บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

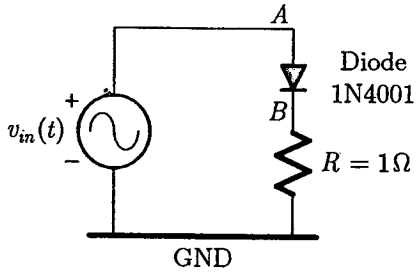
1. กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ในลักษณะต่างๆ เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีมากมายหลายชนิดในท้องตลาดให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการ อีกทั้ง เพื่อให้นักศึกษาได้เข้าใจถึงการใช้งานโปรแกรมทางวิศวกรรมศาสตร์และให้สามารถใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

2. ศึกษาเรื่องคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไดโอด

ตอนที่ 2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงพื้นฐานของไดโอด

การทดลองตอนที่ 2.1.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติทางไฟตรงพื้นฐานของไดโอด



ภาพที่ 21 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด

1) วาดวงจรตามภาพที่ 1 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001

2) ป้อนสัญญาณแบบสามเหลี่ยม ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ มีขนาดแบบยอดเท่ากับ 5 โวลต์และมีแรงดันออฟเซทเท่ากับ 5 โวลต์

3) พล็อตความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านไดโอด

4) หาค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัว บันทึกค่าเก็บไว้

5) เปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์ 1N4002, 1N4148, 1N5231B จากนั้นทำตามข้อ 2) ถึง ข้อ 4)

6) บันทึกผลในตารางโดยเรียงลำดับเบอร์ไดโอดตามค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัวจากมากไปหาน้อย

7) เปลี่ยนให้สัญญาณแบบสามเหลี่ยม ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ มีขนาดแบบยอดเท่ากับ 5 โวลต์ และมีแรงดันออฟเซทเท่ากับ -5 โวลต์ แล้วเริ่มต้นใหม่ใช้ไดโอดเป็นเบอร์ 1N4001

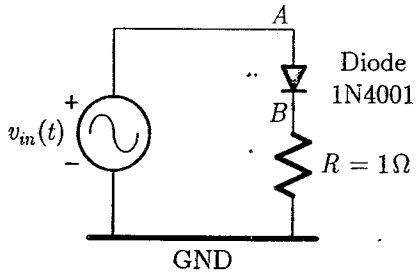
8) พล็อตความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านไดโอด

9) หาค่าแรงดันเบรกดาวน์ บันทึกค่าเก็บไว้

10) เปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์ 1N4148, 1N5231B และ 1N52xxB จากนั้นทำตามข้อ8) ถึงข้อ 9)

11) บันทึกผลในตารางโดยเรียงลำดับเบอร์ไดโอดตามค่าแรงดันเบรกดาวน์ จากมากไปหาน้อย (ถ้าไดโอดตัวใดไม่สามารถทราบค่าแรงดันเบรกดาวน์ดังกล่าวให้ระบุในตารางบันทึกผลว่า มีค่าเกินกว่าช่วงที่วัดได้)

การทดลองตอนที่ 2.1.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติทางไฟตรงพื้นฐานของไดโอด



ภาพที่ 22 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 2 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001

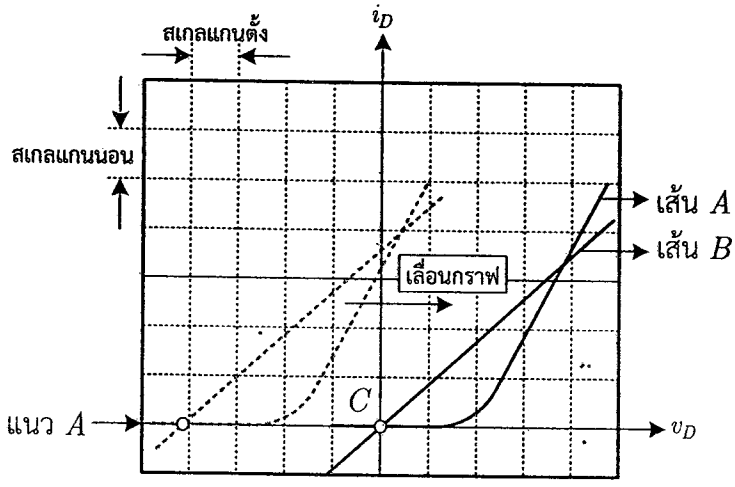
2) ปรับเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณให้เป็นแบบสามเหลี่ยม ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ มีขนาดแบบยอดเท่ากับ 5 โวลต์และมีแรงดันออฟเซทเท่ากับ 5 โวลต์

3) ปรับปุ่มต่างๆ ของออสซิลโลสโคปเป็นดังนี้

- ปรับปุ่มเลือกอินพุตไปที่ Dual
- ตั้งแนวอ้างอิงของออสซิลโลสโคปทั้งสองแชนแนล ให้ไปทับกันที่ตำแหน่งเหนือจากเส้นล่างสุดของเส้นแบ่งหน้าจอออสซิลโลสโคปในแนวนอน จำนวน 1 ช่องใหญ่
- ปรับปุ่มปรับอัตราขยายในแนวตั้งของออสซิลโลสโคปไปที่ค่า 0.5 โวลต์/ช่องสำหรับแชนแนล 1 และค่า 20 มิลลิโวลต์/ช่องสำหรับแชนแนล 2
- ใช้ออสซิลโลสโคปแชนแนล 1 และแชนแนล 2 จับสัญญาณที่ขั้วอาโนด (จุด A) เทียบกราวด์และขั้วคาโธด (จุด B) เทียบกราวด์ ตามลำดับ ห้ามสลับจุดวัดและแชนแนล โดยอย่าเปลี่ยนแปลงปุ่มต่างๆ ของออสซิลโลสโคปตามที่ปรับไว้

4) ปรับปุ่มปรับอัตราขยายในแนวนอนของออสซิลโลสโคปอยู่ที่ตำแหน่ง x-y (บิดไปให้สุดแบบทวนเข็มนาฬิกา) แต่ถ้าจุด C (ซึ่งเป็นจุดตัดระหว่างเส้น A กับเส้น B) ของภาพที่นักศึกษาเห็นไม่อยู่

บนเส้นกลางในแนวตั้งของออสซิลโลสโคป ให้นักศึกษาทำการปรับปุ่มเลื่อนภาพในแนวนอนของออสซิลโลสโคป เลื่อนภาพดังกล่าวจนทำให้จุด C อยู่บนเส้นกลางในแนวตั้งเพื่อเป็นการตั้งแนวแรงดัน 0 โวลต์ ของแกนในแนวนอนให้กับภาพ ส่วนแนวกระแส 0 แอมแปร์ ก็คือแนว A ในภาพ



ภาพที่ 23 ตัวอย่างภาพที่ปรากฏบนหน้าจอออสซิลโลสโคปขณะไดโอดได้รับไบอัสไปข้างหน้า

5) เราจะได้กราฟความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด โดยกระแสเป็นแกนตั้ง ส่วนแรงดันเป็นแกนนอน มีรายละเอียดของสเกลเป็นดังนี้

สเกลในแกนตั้ง i_D มีค่าเท่ากับค่าสเกลอัตราขยายในแนวตั้งของออสซิลโลสโคปแชนแนล 2

สเกลในแกนนอน v_D มีค่าเท่ากับค่าสเกลอัตราขยายในแนวตั้งของออสซิลโลสโคปแชนแนล 1

ดังนั้น เราจะได้สเกลในแกนตั้งของภาพที่ปรากฏมีค่าเท่ากับ 20 มิลลิแอมป์/ช่อง และสเกลในแกนนอนเท่ากับ 0.5 โวลต์/ช่อง

6) ปรับปุ่มเลือกอินพุตไปอยู่ที่ CH2 นักศึกษาจะเห็นว่าเส้น B จะหายไป โดยเส้น B นี้มีประโยชน์เพียงเพื่อช่วยให้เราตั้งแนวแรงดัน 0 โวลต์ได้เท่านั้น จากนั้นบันทึกรูปกราฟที่เหลือ (เส้น A) ลงในกระดาษกราฟ โดยอย่าลืมบันทึกสเกลที่กล่าวมาแล้วลงในรูปกราฟด้วย

7) เปลี่ยนไดโอดที่ใช้ในวงจรเป็นเบอร์ 1N4002, 1N4148 และ 1N5231B แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 6) สำหรับไดโอดแต่ละเบอร์ ซึ่งสรุปแล้วนักศึกษาจะต้องบันทึกของข้อมูลความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันที่ตกคร่อมของไดโอดจำนวน 4 รูปกราฟ

8) บันทึกผลในตารางโดยเรียงลำดับเบอร์ไดโอดตามค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัวจากมากไปหาน้อย

9) เปลี่ยนให้สัญญาณแบบสามเหลี่ยม ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ มีขนาดแบบยอดเท่ากับ 5 โวลต์ และมีแรงดันออฟเซทเท่ากับ -5 โวลต์ แล้วเริ่มต้นใหม่ใช้ไดโอดเป็นเบอร์ 1N4001

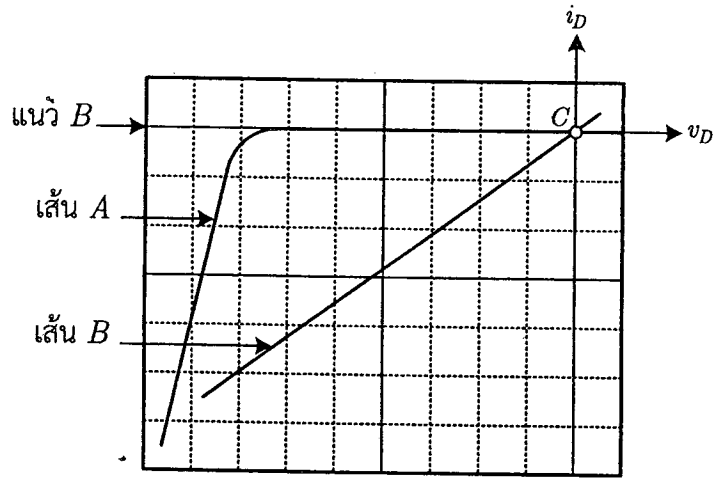
10) ปรับปุ่มต่างๆ ของออสซิลโลสโคปเป็นดังนี้

- ปรับปุ่มเลือกอินพุตไปที่ Dual
- ตั้งแนวอ้างอิงของออสซิลโลสโคปทั้งสองแชนแนลให้ไปทับกันที่ตำแหน่งต่ำจากเส้นบนสุดของเส้นแบ่งออสซิลโลสโคปในแนวนอน จำนวน 1 ช่องใหญ่ (ตามแนว B)
- ปรับปุ่มปรับอัตราขยายในแนวตั้งของออสซิลโลสโคปไปที่ค่า 2 โวลต์/ช่อง สำหรับแชนแนล 1 และค่า 20 มิลลิโวลต์/ช่อง สำหรับแชนแนล 2

11) ใช้ออสซิลโลสโคปแชนแนล 1 และแชนแนล 2 จับสัญญาณที่ขั้วอาโนด (จุด A) เทียบกราวด์และขั้วคาโธด (จุด B) เทียบกราวด์ ตามลำดับ ห้ามสลับจุดวัดและแชนแนล โดยอย่าเปลี่ยนแปลงปุ่มต่างๆ ของออสซิลโลสโคปตามที่ปรับไว้

12) เปลี่ยนไดโอดในวงจรเป็นเบอร์ 1N5231B แทนเบอร์ 1N4001

13) ปรับปุ่มปรับอัตราขยายในแนวนอนของออสซิลโลสโคปอยู่ที่ตำแหน่ง x-y นักศึกษาจะเห็นภาพปรากฏบนจอคล้ายเส้นทึบ โดยเราสามารถตั้งแนวแรงดัน 0 โวลต์ และทราบค่าสเกลต่างๆ



ภาพที่ 24 ตัวอย่างภาพที่ปรากฏบนหน้าจอออสซิลโลสโคปขณะไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

14) เราจะได้กราฟความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด โดยกระแสเป็นแกนตั้ง ส่วนแรงดันเป็นแกนนอน มีรายละเอียดของสเกลเป็นดังนี้

สเกลในแกนตั้ง i_D มีค่าเท่ากับค่าสเกลอัตราขยายในแนวตั้งของออสซิลโลสโคปแชนแนล 2

สเกลในแกนนอน v_D มีค่าเท่ากับค่าสเกลอัตราขยายในแนวตั้งของออสซิลโลสโคปแชนแนล 1

ดังนั้น เราจะได้สเกลในแกนตั้งของภาพที่ปรากฏมีค่าเท่ากับ 20 มิลลิแอมป์/ช่อง และสเกลในแกนนอนเท่ากับ 0.5 โวลต์/ช่อง

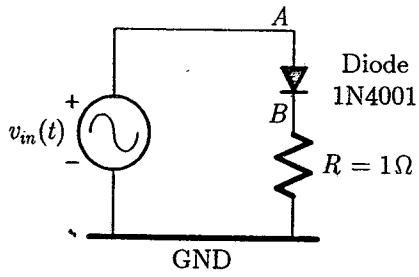
15) ปรับปุ่มเลือกอินพุตไปอยู่ที่ CH2 นักศึกษาจะเห็นว่าเส้น B จะหายไป โดยเส้น B นี้มีประโยชน์เพียงเพื่อช่วยให้เราตั้งแนวแรงดัน 0 โวลต์ได้เท่านั้น จากนั้นบันทึกรูปกราฟที่เหลือ (เส้น A) ลงในกระดาษกราฟ โดยอย่าลืมบันทึกสเกลที่กล่าวมาแล้วลงในรูปกราฟด้วย

16) เปลี่ยนไดโอดในวงจรเป็นเบอร์ 1N4148 และ 1N52xxB และทำซ้ำข้อ 9) ถึงข้อ 15) สำหรับไดโอดแต่ละเบอร์ ดังนั้นนักศึกษาจะต้องบันทึกกราฟจำนวน 3 รูป

17) บันทึกผลในตารางโดยเรียงลำดับเบอร์ไดโอดตามค่าแรงดันเบรกดาวน์ จากมากไปหาน้อย (ถ้าไดโอดตัวใดไม่สามารถทราบค่าแรงดันเบรกดาวน์ดังกล่าวให้ระบุในตารางบันทึกผลว่ามีค่าเกินกว่าช่วงที่วัดได้)

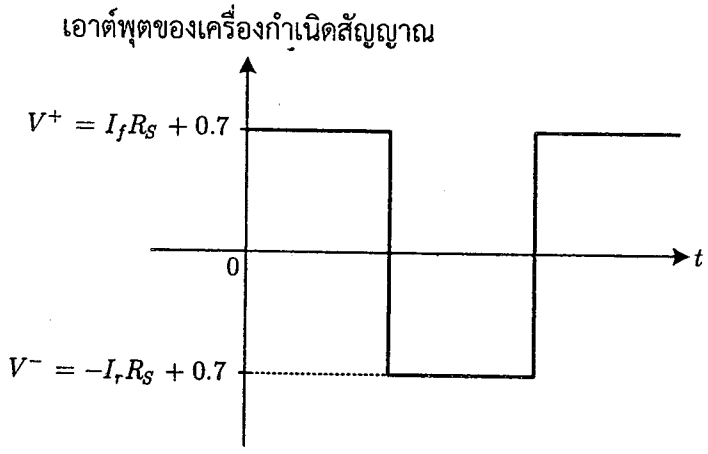
ตอนที่ 2.2 ศึกษาคุณสมบัติการสวิทช์ของไดโอด

การทดลองตอนที่ 2.2.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติการสวิทช์ของไดโอด



ภาพที่ 25 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด

1) วาดวงจรตามภาพที่ 5 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001



ภาพที่ 26 การกำหนดค่า V^+ และ V^- ของสัญญาณรูปเหลี่ยม

2) ป้อนสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ มีขนาดเท่ากับ $V^+ = I_f R_S + 0.7$ และ $V^- = I_r R_S + 0.7$ (สามารถปรับได้โดยการปรับขนาดและออฟเซทของสัญญาณรูปเหลี่ยมพร้อมกัน) โดยในตอนแรกนี้จะกำหนดให้ค่า $I_f = I_r$ เท่ากับ 10 มิลลิแอมป์ และค่า R_S ปรากฏในรูป ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม ดังนั้นเราจะได้ $V^+ = 1.7$ โวลต์และ $V^- = -0.3$ โวลต์

3) พล๊อตความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อม ณ จุด A และ B เพื่อหาค่าเวลา t_S

4) เปลี่ยนค่า I_f และ I_r เป็นดังตาราง โดยยังคงใช้ R_S ค่าเดิม พล๊อตความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อม ณ จุด A และ B เพื่อหาค่าเวลา t_S

5) พล๊อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา t_S (แกนตั้ง) กับค่า I_r / I_f (แกนนอน) ของไดโอดตามเบอร์ที่กำหนด โดยใช้กระดาษเซมิล็อค

6) เปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์ 1N4002 ป้อนความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ และ 1N4148 ป้อนความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 5)

การทดลองตอนที่ 2.2.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติการสวิทซ์ของไดโอด

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 5 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001

2) ป้อนสัญญาณแบบสี่เหลี่ยมจากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้มีความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ มีขนาดเท่ากับ $V^+ = I_f R_S + 0.7$ และ $V^- = I_r R_S + 0.7$ (สามารถปรับได้โดยการปรับขนาดและออฟเซทของสัญญาณรูปเหลี่ยมพร้อมกัน) โดยในตอนแรกนี้จะกำหนดให้ค่า $I_f = I_r$ เท่ากับ 10 มิลลิแอมป์ และค่า R_S ปรากฏในรูป ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม ดังนั้นเราจะได้ $V^+ = 1.7$ โวลต์ และ $V^- = -0.3$ โวลต์

3) จากนั้นให้ใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันที่ตกคร่อม ณ จุด A และ B บันทึกกราฟที่วัดได้บนจอออสซิลโลสโคป ลงในกระดาษกราฟ โดยนักศึกษาควรปรับสเกลในแนวตั้งและแนวนอนของออสซิลโลสโคปให้เหมาะสม คือปรับจนเห็นรูปสัญญาณ (ณ จุด A และ B) ที่ปรากฏบนหน้าจอออสซิลโลสโคปประมาณ 1-2 ลูกคลื่น เพราะจะทำให้สามารถหาค่าเวลา t_S ได้ง่าย (อย่าลืมบันทึกสเกลในแนวตั้งและแนวนอนขณะนั้นไว้ข้างกราฟด้วย)

4) หาค่าเวลา t_S จากกราฟที่บันทึกไว้ แล้วบันทึกค่าดังกล่าวไว้ข้างกราฟ

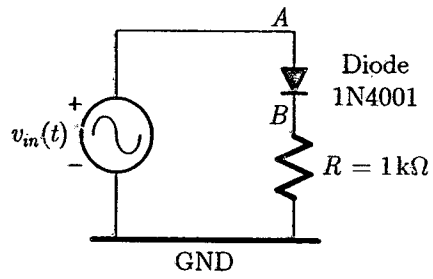
5) เปลี่ยนค่า I_f และ I_r เป็นดังตาราง โดยยังคงใช้ R_S ค่าเดิม แล้วทำซ้ำข้อ 2) ถึงข้อ 4)

6) พล๊อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา t_S (แกนตั้ง) กับค่า I_r / I_f (แกนนอน) ของไดโอดตามเบอร์ที่กำหนด โดยใช้กระดาษเซมิล็อค

7) เปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์ 1N4002 ป้อนความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ และ 1N4148 ป้อนความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์ แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 6)

ตอนที่ 2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอด

การทดลองตอนที่ 2.3.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอด



ภาพที่ 27 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอด

1) วาดวงจรตามภาพที่ 7 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001

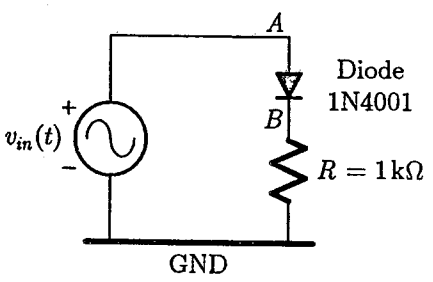
2) ป้อนสัญญาณแบบไซน์ มีขนาดคงที่ตลอดเท่ากับ 10 มิลลิโวลต์ ทุกๆ ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง มีค่าออฟเซทเท่ากับ 0.65 โวลต์ โดยเริ่มต้น ณ ความถี่ 100 เฮิรตซ์

3) ปรับค่าความถี่ของสัญญาณให้เป็นไปตามตารางที่ 4 โดยในแต่ละความถี่ที่ป้อนให้กับวงจร ให้วัดค่าแรงดันแบบพีคของ v_{in} และ v_{out} ค่ามุมเฟสในหน่วยองศาของ v_{out} เทียบกับ v_{in}

4) นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟลงในกระดาษเซมิล็อค โดยให้แกนนอนเป็นแกนความถี่ แกนตั้งเป็นขนาดของการขยายสัญญาณในหน่วยดีบี และเฟสของเอาต์พุตเป็นองศา พร้อมทั้งแสดงค่าความถี่คัตออฟลงบนกราฟด้วย

5) เปลี่ยนความต้านทานจาก 1 โอห์ม เป็นความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม พร้อมกับเปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์ 1N4002 และ 1N4148 แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 4)

การทดลองตอนที่ 2.3.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอด



ภาพที่ 28 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอดทางปฏิบัติ

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 8 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001

2) ป้อนสัญญาณแบบไซน์ มีขนาดคงที่ตลอดเท่ากับ 10 มิลลิโวลต์ ทุกๆ ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง มีค่าออฟเซทเท่ากับ 0.65 โวลต์ (ซึ่งสามารถปรับได้โดยการปรับขนาดและออฟเซทของสัญญาณพร้อมกัน) โดยเริ่มต้น ณ ความถี่ 100 เฮิรตซ์

3) ปรับค่าความถี่ของสัญญาณให้เป็นไปตามตารางที่ 4 โดยในแต่ละความถี่ที่ป้อนให้กับวงจร ให้วัดค่าแรงดันแบบพีคของ v_{in} และ v_{out} ค่ามุมเฟสในหน่วยองศาของ v_{out} เทียบกับ v_{in} ซึ่งวัดได้ด้วยวิธีลิสซาจูส เป็นต้น

4) นำผลการทดลองที่ได้มาพล็อตกราฟลงในกระดาษเซมิล็อค โดยให้แกนนอนเป็นแกนความถี่ แกนตั้งเป็นขนาดของการขยายสัญญาณในหน่วยดีบี และเฟสของเอาต์พุตเป็นองศา พร้อมทั้งแสดงค่าความถี่คัตออฟลงบนกราฟด้วย

5) เปลี่ยนความต้านทานจาก 1 โอห์ม เป็นความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม พร้อมกับเปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์ 1N4002 และ 1N4148 แล้วทำตามข้อ 2) ถึงข้อ 4)

ตารางที่ 3 ตารางเรียงเบอร์ไดโอดตามค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัว

อันดับของค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัว	**เบอร์ของไดโอด**
1 (สูงสุด)	
2	
3	
4 (ต่ำสุด)	

ตารางที่ 4 ตารางเรียงเบอร์ไดโอดตามค่าแรงดันเบรกดาวน์

อันดับของขนาดค่าแรงดันเบรกดาวน์	**ค่าแรงดันเบรกดาวน์**	**เบอร์ของไดโอด**
1 (สูงสุด)		
2		
3 (ต่ำสุด)		

ตารางที่ 5 ค่ากระแสที่ใช้ในการทดลอง

I_f(mA)	I_r(mA)	I_r / I_f
10	10	1.00
15	10	0.67
20	10	0.50
30	10	0.33
100	10	0.10

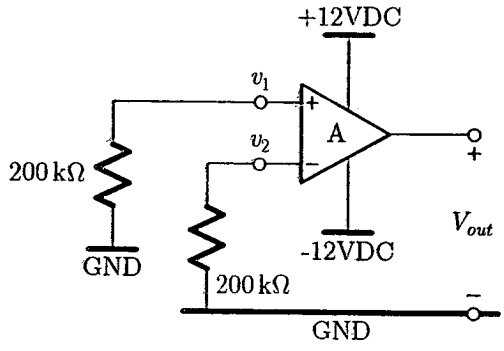
10	20	2.0
10	40	4.0
10	60	6.0
10	80	8.0
10	100	10.0

ตารางที่ 6 ขนาดและเฟสของสัญญาณทางอินพุตและเอาต์พุต

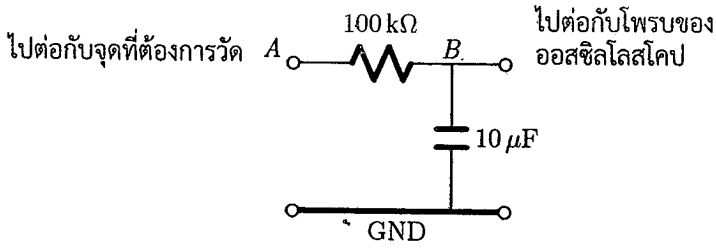
ความถี่ (Hz)	v_{in} (peak voltage)	v_{out} (peak voltage)	$20\log(v_{out}/v_{in})$ (dB)	มุมของ v_{out} (องศา)
100				
300				
500				
800				
1k				
3k				
5k				
8k				
10k				
30k				
50k				
80k				
100k				
300k				

3. **การทดลองเรื่องคุณลักษณะบางประการของออปแอมป์ที่แตกต่างจากอุดมคติ**

ตอนที่ 3.1 ศึกษาคุณสมบัติกระแสไบอัสด้านเข้าของออปแอมป์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 29 วงจรออปแอมป์ (ก) ใช้วัดกระแสไบอัสด้านเข้า และ (ข) วงจรคั่นกลางระหว่างวงจรออปแอมป์และออสซิลโลสโคปกรณีมีสัญญาณรบกวน

การทดลองตอนที่ 3.1.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติกระแสไบอัสด้านเข้าของออปแอมป์

1) วาดวงจรตามภาพที่ 29(ก) โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) กำหนดชื่อแรงดันขาบวกของออปแอมป์มีค่าเท่ากับ v_1 และแรงดันที่ขาลบของออปแอมป์มีค่าเท่ากับ v_2 ใช้คำสั่ง probe เพื่อวัดสัญญาณที่ขาบวกของออปแอมป์ ซึ่งหากได้แรงดันไฟตรงที่ราบเรียบให้บันทึกค่าลงในตารางที่ 3
3) ใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณที่ขาลบของออปแอมป์ บันทึกค่าลงในตารางที่ 3
4) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ใหม่ แล้วทำซ้ำข้อ 2) และข้อ 3)
5) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำซ้ำข้อ 2) และข้อ 3)
6) ใช้กฎของโอห์ม $V = I \times R$ ซึ่งในที่นี้ $R = 200\,\text{k}\Omega$ เพื่อคำนวณหาค่ากระแส I แต่ละขาออกมา (I^+ และ I^-) แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3

7) หาค่ากระแสเฉลี่ยจากความสัมพันธ์ $I_{av} = (I^+ + I^-)/2$ แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3

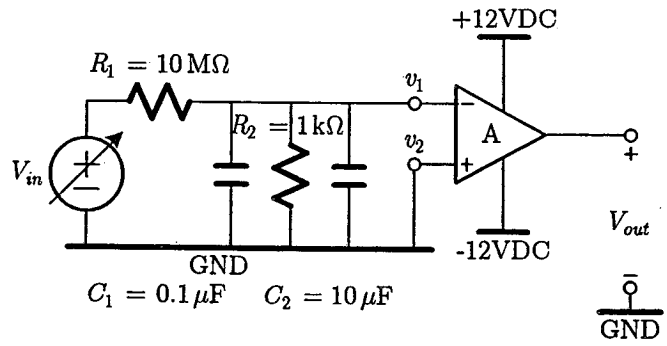
การทดลองตอนที่ 3.1.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติกระแสไบอัสด้านเข้าของออปแอมป์

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 9(ก) โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ปรับออสซิลโลสโคปให้เป็นการวัดสัญญาณไฟตรง (DC input) แล้ววัดแรงดันที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ สังเกตผลที่ได้จากออสซิลโลสโคป ถ้าเป็นแรงดันไฟตรงที่ราบเรียบให้อ่านค่าที่วัดได้พร้อมบันทึกค่าลงในตารางที่ 3 แต่ถ้ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นให้ต่อวงจรตามรูปที่ 9(ข) โดยใช้สายโพรบของออสซิลโลสโคปวัดที่จุด B และต่อจุด A ไปยังวงจรที่ต้องการวัด แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 3

ข้อพึงระวัง การต่อวงจรตามภาพที่ 29(ข) เข้าไปไม่ควรปิดไฟเลี้ยงวงจรที่จ่ายให้กับออปแอมป์ เพราะจะทำให้แรงดันที่วัดได้มีการกระเพื่อม

3) วัดแรงดันที่ขาอินพุตลบของออปแอมป์ บันทึกค่าลงในตารางที่ 3
4) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ใหม่ แล้วทำซ้ำข้อ 2) และข้อ 3)
5) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำซ้ำข้อ 2) และข้อ 3)
6) ใช้กฎของโอห์ม $V = I \times R$ ซึ่งในที่นี้ $R = 200\,\text{k}\Omega$ เพื่อคำนวณหาค่ากระแส I แต่ละขาออกมา (I^+ และ I^-) ของออปแอมป์ทุกเบอร์ แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3
7) หาค่ากระแสเฉลี่ยจากความสัมพันธ์ $I_{av} = (I^+ + I^-)/2$ ของออปแอมป์ทุกเบอร์ แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3

ตอนที่ 3.2 ศึกษาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

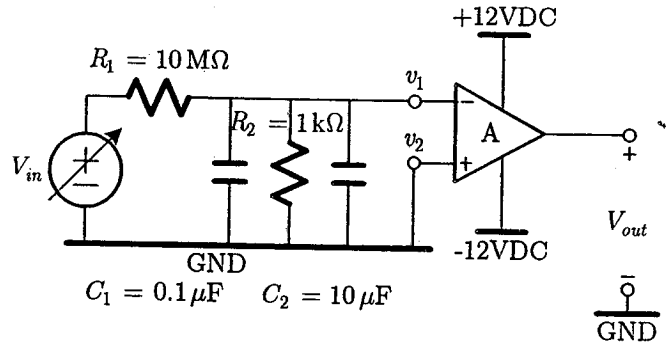


ภาพที่ 30 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

การทดลองตอนที่ 3.2.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

1) วาดวงจรตามภาพที่ 30 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) กำหนดให้ V_{in} ที่ต่อเข้าไปในวงจร เป็นแหล่งจ่ายไฟตรง
3) ป้อนค่า $V_{in} = 0$ โวลต์ แล้วใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณเอาต์พุต V_O
4) ปรับเพิ่มค่า V_{in} ทีละ 0.01 โวลต์ ใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณเอาต์พุต V_O อ่านค่าแรงดัน V_{in} ที่ทำให้ได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุต $V_O = 0$ โวลต์ บันทึกค่า V_{in} ลงในตารางที่ 4
5) ใช้คำสั่ง probe อ่านค่าแรงดันไฟตรงที่ตกคร่อม R_2 ณ แรงดันสัญญาณเอาต์พุต $V_O = 0$ โวลต์ บันทึกค่า V_{R2} ที่ได้ลงในตารางที่ 4
6) ค่าแรงดัน V_{R2} ที่ได้คือนิยามของค่าแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์
7) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์อื่น แล้วทำซ้ำข้อ 2) ถึงข้อ 6)
8) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นอีกเบอร์หนึ่ง แล้วทำซ้ำข้อ 2) ถึงข้อ 6)

การทดลองตอนที่ 3.2.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

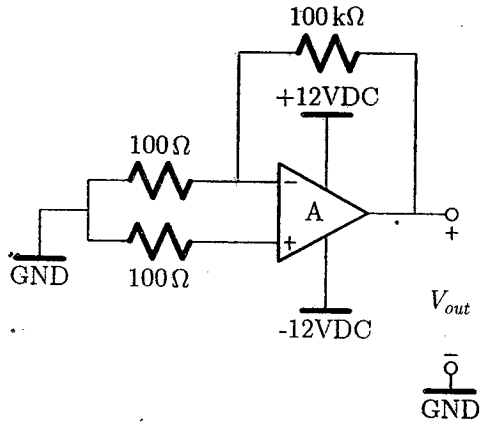


ภาพที่ 31 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ทางปฏิบัติ

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 31 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) กำหนดให้ V_{in} ที่ต่อเข้าไปในวงจรซึ่งได้จากเป็นแหล่งจ่ายกำลังงานไฟตรง (DC power supply)
3) ใช้ออสซิลโลสโคปต่อเข้าทางเอาต์พุตของวงจร โดยตั้งค่าการวัดสัญญาณไฟตรง (DC input)
4) ปรับค่า V_{in} จาก 0 โวลต์ ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุต $V_O = 0$ โวลต์ บันทึกค่า V_{in} ลงในตารางที่ 4
5) จากค่าแรงดัน V_{in} ที่ได้ ให้ใช้กฎการแบ่งแรงดัน (voltage divider) หาค่าแรงดันที่ตกคร่อม R_2 แล้วบันทึกค่าที่ได้ลงในตารางที่ 4

6) ค่าแรงดัน V_{R2} ที่ได้คือนิยามของค่าแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ นั่นเอง
7) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์อื่น แล้วทำซ้ำข้อ 2) ถึงข้อ 6)
8) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นอีกเบอร์หนึ่ง แล้วทำซ้ำข้อ 2) ถึงข้อ 6)

ตอนที่ 3.3 ศึกษาผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 32 วงจรทดลองเพื่อศึกษาผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติโดยใช้โปรแกรม

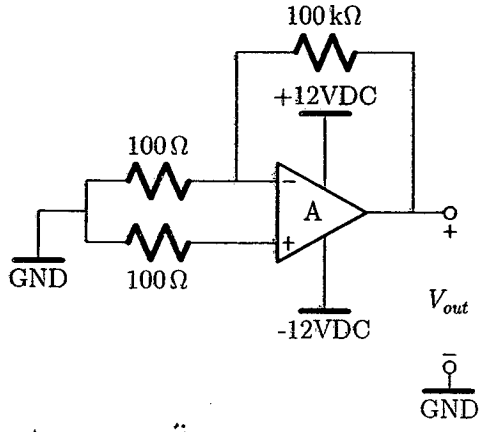
การทดลองตอนที่ 3.3.1 <u>การจำลอง</u>ผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติ

1) วาดวงจรตามภาพที่ 32 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ตั้งค่าการวิเคราะห์แบบ DC
3) ใช้คำสั่ง probe วัดแรงดันไฟตรงที่ขาอินพุตบวก บันทึกผลลงในตารางที่ 4
4) ใช้คำสั่ง probe วัดแรงดันไฟตรงที่ขาอินพุตลบ บันทึกผลลงในตารางที่ 4
5) ใช้คำสั่ง probe วัดแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุต บันทึกผลลงในตารางที่ 4
6) หาค่าอัตราขยายแรงดันสัญญาณจากความสัมพันธ์

$$A_v = \frac{v_{out}(t)}{v_{in}(t)}$$

หมายเหตุ ในที่นี้ค่า $v_{in}(t)$ คือแรงดันออฟเซททางอินพุต

การทดลองตอนที่ 3.3.2 <u>การวัด</u>ผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติ



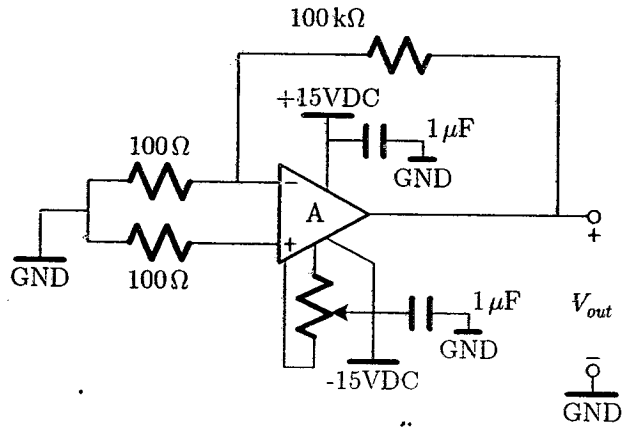
ภาพที่ 33 วงจรทดลองเพื่อศึกษาผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติโดยการต่อวงจรจริง

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 33 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ใช้ออสซิลโลสโคปต่อเข้าทางเอาต์พุตของวงจร โดยตั้งค่าการวัดสัญญาณไฟตรง (DC input)
3) วัดค่าแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุต บันทึกผลลงในตารางที่ 4
4) จากวงจรจะได้อัตราขยายแรงดันสัญญาณมีค่าประมาณ

$$A_v = \frac{R_f}{R_1} = 1,000$$
$$= \frac{v_{out}(t)}{v_{in}(t)}$$

หมายเหตุ ในที่นี้ค่า $v_{in}(t)$ คือแรงดันออฟเซททางอินพุต

ตอนที่ 3.4 ศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 34 วงจรทดลองเพื่อศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติโดยใช้โปรแกรม

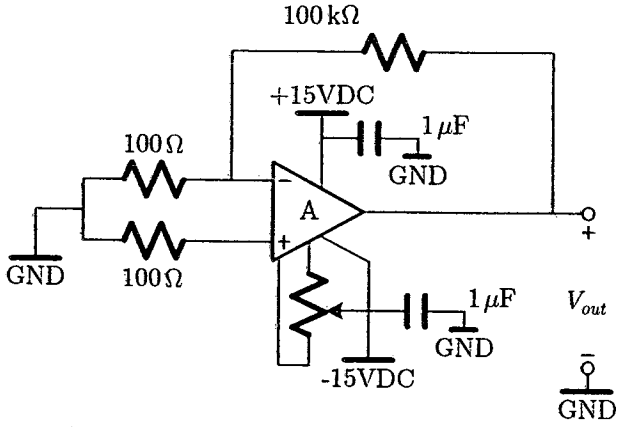
การทดลองตอนที่ 3.4.1 <u>การจำลอง</u>การแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ

1) วาดวงจรตามภาพที่ 34 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 15 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ใช้ความต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ขนาด 1 กิโลโอห์ม ต่อเข้าที่ขาออฟเซททั้งสองของออปแอมป์ (ดังรูป)
3) จากนั้นใช้คำสั่ง parametric sweep กับตัวต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์ม จนกระทั่งแรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์

หมายเหตุ ถ้าไม่สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ได้ ให้เปลี่ยนแรงดันอ้างอิงจาก -15 โวลต์ เป็น $+15$ โวลต์

4) ใช้คำสั่ง probe วัดแรงดันที่จุด x เทียบกราวด์ แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4
5) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 4)
6) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 4)

การทดลองตอนที่ 3.4.2 <u>การวัด</u>การแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ



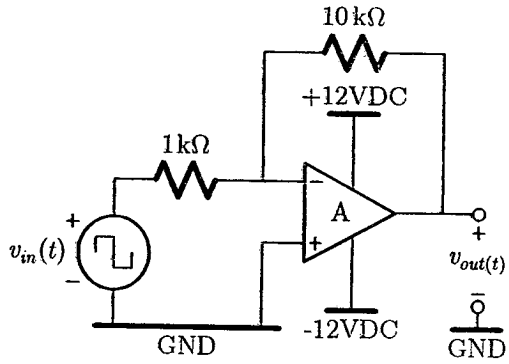
ภาพที่ 35 วงจรทดลองเพื่อศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติโดยการต่อวงจรจริง

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 35 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 15 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ใช้ความต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ขนาด 1 กิโลโอห์ม ต่อเข้าที่ขาออฟเซททั้งสองของออปแอมป์ (ดังรูป)
3) ใช้ออสซิลโลสโคปต่อเข้าทางเอาต์พุตของวงจร โดยตั้งค่าการวัดสัญญาณไฟตรง (DC input)
4) ปรับค่าความต้านทานจนกระทั่งแรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์.

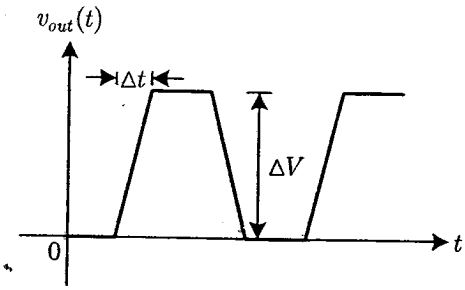
หมายเหตุ ถ้าไม่สามารถปรับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ได้ ให้เปลี่ยนแรงดันอ้างอิงจาก -15 โวลต์ เป็น $+15$ โวลต์

5) วัดค่าแรงดันที่จุด x เทียบกราวด์ แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4
6) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 4)
7) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 4)

ตอนที่ 3.5 ศึกษาอัตราสลูว์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 36 วงจรทดลองเพื่อศึกษาอัตราสลูว์ (ก) วงจรที่ใช้ และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้

การทดลองตอนที่ 3.5.1 <u>การจำลอง</u>อัตราสลูว์

1) วาดวงจรตามภาพที่ 36(ก) โดยใช้ไฟเลี้ยง ±12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) กำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณรูปเหลี่ยม (square wave) ขนาด x โวลต์ ความถี่เท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์ ป้อนเข้าที่ขาอินพุตของวงจร
3) ใช้การวิเคราะห์สัญญาณและ transient กำหนดเวลา start= 0s เวลาสุดท้าย stop= 1ms และ step=0.01ms
4) ใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณที่เอาต์พุตหาค่า ΔV_{out} และ Δt แล้วบันทึกลงในตารางที่ 5
5) คำนวณอัตราสลูว์ได้โดยใช้สูตร

$$SR = \left.\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}\right|_{\max}$$

6) เปลี่ยนสัญญาณอินพุตเป็นรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ แล้วป้อนให้กับวงจร โดยเพิ่มขนาดของสัญญาณอินพุตให้แรงพอ จนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตเป็นดังภาพที่ 36(ข)
7) ใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณที่เอาต์พุตหาค่า ΔV_{out} และ Δt แล้วบันทึกลงในตารางที่ 5
8) คำนวณอัตราสลูว์ได้โดยใช้สูตร

$$SR = \left.\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}\right|_{\max}$$

8) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 8)
9) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 8)

การทดลองตอนที่ 3.5.2 <u>การวัด</u>อัตราสลูว์

1) วาดวงจรตามภาพที่ 36(ก) โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ป้อนสัญญาณอินพุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) เป็นสัญญาณรูปเหลี่ยม (square wave) ขนาด x โวลต์ ความถี่เท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์ ป้อนเข้าที่ขาอินพุตของวงจร
3) ใช้ออสซิลโลสโคปต่อเข้าทางเอาต์พุตของวงจร โดยตั้งค่าการวัดสัญญาณไฟตรง (DC input)
4) วัดสัญญาณทางเอาต์พุตเพื่อหาค่า ΔV_{out} และ Δt แล้วบันทึกลงในตารางที่ 5
5) คำนวณอัตราสลูว์ได้โดยใช้สูตร

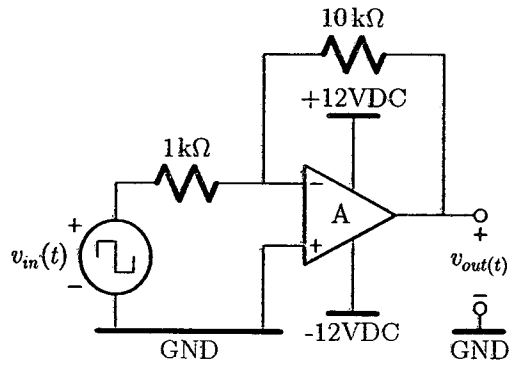
$$SR = \left.\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}\right|_{\max}$$

6) เปลี่ยนสัญญาณอินพุตเป็นรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ซึ่งได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ แล้วป้อนให้กับอินพุตของวงจร โดยเพิ่มขนาดของสัญญาณอินพุตให้แรงพอ จนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตเป็นดังภาพที่ 36(ข)
7) วัดสัญญาณที่เอาต์พุต พร้อมกับหาค่า ΔV_{out} และ Δt แล้วบันทึกลงในตารางที่ 5
8) คำนวณอัตราสลูว์ได้โดยใช้สูตร

$$SR = \left.\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}\right|_{\max}$$

9) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 8)
10) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 8)

ตอนที่ 3.6 ศึกษาค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง



ภาพที่ 37 ลักษณะวงจรที่ใช้ศึกษาแบนด์วิดท์กำลังโดยใช้โปรแกรม

การทดลองตอนที่ 3.6.1 <u>การจำลอง</u>ค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง

1) วาดวงจรตามภาพที่ 37 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) กำหนดให้สัญญาณอินพุตเป็นรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เป็นสัญญาณอินพุต ใช้การวิเคราะห์สัญญาณและ transient กำหนดเวลา start= 0s เวลาสุดท้าย stop= 20ms และ step=0.001ms
3) โดยเลือกป้อนขนาดอินพุต จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 10 โวลต์พีค-พีค โดยใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณที่เอาต์พุต
4) จากนั้นใช้อินพุตค่าเดิมที่ได้ในข้อ 3) แต่ปรับความถี่ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตเริ่มกลายเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม (triangular wave) และมีขนาดลง แล้วบันทึกค่าความถี่ที่ได้ลงในตารางที่ 6
5) ป้อนขนาดสัญญาณอินพุต จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 20 โวลต์พีค-พีค โดยใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณที่เอาต์พุต
6) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 4)
7) คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง โดยใช้สูตร

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi V_p}$$

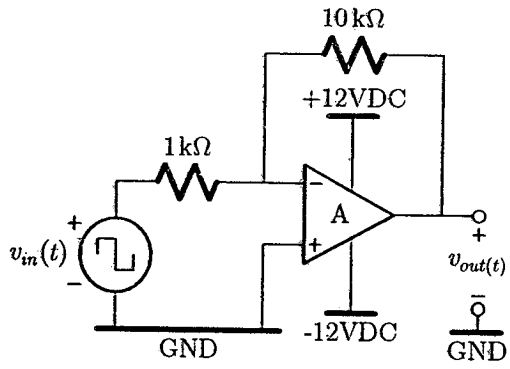
ในที่นี้ SR เป็นค่าอัตราสลูว์ที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา

V_p เป็นค่าแรงดันยอดคลื่น (peak voltage) ของสัญญาณด้านเอาต์พุต

$f_{\max}$ เป็นค่าความถี่สูงสุดของสัญญาณที่ไม่เกิดการผิดเพี้ยนดังกล่าว

8) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 7)
9) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 7)

การทดลองตอนที่ 3.6.2 <u>การวัด</u>ค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง



ภาพที่ 38 ลักษณะวงจรที่ใช้ศึกษาแบนด์วิดท์กำลังโดยการต่อวงจรจริง

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 38 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ป้อนสัญญาณอินพุตเป็นรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ซึ่งได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) ความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เป็นสัญญาณอินพุต
3) ปรับขนาดของแหล่งกำเนิดซึ่งป้อนเข้าทางอินพุตของวงจร จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 10 โวลต์พีค-พีค โดยใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัด
4) จากนั้นใช้อินพุตค่าเดิมที่ได้ในข้อ 3) แต่ปรับความถี่ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตเริ่มกลายเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม (triangular wave) และมีขนาดลง แล้วบันทึกค่าความถี่ที่ได้ลงในตารางที่ 6
5) ปรับเปลี่ยนขนาดสัญญาณอินพุตที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 20 โวลต์พีค-พีค โดยใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัด
6) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 4)
7) คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง โดยใช้สูตร

$$f_{\max} = \frac{SR}{2\pi V_p}$$

ในที่นี้ SR เป็นค่าอัตราสลูว์ที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา

V_p เป็นค่าแรงดันยอดคลื่น (peak voltage) ของสัญญาณด้านเอาต์พุต

$f_{\max}$ เป็นค่าความถี่สูงสุดของสัญญาณที่ไม่เกิดการผิดเพี้ยนดังกล่าว

8) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 7)
9) เปลี่ยนเบอร์ออปแอมป์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1) ถึง 7)

ตารางที่ 7

เบอร์ออปแอมป์	แรงดันขาบวก	แรงดันขาลบ	กระแสขาบวก	กระแสขาลบ	กระแสเฉลี่ย

ตารางที่ 8

เบอร์ออปแอมป์	V_{in} (โวลต์)	แรงดันที่ตกคร่อม R_2 (โวลต์)

ตารางที่ 9

เบอร์ออปแอมป์	V_{out} (โวลต์)	V_{in} (โวลต์)	V_X (โวลต์)

ตารางที่ 10

เบอร์ออปแอมป์	Square wave			Triangular wave		
	ΔV	Δt	SR	ΔV	Δt	SR

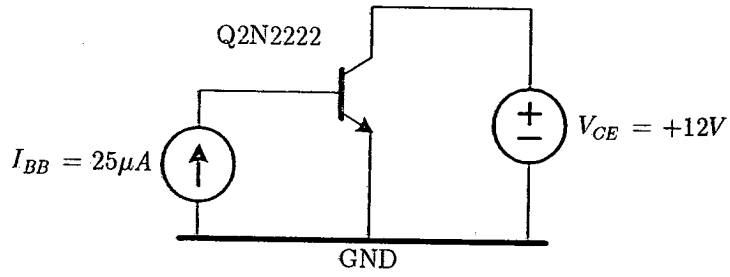
ตารางที่ 11

เบอร์ออปแอมป์	จากการทดลอง		จากการคำนวณ	
	$10V_{p-p}$	$20V_{p-p}$	$10V_{p-p}$	$20V_{p-p}$

4. ศึกษาเรื่องทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

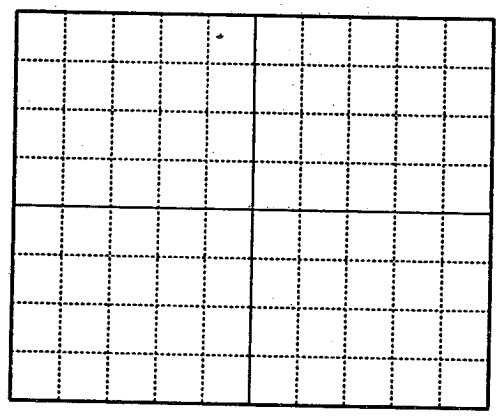
ตอนที่ 4.1 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

การทดลองตอนที่ 4.1.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์



ภาพที่ 39 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์โดยใช้โปรแกรม

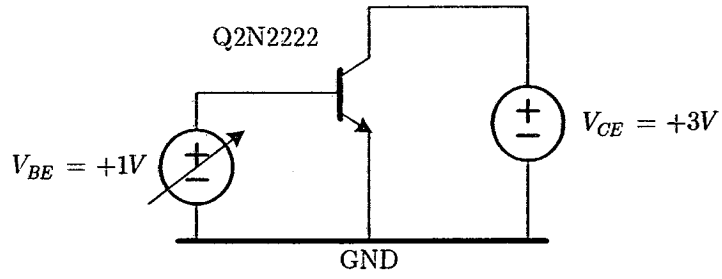
1) วาดวงจรตามภาพที่ 39 โดยใช้ไฟเลี้ยง $+12$ โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งเป็นชนิด NPN
2) ต่อแหล่งจ่ายกระแสดีซี $I_{BB} = 25\,\mu\text{A}$
3) ปรับเปลี่ยนค่าไฟเลี้ยงจาก 0 โวลต์ ไปจนถึง 12 โวลต์ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม
4) ปรับเปลี่ยนค่ากระแสดีซีจาก $I_{BB} = 25\,\mu\text{A}$ เรื่อยไปจนถึง $I_{BB} = 25\,\mu\text{A}$ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ $5\,\mu\text{A}$ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม
5) ใช้คำสั่ง probe พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่คอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ (I_C) กับแรงดันที่คอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) พร้อมกับบันทึกรูปกราฟที่ได้



ข้อสังเกต กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ณ $I_{BB} = 25\,\mu\text{A}$ จะอยู่ด้านบนสุด ส่วน $I_{BB} = 5\,\mu\text{A}$ จะอยู่ข้างล่างสุด

6) จับกลุ่มอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเข้าใจ

7) วาดวงจรใหม่ตามภาพที่ 40 ข้างล่าง



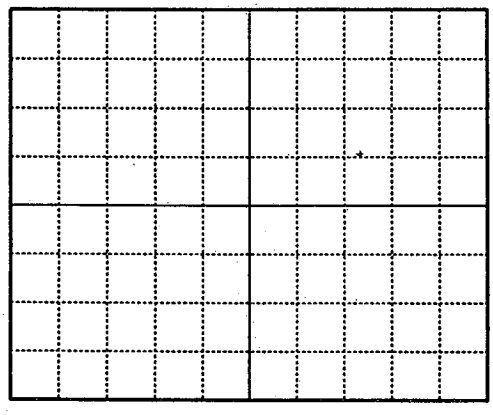
ภาพที่ 40 วงจรทดลองสำหรับข้อ 7

8) ป้อนแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง $V_{CE} = +3$ โวลต์ เข้าที่ขาคอลเลคเตอร์เทียบกราวด์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งเป็นชนิด NPN

9) ป้อนแหล่งจ่ายแรงดันไฟค่าเท่ากับ $V_{BE} = +1$ โวลต์ เข้าที่ขาเบสเทียบกราวด์ของทรานซิสเตอร์

10) จากนั้นปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟดีซีจาก $V_{BE} = 0$ โวลต์ เรื่อยไปจนถึง $V_{BE} = +1$ โวลต์ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม

11) ใช้คำสั่ง probe พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่เบสของทรานซิสเตอร์ (I_B) กับแรงดันที่เบส-อิมิตเตอร์ (V_{BE}) พร้อมกับบันทึกรูปกราฟที่ได้



12) จากนั้นเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง $V_{CE} = +4$ โวลต์ เข้าที่ขาคอลเลคเตอร์เทียบกราวด์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งเป็นชนิด NPN

13) แล้วทำซ้ำตามข้อที่ 9) ถึง 11) อีกครั้ง พล็อตผลตอบสนองลงในกราฟเดียวกับข้อ 11)

14) จากนั้นเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง $V_{CE} = +5$ โวลต์ เข้าที่ขาคอลเลคเตอร์เทียบกราวด์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งเป็นชนิด NPN

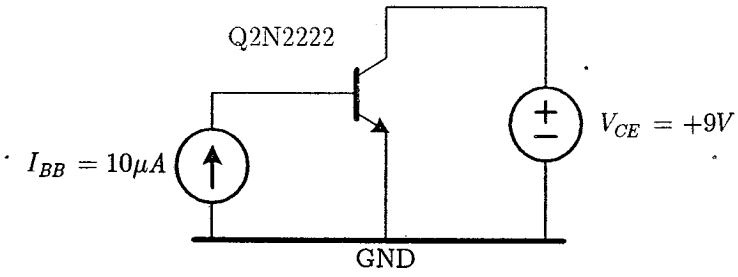
15) แล้วทำซ้ำตามข้อที่ 9) ถึง 11) อีกครั้ง พล็อตผลตอบสนองลงในกราฟเดียวกับข้อ 11)

ข้อสังเกต กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ณ $V_{CE} = +3$ โวลต์ จะได้กราฟตอบสนองที่อยู่ด้านซ้ายมือ ขณะที่ $V_{CE} = +5$ โวลต์ จะอยู่ด้านขวามือสุด

16) จับกลุ่มอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเข้าใจ

ตอนที่ 4.2 ศึกษาคุณสมบัติแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

การทดลองตอนที่ 4.2.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์



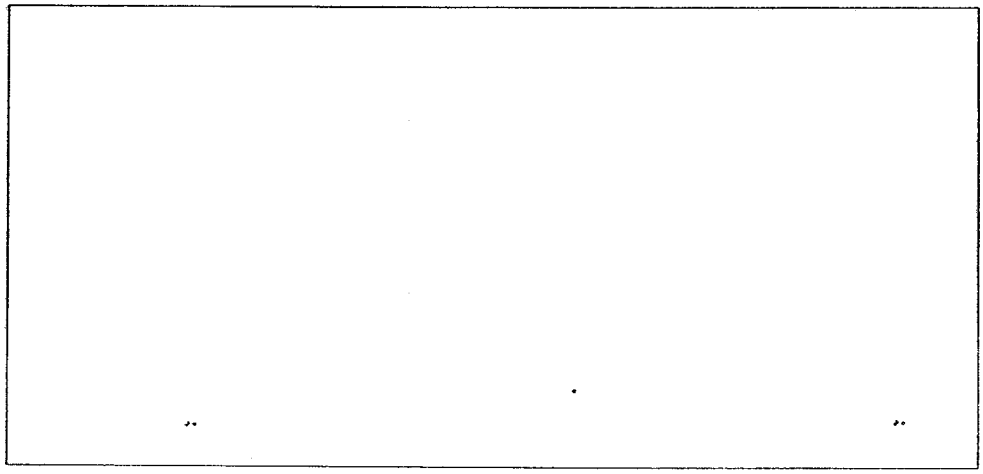
ภาพที่ 41 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์โดยใช้โปรแกรม

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 41 โดยใช้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง +9 โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งเป็นชนิด NPN
2) ต่อแหล่งจ่ายกระแสดีซี $I_{BB} = 10$ ไมโครแอมป์
3) ในหน้าต่าง Schematic ใช้เมนูคำสั่ง Analysis เลือก Examine Output
4) อ่านค่าตัวแปรที่เป็นส่วนประกอบของแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ พร้อมกับบันทึกค่าลงในตาราง

ตารางที่ 12

ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้	ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้
BetaDC		BetaAC	
GM		CBE	
RPI		CBC	
Ro		FT	

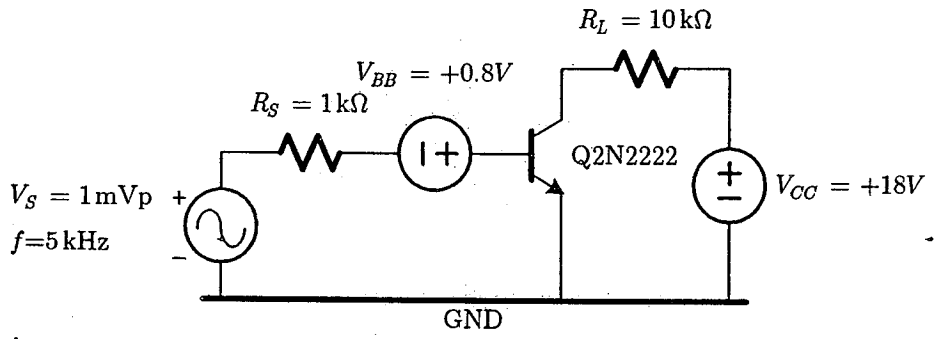
5) วาดแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์พร้อมระบุค่าลงในแบบจำลองให้สอดคล้องกับตารางข้างต้น



แบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์พร้อมค่าอุปกรณ์ (ในกรอบสี่เหลี่ยมข้างบน)

ตอนที่ 4.3 ศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วม

การทดลองตอนที่ 4.3.1 <u>การจำลอง</u>ค่าทางไฟตรงและฟังก์ชันส่งผ่านของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมอย่างง่าย



ภาพที่ 42 วงจรทดลองเพื่อศึกษาค่าทางไฟตรงและฟังก์ชันส่งผ่านของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมอย่างง่ายโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 42 โดยมีทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เบอร์ 2N2222 ความต้านทาน $R_S = 1\mathrm{k}\Omega$ และ $R_L = 10\,\mathrm{k}\Omega$
2) ป้อนแหล่งจ่ายไฟดีซี $V_{CC} = +18$ โวลต์ ตามรูป
3) ป้อนสัญญาณแบบไซน์ ที่มีขนาดเท่ากับ 1 มิลลิโวลต์ ความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ ที่มีแรงดันออฟเซทเท่ากับ 0.8 โวลต์ เข้าไปทางอินพุตของวงจรขยาย

4) ในหน้าต่าง Schematic ใช้เมนูคำสั่ง Analysis เลือก Examine Output เพื่อหาอัตราขยายทางดีซี (β_{DC}) ค่ากระแสเบส (I_B) และ ค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C)

$I_B =$ .....

$I_C =$ .....

$\beta_{DC} =$ .....

$V_{collector} =$ .....

5) อ่านค่าแรงดันที่เบส-อิมิตเตอร์ (V_{BE}) จาก Examine Output ได้ค่าเท่ากับ

$V_{BE} =$ ..... โวลต์

6) คำนวณค่ากระแสเบส (I_B) จากสมการต่อไปนี้

$$I_B = \frac{V_{offset} - V_{BE}}{R_S} = \frac{0.8 - V_{BE}}{1 \times 10^3} = \text{.....}$$

7) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากข้อ 4) และ ข้อ 6) มีค่าเท่ากันหรือต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

.....

.....

.....

.....

8) คำนวณค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) จากสมการต่อไปนี้

$I_C = \beta_{DC} I_B =$ .....

9) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากข้อ 4) และ ข้อ 8) มีค่าเท่ากันหรือต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

10) .....

.....

.....

.....

11) คำนวณแรงดันคอลเลคเตอร์เทียบกราวด์ (V_C) ได้โดยใช้ I_C ที่ได้จากข้อ 8) แทนลงไปในสูตร

$V_C = V_{CC} - I_C R_L = 18 - (\quad\quad) \times (10 \times 10^3) =$ .....โวลต์

12) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากข้อ 4) และ ข้อ 11) มีค่าเท่ากันหรือต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

.....

.....

.....

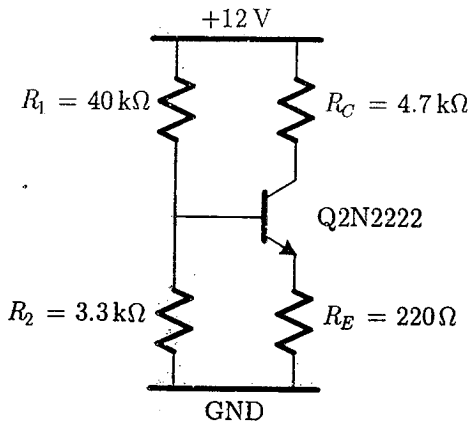
.....

13) เซทค่าฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function) ในโปรแกรม โดยการพิจารณาที่โหนดเอาต์พุต และชื่อของแหล่งกำเนิดทางอินพุต

14) บันทึกค่าความต้านทานทางอินพุตที่ได้จากโปรแกรม

R_{in} = ... โอห์ม

การทดลองตอนที่ 4.3.2 <u>การจำลอง</u>วงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแบบมี R_E และ C_E



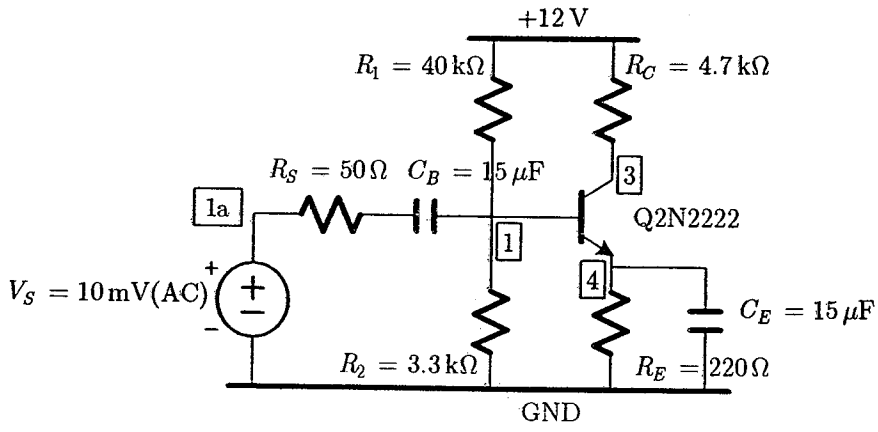
ภาพที่ 43 วงจรทดลองเพื่อศึกษาวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแบบมี R_E และ C_E โดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 43 โดยมีทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เบอร์ 2N2222 ความต้านทาน $R_1 = 40\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 3.3\,\text{k}\Omega$, $R_C = 4.7\,\text{k}\Omega$ และ $R_E = 220\,\Omega$

2) ใช้การวิเคราะห์ค่าทางไฟตรง (DC Analysis) บันทึกค่าลงในตารางข้างล่าง

ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรม	ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรม
β_{DC}		V_{CE}	
β_{AC}		V_{BE}	
β_{MAX}		I_C	
		I_B	

3) วาดวงจรเพิ่มเติมเป็นดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 วงจรทดลองสำหรับข้อ 3) โดยใช้โปรแกรม

4) ป้อนแหล่งจ่ายสัญญาณ ac ขนาด 10 มิลลิโวลต์ เข้าที่โหนด 1a

5) ใช้โปรแกรมหาความต้านทานทางอินพุตของวงจร

R_{in} = ... โอห์ม

6) ใช้โปรแกรมหาแรงดันสัญญาณ ac ที่ตำแหน่งต่างๆ

$V(3)$ = ...

$V(1)$ = ...

$V(1a)$ = ...

7) คำนวณหาอัตราขยายสัญญาณ V(3)/V(1) โดยใช้คำสั่ง probe

$\frac{V(3)}{V(1)}$ = ...

$\frac{V(3)}{V(1a)}$ = ...

8) ใช้คำสั่ง probe อ่านค่า $I(RC)$ และ $I(RS)$ ณ ความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ บันทึกค่า

กระแส ac ที่เกิดขึ้นทางเอาต์พุต $I(RC)$ = ...

กระแส ac ที่เกิดไหลทางอินพุต $I(RS)$ = ...

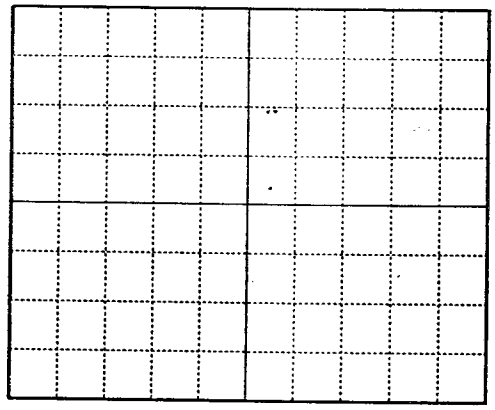
9) คำนวณหาอัตราขยายกระแส $I(RC)/I(RS)$

$$\frac{I(RC)}{I(RS)} = \text{.....}$$

10) เปลี่ยนแหล่งจ่ายสัญญาณจาก ac เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณแบบไซน์ มีขนาด 10 มิลลิโวลต์ เข้าที่โหนด 1a

11) สั่งให้โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณแบบชั่วขณะ (transient analysis)

12) ใช้คำสั่ง probe วัดแรงดันสัญญาณที่โหนด 3 โหนด 1 และ โหนด 1a พร้อมวาดรูปสัญญาณในโดเมนเวลา (time domain)



บันทึกค่าแบบ peak-to-peak

$V(3) = \text{.....}$

$V(1) = \text{.....}$

$V(1a) = \text{.....}$

13) สัญญาณทางเอาต์พุต $V(3)$ มีเฟสต่างจาก $V(1)$ และ $V(1a)$ อย่างไร

14) คำนวณหาอัตราขยายสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 12)

$$\frac{V(3)}{V(1)} = \text{.....}$$

$$\frac{V(3)}{V(1a)} = \text{.....}$$

15) เปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากข้อ 14) และข้อ 7) เหมือนกันหรือต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

16) ใช้โปรแกรมอ่านค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์โดยรวม (Total Harmonic Distortion: THD) บันทึกค่าที่ได้

$\%THD = \text{.....}$

17) ลบตัวเก็บประจุ C_E ที่ต่อขนาน R_E ออกจากโปรแกรม

18) ทำซ้ำข้อ 12) ถึง 16) อีกครั้ง

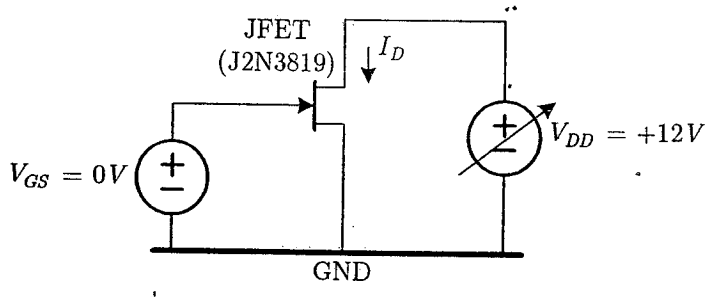
19) คำนวณหาอัตราขยายของวงจรจากสมการ

$$A_V = -\frac{R_C}{R_S + R_{in}} = -\frac{R_C}{R_{in} + (1+\beta_{DC})R_E} = \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

5. การทดลองเรื่องทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

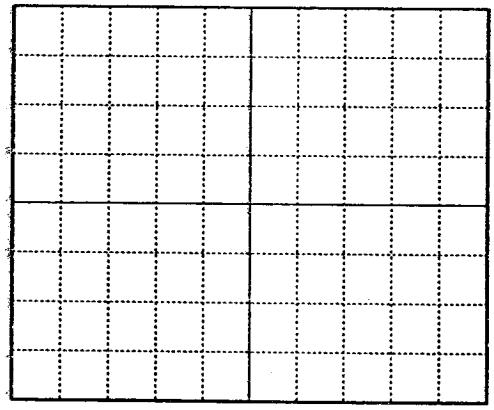
ตอนที่ 5.1 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

การทดลองตอนที่ 5.1.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติทางไฟตรงทาง<u>***เอาต์พุต***</u>ของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 45 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงทางเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 45 โดยใช้ $V_{DD} = +12$ โวลต์ และ $V_{GS} = 0$ โวลต์ ป้อนให้กับทรานซิสเตอร์แบบเจเฟ็ท (JFET) ชนิด N (*n*-channel) เบอร์ J2N3819
2) จากนั้นใช้คำสั่งในโปรแกรมปรับเปลี่ยนค่าแรงดันจาก $V_{DD} = +0$ โวลต์ เพิ่มขึ้นทีละ 0.01 โวลต์ ไปจนถึง $V_{DD} = +12$ โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม
3) ใช้การวิเคราะห์แบบไฟตรง (DC analysis) และใช้คำสั่ง probe วัดกระแสเดรน (I_D) เทียบกับ V_{DD} พร้อมวาดรูปสัญญาณ

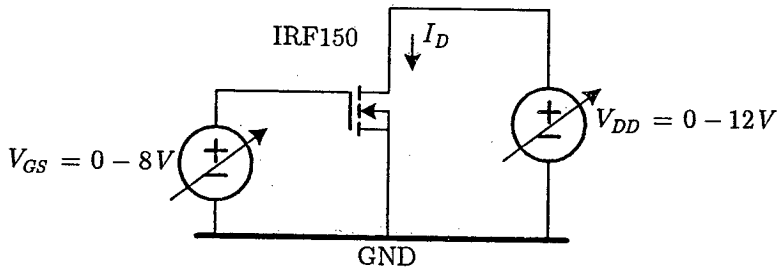


4) เปลี่ยนแรงดัน V_{GS} จาก 0 โวลต์ เป็น -1 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับทรานซิสเตอร์แบบเจเฟ็ท (JFET) ชนิด N (*n*-channel)
5) จากนั้นปรับเปลี่ยนค่าไฟเลี้ยง V_{DD} จาก 0 โวลต์ ไปจนถึง 12 โวลต์ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม ซ้ำอีกครั้ง
6) ใช้การวิเคราะห์แบบไฟตรง (DC analysis) และใช้คำสั่ง probe วัดกระแสเดรน (I_D) พร้อมวาดรูปสัญญาณลงไปในกราฟเดิม (ข้างต้น)
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4) ไปจนถึงขั้นตอนที่ 6) แต่เปลี่ยนค่า V_{GS} เป็น $-2, -3,$ และ -4 โวลต์ ตามลำดับ
8) จับกลุ่มอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเข้าใจ

ข้อสังเกต กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ณ $V_{GS} = 0$ โวลต์ จะอยู่ด้านบนสุด ส่วน $V_{GS} = -4$ โวลต์ จะอยู่ข้างล่างสุด

แบบฝึกหัดส่งท้ายชั่วโมง

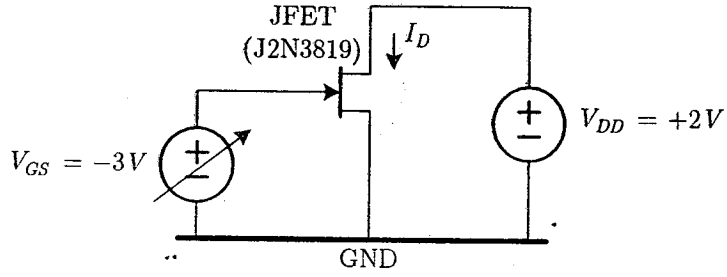
9) ให้นักศึกษาทดลองเปลี่ยนทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าจากเบอร์ J2N3819 เป็นเบอร์ใหม่ คือ IRF150 (Power MOSFET ชนิด Enhancement MOSFET) ตามภาพที่ 26



ภาพที่ 46 วงจรทดลองสำหรับข้อ 9) โดยใช้โปรแกรม

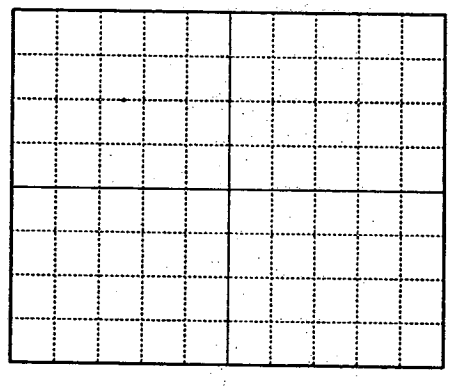
และใช้ $V_{DD} = 0 - 12$ โวลต์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 โวลต์) และ $V_{GS} = 0 - 8$ โวลต์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 โวลต์) ใช้กระบวนการทำซ้ำตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

การทดลองตอนที่ 5.1.2 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติทางไฟตรงทาง***<u>อินพุต</u>***ของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 47 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงทางอินพุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 47 โดยใช้ $V_{GS} = -3$ โวลต์ และ $V_{DD} = +2$ โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบเจเฟ็ท (JFET) ชนิด N (*n*-channel) เบอร์ J2N3819
2) จากนั้นใช้คำสั่งในโปรแกรมปรับเปลี่ยนค่าแรงดันจาก $V_{GS} = -3$ โวลต์ เพิ่มขึ้นทีละ 0.01 โวลต์ ไปจนถึง $V_{GS} = 0$ โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม
3) ใช้การวิเคราะห์แบบไฟตรง (DC analysis) และใช้คำสั่ง probe วัดกระแสเดรน (I_D) เทียบกับ V_{GS} พร้อมวาดรูปสัญญาณ



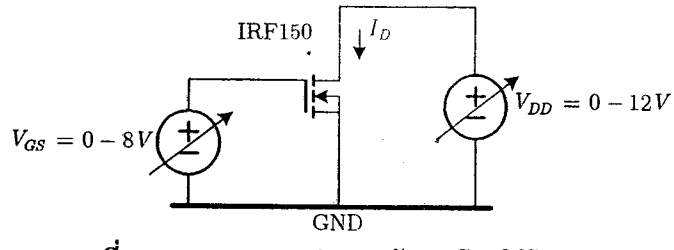
4) เปลี่ยนแรงดัน V_{DD} จาก +2 โวลต์ เป็น +6 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับทรานซิสเตอร์แบบเจเฟ็ท (JFET) ชนิด N (*n*-channel)
5) จากนั้นใช้คำสั่งในโปรแกรมปรับเปลี่ยนค่าแรงดันจาก $V_{GS} = -3$ โวลต์ เพิ่มขึ้นทีละ 0.01 โวลต์ ไปจนถึง $V_{GS} = 0$ โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม ซ้ำอีกครั้ง

6) ใช้การวิเคราะห์แบบไฟตรง (DC analysis) และใช้คำสั่ง probe วัดกระแสเดรน (I_D) เทียบกับ V_{GS} พร้อมวาดรูปสัญญาณลงไปในกราฟเดิม (ข้างต้น)
7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4) ไปจนถึงขั้นตอนที่ 6) แต่เปลี่ยนค่า V_{DD} เป็น $+10$ โวลต์
8) จับกลุ่มอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเข้าใจ

ข้อสังเกต กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ ณ $V_{GS} = 0$ โวลต์ จะอยู่ด้านบนสุด ส่วน $V_{GS} = -4$ โวลต์ จะอยู่ข้างล่างสุด

แบบฝึกหัดส่งท้ายชั่วโมง

9) ให้นักศึกษาทดลองเปลี่ยนทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าจากเบอร์ J2N3819 เป็นเบอร์ใหม่ คือ IRF150 (Power MOSFETชนิด Enhancement MOSFET) ตามภาพที่ 28

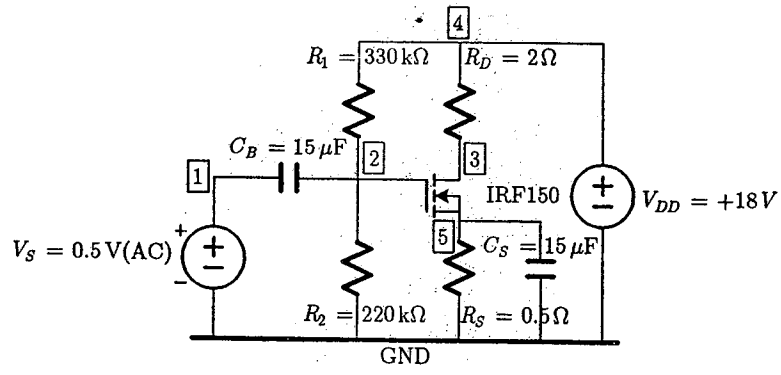


ภาพที่ 48 วงจรทดลองสำหรับข้อ 9) โดยใช้โปรแกรม

และใช้ $V_{DD} = 0 - 12$ โวลต์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.01 โวลต์) และ $V_{GS} = 0 - 8$ โวลต์ (เพิ่มขึ้นครั้งละ 1 โวลต์) ใช้กระบวนการทำซ้ำตามที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

ตอนที่ 5.2 ศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วม

การทดลองตอนที่ 5.2.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่าย ac เป็นสัญญาณอินพุต



ภาพที่ 49 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่าย ac เป็นสัญญาณอินพุตโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 49 โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (ชนิด *n*-channel Enhancement MOSFET) ความต้านทาน $R_1 = 330\text{k}\Omega$, $R_2 = 220\text{k}\Omega$, $R_D = 2\Omega$ และ $R_S = 0.5\Omega$ ส่วนตัวเก็บประจุมีค่า $C_S = 15\,\mu\text{F}$
2) ใช้แหล่งจ่ายไฟ $V_{DD} = +18$ โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟ็ท (MOSFET) ชนิด N (*n*-channel) เบอร์ IRF150
3) ป้อนแหล่งจ่ายสัญญาณ ac ขนาด 0.5 โวลต์ เข้าที่โหนด 1
4) ใช้การวิเคราะห์ค่าทางไฟตรง (DC Analysis) บันทึกค่าลงในตารางข้างล่าง

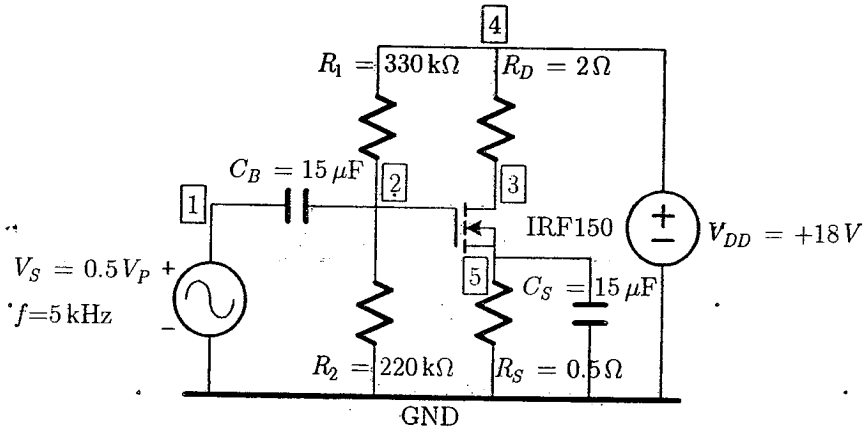
ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรม	ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรม
V_{DS}		V_{TH}	
V_{GS}		I_D	
G_m (transconductance)		R_G (gate resistance)	

5) ใช้การวิเคราะห์ค่าทาง ac (AC Analysis) เลือกชนิดของกราฟการตอบสนองแบบเชิงเส้น (liner) โดยเซทความถี่เริ่มต้นเท่ากับ 0 เฮิรตซ์ ความถี่สุดท้ายเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์ มีจำนวนจุดทั้งสิ้น 1,000 จุด (หรือค่าอื่นตามความเหมาะสม)
6) ใช้คำสั่ง probe อ่านค่าแรงดันสัญญาณที่โหนด 1 โหนด 3 และอ่านค่ากระแสสัญญาณที่เดรน I_D (ทั้งหมดให้อ่านค่า ณ ความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์) ได้ค่าเป็นดังนี้
   แรงดันสัญญาณ ac ทางอินพุต อ่านค่าได้ $v(1) =$ .....
   แรงดันสัญญาณ ac ทางที่เดรน อ่านค่าได้ $v(3) =$ .....
   กระแสสัญญาณ ac ทางที่เดรน อ่านค่าได้ $i_{R_D} =$ .....
7) บันทึกผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้ลงในกราฟข้างล่าง

8) จากข้อมูลที่ได้ในข้อ 6) คำนวณอัตราขยาย A_v ได้เท่ากับ

$$A_v = \frac{v(3)}{v_i} = \frac{v(3)}{v(1)} = \text{.....}$$

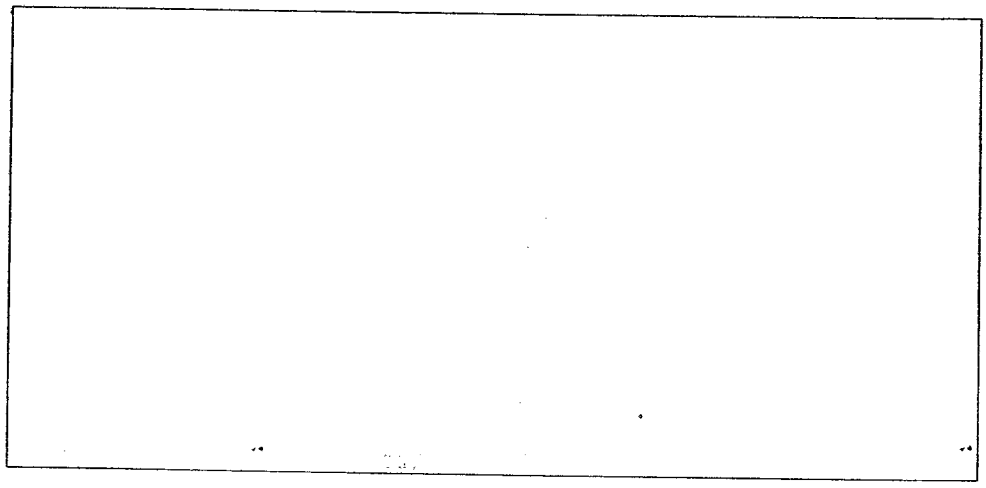
การทดลองตอนที่ 5.2.2 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่ายรูปไซน์ เป็นสัญญาณอินุต



ภาพที่ 50 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่ายรูปไซน์ เป็นสัญญาณอินุตโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 50 โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (ชนิด *n*-channel Enhancement MOSFET) ความต้านทาน $R_1 = 330\,\text{k}\Omega$, $R_2 = 220\,\text{k}\Omega$, $R_D = 2\Omega$ และ $R_S = 0.5\Omega$ ส่วนตัวเก็บประจุมีค่า $C_S = 15\,\mu\text{F}$
2) ใช้แหล่งจ่ายไฟ $V_{DD} = +12$ โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟ็ท (MOSFET) ชนิด N (*n*-channel) เบอร์ IRF150
3) ป้อนแหล่งจ่ายสัญญาณรูปไซน์ (sinusoidal) ขนาด 0.5 โวลต์ ความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ เข้าที่โหนด 1
4) ใช้การวิเคราะห์ค่าแบบชั่วขณะ (Transient Analysis)
   โดยอาจกำหนด เช่น Final Time = 2 ms
   Print Step = 0.02 ms

5) ใช้คำสั่ง probe พล็อตกราฟแรงดันสัญญาณที่โหนด 1 โหนด 3 และกระแสสัญญาณที่เดรน I_D วาดผลตอบสนองทางเวลา (time domain) ที่ได้



จากผลตอบสนองทางเวลา (time domain) ที่ได้ข้างต้น แรงดันสัญญาณที่โหนด 1 กับแรงดันที่โหนด 3 มีความต่างเฟสกันเท่าไร จงอธิบาย

.....

.....

.....

.....

6) บันทึกค่าแรงดันสัญญาณที่โหนด 1 โหนด 3 และอ่านค่ากระแสสัญญาณที่เดรน I_D (ทั้งหมดให้อ่านค่า ณ ความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ และอ่านแบบ peak-to-peak) ได้ค่าเป็นดังนี้

แรงดันสัญญาณ ac ทางอินพุต อ่านค่าได้ $v(1) =$ .....

แรงดันสัญญาณ ac ทางที่เดรน อ่านค่าได้ $v(3) =$ .....

กระแสสัญญาณ ac ทางที่เดรน อ่านค่าได้ $i_{R_D} =$ .....

7) จากข้อมูลที่ได้ในข้อ 6) คำนวณอัตราขยาย A_v ได้เท่ากับ

$$A_v = \frac{v(3)}{v_i} = \frac{v(3)}{v(1)} = ...$$

8) ให้นักศึกษาเปรียบเทียบอัตราขยายที่ได้จากข้อ 7) กับ ข้อ 8) **(ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมาเรื่องการ<u>จำลอง</u>คุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้ <u>แหล่งจ่าย ac</u> เป็นสัญญาณอินพุต)**

9) ใช้โปรแกรมอ่านค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์โดยรวม (Total Harmonic Distortion: THD) บันทึกค่าที่ได้

$\%THD =$ .....

6. กล่าวสรุป

ในบทนี้ เราได้ทราบถึงวิธีการดำเนินการวิจัยโดยพยายามศึกษาคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด ออปแอมป์ และลักษณะวงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์และแบบสนามไฟฟ้า เป็นต้น ผ่านทางการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และมีบางการทดลองสามารถเทียบผลกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ (เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัดและทดสอบในห้องปฏิบัติการ) จะเห็นได้ว่าการดำเนินการวิจัยจะช่วยให้ผู้ที่ต้องการศึกษาหรือนักศึกษาที่ต้องการผลวิจัย ลำดับขั้นตอนไปใช้งานในการทำความเข้าใจอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี