

$$g_{m0} = 3 \text{ mS}$$

ตอบ

จากสมการที่ 7.41 หาค่า g_m ได้ดังนี้

$$g_m = g_{m0} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]$$

$$g_m = (3 \text{ mA}) \left[1 - \frac{0.5 \text{ V}}{-4 \text{ V}} \right]$$

$$g_m = (3 \text{ mA}) [1 + 0.875]$$

$$g_m = 5.62 \text{ mS}$$

ตอบ

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

(2) หาค่าความต้านทานทางด้านเอาต์พุต (r_d)

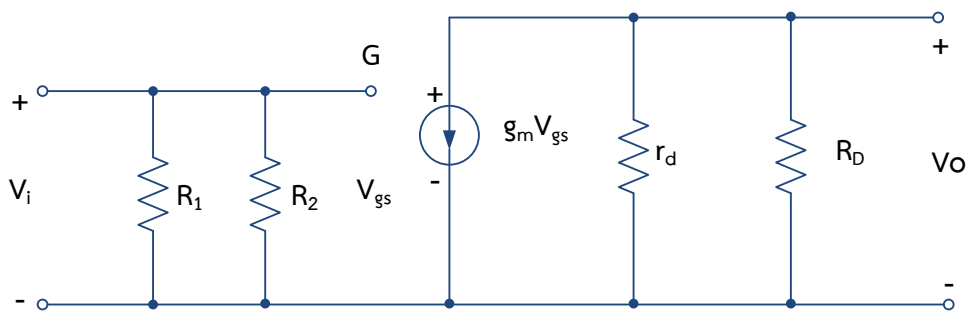
$$r_d = \frac{1}{y_{os}}$$

$$r_d = \frac{1}{10 \mu S}$$

$$r_d = 100 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

(3) เขียนวงจรสมมูลกระแสกลับ



รูปที่ 7.37 วงจรสมมูลกระแสกลับ

(4) หาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

$$Z_i = R_1 // R_2$$

$$Z_i = \frac{(110 \text{ M}\Omega)(10 \text{ M}\Omega)}{110 \text{ M}\Omega + 10 \text{ M}\Omega}$$

$$Z_i = 9.17 \text{ M}\Omega$$

ตอบ(5) หาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

$$Z_o = r_d // R_D$$

$$Z_o = \frac{(100 \text{ k}\Omega)(1.8 \text{ k}\Omega)}{100 \text{ k}\Omega + 1.8 \text{ k}\Omega}$$

$$Z_o = 1.77 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = 1.8 \text{ k}\Omega$$

ตอบ(6) ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)เนื่องจาก $r_d \geq 10R_D$, $100 \text{ k}\Omega \geq 10(1.8 \text{ k}\Omega)$

$$A_V \cong -g_m R_D$$

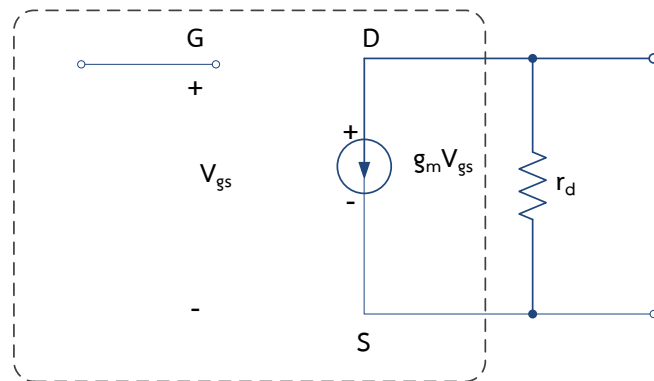
$$A_V \cong -(5.62 \text{ mS})(1.8 \text{ k}\Omega)$$

$$A_V \cong -10.16$$

ตอบ

7.9 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต

แบบจำลองวงจรสมมูลทางด้านไฟสลัของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตดังแสดงในรูปที่ 7.38



รูปที่ 7.38 วงจรสมมูลทางด้านไฟสลัของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต

ในการวิเคราะห์กระแสสลัของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต สมการการหาค่า g_m จะได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_D) และแรงดันใช้ควบคุม (V_{GS}) จากสมการ ดังนี้

$$I_D = K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

เนื่องจาก g_m จะถูกกำหนดโดย

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GSD}}$$

ซึ่งสามารถใช้อนุพันธ์ของสมการถ่ายโอน (Transfer Equation) เพื่อกำหนด g_m ที่จุดการทำงาน ดังนี้

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}}$$

$$g_m = \frac{d}{dV_{GS}} K(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

$$g_m = K \frac{d}{dV_{GS}} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_{GS(th)}) \frac{d}{dV_{GS}} (V_{GS} - V_{GS(th)})$$

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_{GS(th)})(1-0)$$

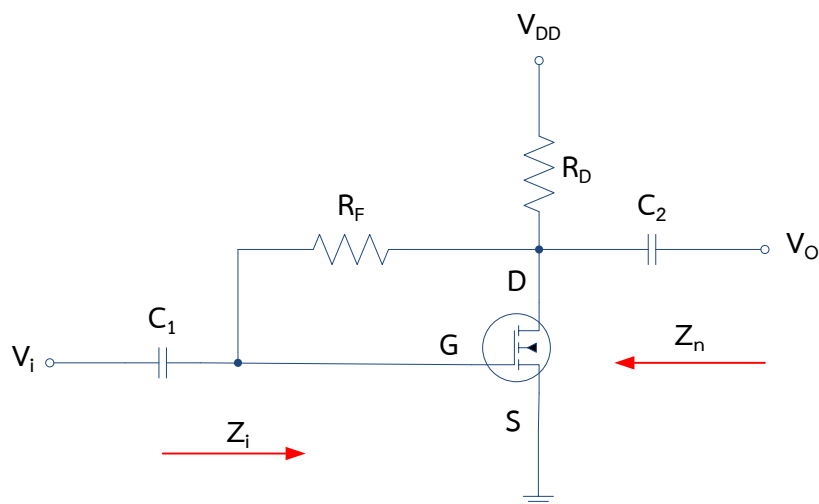
$$g_m = 2K(V_{GS} - V_{GS(th)})$$

...7.46

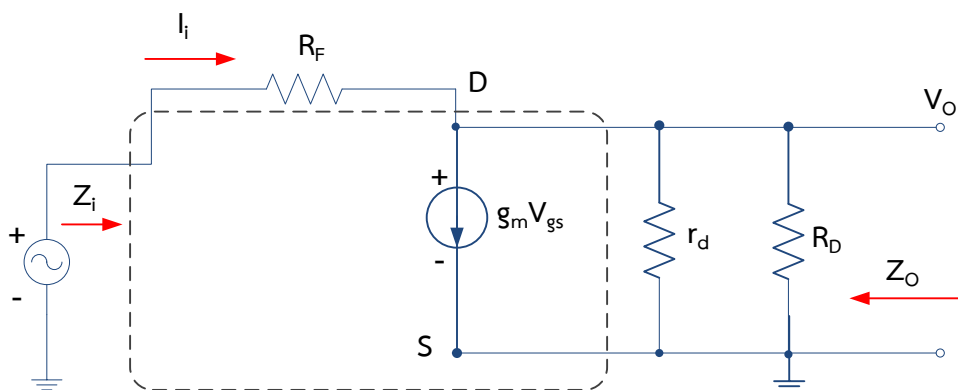
เมื่อ K เป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถกำหนดจากจุดการทำงานทั่ว ๆ ไป ซึ่งเป็นข้อมูลจาก Data Sheet ของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตเพื่อทำการวิเคราะห์ทางด้านกระแสสลับจะเป็นลักษณะเช่นเดียวกับ ดีฟิชั่นมอสเฟต

7.10 การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตแบบวงจรไบอัสป้อนกลับที่เดรน (Drain Feedback Bias)

จากวงจรในรูปที่ 7.39 เป็นวงจรไบอัสป้อนกลับที่เดรนของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต โดยที่อ้างอิงจากการวิเคราะห์กระแสตรง (DC) เมื่อ R_G จะถูกแทนที่ด้วยการลัดวงจร เนื่องจาก $I_G = 0$ A และ ดังนั้น $V_{RG} = 0$ V อย่างไรก็ตามในกรณีกระแสสลับ (AC) จะให้อินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i) สูง ที่สำคัญระหว่าง V_o และ V_i ขั้วต่ออินพุตและขั้วต่อเอาต์พุตจะถูกต่อเข้าด้วยกันโดยตรงและมีผลทำให้ $V_o = V_i$



รูปที่ 7.39 วงจรไบอัสป้อนกลับที่เดรนของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต



รูปที่ 7.40 วงจรสมมูลกระแสสลับของวงจรไบอัสป้อนกลับที่เดรนของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต

จากรูปที่ 7.40 เป็นวงจรสมมูลกระแสสลับของวงจรไบอัสป้อนกลับที่เดรนของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตจะเห็นว่า ที่ตัวต้านทาน R_F จะไม่ได้อยู่ในส่วนของกรอบสี่เหลี่ยม เพื่อกำหนดของเขตของวงจรสมมูลแต่จะถูกต่อโดยตรงระหว่างวงจรทางด้านอินพุตและเอาต์พุต

วงจรสมมูลกระแสสลับของวงจรไบอัสป้อนกลับที่เดรนของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต จากในรูปที่ 7.40 สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ Z_i , Z_o และ A_v ของวงจรได้ดังนี้

7.10.1 หาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์กับวงจรทางด้านเอาต์พุตที่ตำแหน่งโหนด D ในรูปที่ 7.40 จะได้

$$I_i = g_m V_{gs} + \frac{V_o}{r_d // R_D}$$

และ

$$V_{gs} = V_i$$

เพื่อให้

$$I_i = g_m V_i + \frac{V_o}{r_d // R_D}$$

$$I_i - g_m V_i = \frac{V_o}{r_d // R_D}$$

$$(I_i - g_m V_i)(r_d // R_D) = V_o$$

$$V_o = (I_i - g_m V_i)(r_d // R_D)$$

แต่

$$I_i = \frac{V_i - V_o}{R_F}$$

$$I_i = \frac{V_i - (I_i - g_m V_i)(r_d // R_D)}{R_F}$$

$$I_i R_F = V_i - (I_i - g_m V_i)(r_d // R_D)$$

$$I_i R_F = V_i - (r_d // R_D) I_i + (r_d // R_D) g_m V_i$$

$$I_i R_F + (r_d // R_D) I_i = V_i + (r_d // R_D) g_m V_i$$

$$I_i [R_F + (r_d // R_D)] = V_i [1 + (r_d // R_D) g_m]$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_F + (r_d // R_D)}{1 + (r_d // R_D) g_m}$$

...7.47

โดยทั่วไป $R_F \gg r_d // R_D$ จะได้

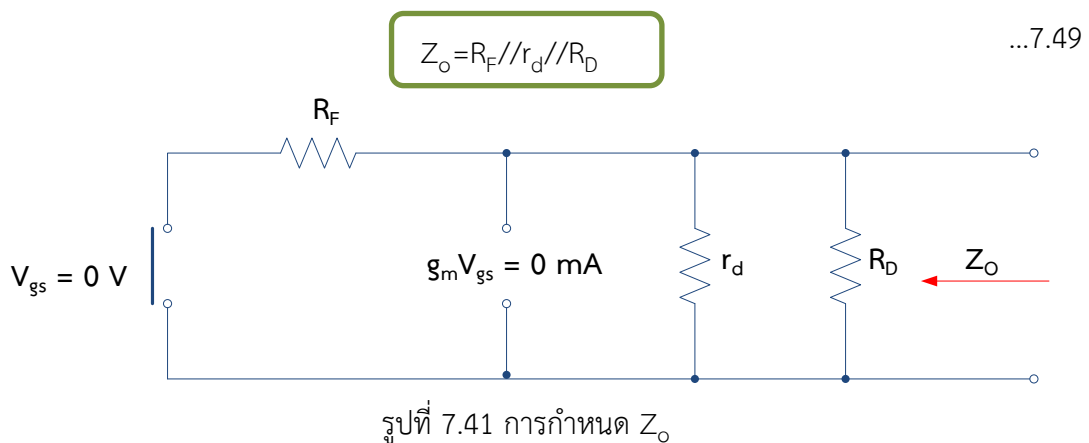
$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \cong \frac{R_F}{1 + (r_d // R_D) g_m}$$

สำหรับ $r_d \geq 10R_D$ จะได้

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} \cong \frac{R_F}{1 + g_m R_D} \quad \dots 7.48$$

7.10.2 หาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

เมื่อแทน $V_i = 0$ V ซึ่งจะทำให้ $V_{gs} = 0$ V และ $g_m V_{gs} = 0$ mА พร้อมกับการลัดวงจรจากขาเกต (G) ไปยังกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 7.41 โดย R_F , r_d และ R_D จะต่อขนานกัน



โดยทั่วไป R_F จะมีค่ามากกว่า $r_d // R_D$ นั่นคือ

$$Z_o \cong r_d // R_D$$

เมื่อ $r_d \geq 10R_D$ จะได้

$$Z_o \cong R_D \quad \dots 7.5$$

7.10.3 หาค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)

จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ที่ตำแหน่งโหนด D ในรูปที่ 7.40 จะได้ว่า

$$I_i = g_m V_{gs} + \frac{V_o}{r_d // R_D}$$

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

แต่

$$V_{gs} = V_i$$

และ

$$I_i = \frac{V_i - V_o}{R_F}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{V_i - V_o}{R_F} &= g_m V_i + \frac{V_o}{r_d // R_D} \\ \frac{V_i}{R_F} - \frac{V_o}{R_F} &= g_m V_i + \frac{V_o}{r_d // R_D} \\ \frac{V_o}{r_d // R_D} - \frac{V_o}{R_F} &= \frac{V_i}{R_F} - g_m V_i \\ V_o \left[\frac{1}{r_d // R_D} + \frac{1}{R_F} \right] &= V_i \left[\frac{1}{R_F} - g_m \right] \end{aligned}$$

และ

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\left[\frac{1}{R_F} - g_m \right]}{\left[\frac{1}{r_d // R_D} + \frac{1}{R_F} \right]}$$

แต่

$$\frac{1}{r_d // R_D} + \frac{1}{R_F} = \frac{1}{R_F // r_d // R_D}$$

และ

$$g_m \gg \frac{1}{R_F}$$

ดังนั้น

$$A_V = -g_m (R_F // r_d // R_D)$$

...7.51

เนื่องจากโดยทั่วไป $R_F \gg r_d // R_D$ และถ้า $r_d \geq 10R_D$ จะได้

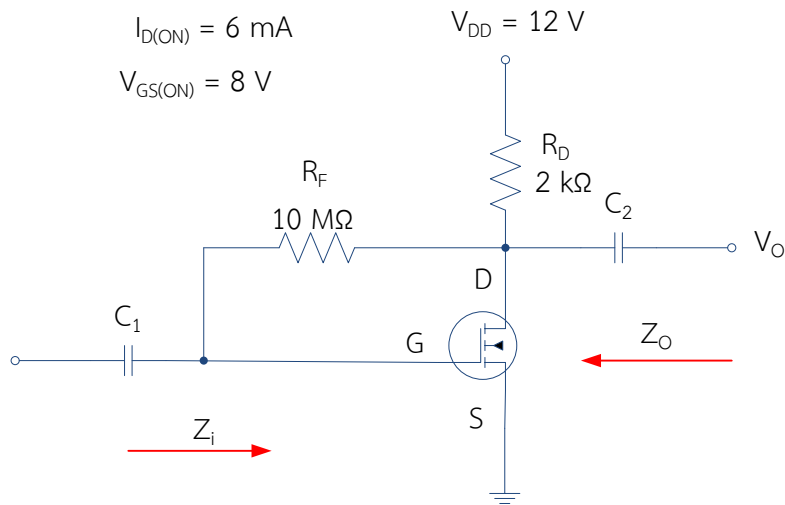
$$A_V \cong -g_m R_D$$

...7.52

ตัวอย่างที่ 7.6 จากวงจรในรูปที่ 7.42 กำหนดให้ $V_{GS}=5.4$ V, $I_D=2.5$ mA, $k=0.24 \times 10^{-3}$ A/V² กับ $I_{D(on)}=6$ mA จงคำนวณหาค่าต่าง ๆ ดังนี้

- (1) ค่าของ g_m
- (2) ค่าของ r_d
- (3) ค่าของอิมพีแดนซ์ (Z_i) ขณะที่มีและไม่มีผลกระทบ r_d
- (4) ค่าของอิมพีแดนซ์ (Z_o) ขณะที่มีและไม่มีผลกระทบ r_d

(5) ค่าของอัตราขยายแรงดัน (A_V) ขณะที่มีและไม่มีผลกระทบ r_d



รูปที่ 7.42 วงจรไบอัสย้อนกลับที่เดรนของเอนฮานซ์เม้นซ์มอสเฟต

วิธีทำ (1) ค่าของ g_m

$$g_m = 2K(V_{GS} - V_{GS(th)})$$

$$g_m = 2(0.24 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2)(5.4 \text{ V} - 3 \text{ V})$$

$$g_m = 1.15 \text{ mS}$$

ตอบ

(2) ค่าของ r_d

$$r_d = \frac{1}{y_{os}}$$

$$r_d = \frac{1}{20 \mu\text{S}}$$

$$r_d = 50 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

(3) ค่าของอิมพีแดนซ์ (Z_i) ขณะที่มีและไม่มีผลกระทบ r_d

ขณะที่มี r_d

$$Z_i = \frac{R_F + (r_d // R_D)}{1 + (r_d // R_D)g_m}$$

$$Z_i = \frac{10 \text{ M}\Omega + (50 \text{ k}\Omega // 2 \text{ k}\Omega)}{1 + (50 \text{ k}\Omega // 2 \text{ k}\Omega)(1.15 \text{ mS})}$$

$$Z_i = \frac{10 \text{ M}\Omega + (1.92 \text{ k}\Omega)}{2.21}$$

$$Z_i = 4.52 \text{ M}\Omega$$

ตอบ

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

ขณะไม่มีผลกระทบ r_d

$$Z_i \cong \frac{R_F}{1 + g_m R_D}$$

$$Z_i \cong \frac{10 \text{ M}\Omega}{1 + (1.15 \text{ mS})(2 \text{ k}\Omega)}$$

$$Z_i \cong 3.03 \text{ M}\Omega$$

ตอบ(4) ค่าของอิมพีแดนซ์ (Z_o) ขณะที่มีและไม่มีผลกระทบ r_d ขณะที่มี r_d

$$Z_o = R_F // r_d // R_D$$

$$Z_o = 10 \text{ M}\Omega // 50 \text{ k}\Omega // 2 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = 49.75 \text{ k}\Omega // 2 \text{ k}\Omega$$

$$Z_o = 1.92 \text{ k}\Omega$$

ตอบขณะไม่มีผลกระทบ r_d

$$Z_o \cong R_D$$

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

ตอบ(5) ค่าของอัตราขยายแรงดัน (A_v) ขณะที่มีและไม่มีผลกระทบ r_d ขณะที่มี r_d

$$A_v = -g_m (R_F // r_d // R_D)$$

$$A_v = - (1.15 \text{ mS}) (10 \text{ M}\Omega // 50 \text{ k}\Omega // 2 \text{ k}\Omega)$$

$$A_v = - (1.15 \text{ mS}) (1.92 \text{ k}\Omega)$$

$$A_v = -2.20$$

ตอบขณะไม่มีผลกระทบ r_d

$$A_v \cong -g_m R_D$$

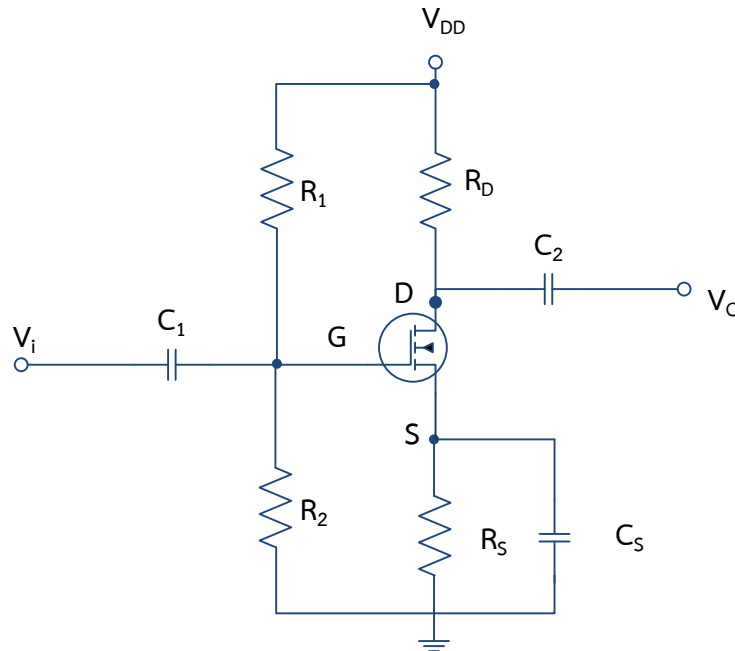
$$A_v \cong - (1.15 \text{ mS}) (2 \text{ k}\Omega)$$

$$A_v \cong -2.3$$

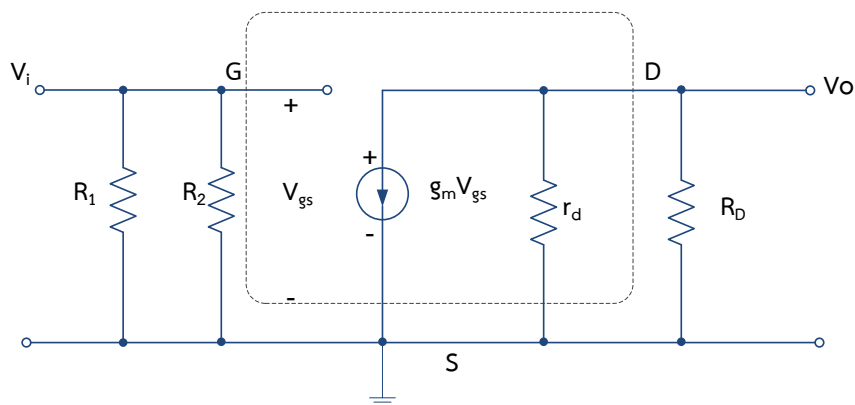
ตอบ

7.11 การวิเคราะห์ห้วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต แบบวงจรไบอัสแบ่งดัน

จากวงจรในรูปที่ 7.43 เป็นวงจรไบอัสแบ่งดันของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต



รูปที่ 7.43 วงจรไบอัสแบ่งดันของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต



รูปที่ 7.44 วงจรสมมูลกระแสสลับวงจรไบอัสแบ่งดันของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟต

จากวงจรสมมูลกระแสสลับของวงจรไบอัสแบ่งดันของเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตในรูปที่ 7.44 สามารถวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ Z_i , Z_o และ A_v ของวงจรได้ดังนี้

7.11.1 หาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)

$$Z_i = R_1 // R_2 \quad \dots 7.53$$

7.11.2 หาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)

$$Z_o = r_d // R_D \quad \dots 7.54$$

สำหรับ $r_d \geq 10R_D$ จะได้

$$Z_o \cong R_D \quad \dots 7.55$$

7.11.3 หาค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -g_m (r_d // R_D) \quad \dots 7.56$$

สำหรับ $r_d \geq 10R_D$ จะได้

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -g_m R_D \quad \dots 7.57$$

7.12 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต

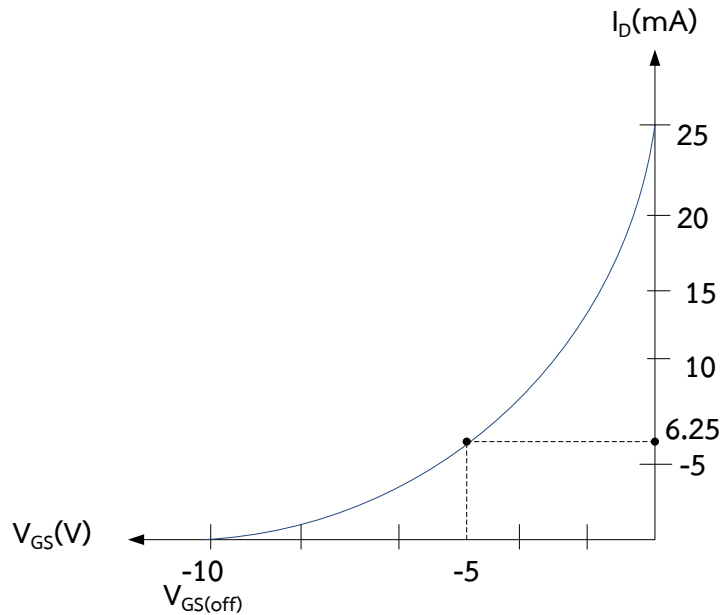
ในการออกแบบการให้ไบอัสเจฟตนั้น จะต้องนำกราฟคุณสมบัติของเฟตเบอร์ที่ต้องการออกแบบมาช่วยในการวิเคราะห์ปรับจุดการทำงานของเจฟตในวงจรไบอัสตนเอง การหาค่าจุดทำงาน (Q-Point) ของเจฟตคือ การหาค่ากระแสเดรน (I_D) และค่าแรงดันเกต (V_{GS})

สามารถกำหนดค่าความต้านทานที่รอยต่อระหว่างขาซอร์สกับกราวด์ (R_S) ได้ดังนี้

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right| \quad \dots 7.58$$

ค่าแรงดัน V_{GS} และค่ากระแส I_D สามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ การหากราฟคุณลักษณะการถ่ายโอน (Transfer Characteristic Curve) ของเจฟตหรือหาได้ โดยใช้ค่า I_{DSS} และ $V_{GS(off)}$ ซึ่งเป็นค่าจากคู่มือการใช้งานของเฟต

ตัวอย่างที่ 7.7 จากรูปที่ 7.45 เป็นกราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนของเจฟेट N-Channel J-FET เบอร์หนึ่ง จงคำนวณหาค่า R_S ของวงจรไบอัสตัวเอง (Self Bias)



รูปที่ 7.45 กราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนของเจฟेट N - Channel

วิธีทำ จากกราฟในรูปที่ 7.45 จะได้อ่านค่า $I_D = 6.25$ mA เมื่อ $V_{GS} = -5$ V หาค่า R_S ได้จากสมการที่ 7.58

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right|$$

$$R_S = \left| \frac{-5 \text{ V}}{6.25 \text{ mA}} \right|$$

$$R_S = |-800|$$

$$R_S = 800 \text{ } \Omega$$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 7.8 วงจรไบอัสเจฟेट P - Channel J-FET แบบไบอัสตนเอง (Self Bias) ที่ $I_{DSS} = 20$ mA และ $V_{GS(off)} = 12$ V ที่แรงดัน $V_{GS} = 4$ V จงคำนวณหาค่า R_S ของวงจร

วิธีทำ จากสมการ

$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2$$

$$I_D = (20 \text{ mA}) \left[1 - \frac{4 \text{ V}}{12 \text{ V}} \right]^2$$

$$I_D = (20 \text{ mA}) [1 - 0.333]^2$$

$$I_D = 8.88 \text{ mA}$$

หาค่า R_S ได้จากสมการ

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right|$$

$$R_S = \left| \frac{4 \text{ V}}{8.88 \text{ mA}} \right|$$

$$R_S = |450|$$

$$R_S = 450 \text{ } \Omega$$

ตอบ

การไบอัสที่จุดกึ่งกลาง (Midpoint Bias) การไบอัสเจฟต์ให้จุดการทำงานอยู่ที่กึ่งกลางของกราฟคุณลักษณะการถ่ายโอนนั้น จะเป็นผลให้ $I_D = I_{DSS}/2$ เมื่อ $V_{GS} = V_{GS(off)}/3.414$ กรณีนี้การแกว่งของกระแสเดรนจะสามารถทำได้ที่สูงสุดจากค่า I_{DSS} จนถึง 0 mA ดังนี้

$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2$$

$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS(off)}/3.414}{V_{GS(off)}} \right]^2$$

$$I_D = I_{DSS} [1 - 0.2929]^2$$

$$I_D = I_{DSS} (0.707)^2$$

$$I_D \approx 0.5 I_{DSS}$$

เมื่อกำหนดให้ $V_{GS} = V_{GS(off)}/3.414$ จะเป็นผลให้จุดการทำงานของเจฟต์อยู่ที่กึ่งกลางของกราฟคุณสมบัติการถ่ายโอน

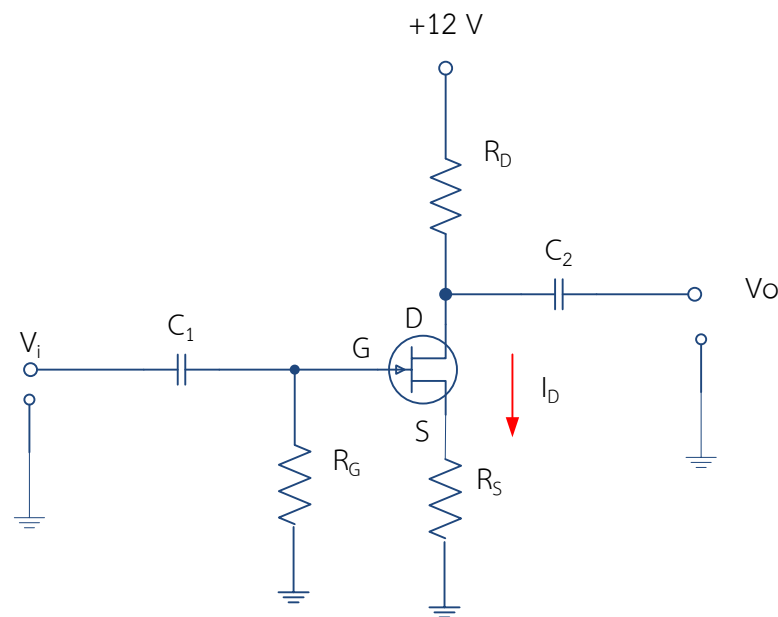
ดังนั้น

$$V_D = \frac{V_{DD}}{2}$$

เป็น V_D ที่จุดการทำงานที่กึ่งกลาง

ตัวอย่างที่ 7.9 จากวงจรดังรูปที่ 7.46 กำหนดจุดการทำงานของเจฟตอยู่ที่กึ่งกลาง โดยเจฟตมีค่า $I_{DSS}=20\text{ mA}$, $V_{GS}=V_{GS(off)}=-6\text{ V}$ เลือกค่า $V_D=3\text{V}$ จงหาค่าตัวต้านทานที่ไม่ทราบค่าในวงจรดังนี้

- (1) I_D
- (2) V_{GS}
- (3) R_S
- (4) R_D
- (5) R_G



รูปที่ 7.46 วงจรไบอัสเจฟตแบบ Self Bias

วิธีทำ ที่จุดกึ่งกลาง

$$I_D \approx 0.5 I_{DSS}$$

$$I_D \approx 0.5 (20\text{ mA})$$

$$I_D \approx 10\text{ mA}$$

ตอบ

$$V_{GS} = \frac{V_{GS(off)}}{3.414}$$

$$V_{GS} = \frac{-6\text{ V}}{3.414}$$

$$V_{GS} = -1.757$$

ตอบ

หาค่า R_S ได้ดังนี้

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right|$$

$$R_S = \left| \frac{-1.757 \text{ V}}{10 \text{ mA}} \right|$$

$$R_S = 175 \text{ } \Omega \text{ (180 } \Omega \text{)}$$

ตอบ

หาค่า R_D ได้ดังนี้

จากสมการ

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

สามารถหา R_D ได้ดังนี้

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D}$$

$$R_D = \frac{12 \text{ V} - 4 \text{ V}}{10 \text{ mA}}$$

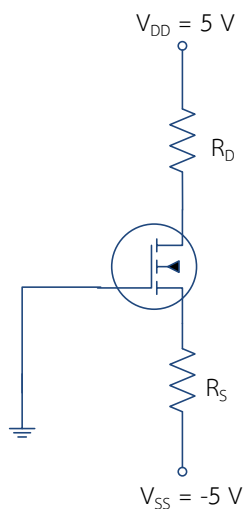
$$R_D = 800 \text{ } \Omega \text{ (820 } \Omega \text{)}$$

ตอบ

การเลือกค่า R_G ควรเลือกให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าความต้านทานอินพุตของเจเฟต (ซึ่งมีค่าเป็น $M\Omega$) เนื่องจาก R_G จะขนานกับความต้านทานทางอินพุตของเจเฟต

ตอบ

ตัวอย่างที่ 7.10 จากวงจรในรูปที่ 7.47 กำหนดค่าดังนี้ $V_{GS(th)} = 3 \text{ V}$, $I_D = 1.5 \text{ mA}$, $V_{DS} = 4.5 \text{ V}$ และ $K = 0.1 \text{ mA/V}^2$ จงคำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_D และ R_S



รูปที่ 7.47 วงจรการไบอัสดีมอสเฟต

วิธีทำ เนื่องจากทราบค่า K ของดีมอสเฟตทำการย้ายข้างสมการเพื่อหาค่า V_{GS} ได้ดังนี้

$$I_D = K[V_{GS} - V_{GS(th)}]^2$$

$$V_{GS} = \sqrt{\frac{I_D}{K}} + V_{GS(th)}$$

$$V_{GS} = \sqrt{\frac{1.5 \text{ mA}}{0.1 \text{ mA/V}^2}} + 3 \text{ V}$$

$$V_{GS} = 4.24 \text{ V}$$

เมื่อได้ค่า $V_{GS} = 4.24 \text{ V}$ จากวงจรจะเห็นว่าที่ขาเกตมีแรงดัน $V_G = 0 \text{ V}$ ดังนั้นแรงดันที่ขาซอร์ส V_S จะมีค่าเท่ากับ -4.24 V

และจาก

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

ดังนั้น

$$V_D = V_{DS} + V_S$$

$$V_D = 4.5 \text{ V} + (-4.24 \text{ V})$$

$$V_D = -0.26 \text{ V}$$

จากนั้นหาค่าตัวต้านทาน R_D

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_D}{I_D}$$

$$R_D = \frac{5 \text{ V} - (-0.24 \text{ V})}{1.5 \text{ mA}}$$

$$R_D = 3.49 \text{ k}\Omega$$

ตอบ

และหาค่าตัวต้านทาน R_S

$$R_S = \frac{V_S - V_{SS}}{I_D}$$

$$R_S = \frac{(-4.24 \text{ V}) - (-5 \text{ V})}{1.5 \text{ mA}}$$

$$R_S = 506.6 \text{ }\Omega$$

ตอบ



ข้อดีของวงจรขยายสัญญาณด้วยเฟต คือ

1. เนื่องจาก input Diode (PN Junction) อยู่ในสถานะ Reverse Bias ทำให้กระแส input มีค่าใกล้เคียงศูนย์ Z_{in} ของวงจรสามารถทำให้มีค่าสูง ๆ ได้ (เป็น $M\Omega$) ยกเว้นวงจร Common Gate
2. ใช้เป็น Low noise Amplifier ได้ดีเนื่องจากกระแส input มีค่าน้อยมากทำให้ไม่มี shot noise เกิดขึ้นในวงจร input
3. การไหลของ I_D เกิดขึ้นเนื่องจากสนามไฟฟ้า จึงเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าการไหลของ I_C ซึ่งเกิดจากการ Diffuse ข้าม Junction FET จึงสามารถไปใช้งานกับความถี่สูงได้

ข้อเสียของวงจรขยายสัญญาณด้วยเฟต คือ มี อัตราขยายแรงดันต่ำ

มอสเฟต คืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ถูกนำไปต่อเป็นวงจรขยายสัญญาณ และวงจรสวิตช์ อิเล็กทรอนิกส์ กระแสที่ไหลผ่านตัวมอสเฟตจะถูกควบคุมด้วยแรงดัน V_{GS} วงจรขยายด้วยมอสเฟตมีจำนวน 3 วงจร ได้แก่ วงจรขยายคอมมอนซอส วงจรขยายคอมมอนเกต และวงจรขยายคอมมอนเดรน อัตราขยายของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่า g_m ของมอสเฟต และค่า R_D การประยุกต์ใช้มอสเฟตเป็นสวิตช์ อิเล็กทรอนิกส์จะถูก นำไปใช้ในวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์ชิ่ง และวงจรอินเวอร์เตอร์

แบบฝึกหัด

แบบฝึกหัดหน่วยที่ 7 การวิเคราะห์การทำงาน และการออกแบบวงจรขยาย
สัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต (FET Small Signal Analysis And Design Circuit)

คำสั่ง จงตอบคำถามให้สมบูรณ์และถูกต้อง ใช้เวลาทำแบบฝึกหัด 20 นาที (คะแนนเต็ม 10 คะแนน)

1. จงคำนวณหาค่า g_{m0} ของ J-FET ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $I_{DSS}=12\text{ mA}$ และ $V_P=-4\text{ V}$

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. จงคำนวณหาค่าของ I_{DSS} ถ้า $V_P=-2.5\text{ V}$ โดย J-FET ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $g_m=6\text{ mS}$ ที่ $V_{GSQ} = -1\text{ V}$

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. จงคำนวณหาค่า g_m เมื่อ $I_{DSS}=8\text{ mA}$ และ $V_P=-5\text{ V}$ และ $V_{GSQ} = \frac{V_P}{4}$

.....

.....

.....

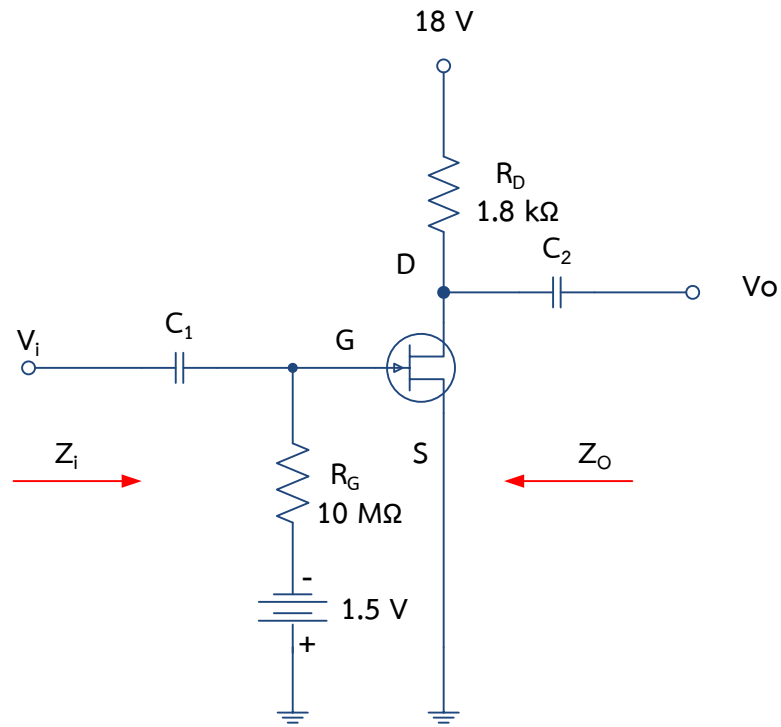
.....

.....

.....

4. จากรูปที่ 1 ถ้ากำหนดให้ $I_{DSS}=10\text{ mA}$ และ $V_p=-6\text{ V}$ และ $r_d=40\text{ k}\Omega$ จงคำนวณหาค่าดังต่อไปนี้

- (1) ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)
- (2) ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)
- (3) ค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)



รูปที่ 1 วงจรขยายสัญญาณเจเฟตแบบ Fixed Bias

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

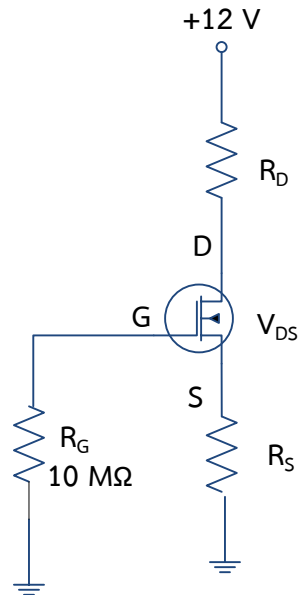
.....

.....

.....

.....

6. จากรูปที่ 3 วงจรไบอัสดีฟฟิชั่นมอสเฟตแบบ Zero Biasing กำหนดค่าดังนี้ $V_{GS(off)} = -6 \text{ V}$ และ $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$ จงคำนวณหาค่าแรงดันระหว่างขาเดรนและซอร์ส



รูปที่ 3 วงจรไบอัสดีพลีชั้นมอสเฟตแบบ Zero Biasing

[illegible]

เอกสารประกอบการเรียน

วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (รหัสวิชา 3105-1003)

แบบทดสอบหลังเรียน

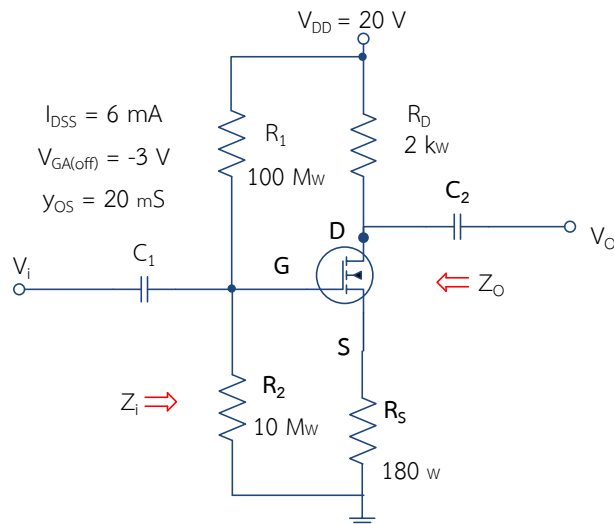
หน่วยที่ 7 การวิเคราะห์การทำงาน และการออกแบบวงจรขยาย

สัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต (FET Small Signal Analysis And Design Circuit)

คำชี้แจง

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

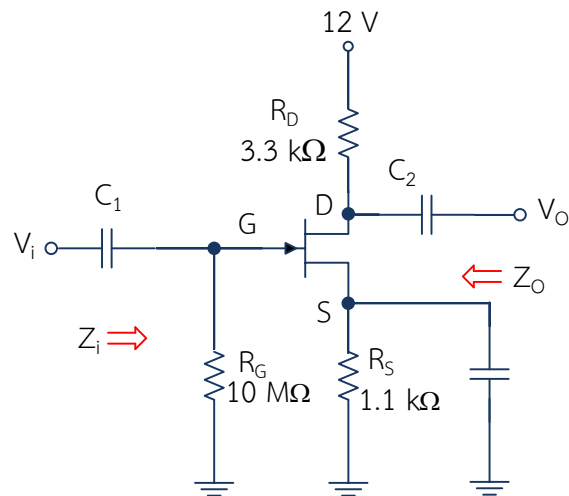
1. ข้อใดคือค่า g_m เมื่อ $I_{DSS} = 8 \text{ mA}$, $V_P = -5 \text{ V}$ และ $V_{GSQ} = \frac{V_P}{4}$
 - ก. 2.4 mS
 - ข. 2.6 mS
 - ค. 2.8 mS
 - ง. 3.2 mS
 - จ. 3.8 mS
2. จากวงจรในรูปที่ 2 กำหนดให้ $V_{GS} = 0.5 \text{ V}$, $I_D = 6 \text{ mA}$ จงคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์



รูปที่ 1 วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กของดีฟิชั่นมอสเฟต ประกอบโจทย์ข้อที่ 2

- ก. $8.11 \text{ M}\Omega$
- ข. $9.09 \text{ M}\Omega$
- ค. $10 \text{ M}\Omega$
- ง. $11 \text{ M}\Omega$
- จ. $12 \text{ M}\Omega$

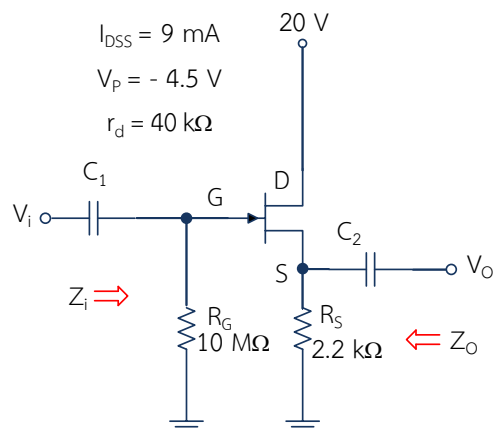
3. จากรูปที่ 3 ข้อใดคือค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Z_i)



รูปที่ 2 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 3

- ก. $3 \text{ M}\Omega$
- ข. $5 \text{ M}\Omega$
- ค. $10 \text{ M}\Omega$
- ง. $15 \text{ M}\Omega$
- จ. $18 \text{ M}\Omega$

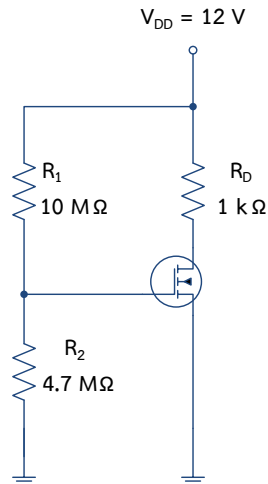
4. จากรูปที่ 3 ข้อใดคือค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_o)



รูปที่ 3 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 4

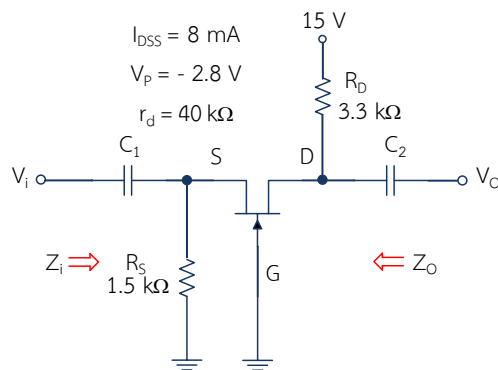
- ก. 326Ω
- ข. 341Ω
- ค. 353Ω
- ง. 393Ω
- จ. 412Ω

5. จากวงจรในรูปที่ 4 กำหนดค่าดังนี้ $I_{D(on)} = 3 \text{ mA}$ ที่ $V_{GS} = 6 \text{ V}$ และ $V_{GS(th)} = 2 \text{ V}$ จงคำนวณหาว่า V_{GS} มีค่าตรงกับข้อใด



รูปที่ 4 วงจรไบอัสเอนฮานซ์เมนต์มอสเฟตแบบแบ่งแรงดัน ประกอบโจทย์ข้อที่ 5

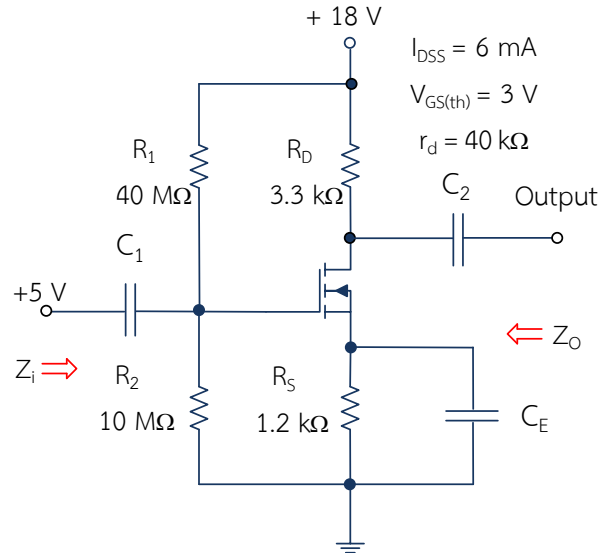
- ก. 2.25 V
 ข. 3.84 V
 ค. 4.91 V
 ง. 5.28 V
 จ. 6.51 V
6. จากรูปที่ 5 ข้อใดคือค่าอัตราขยายแรงดัน (A_v)



รูปที่ 5 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 6

- ก. 5.66
 ข. 5.71
 ค. 6.02
 ง. 6.73
 จ. 7.41

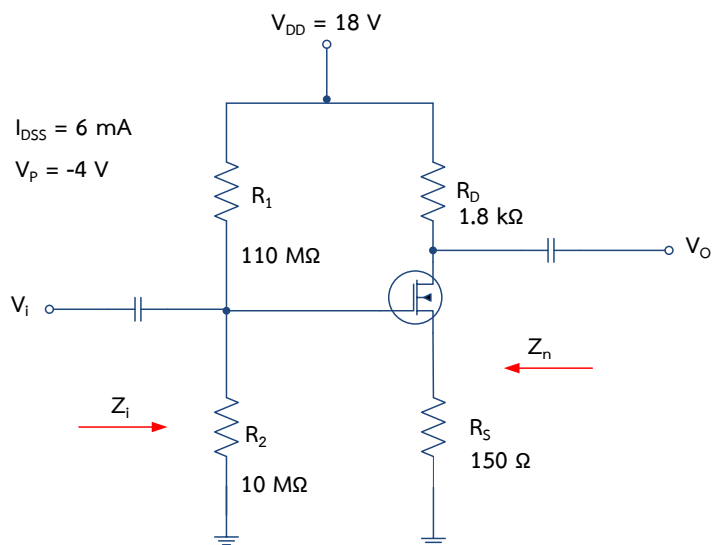
7. จากรูปที่ 6 กำหนดให้ $V_{GS} = 4.66 \text{ V}$, $I_{DQ} = 3 \text{ mA}$, $k = 0.4 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$ และมีสัญญาณที่ใช้ $V_i = 0.8 \text{ mV}$ จงคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีค่าเท่ากับข้อใด



รูปที่ 6 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 7

- ก. - 2.67 V
- ข. - 2.99 V
- ค. - 3.12 V
- ง. - 3.51 V
- จ. - 4.08 V

ใช้รูปที่ 7 ตอบคำถามข้อที่ 8-9



รูปที่ 7 ประกอบโจทย์ข้อ 8 - 9

8. จากรูปที่ 7 จงคำนวณหาค่า g_{m0} มีค่าตรงกับข้อใด

ก. 3 mS

ข. 4 mS

ค. 4.62 mS

ง. 5 mS

จ. 5.62 mS

9. จากรูปที่ 7 จงคำนวณหาค่า Z_i มีค่าตรงกับข้อใด

ก. 8 M Ω

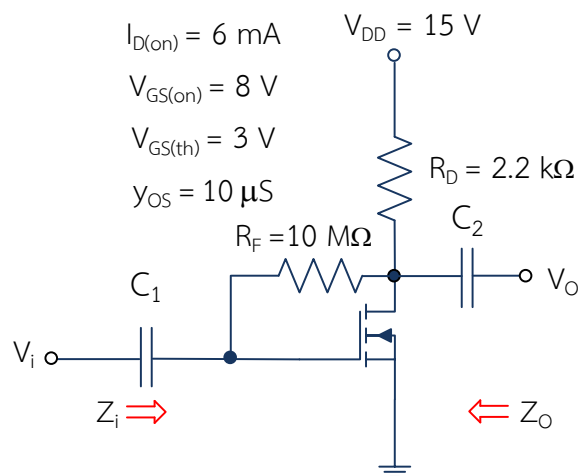
ข. 8.17 M Ω

ค. 9 M Ω

ง. 9.17 M Ω

จ. 10 M Ω

10. จากวงจรกำหนดให้ $V_{GS} = 6$ V, $I_D = 3$ mA, $k = 0.3 \times 10^{-3}$ A/V² จงคำนวณหาค่าของเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Z_O) ขณะที่ไม่มีผลกระทบ r_d ตรงกับข้อใด



รูปที่ 8 วงจรประกอบโจทย์ข้อที่ 10

ก. 2.2 k Ω

ข. 19 k Ω

ค. 22 k Ω

ง. 1 M Ω

จ. 10 M Ω

บรรณานุกรม

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

	ใบงานที่ 7.1	หน่วยที่ 7
	รหัสวิชา 3105-1003 วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์	สอนครั้งที่ 1
	ชื่อหน่วย การวิเคราะห์การทำงานและการออกแบบวงจรขยาย สัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต (FET Small Signal Analysis And Design Circuit)	คาบรวม 10
ชื่อเรื่อง	วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเจเฟต	จำนวนคาบ 3

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. ต่วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยเจเฟตเพื่อทดลองตามใบงานได้อย่างถูกต้อง
2. วัด อ่านค่า แรงดันและกระแสในวงจรตามที่ใบงานกำหนดได้อย่างถูกต้อง
3. คำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรขยายสัญญาณด้วยเจเฟตได้อย่างถูกต้อง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (จิตพิสัย) ที่มีการบูรณาการตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

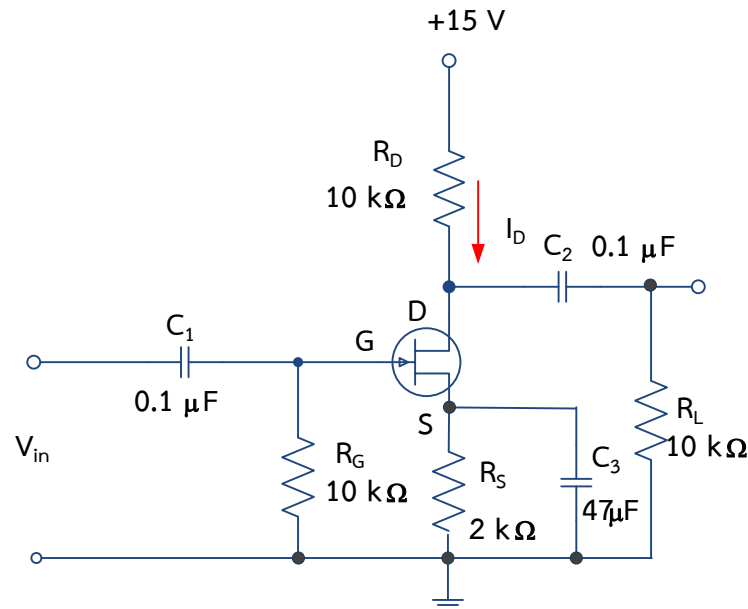
1. ความรับผิดชอบ
2. ความมีวินัย
3. การตรงต่อเวลา
4. ความมีมนุษยสัมพันธ์
5. ความรู้และทักษะวิชาชีพ
6. ความสนใจใฝ่หาความรู้
7. การพึ่งตัวเอง
8. มีความเพียร
9. รู้รักสามัคคี
10. การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า

เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | |
|--|---------------|
| 1. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์หรือแอนะล็อกมัลติมิเตอร์ | 2 เครื่อง |
| 2. แหล่งจ่ายไฟตรงแบบปรับค่าได้ 0-30 V 3 A | 1 เครื่อง |
| 3. ออสซิลอสโคป | 1 เครื่อง |
| 4. ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 5. ตัวต้านทานคงที่ 10 k Ω , 2 k Ω , 50 k Ω และ 100 k Ω ; 0.5 W อย่างละ | 1 ตัว |
| 6. ตัวเก็บประจุ 0.1 μ F, 1 μ F , 47 μ F 16V | อย่างละ 1 ตัว |
| 7. เจเฟตเบอร์ BF 245 | 1 ตัว |
| 8. แผงประกอบวงจรและสายต่อวงจร | 1 ชุด |

ลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติใบงาน

1. ต่อยังวงจรดังรูปที่ 7.1.1 ยังไม่ต้องป้อนอินพุต
2. วัดค่ากระแส $I_D =$ _____ และแรงดันไบอัส $V_{GS} =$ _____

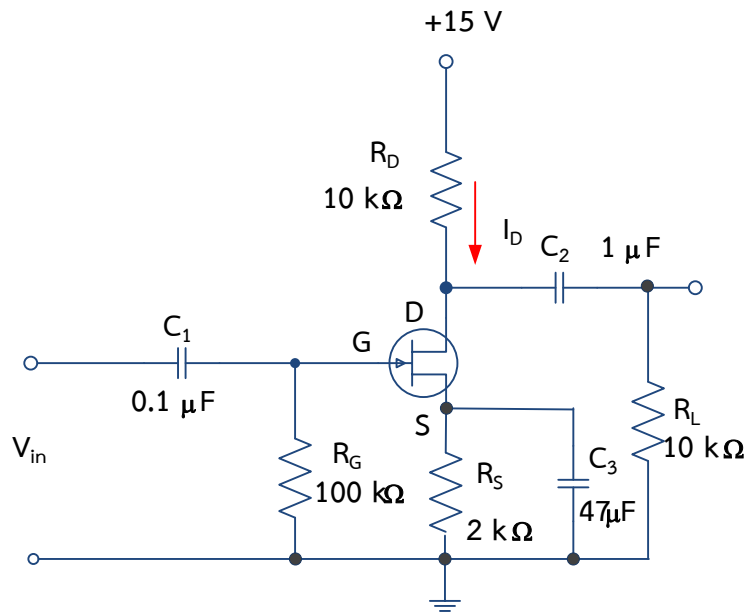


รูปที่ 7.1.1 แสดงการต่อวงจรข้อ 1

3. ป้อนอินพุตให้กับวงจรความถี่ sine 1kHz โดยปรับให้มีขนาดสูงที่สุดและเอาต์พุตยังเป็นรูป sine ทำการวัดค่า $V_{in} =$ _____ , $V_{out} =$ _____ , $A_V =$ _____
 4. คำนวณค่า $A_V =$ _____ , $Z_{in} =$ _____ , $Z_{out} =$ _____ ของวงจรในรูป
 5. เปลี่ยนค่า R_G ตามตารางที่ 7.1.1 ทำการวัดค่า และบันทึกผลตามตาราง
- ตารางที่ 7.1.1 บันทึกผลการทดลองข้อ 5

R_G	10 kΩ	20 kΩ	500 kΩ
Z_{in} (วัด)			
Z_{in} (คำนวณ)			
A_V (วัด)			
A_V (คำนวณ)			

6. ต่อดังต่อไปนี้ตามรูปที่ 7.1.2



7.

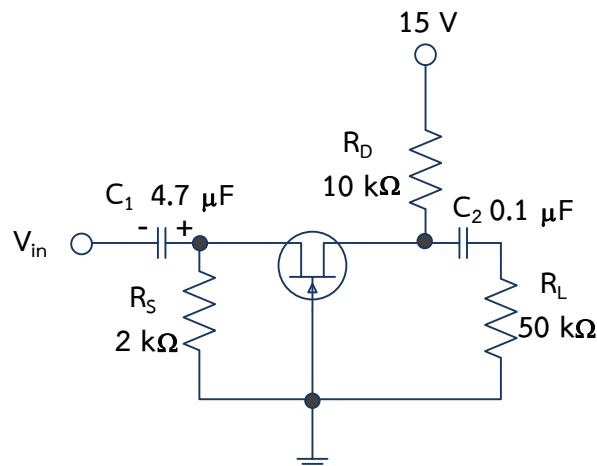
รูปที่ 7.1.2 แสดงการต่อวงจรข้อ 6

8. ทำซ้ำตามขั้นตอนในข้อที่ 3 – 4 บันทึกผล

$V_{in} =$ _____ , $V_{out} =$ _____ , $A_v =$ _____ ผลการวัด

$A_v =$ _____ , $Z_{in} =$ _____ , $Z_{out} =$ _____ ผลการคำนวณ

8. ต่อดังต่อไปนี้ตามรูปที่



รูปที่ 7.1.2 แสดงการต่อวงจรข้อ 8

9. ทำซ้ำตามขั้นตอนในข้อที่ 3 – 4 บันทึกผล

$V_{in} =$ _____ , $V_{out} =$ _____ , $A_v =$ _____ ผลการวัด

$A_v =$ _____ , $Z_{in} =$ _____ , $Z_{out} =$ _____ ผลการคำนวณ

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามการทดลอง

1. ค่าอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณด้วยเจฟตขึ้นอยู่กับอะไร

.....

.....

.....

.....

2. ค่าความต้านทาน Z_{in} ของวงจรขยายสัญญาณด้วยเจฟตขึ้นอยู่กับอะไร

.....

.....

.....

.....

3. ค่าความต้านทาน Z_{out} ของวงจรขยายสัญญาณด้วยเจฟตขึ้นอยู่กับอะไร

.....

.....

.....

.....

	ใบงานที่ 7.2	หน่วยที่ 7
	รหัสวิชา 3105-1003 วิชา การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์	สอนครั้งที่ 2
	ชื่อหน่วย การวิเคราะห์การทำงานและการออกแบบวงจรขยาย สัญญาณขนาดเล็กด้วยเฟต (FET Small Signal Analysis And Design Circuit)	คาบรวม 10
ชื่อเรื่อง	วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยมอสเฟต	จำนวนคาบ 3

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. ต่วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กด้วยมอสเฟตเพื่อทดลองตามใบงานได้อย่างถูกต้อง
2. วัด อ่านค่า แรงดันและกระแสในวงจรตามที่ใบงานกำหนดได้อย่างถูกต้อง
3. คำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรขยายสัญญาณด้วยมอสเฟตได้อย่างถูกต้อง

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม (จิตพิสัย) ที่มีการบูรณาการตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียง

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

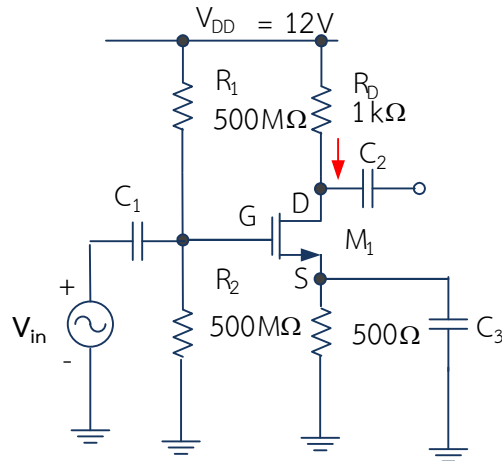
เครื่องมือและอุปกรณ์

- | | |
|---|---------------|
| 1. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์หรือแอนะล็อกมัลติมิเตอร์ | 2 เครื่อง |
| 2. แหล่งจ่ายไฟตรงแบบปรับค่าได้ 0-30 V 3 A | 1 เครื่อง |
| 3. ออสซิลอสโคป | 1 เครื่อง |
| 4. ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ | 1 เครื่อง |
| 5. ตัวต้านทานค่าคงที่ R_1, R_2 500 $M\Omega$, R_D, R_L 1 $k\Omega$
และ R_S 500 Ω 0.5 W | อย่างละ 1 ตัว |
| 6. ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 0.1 μF , C_3 47 μF 16V | อย่างละ 1 ตัว |
| 7. มอสเฟตเบอร์ IRFZ 44N | 1 ตัว |
| 8. แผงประกอบวงจรและสายต่อวงจร | 1 ชุด |

ลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติใบงาน

1. ให้ต่อวงจรขยายแบบคอมมอนซอสตาม รูปที่ 7.2.1 และวัดกระแส I_D และแรงดัน V_{DS}

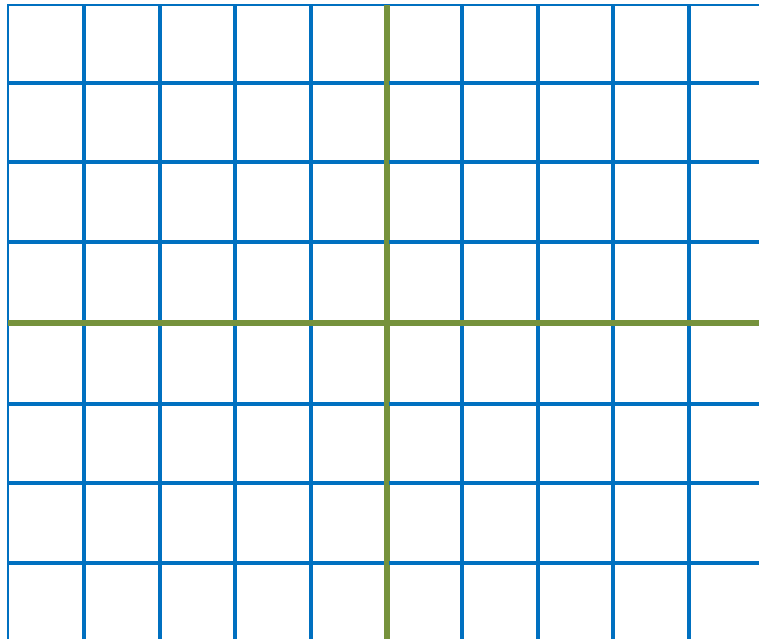
$$I_D = \dots\dots\dots V_{DS} = \dots\dots\dots$$



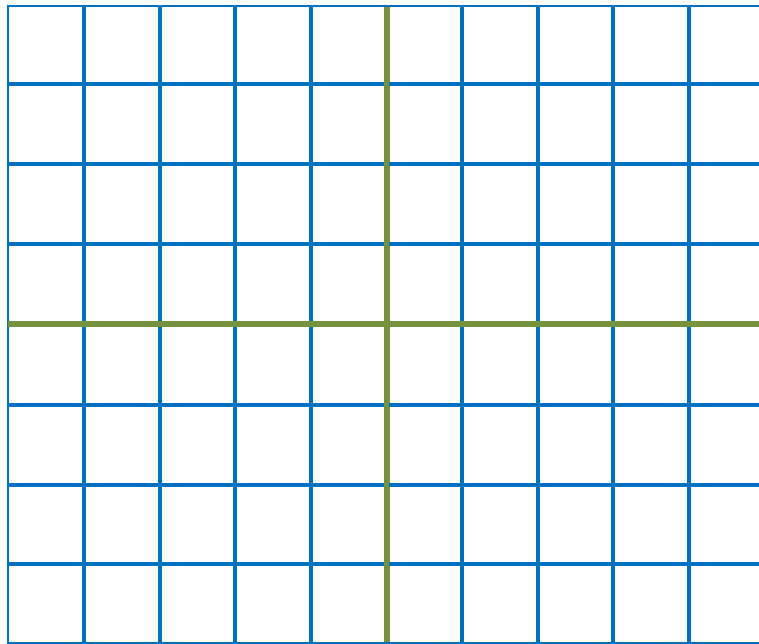
รูปที่ 7.2.1 แสดงการต่อวงจรข้อ 1

2. ป้อนสัญญาณขนาด 100 mVp มีความถี่ 1 kHz วัด และวาดภาพสัญญาณอินพุตลงในรูป รูปที่ 7.2.2 เทียบกับผลการทดลองทางด้านเอาต์พุตรูปที่ 7.2.3 พร้อมทั้งระบุค่าต่าง ๆ ให้ชัดเจน

$$V_{in} = \dots\dots\dots V_{out} = \dots\dots\dots I_L = \dots\dots\dots$$



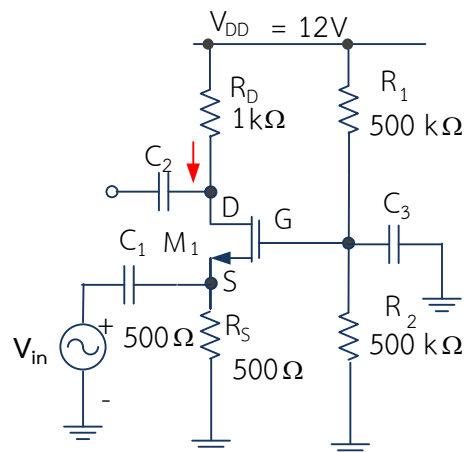
รูปที่ 7.2.2 สัญญาณอินพุตที่วัดได้ข้อ 2



รูปที่ 7.2.3 สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ข้อ 2

3. ให้คำนวณหาค่าความต้านทานด้านอินพุต (Z_{in}) และเอาต์พุต (Z_{out}) อัตราการขยายแรงดัน (A_v) อัตราการขยายกระแส (A_i) และอัตราการขยายกำลัง (A_p) เมื่อต่อความต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ ที่เอาต์พุต
4. ให้ต่อวงจรขยายแบบคอมมอนเกตตาม รูปที่ 7.2.4 และวัดกระแส I_D และแรงดัน V_{DS}

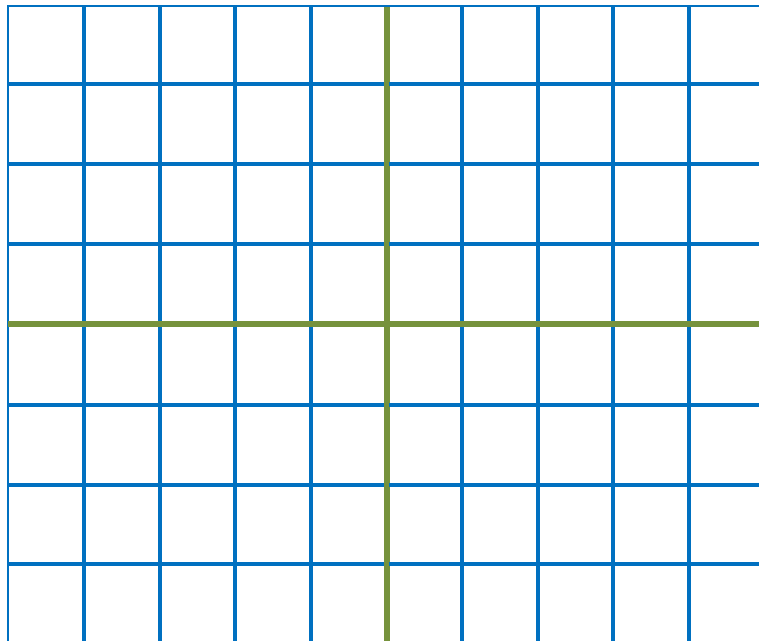
$I_D = \dots\dots\dots$ $V_{DS} = \dots\dots\dots$



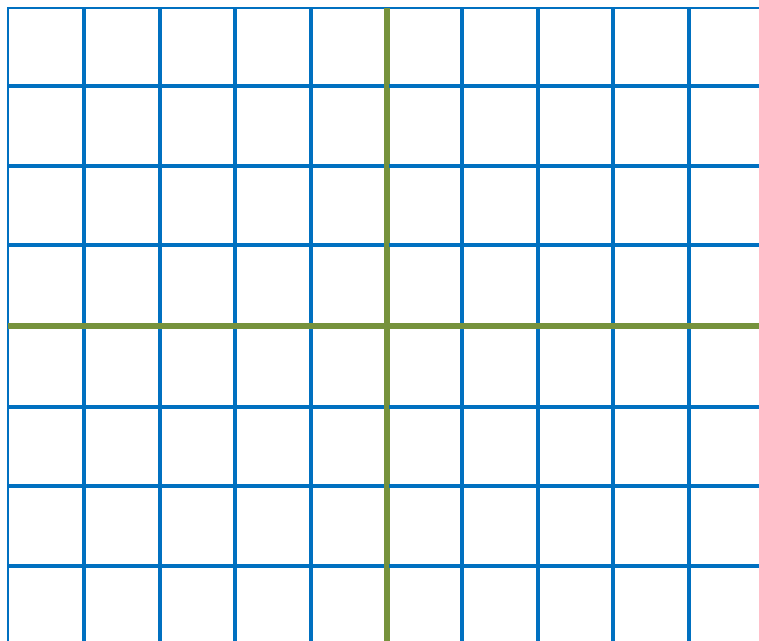
รูปที่ 7.2.4 แสดงการต่อวงจรข้อ 5

5. ป้อนสัญญาณขนาด 100 mVp มีความถี่ 1 kHz วัด และวาดภาพสัญญาณอินพุต เทียบกับเอาต์พุตลงในรูปผลการทดลอง พร้อมทั้งระบุค่าต่าง ๆ ให้ชัดเจน

$V_{in} = \dots\dots\dots$ $V_{out} = \dots\dots\dots$ $I_L = \dots\dots\dots$



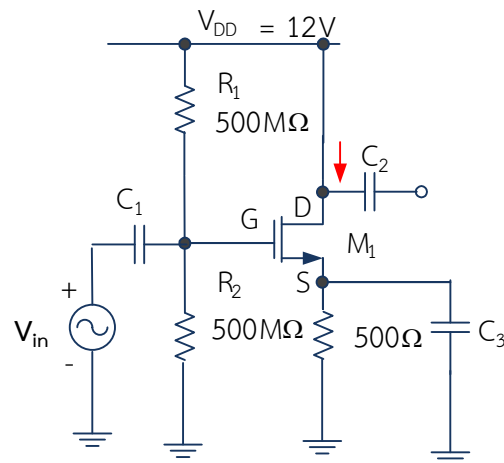
รูปที่ 7.2.5 สัญญาณอินพุตที่วัดได้ข้อ 5



รูปที่ 7.2.6 สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ข้อ 5

6. ให้คำนวณหาค่าความต้านทานด้านอินพุต (Z_{in}) และเอาต์พุต (Z_{out}) อัตราการขยายแรงดัน (A_v) อัตราการขยายกระแส (A_i) และอัตราการขยายกำลัง (A_p) เมื่อต่อความต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ ที่เอาต์พุต
7. ให้ต่อวงจรขยายแบบคอมมอนดริเวอร์ตาม รูปที่ 7.2.7 และวัดกระแส I_D และแรงดัน V_{DS}

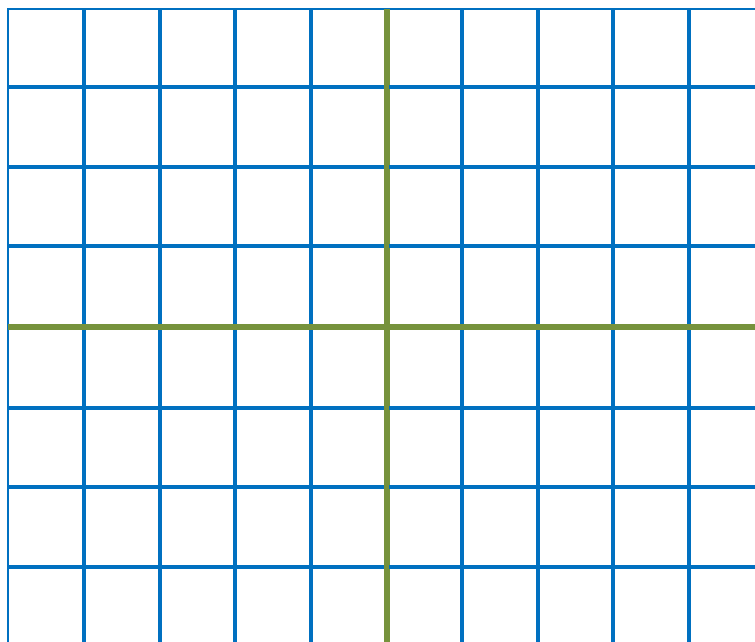
$I_D = \dots\dots\dots$ $V_{DS} = \dots\dots\dots$



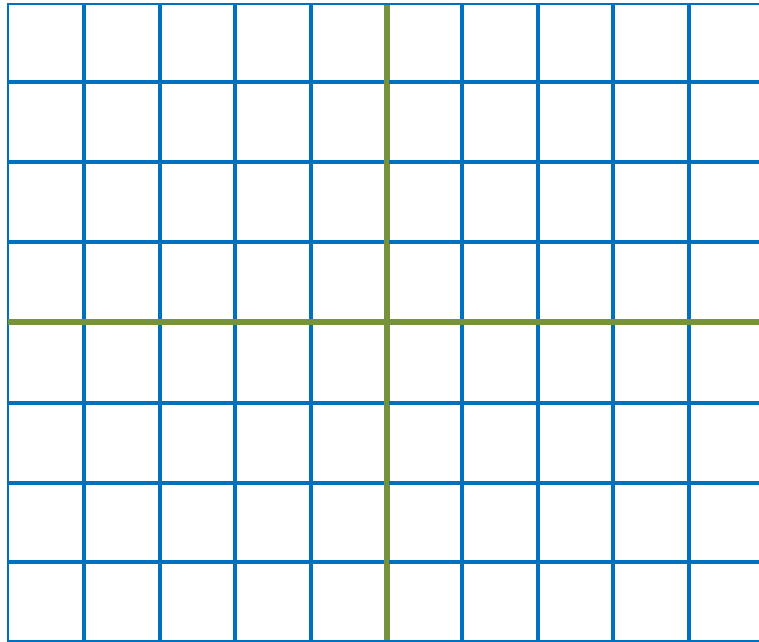
รูปที่ 7.2.7 แสดงการต่อวงจรข้อ 7

8. ป้อนสัญญาณขนาด 100 mVp มีความถี่ 1 kHz วัด และวาดภาพสัญญาณอินพุต เทียบกับ เอาต์พุตลงในรูปแบบการทดลอง พร้อมทั้งระบุค่าต่าง ๆ ให้ชัดเจน

$V_{in} = \dots\dots\dots$ $V_{out} = \dots\dots\dots$ $I_L = \dots\dots\dots$



รูปที่ 7.2.5 สัญญาณอินพุตที่วัดได้ข้อ 8



รูปที่ 7.2.6 สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ข้อ 8

9. ให้คำนวณหาค่าความต้านทานด้านอินพุต (Z_{in}) และเอาต์พุต (Z_{out}) อัตราการขยายแรงดัน (A_v) อัตราการขยายกระแส (A_i) และอัตราการขยายกำลัง (A_p) เมื่อต่อความต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ ที่เอาต์พุต

สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

คำถามการทดลอง

1. จากการทดลองวงจรขยายแบบคอมมอนซอส สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกัน อย่างไร เพราะเหตุใด

.....

.....

.....

.....

.....

2. จากการทดลองวงจรขยายแบบคอมมอนเกต สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกัน อย่างไร เพราะเหตุใด

.....

.....

.....

3. จากการทดลองวงจรขยายแบบคอมมอนเดรน สัญญาณเอาต์พุตกับอินพุตเหมือนหรือแตกต่างกัน อย่างไร เพราะเหตุใด

.....

.....

.....