การใชโปรแกรมวิเคราะหทางวิศวกรรมควบคุมกับการปฏิบัติจริงในหองปฏิบัติการไปสูความเขาใจในเรื่องของอิเล็กทรอนิกสวิศวกรรม

โดย

เชิงชาย สมประชา

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร

ประจำปงบประมาณ 2556

The Use of Engineering Program coupled with a Practice to Understanding in the Subject of Engineering Electronics

By

Chernghchai Sompracha

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal year 2012

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือจาก นักศึกษา และขอขอบคุณนักศึกษา วิศวกรรมศาสตร์ ทุกคน ที่ให้ข้อมูลซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิจัย อันจะนำไปสู่การปรับปรุงการจัดการเรียนการสอนในภาคการศึกษาถัดไปให้ มีประสิทธิผลยิ่งขึ้น รวมทั้งเพื่อนอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการค้นคว้าวิจัย ที่อำนวยความสะดวก จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

ตุลาคม 2556

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : L05/2/2556
ชื่อโครงการ : การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมควบคู่กับทางปฏิบัติจริงในห้องปฏิบัติการไปสู่ความเข้าใจในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม
ชื่อนักวิจัย : เชิงชาย สมประชา

โครงการวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการเรียนของนักศึกษาระดับปริญญาตรี ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ เพื่อปรับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมให้กับนักศึกษา วิธีดำเนินการวิจัยได้พยายามให้สอดคล้องกับเนื้อหาทางทฤษฎี เพื่อเป็นแนวทางศึกษาให้กับนักศึกษาได้ทำความเข้าใจบทเรียน การวิจัยได้ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเวอร์ชันนักศึกษา (student version หรือ demo version) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จากเวฟไซท์ผู้ผลิตซอฟท์แวร์ (software) หรือที่ (http://www. cadence.com/products/orcad/pages/downloads.aspx)

วิธีดำเนินการวิจัยได้แบ่งแนวทางออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่ศึกษาโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมและส่วนที่ใช้การทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื้อหาที่ใช้ประกอบด้วย การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไดโอด เช่น คุณสมบัติไฟตรง คุณสมบัติการสวิทซ์ คุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำ เป็นต้น การทดลองเรื่องคุณสมบัติบางประการของออปแอมป์ที่แตกต่างจากอุดมคติ เช่น กระแสไบอัสด้านเข้า แรงดันออฟเซททางอินพุตและผลกระทบ การแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ อัตราสลูว์และแบนด์วิดท์กำลัง เป็นต้น การทดลองเรื่องทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ เช่น คุณสมบัติทางไฟตรง แบบจำลองไฮบริด ฟังก์ชันส่งผ่านและอัตราขยายสัญญาณ เป็นต้น การทดลองเรื่องทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า เช่น คุณสมบัติทางไฟตรงทางอินพุต -เอาต์พุต และวงจรขยายสัญญาณ เป็นต้น

ผลของการดำเนินการวิจัยทำให้นักศึกษามีความสนใจและเข้าใจในเนื้อหามากยิ่งขึ้น สามารถปรับพื้นฐานความรู้ให้กับนักศึกษาได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้จัดเตรียมแบบทดสอบก่อนการเรียน เพื่อให้ทราบข้อจำกัดของนักศึกษาแต่ละคน อันจะนำมาซึ่งการปรับแผนการสอนในบทเรียนถัดไป

E-mail : cherngche.som@rmutr.ac.th
ระยะเวลาโครงการ : 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

Abstract

Code of project : L05/2/2556
Project name : The Use of Engineering Program coupled with a Practice to Understanding in the Subject of Engineering Electronics
Researcher name : Cherngchai Sompracha

This research project is the academic research for undergraduate student in engineering, faculty of engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin (RMUTR). The research is to improve the basic knowledge of B.Eng. student about the subject of electronic engineering. The research methodologies have tried to be consistent with theoretical contents, guiding the student to understand the lessons. The student software can be downloaded at the following http://www.cadence.com/products/orcad/pages/downloads.aspx.

Two major methodologies can be provided in this project, including the software and hardware parts. The contents are focused on the principal properties of diode, the some deviated properties of operational amplifier (OP-AMP), bipolar and filed effect transistors. For more details, the many diodes are studied about DC, switching, and small signal characteristics. An OP-AMP is concerned about an input bias current, offset input voltage, its effect and correction, slew rate, and power bandwidth. With the use of bipolar junction transistor (BJT), we present about the DC-characteristic, hybrid model, transfer function, and gain. Finally, the input and output characteristics and amplifier's gain are then discussed.

With the benefits of the research project, they make student the attention and understanding of the subject contents. The lecturers can improve the students with the basic knowledge based on the research project. In addition, the researcher has also prepared a pre-test study to determine the limits of each student for planning the next lesson.

E-mail : cherngche.som@rmutr.ac.th
Period of project : 1 October 2012 - 30 September 2013

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญภาพ.....ช

บทที่ 1 บทนำ.....1
1. กล่าวนำ.....1
2. หลักการและเหตุผล.....1
3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
4. คำถามการวิจัย.....2
5. นิยามศัพท์เฉพาะ.....3
6. ขอบเขตการวิจัย.....4
7. ผลการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....4
8. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....5
9. แนวทางในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์.....5
10. กล่าวสรุป.....5

บทที่ 2 การใช้งานโปรแกรมเบื้องต้นและทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....6
1. กล่าวนำ.....6
2. ข้อตกลงที่สำคัญของการงานโปรแกรมเบื้องต้น.....7
3. ทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญ.....20
4. กล่าวสรุป.....46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....47
1. กล่าวนำ.....47

2. ศึกษาเรื่องคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไดโอด.....47
3. การทดลองเรื่องคุณลักษณะบางประการของออฟแอมป์ที่แตกต่างจากอุดมคติ.....56
4. การทดลองเรื่องทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์.....68
5. การทดลองเรื่องทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า.....76
6. กล่าวสรุป.....83

บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ข้อมูล.....84
1. กล่าวนำ.....84
2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....84
3. กล่าวสรุป.....93

บทที่ 5 บทสรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ.....95
1. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล.....95
2. ข้อเสนอแนะในการวิจัย.....95
3. ปัญหาที่พบในการวิจัย.....96

บรรณานุกรม.....97
ภาคผนวก.....98
ประวัติผู้วิจัย.....104

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1 ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม.....7
2 ตัวอย่างหน่วยมาตรฐานทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม 11
3 ตารางเรียงเบอร์ไดโอดตามค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัว.....54
4 ตารางเรียงเบอร์ไดโอดตามค่าแรงดันเบรกดาวน์.....54
5 ค่ากระแสที่ใช้ในการทดลอง.....54

6 ขนาดและเฟสของสัญญาณทางอินพุตและเอาต์พุต.....55
7 67
8 67
9 67
10 67
11 67
12 70

สารบัญรูป

ภาพที่ **หน้า**

1 สัญลักษณ์ของไดโอดในวงจรไฟฟ้า.....21
2 ปรากฏการณ์เบรกดาวน์ของไดโอด.....24
3 สัญลักษณ์และตัวอย่างการใช้งานซีเนอร์ไดโอดเป็นแรงดันอ้างอิง 9 โวลต์.....24
4 คุณสมบัติทางสวิทช์ของไดโอด.....25
5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสของไดโอดที่จำกัดอยู่ในช่วงที่เล็กมากช่วงหนึ่ง.....27
6 แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำของไดโอด.....27
7 ตัวอย่างวงจรที่ใช้แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำของไดโอดเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่.....28
8 ออปแอมป์ 29

9 การวัดอัตราสลูว์ของออปแอมป์โดยอาศัยการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันได 32
10 ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN และ PNP 33
11 การไบอัสในสถานะแอกทีฟไปข้างหน้าสำหรับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN 34
12 การไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN ในสถานะอิ่มตัวอย่างอ่อน.....36
13 การไบอัสในสถานะแอกทีฟไปข้างหน้าสำหรับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP 37
14 การไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP ในสถานะอิ่มตัวอย่างอ่อน.....38
15 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กแบบไฮบริดพายของทรานซิสเตอร์ชนิด.....39
16 ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์.....40
17 ภาคตัดขวางของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท NMOS 41
18 ภาคตัดขวางของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท PMOS.....42
19 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่รวมผลของการแปรผันความยาวช่องกระแส 44
20 ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า.....45
21 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด.....47

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

22 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด.....48
23 ตัวอย่างภาพที่ปรากฏบนหน้าจอออสซิลโลสโคปขณะไดโอดได้รับไบอัสไปข้างหน้า.....49
24 ตัวอย่างภาพที่ปรากฏบนหน้าจอออสซิลโลสโคปขณะไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ.....50
25 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด.....51
26 การกำหนดค่า V^+ และ V^- ของสัญญาณรูปเหลี่ยม.....51
27 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอด.....53
28 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอดทางปฏิบัติ.....53
29 วงจรออปแอมป์ 56
30 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ 57
31 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ทางปฏิบัติ..... 58
32 วงจรทดลองเพื่อศึกษาผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจร ในทางปฏิบัติโดยใช้โปรแกรม.....59

33 วงจรทดลองเพื่อศึกษาผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติโดยการต่อวงจรจริง 60
34 วงจรทดลองเพื่อศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติโดยใช้โปรแกรม.....61
35 วงจรทดลองเพื่อศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติโดยการต่อวงจรจริง.....62
36 วงจรทดลองเพื่อศึกษาอัตราสลูว์.....63
37 ลักษณะวงจรที่ใช้ศึกษาแบนด์วิดท์กำลังโดยใช้โปรแกรม.....65
38 ลักษณะวงจรที่ใช้ศึกษาแบนด์วิดท์กำลังโดยการต่อวงจรจริง 66
39 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์โดยใช้โปรแกรม.....68
40 วงจรทดลองสำหรับข้อ 7.....69

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

41 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์โดยใช้โปรแกรม.....70
42 วงจรทดลองเพื่อศึกษาค่าทางไฟตรงและฟังก์ชันส่งผ่านของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมอย่างง่ายโดยใช้โปรแกรม.....71
43 วงจรทดลองเพื่อศึกษาวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแบบมี R_E และ C_E โดยใช้โปรแกรม 73
44 วงจรทดลองสำหรับข้อ 3) โดยใช้โปรแกรม.....74
39 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์โดยใช้โปรแกรม 68
40 วงจรทดลองสำหรับข้อ 7.....69
41 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์โดยใช้โปรแกรม.....70
42 วงจรทดลองเพื่อศึกษาค่าทางไฟตรงและฟังก์ชันส่งผ่านของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมอย่างง่ายโดยใช้โปรแกรม.....71
43 วงจรทดลองเพื่อศึกษาวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแบบมี R_E และ C_E โดยใช้โปรแกรม 73
44 วงจรทดลองสำหรับข้อ 3) โดยใช้โปรแกรม.....74
45 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงทางเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าโดยใช้

โปรแกรม 76
46 วงจรทดลองสำหรับข้อ 9) โดยใช้โปรแกรม.....77
47 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงทางอินพุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม.....78
48 วงจรทดลองสำหรับข้อ 9) โดยใช้โปรแกรม.....79
49 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่าย ac เป็นสัญญาณอินพุตโดยใช้โปรแกรม
.....79
50 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่ายรูปไซน์ เป็นสัญญาณอินุตโดยใช้โปรแกรม.....81

บทที่ 1
บทนำ

1. กล่าวนำ

การเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เป็นการสอนที่ มุ่งเน้นให้นักศึกษาได้เข้าใ จทฤษฎีอย่างถ่องแท้ สอนให้คิดอย่างเป็นระบบ เป็นขั้นตอนแล้วนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับสถานการณ์ต่างๆ โดยอาศัยองค์ความรู้พื้นฐาน แม้ว่าวิศวกรรมศาสตร์มีหลายแขนงสาข าวิชา บางรายวิชาสอนทางทฤษฎีเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอที่จะทำให้นักศึกษา เข้าใจได้เป็นอย่างดี ขณะบางรายวิชานั้นต้องมีรายวิชาปฏิบัติการร่วมด้วยจึงจะเกิดผลสัมฤทธิ์ในการเรียนการสอน โดยวิชาปฏิบัติการนั้นจะมีความสอดคล้องกับรายวิชาที่สอนทางทฤษฎี การปฏิบัติในห้องปฏิบั ติการอาจเป็นส่วนหนึ่งของทฤษฎีหรืออาจจะเป็นราย วิชาที่แยกออกจากกันก็ได้ โครงการวิจัยเรื่อง “**การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมควบคู่กับทางปฏิบัติจริงในห้องปฏิบัติการไปสู่ความเข้าใจในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม** ” นี้ เป็นโครงการวิจัยฯ ที่มุ่งเน้นให้ นักศึกษ าใช้ความรู้ ในห้องเรียนทฤษฎีซึ่งมี การยกตัวอย่าง พร้อมทั้งแสดงวิธีการ คำนวณ จนได้คำตอบสุดท้าย การที่ลงมือปฏิบัติอาจจะโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมหรือโดยการทดลองต่ออุปกรณ์จริงแล้ววัดผลการทดลองด้วยเครื่องมือวัดและทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้ จะช่วยให้นักศึกษาเข้ าใจการทำงานของอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี

2. หลักการและเหตุผล

ด้วยนักศึกษา ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมวัดคุม วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ และวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ เป็นนักศึกษาที่ต้อง เรียนรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ซึ่งเป็นวิชาพื้นฐานที่มีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวิศวกรทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ -โทรคมนาคม เพราะจะทำให้ ทราบและ เข้าใจคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจร [1-7] รวมไปถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรไฟฟ้าอื่นๆ ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม แต่ในปัจจุบัน พบว่ามีบางครั้ง สาขาวิชาฯ ได้จัดให้นักศึกษาเรียนวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมควบคู่ไปกับการเรียนวิชาทฤษฎีวงจรไฟฟ้าในภาคการศึกษาเดียวกัน ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเรียนการสอนของทั้งอาจารย์เองและนักศึกษา เพราะรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมต้อง ใช้องค์ความรู้พื้นฐานของการเรียนวิชาทฤษฎีวงจรไฟฟ้ามาช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์และช่วยในแก้ปัญหา-วิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีผลกระทบโดยตรงกับนักศึกษา กล่าวคือ นักศึกษามีผลการเรียน ในรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ไม่ดีเท่าที่ควร จะเป็น เมื่อพิจารณาถึงความพร้อมของห้องปฏิบัติการแล้ว ก็พบอีกว่า ชุดทดลองและเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการมีจำนวนไม่เพียงพอกับจำนวนนักศึกษา การทดลองจริงบางอย่างยากแก่การนำเสนอด้วยการปฏิบัติจริงเพราะต้องใช้เครื่องมือที่มีสมรรถนะสูงและใช้เสียเวลาในการปฏิบัติจริงม ากกว่าจะได้คำตอบที่ถูกต้อง ให้ ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับทางทฤษฎี อีกทั้ง การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรบางอย่างไม่สามารถทำได้ จริงในปฏิบัติ ด้วย

ข้อจำกัดนี้เอง จึงได้มีความพยายามที่จะ นำเอาโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมมาช่วยในการจำลอง [8-10] การทำงานของอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ปัญหาอีกประการหนึ่งที่เกิดขึ้น จริง คือ นักศึกษาที่ลงทะเบียนเรียน ในรายวิชานี้ เดิมทีมาจากต่างสถาบันการศึกษา นั่นหมายความว่า นักศึกษามีพื้นฐาน ความรู้และ การใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกันด้วย การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมสนับสนุนการเรียนรู้ จะช่วยให้ช่องว่างของความรู้ที่ต่างกันลดน้อยลง เพราะนักศึกษาสามารถหัดใช้โปรแกรมเพิ่มเติมนอกเวลาเรียนที่บ้านได้ แต่ด้วยทัศนคติของนักศึกษาที่เห็นว่าการใช้โปรแกรม วิเคราะห์นั้นค่อนข้างยากต่อการทำความเข้าใจและอาจจะยากกว่าการปฏิบัติจริง อีกด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ว่าพื้นฐานการใช้โปรแกรมอาจจะไม่ดีเท่าที่ควร รวมไปถึงบทเรียนยากแก่การทำความเข้าใจ

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จะสามารถตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานและสามารถปรับฐานความรู้ให้กับนักศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.1 เพื่อให้รู้จักการใช้โปรแกรมทางวิศวกรรม (student version) ในการจำลองการทำงานอันจะเป็นพื้นฐานในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าในระดับที่สูงขึ้น

3.2 เพื่อใช้โปรแกรมทางวิศวกรรมช่วยวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คุณสมบัติทางไฟตรง (DC characteristic) และคุณสมบัติทางไฟสลับ (AC characteristic) เป็นต้น

3.3 เพื่อนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียนในห้องเรียน มาต่อเป็นวงจรจริงแล้วทดสอบคุณสมบัติทางไฟตรงและไฟสลับ

3.4 เพื่อให้รู้จักการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดพื้นฐานในระดับห้องปฏิบัติการ

3.5 เพื่อให้รู้จักนำเอาคุณสมบัติที่ได้จากการใช้โปรแกรมและจากการทดสอบมาเปรียบเทียบความเหมือน ความแตกต่าง จากคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ในทางทฤษฎี

3.6 เพื่อฝึกให้นักศึกษาได้รู้จักคิด วิเคราะห์ สังเคราะห์ปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากการปฏิบัติอันจะนำไปสู่ความเข้าใจองค์ความรู้ทางทฤษฎีมากยิ่งขึ้น

3.7 เพื่อปรับเปลี่ยนทัศนคติของนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ให้รู้สึกชอบและสนุกกับการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ควบคู่กับการปฏิบัติจริงในห้องปฏิบัติการ

4. คำถามการวิจัย

4.1 การจำลองการทำงานของอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สามารถทำได้หรือไม่อย่างไร

4.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดและทดสอบ กับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีความสอดคล้องกันหรือไม่ อย่างไร

4.3 การจำลองการทำงานของอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม วิเคราะห์ทางวิศวกรรมมีขั้นตอนการเป็นอย่างไร เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการวัดด้วยเครื่องมือวัดและทดสอบจริง

4.4 ทำอย่างไรให้การจำลองการทำงานของวงจรมีความน่าเชื่อถือเสมือนกับการต่อวงจรจริง

4.5 ผู้ออกแบบมีวิธีการตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดจากการเขียนวงจรในโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือไม่ อย่างไร

4.6 จงอธิบายข้อดีและข้อเสียของการจำลองการทำงานของอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์

4.7 การต่ออุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์จริงมีข้อดีและข้อเสียอย่างไร จงอธิบาย

5. นิยามศัพท์เฉพาะ

5.1 โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง โปรแกรมที่ใช้ ในการจำลองการทำงานของอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ทราบคุณสมบัติต่างๆ ของอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยไม่มีค่าใช้จ่ายในการจำลองการทำงานแต่อย่างใด ทำให้สะดวกต่อการศึกษาพฤติกรรมและผลตอบสนองต่างๆ ได้

5.2 คุณสมบัติทางไฟตรง หมายถึง ผลตอบสนองของอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกรณีที่มีเฉพาะไฟตรงต่อเข้าไปในวงจร

5.3 คุณสมบัติทางไฟสลับ หมายถึง ผลตอบสนองของอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในกรณีที่มีเฉพาะไฟ สลับต่อเข้าไปในวงจร ส่วนแรงดันไฟตรงนั้นอาจจะมีหรือไม่มีในวงจรก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับว่ามีอุปกรณ์แอกทีฟต่อใช้ในวงจรหรือไม่

5.4 ผลตอบสนองแบบชั่วขณะ หมายถึง ผลตอบสนองที่เกิ ดขึ้นจากพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำและหรือตัวเก็บประจุ ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา

5.5 ผลตอบสนองในสภาวะคงตัว หมายถึง ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากพลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำและหรือตัวเก็บประจุ ที่มีการกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือแหล่งจ่ายที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาก็ได้ โดยผลตอบสนองที่ได้จะขึ้นกับชนิดและลักษณะของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับวงจร

5.6 การไบอัส หมายถึง การจ่ายแรงดันและกระแสให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ทำงานในย่านตามที่ต้องการ

5.7 ไดโอด คือ ไดโอดจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ไดโอดเป็นอุปกรณ์ประเภท 2 ขั้ว ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ต่อเชื่อมเข้าหากัน

5.8 ออปแอมป์ คือ วงจรขยายเชิงเนินการ (Operational amplifier) หรือเรียกสั้นๆว่า ออปแอมป์ (Op-AMP) จัดเป็นอุปก รณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายและได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะใช้งานง่าย มีเสถียรภาพทางวงจรสูง เราสามารถนำเอาออปแอมป์ไปใช้เป็นส่วนประกอบหลักในวงจรเชิงเส้น เช่น วงจรขยายผลต่างของสัญญาณ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำเอาออปแอมป์ไปใช้ในวงจรไม่เชิ งเส้น เช่น วงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) วงจรกำเนิดสัญญาณ (signal oscillator) วงจรปรับค่าขยายอัตโนมัติ (automatic gain control: AGC) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์

5.9 ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่าร์ คือ เป็นอุปกรณ์ที่มี 3 ขา ประกอบด้วยรอยต่อพี -เอ็น 2 ชุดต่อเข้าหากันแบบหั นหลังชนกัน (back-to-back) ประกอบด้วยพื้นที่สารกึ่งตัวนำสามส่วนคือ อิมิตเตอร์ (emitter: E) เบส (base: B) และคอลเลกเตอร์ (collector: C)

5.10 ทรานซิสเตอร์แบบเฟท คือ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือที่เรียกกันว่า **“มอสเฟต”** ย่อมาจากคำว่า **M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield-**E**ffect **T**ransistor (MOSFET) ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะในกระบวนการผลิตสมัยใหม่สามารถบรรจุวงจรรวมทางด้านดิจิตอลที่มีความซับซ้อนให้อยู่บนฐานรองเดียวกันได้ จึงทำให้ได้วงจรรวมขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้ว มอสเฟต แบ่งได้สองประเภทคือ NMOS (N-channel MOSFET) และ PMOS (P-channel MOSFET) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 4 ขา ประกอบด้วย ขาเกท (gate: G) ขาเดรน (drain: D) ขาซอร์ส (source: S) และ ขาบอดี้ (body: B)

6. ขอบเขตการวิจัย

6.1 เลือกใช้โจทย์ตัวอย่างจากห้องเรียนทฤษฎีมาเป็นโจทย์ตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

6.2 ใช้การจำลองการทำงานของอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

6.3 ใช้การวัด-ทดสอบอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องมือในห้องปฏิบัติการจริง

7. ผลการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

7.1 ได้รูปแบบการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมศาสตร์ร่วมกับการทดลองปฏิบัติจริงในห้องเรียน

7.2 นักศึกษาที่เรียนในวิชานี้ที่มีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมควบคู่กับการปฏิบัติจริงในห้องปฏิบัติการมีความเข้าใจเพิ่มขึ้นในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม เมื่อเทียบกับนักศึกษาที่เรียนโดยวิธีการสอนก่อนหน้า

8. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

8.1 นักศึกษามีความเข้าใจในเนื้อหาการเรียนในวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมมากยิ่งขึ้น

8.2 นักศึกษาเกิดทักษะการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อนได้

8.3 นักศึกษาเกิดทักษะการใช้เครื่องมือวัดและทดสอบในห้องปฏิบัติการทางอิเล็กทรอนิกส์

8.4 นักศึกษารู้วิธีการและแนวทางในการทดสอบอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์

8.5 อาจารย์ที่สอนในวิชานี้สามารถนำผลและการทดลองที่ได้ไปปรับใช้ให้เหมาะกับนักศึกษาในแต่ละภาคการศึกษาได้อย่างเหมาะสม

9. แนวทางในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

9.1 เผยแพร่ให้อาจารย์ที่สอนในวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมให้ทราบผ่านทางการประชุมสัมมนาอาจารย์ที่สอนวิชาเดียวกันนี้

9.2 นำเทคนิคและวิธีการที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ไปใช้กับนักศึกษาที่ลงทะเบียนเรียนในภาคการศึกษาถัดไป

9.3 จัดทำเป็นคู่มือวิชาการปฏิบัติการสำหรับรายวิชา TEE2219 ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม

10. กล่าวสรุป

ในบทนี้ ผู้วิจัยได้กล่าวถึง แนวคิด ความเป็นม าที่ทำให้เกิดโครงการวิจัย การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมควบคู่กับการปฏิบัติจริงในห้องปฏิบัติการไปสู่ความเข้าใจในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม เพื่อพัฒนาคุณภาพการเรียนการสอนให้เหมาะกับนักศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้า รายวิชา ENG2135 อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ที่เรียนในห้องทฤษฎีเป็นรายวิชาในกลุ่มวิชาพื้นฐานวิชาชีพ (วิชาพื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์) ในขณะที่รายวิชา TEE 2219 ปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม เป็นรายวิชาในกลุ่มวิชาชีพบังคับ (กลุ่มวิชาชีพแกน) ที่ต้องเรียนในห้องปฏิบัติการ โครงการวิจัยฯ นี้ได้ปรับให้เนื้อหาในส่วนของปฏิบัติการให้มีสองส่วนคือ ส่วนแรกจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์ที่ใช้กับนักศึกษา หรือที่รู้จักกันดีในนาม student version ที่สามารถหาดาวน์โหลดได้จากผู้ผลิตโปรแกรมวิคราะห์ทางเวปไซด์ ส่วนที่สองนั้นจะเป็นการทดลองจริงโดยใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ เช่น แหล่งจ่ายกำ ลังงาน แหล่งกำเนิดสัญญาณ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และออสซิลโลสโคป เป็นต้น เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับตัวนักศึกษาเอง

บทที่ 2
การใช้งานโปรแกรมเบื้องต้นและทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

1. กล่าวนำ

ปัจจุบัน วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์อาจประกอบขึ้นจากอุปกรณ์ไฟฟ้าเพียง 2-3 ตัวหรือ อาจต้องใช้อุปกรณ์มากเป็น 2-3 ล้านตัว ก็ได้ การวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยมือเปล่า อาจไม่สามารถทำได้เหมือนเช่นแต่ก่อน เพราะมีความ ยาก-ซับซ้อนและใช้เวลามาก กว่าจะได้คำตอบที่ต้องการ

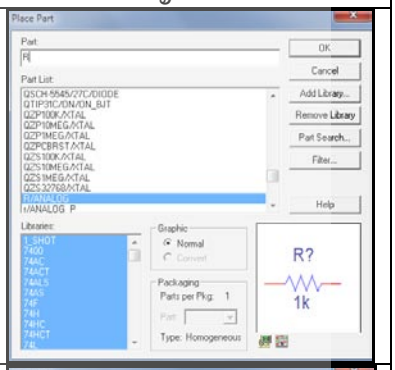
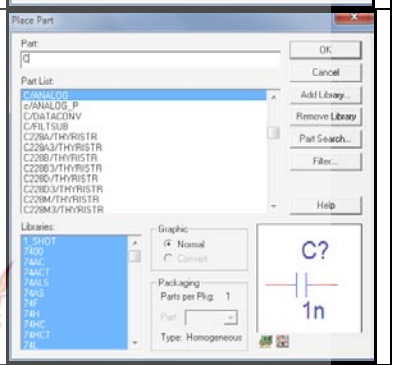
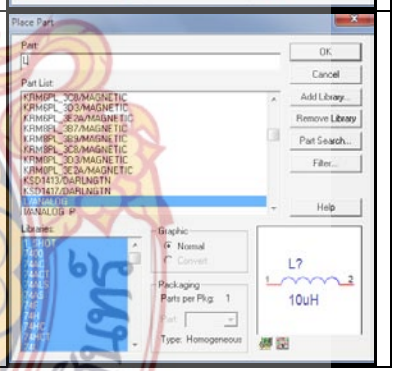
โปรแกรมจำลองการทำงาน (Simulation Program) ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกใน ช่วงต้นปี ค.ศ. 1970s โดยนักวิจัยจากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ ประเทศสหรัฐอเมริกา (University of California, Berkeley, USA) ในครั้งนั้นได้พัฒนาขึ้นด้วยภาษา FORTRAN ที่เป็นโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์แบบเมนเฟรม (main-frame computer) และตั้งชื่อโปรแกรมว่า SPICE ซึ่งย่อมาจาก **S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis (SPICE) จากนั้นได้พัฒนาความสามารถในการวิเคราะห์ว งจรพร้อมปรับเปลี่ยนเป็นเวอร์ชั น SPICE2 อยู่ในรูปของ text editor นับจากนั้นเป็นต้นมาโปรแกรมก็มีถูกพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ เช่น โปรแกรม PSPICE ได้พัฒนาโดยบริษัท MicroSim Corporation ให้สามารถทำงานได้หลากหลายบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในปี 1984 (Personal Computer: PC) เครื่อง Macintoshes, และ Mini-computer เป็นต้น โดยเฉพาะที่พัฒนาบน PC เป็นโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการวินโดว์ อีกทั้งมีเวอร์ชันสำหรับภาคการศึกษา (educational version) นับจากนั้นโปรแกรม PSPICE ก็ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย โปรแกรม PSPICE มีการแสดงผลเป็นกราฟ (graphical postprocessor: Probe) มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบวงจรจาก text editor ซึ่งเป็นตัวหนังสือมากำหนดเป็นการเขียนวงจรแบบ graphical interface ที่เรียกว่า Schematic เพื่อให้ง่ายต่อการเขียนวงจรและ สะดวกต่อการ ตรวจสอบความถูกต้อง ด้วย ความหลากหลายในการจำลองการทำงานทั้งวงจรแอนะลอกและดิจิตอล บางครั้งอาจเรียกโปรแกรมนี้ว่า PSpice A/D จากนั้นพัฒนาเรื่อยมาจนถึงเวอร์ชัน 8 และถูกควบรวมกิจการโดย OrCAD พร้อมทั้งเปลี่ยนเป็นเวอร์ชัน 9 ในนาม OrCAD PSpice A/D และมีการปรับปรุง Schematic โดยเรียกชื่อใหม่ว่า Schematic Capture จากนั้นก็ได้พัฒนาภายใต้ชื่อ OrCAD เวอร์ชันต่างๆ จน บริษัท CADENCE ได้เข้าซื้อกิจการพร้อมกับเปลี่ยนชื่อเป็น Cadence OrCAD ล่าสุดโปรแกรมได้ถูกพัฒนาเป็นเวอชัน Cadence OrCAD16.6 ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้ที่เวฟไซท์ (http://www.cadence.com/products/orcad/pages/downloads.aspx) นอกจากนี้ เรายังอาจพบ SPICE อยู่ในรูปทางการค้าอื่นๆ เช่น HSPICE และ B^2SPICE เป็นต้น

การใช้โปรแกรมจำลองการทำงานมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ช่วยหาคำตอบของกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ หรือค่ากำลังงานที่เกิดขึ้นหรื อที่สูญเสียในอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้แล้ว เรายังสามารถใช้โปรแกรมช่วยจำลองการทำงานของอุปกรณ์หรือวงจรโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยไม่ต้องกังวลความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือวงจร ซึ่งต่างจากการต่อวงจรจริง อีกทั้ง การจำลองการทำงานสามารถช่วยยืนยันได้ว่าวงจรที่ออกแบบมีสมรรถนะเป็นตามที่ต้องการหรือไม่ อย่างไร หากไม่เป็นดังต้องการ เราสามารถปรับแก้ไขวงจรได้ ก่อนนำไปสร้างวงจรจริงและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวงจร

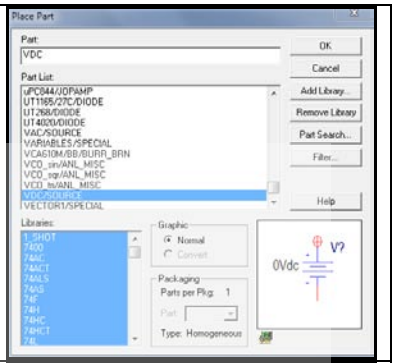
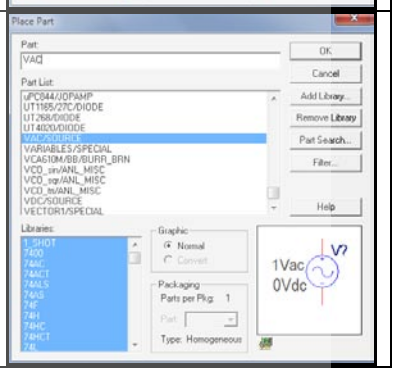
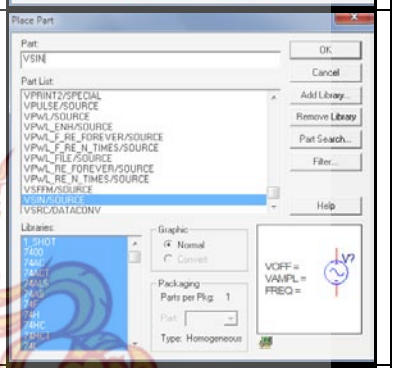
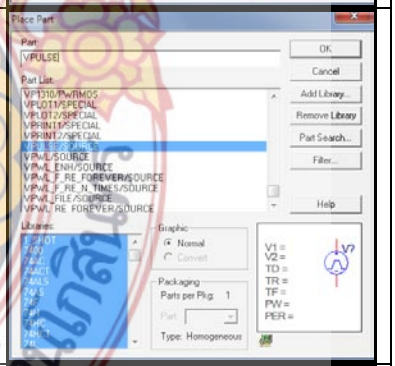
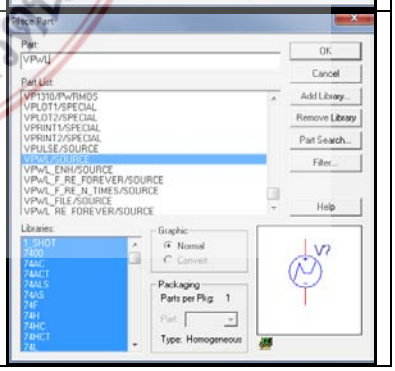
2. ข้อตกลงที่สำคัญและการใช้งานโปรแกรมเบื้องต้น

2.1 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์

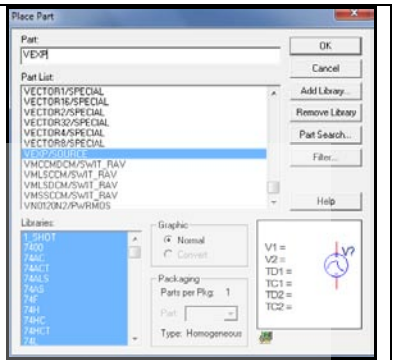
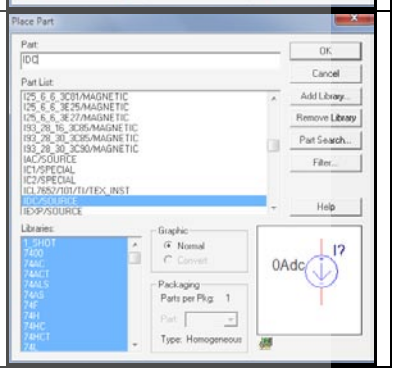
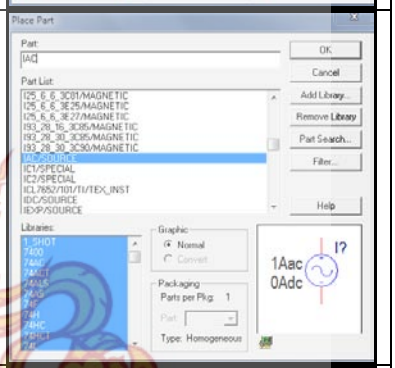
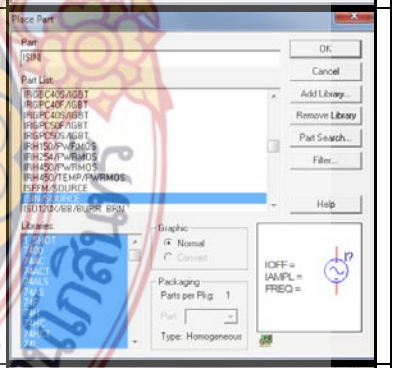
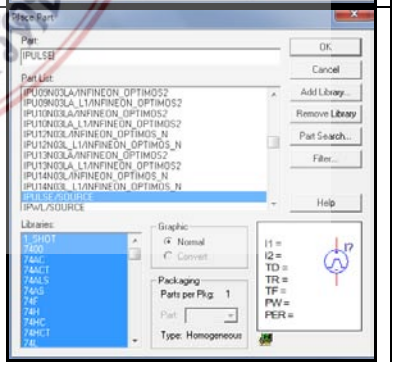
ตารางที่ 1 ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

รายชื่ออุปกรณ์	ชื่อ Part	สัญลักษณ์
ตัวต้านทาน	R	
ตัวเก็บประจุ	C	
ตัวเหนี่ยวนำ	L	

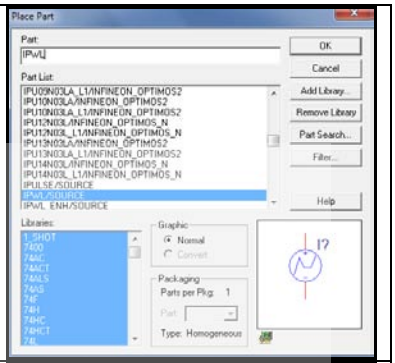
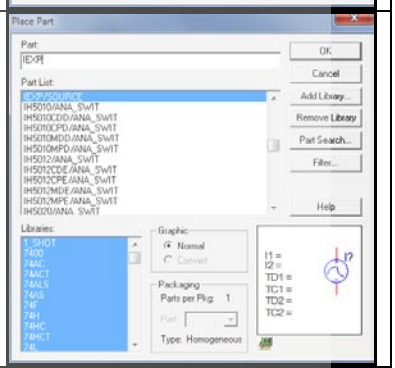
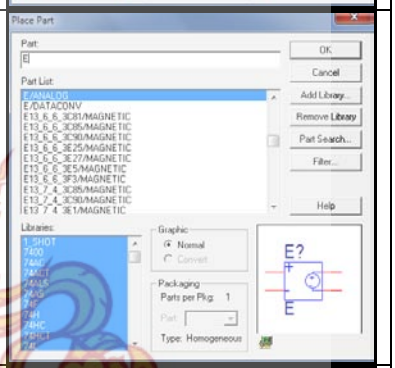
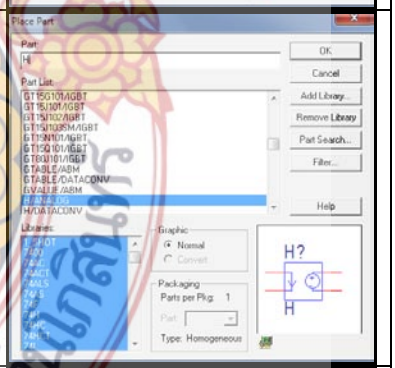
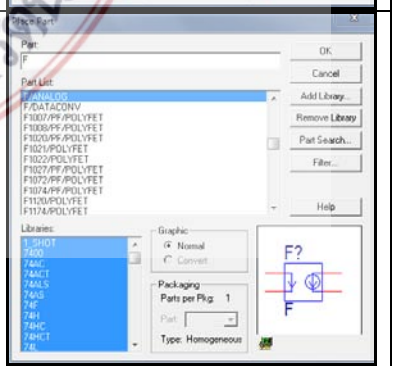
ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง	Vdc	
แหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับ	Vac	
แรงดันสัญญาณรูปไซน์	Vsin	
แรงดันสัญญาณรูปพัลส์	Vpulse	
แรงดันสัญญาณ piece wise linear	Vpwl	

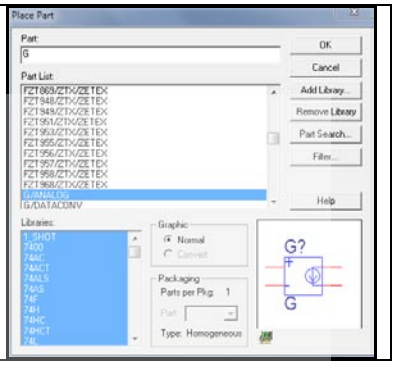
ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

แรงดันสัญญาณเอ๊กซ์โพเนนเชียล	Vexp	
แหล่งจ่ายกระแสไฟตรง	Idc	
แหล่งจ่ายกระแสไฟสลับ	Iac	
กระแสสัญญาณรูปไซน์	Isin	
กระแสสัญญาณรูปพัลส์	Ipulse	

ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

กระแสสัญญาณ piece wise linear	Ipwl	
กระแสสัญญาณเอ็กซ์โพเนนเชียล	Iexp	
แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน	Voltage controlled voltage source: E	
แหล่งจ่ายแรงดันที่ถูกควบคุมด้วยกระแส	Current controlled voltage source: H	
แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยกระแส	Current controlled current source: F	

ตารางที่ 1 (ต่อ) ตัวอย่างสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

แหล่งจ่ายกระแสที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน	Voltage controlled current source: G	

2.2 หน่วยที่มาตรฐานที่ใช้

ตารางที่ 2 ตัวอย่างหน่วยมาตรฐานทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ใช้บ่อยในโปรแกรม

ชื่อหน่วย	ค่า	ตัวแปรที่ใช้
เฟมโต (femto)	1E-15	f
พิโค (pico)	1E-12	P
นาโน (nano)	1E-9	n
ไมโคร (micro)	1E-6	u
มิลลิ (milli)	1E-3	m
กิโล (kilo)	1E+3	K
เมกกะ (mega)	1E+6	MEG
กิกะ (giga)	1E+9	G
เทอรา (tera)	1E+12	T

2.3 ข้อห้ามและข้อจำกัดของเวอร์ชันทดลองใช้

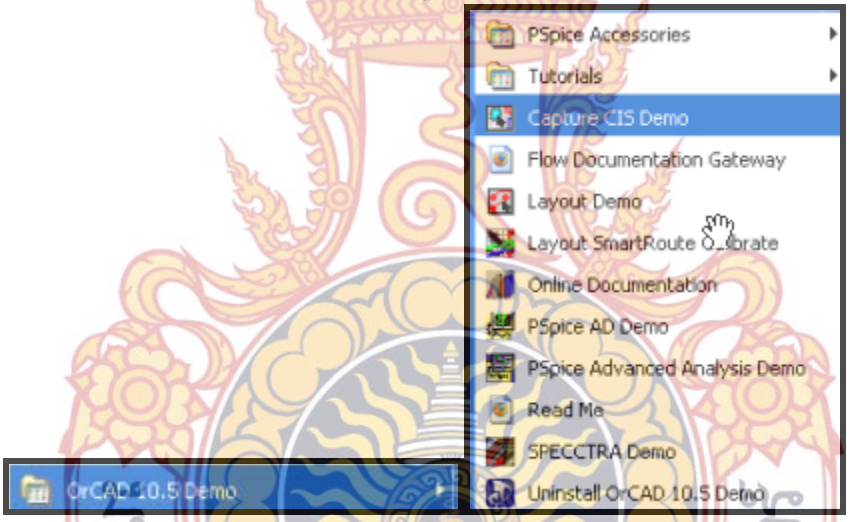
- ชื่อของตัวต้านทานที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว R เท่านั้น
- ชื่อของตัวเก็บประจุที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว C เท่านั้น
- ชื่อของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว L เท่านั้น
- ชื่อของแหล่งจ่ายแรงดันแบบอิสระ (independent voltage source) ที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว V เท่านั้น
- ชื่อของแหล่งจ่ายกระแสแบบอิสระ (independent current source) ที่ใช้ต้องขึ้นต้นด้วยพยัญชนะตัว I เท่านั้น
- พยัญชนะตัวเล็กกับตัวใหญ่มีค่าและความหมายเหมือนกัน
- การใช้ตัวพยัญชนะห้ามมีการเว้นวรรค ห้ามใช้เครื่องยติภังค์ (hyphen) แต่สามารถใช้เครื่องหมายขีดล่างได้ (underscore)
- ห้ามใช้เครื่องหมายขีดล่างขึ้นหน้าพยัญชนะ
- ห้ามใช้เครื่องหมาย # (number sign)
- การต่อวงจรในการจำลองแต่ละครั้งมีจำนวนโหนดไม่เกิน 64 โหนด

- ออปแอมป์ใช้งานได้ไม่เกิน 2 ตัว
- ทรานซิสเตอร์ใช้งานได้ไม้เกิน 10 ตัว
- สายนำสัญญาณทั้งแบบอุดมคติและแบบไม่เป็นอุดมคติใช้งานรวมกันได้ไม่เกิน 10 เส้น
- อุปกรณ์ดิจิตอลแบบดั้งเดิมใช้งานรวมกันได้ไม่เกิน 65 ตัว
- ไลบรารีของอุปกรณ์แอนะลอกมีจำนวน 39 ไลบรารี
- ไลบรารีของอุปกรณ์ดิจิตอลมีจำนวน 134 ไลบรารี
- ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้ในการวาด schematic ไม่เกิน 15 parts สามารถบันทึก (save) ไฟล์ได้ ในทางตรงข้าม เราสามารถที่จะวาดอุปกรณ์มากกว่านั้น ได้ แต่จะไม่สามารถบันทึกไฟล์ได้

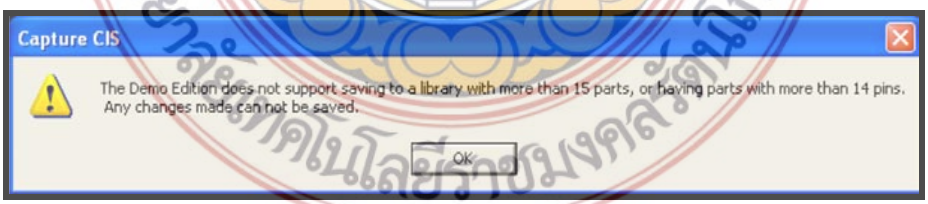
2.4 **การเรียกใช้โปรแกรมและการใช้งานเมนูย่อย**

- **ขั้นตอนการเรียกใช้โปรแกรม**

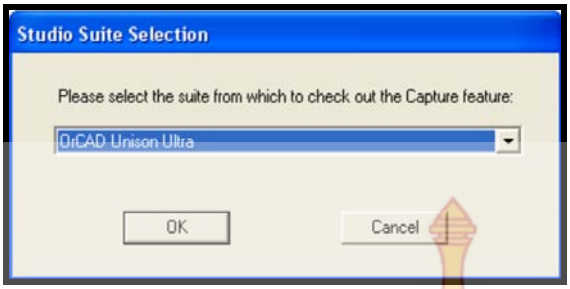
ก) Start->OrCAD 10.5->Capture CIS Demo



จากนั้นจะแสดงข้อจำกัดของเวอร์ชันสาธิต (demo version)



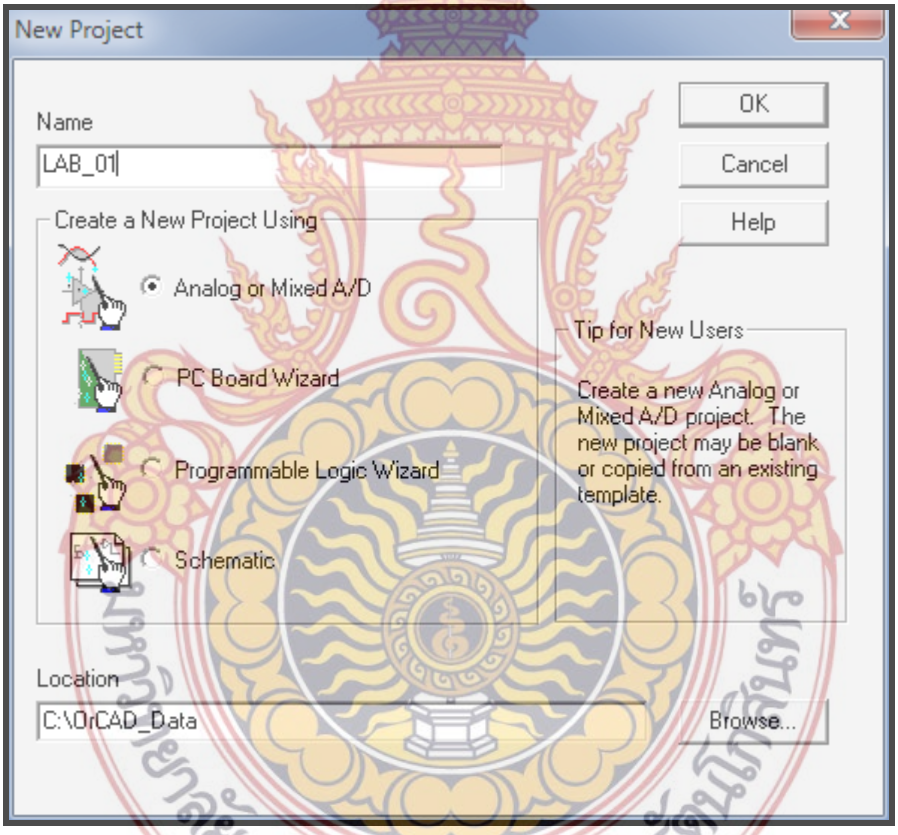
จากนั้นจะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นมา ให้เลือกค่าตามรูปข้างล่าง



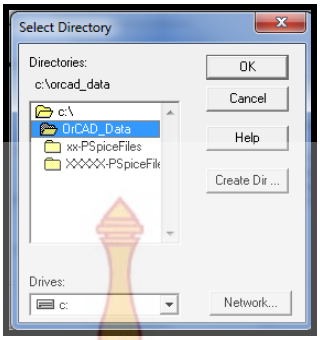
จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง OrCAD Capture

ข) เลือก File->New->Project พร้อมกับตั้งชื่อ File เช่น LAB_01

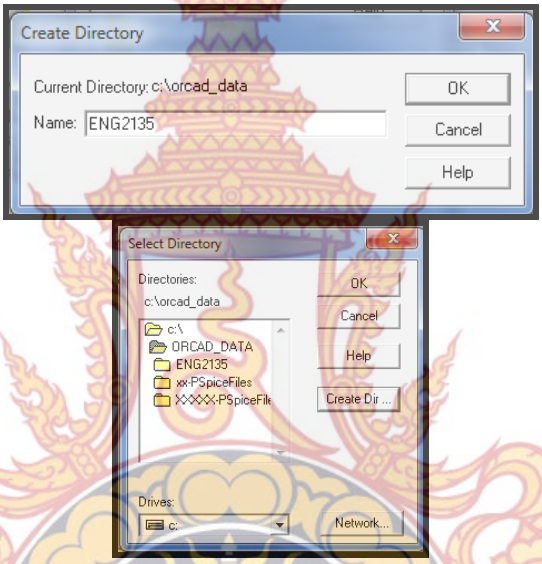
ค) คลิกเลือกช่อง Analog or Mixed A/D พร้อมกับเลือก Location เป็นไดร์ฟที่ต้องการบันทึกไฟล์



เลือก Browse ไปยังไดร์ฟที่ต้องการบันทึก

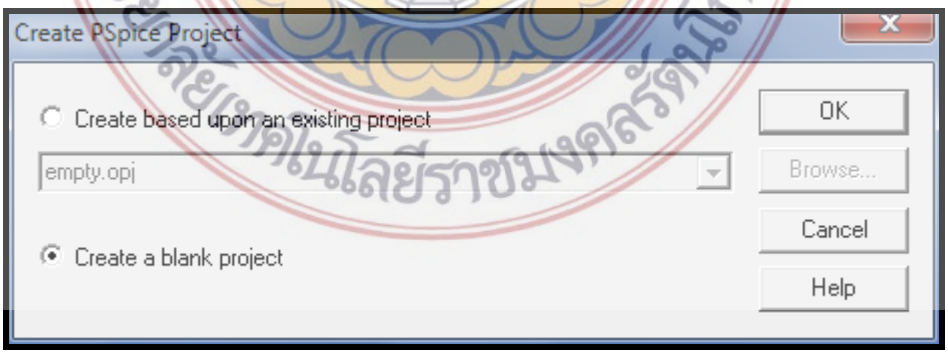


หรือถ้าต้องการสร้างไดเร็คทอ รีใหม่ก็เลือก Create Dir... พิมพ์ชื่อไดเร็คทอรีที่ต้องการสร้าง **เช่น** ENG2135 จากนั้นกด OK

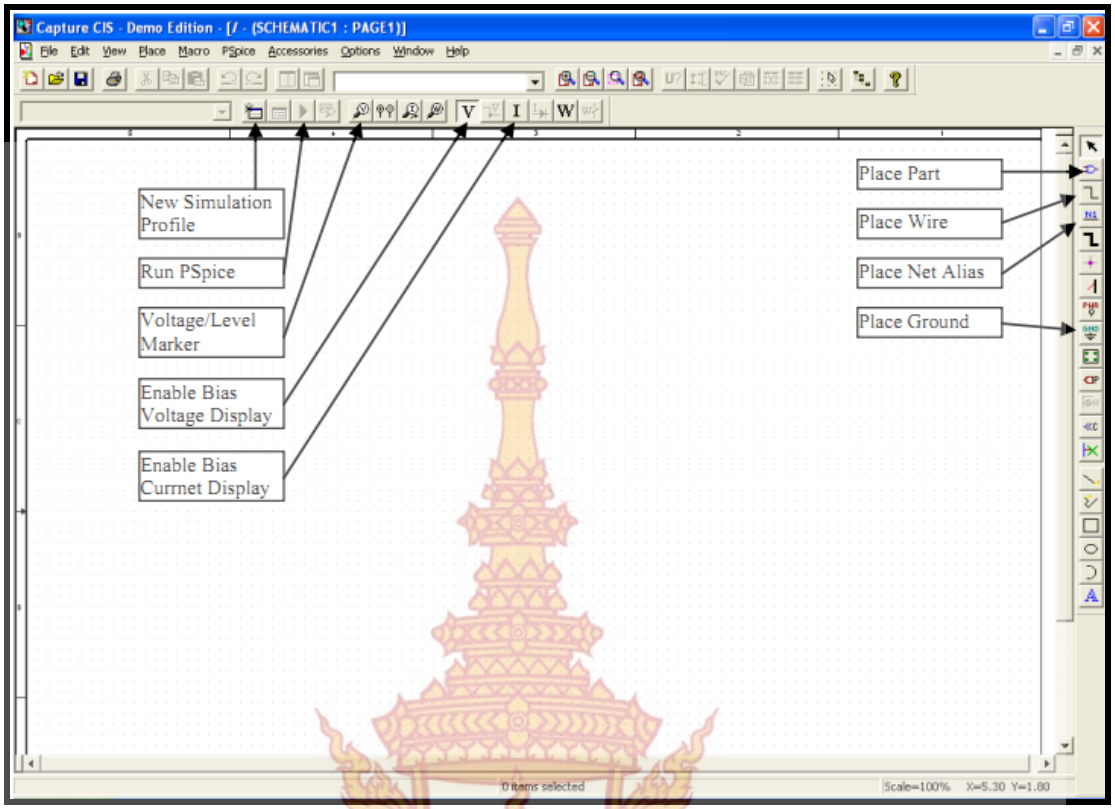


ดับเบิ้ลคลิ๊กที่ไดเร็กทอรี ENG2135 เพื่อเลือกไดเร็คทอรีที่ใช้งาน ที่เคยสร้างไว้ จากนั้นกดปุ่ม OK **เพื่อ** กลับไปยังหน้าต่าง New Project จากนั้นเลือก OK เพื่อสร้าง New Project

เลือก Create a blank project เพื่อเปิดหน้าต่างที่เป็น Schematic ที่ว่างเปล่า

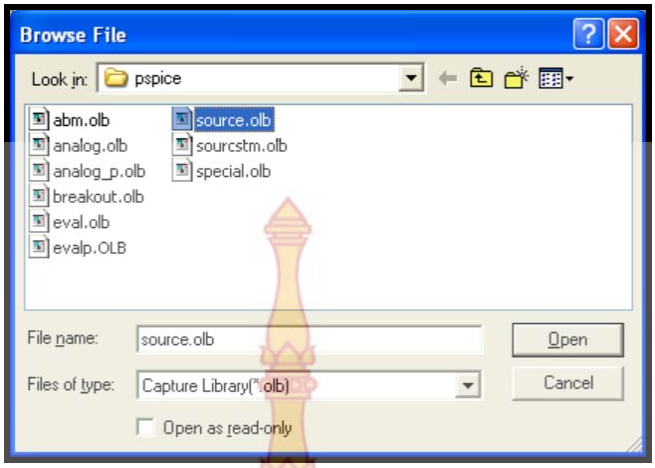


ตัวอย่างของหน้าต่าง Schematic ที่ว่างเปล่า



หลังจากที่หน้าต่าง Schematic ถูกเปิดขึ้นมา การวางอุปกรณ์ทำได้โดยเลือก กดปุ่มที่ 2 ทางด้านขวามือในแนวตั้งแล้ว จะปรากฏหน้าต่างใหม่ขึ้นมา

ง) กดปุ่ม Add Library เพื่อเพิ่มไลบรารี

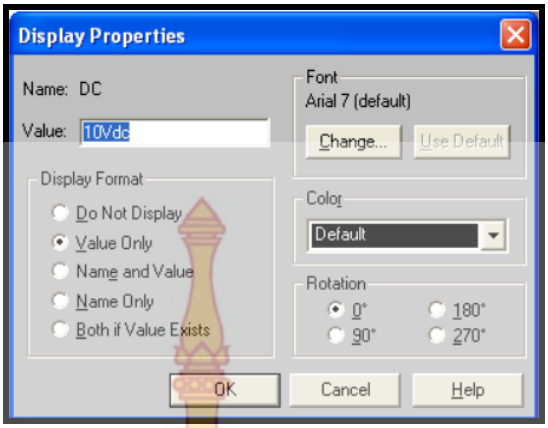


จ) เลือก High Light บรรทัด source.olb แล้วกดปุ่ม Open

ฉ) จากนั้นกดปุ่มที่ 2 ในแนวตั้งทางด้านขวามือเพื่อวางอุปกรณ์ เช่น ถ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟตรง ให้เลือก High Light ที่มุมซ้ายด้านล่างของ Libraries เป็น SOURCE

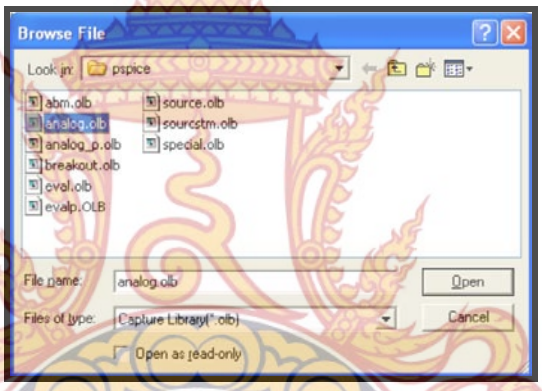
ช) ส่วนช่อง Part ซึ่งอยู่มุมบนด้านขวามือให้พิมพ์ VDC ตามรูป โดยสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่พิมพ์ลงในหน้าต่างนี้จะปรากฏให้เห็นในมุมล่างด้านขวามือ ให้นักศึกษาตรวจสอบว่าตรงกับที่ต้องการเลือกใช้หรือไม่ ถ้าตรงก็กด OK ถ้าไม่ตรงให้ตรวจสอบใหม่ พร้อมทั้งแก้ไขให้ถูกต้อง

ซ) จากนั้นวางอุปกรณ์ลงบน Blank Schematic การแก้ไขค่าแรงดัน VDC ทำได้ด้วยการดับเบิ้ลคลิกที่ค่าประจำตัวของอุปกรณ์เช่น จาก 0 โวลต์ เป็นค่า 10 โวลต์ หรือ ดับเบิ้ลคลิกที่ตัวอุปกรณ์ จะปรากฏหน้าต่างนี้ขึ้นมา พร้อมกับให้แก้ไขค่าในช่อง Value เช่น 10V นอกจากนี้ เรายังเลือกรูปแบบการแสดงค่า ขนาดและรูปแบบของตัวอักษร สีและลักษณะการวางอุปกรณ์ในหน้าต่างนี้ได้ด้วย



ฌ) จากนั้นกดปุ่ม ESC เพื่อเสร็จสิ้นการวางอุปกรณ์ (ยกเลิกคำสั่งทั้งหมด)

ญ) หากต้องการวางตัวต้านทานทำได้โดยเพิ่มไลบรารี analog.olb ด้วยการ Add Library พร้อมกับเลือก High Light บรรทัด analog.olb แล้วกดปุ่ม Open

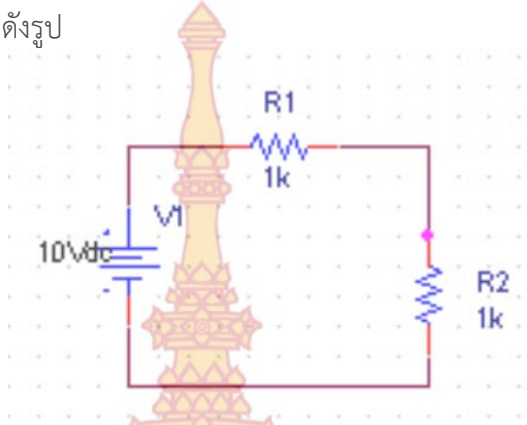


ฎ) เมื่อกดปุ่มที่ 2 ในแนวตั้งซึ่งอยู่ทางด้านขวามือ จะปรากฏหน้าต่าง ใหม่ขึ้นมา จากนั้นที่มุมล่างด้านซ้ายมือให้เลือก Libraries ที่ชื่อ ANALOG ส่วนมุมบนด้านซ้ายมือในช่อง Part ให้พิมพ์ R จะได้ดังรูป

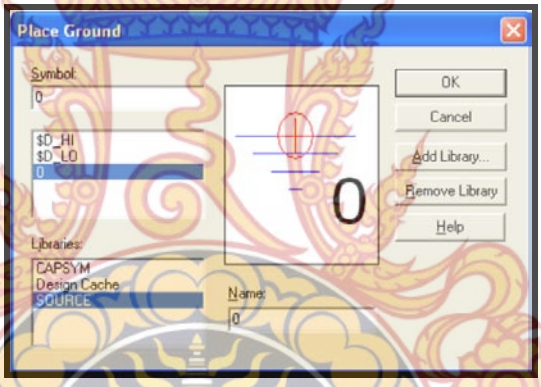
ฏ) จากนั้นกดปุ่ม OK

ฐ) ในการวางตัวต้านทานตัวที่ 2 ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ผ่านมา หากต้องการปรับตัวต้านทานที่วางในแนวนอนให้ เป็นการวางในแนวตั้ง สามารถทำได้โดยเลือกที่แถบเมนูด้านบนสุด จากนั้นเลือก Edit และเลือก Rotate ตามลำดับ

ฑ) จากนั้นวาดเส้นเชื่อมต่อวงจรโดยกดปุ่มที่ 3 ในแนวตั้งทางด้านขวามือ ลากเส้นเชื่อมต่อวงจรตามต้องการ ดังรูป

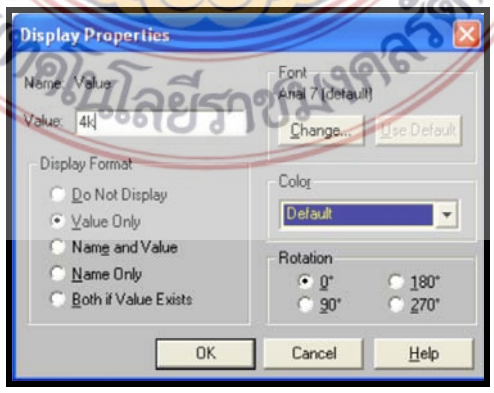


ฒ) การต่อกราวด์ให้ กับวงจรทำได้ด้วยการกดปุ่มที่ 9 ในแนวตั้งทางขวามือ จะมีหน้าต่างปรากฏตามรูป



ณ) ให้เลือกช่อง Libraries เป็น SOURCE ส่วนช่อง Symbol พิมพ์ 0 จากนั้นกดปุ่ม OK รำสัญลักษณ์กราวด์ที่ได้ไปต่อในตำแหน่งที่ต้องการ พร้อมกับลากเส้นโดยการกดปุ่มที่ 3 เพื่อเชื่อมต่อกราวด์เข้ากับวงจรให้ถูกต้อง

ด) ส่วนการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานสามารถทำได้โดยการดับเบิ้ลคลิกที่ค่าของตัวต้านทานที่ต้องการเปลี่ยน เช่น การเปลี่ยนความต้านทานจาก 1k เป็น 4k จะเป็นดังรูป



3. ทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญ

3.1 ไดโอด

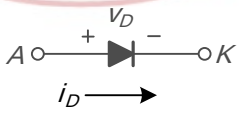
ไดโอด จัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่สำคัญอย่างหนึ่งในวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากทั้งในอดีตและปัจจุบัน คุณสมบัติที่สำคัญของไดโอดคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมตัวไดโอดและกระแสจะไม่เป็นเชิงเส้น

ไดโอดเป็นอุปกรณ์ประเภท 2 ขั้ว ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ต่อเชื่อมเข้าหากัน เราเรียกไดโอดแบบนี้ว่า **“ไดโอดรอยต่อ (Junction Diode)”** แต่ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยตรงเพราะจะเกิดปัญหาหลายอย่างที่ไม่สามารถคาดคะเนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติ บริเวณรอยต่อเราจะสร้างขึ้นโดยอาศัยการ แพร่สารเจือหมู่ III ลงไปในสารเจือชนิดเอ็น หรือ แพร่สารเจือหมู่ V ลงไปในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนใหญ่ (majority carrier) ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่สารกึ่งตัวนำชนิด พีมีโฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่ ผลที่ได้คือ อิเล็คตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็นจะแพร่เข้าสู่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิด พี แล้วไปรวมตัวกับโฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิด พีซึ่งอยู่อีกฝั่งหนึ่ง ในทางกลับกัน โฮ ลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ก็จะแพร่เข้ าสู่บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นทำให้เกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การแพร่ที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคมีความหนาแน่นเสมอกันทั่วทุกบริเวณ แต่การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลจะแตกต่างกัน กล่าวคือ ในช่วงแรกๆ จะเกิดการแพร่อย่างรวดเร็วมาก และการแพร่จะค่อยๆ ช้าลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จนกระทั่ง ณ สภาวะสมดุลจะไม่เกิดการแพร่ (หรือเกิดขึ้นเพียงน้อยมาก) มีเพียงบริเวณรอยต่อเท่านั้นที่ไม่เกิดการแพร่ขึ้นเลย และเรียกบริเวณรอยต่อนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) มีเพียงประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เป็นอิออนบวกและอิออนลบเท่านั้น

ประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น จะเป็นไปในลักษณะที่ ต้านการเคลื่อนที่ของพาหะข้ามรอยต่อ (ประจุบวกสถิตในบริเวณปลอดพาหะฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะต้านไม่ให้โฮลในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อมา รวมไปถึง ประจุลบสถิตย์ที่เ กิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะต้านไม่ให้อิเล็ก ตรอนอิสระ ในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ข้ามรอยต่อมา เช่นกัน) แสดงว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะเป็นตัวคอยป้องกันไม่ให้โฮลและอิเล็กตรอนอิสระข้ามรอยต่อไปมาได้อย่างสะดวกและเป็นตัวกำหนดศักย์ภายใน (built-in potential) มีค่าแปรตามความเข้มข้นของพา หะในสารกึ่งตัวนำ เมื่อนำไปใช้งาน ในวงจรไฟฟ้าจะต้องต่อขั้ว ไฟฟ้าออกมาข้างนอก โดยขั้วไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกว่า **ขั้วอาโนด (Anode: A)** อีกขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเรียกว่า **ขั้วคาโธด (Cathode: K)** สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของไดโอดแสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สัญลักษณ์ของไดโอดในวงจรไฟฟ้า

3.2 คุณสมบัติทางไฟตรง

เมื่อไดโอดรอยต่อได้รับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก โดยให้ขั้วอาโนดมีแรงดันสูงกว่าขั้วคาโธด จะทำให้โฮลที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี จะถูกดึงดูดโดยขั้วลบจากแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก็จะถูกดึงดูดโดยขั้วบวกไฟฟ้าจากแรงดันภายนอกเช่นกัน การเคลื่อนที่ของพาหะดังกล่าวจะทำให้บริเวณปลอดพาหะแคบลง ส่งผลให้การแพร่ของอิเล็กตรอนอิสระและโฮล ข้ามรอยต่อได้มากขึ้น เราเรียกการไบอัสแบบนี้ว่า **“การไบอัสไปข้างหน้า (forward bias)”** หรือบางทีอาจเรียกว่า **“ไบอัสตรง”**

ในทางตรงข้าม หากให้ไดโอดรอยต่อได้รับแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก โดยให้ขั้วอาโนดมีแรงดันต่ำกว่าขั้วคาโธดแล้ว จะทำให้โฮลที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะถูกดึงดูดโดยขั้วลบจากแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก็จะถูกดึงดูดโดยขั้วบวกไฟฟ้าจากแรงดันภายนอกเช่นเดียวกับการไบอัสไปข้างหน้า แต่จะต่างตรงที่บริเวณปลอดพาหะ กว้างขึ้น เป็นผลให้การแพร่ของอิเล็กตรอนอิสระและโ ฮลข้ามรอยต่อได้ ลดลง เราเรียกการไบอัสแบบนี้ว่า **“การไบอัสย้อนกลับ (reverse bias)”** หรือบางทีอาจเรียกว่า **“ไบอัสกลับ”**

เราอาจสรุปได้ว่า ไดโอดรอยต่อเมื่อถูกไบอัสไปข้างหน้าจะยอมให้กระแสไหลผ่านรอยต่อมาก ในทางกลับกัน หากให้ไดโอดรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหล ผ่านไดโอดรอยต่อน้อยมากๆ

เรานำเอาไดโอดไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ในวงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) เพื่อทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟสลับให้เป็นแรงดันไฟตรง ใช้ในวงจรคงค่าแรงดัน (voltage regulator) และวงจรจำกัดแรงดัน (voltage limiting) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการนำเอาไดโอดไปใช้งานในวงจรทางแสงด้วย (optical circuit)

กระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอดกับแรงดันที่ตกคร่อมไดโอด (ตาม ภาพที่ 1) มีความสัมพันธ์เป็นดังสมการ

$$i_D = I_S(e^{v_D / nV_T} - 1) \qquad (1)$$

โดย I_S คือกระแสย้อนกลับอิ่มตัวของไดโอด (saturation current) สำหรับไดโอดรอยต่อซิลิกอนขนาดเล็กที่ใช้งานในวงจรกำลังต่ำจะมีค่าประมาณ 10^{-15} แอมแปร์ อีกทั้งมีค่าแปรตามอุณหภูมิ โดยทั่วไป I_S จะมีค่าเพิ่มขึ้นสองเท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียส ส่วนแรงดัน V_T คือ แรงดันอุณหภูมิ (thermal voltage) มีค่าตามสมการ

$$V_T = \frac{kT}{q} \qquad (2)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ของโบลต์ซมันซ์ (Boltzmann’s constant) มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T แทนอุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวินมีค่าเท่ากับ $273 +$ อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส
q แทนค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมบ์

ณ อุณหภูมิห้องที่อยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส แรงดันอุณหภูมิมีค่าประมาณ 25 ถึง 26 มิลลิโวลต์ เรามักเลือกใช้ 25 มิลลิโวลต์ แต่ก็มีหนังสือบางเล่มเลือกค่าเท่ากับ 26 มิลลิโวลต์

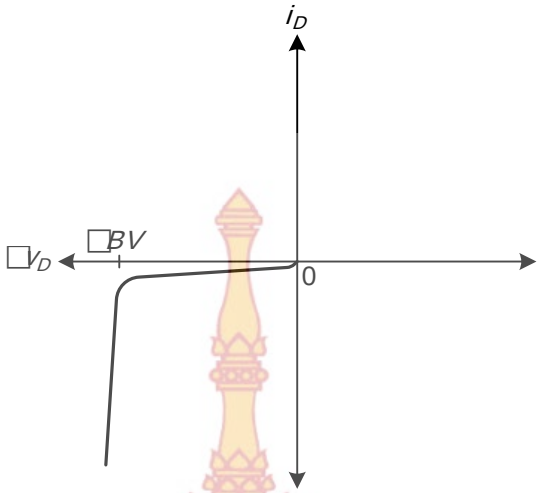
หมายเหตุ ไดโอดที่กล่าวถึงในที่นี้จะจำกัดเฉพาะไดโอดรอยต่อพี-เอ็น เท่านั้น

สมการที่ (1) นี้จะใช้อธิบายคุณสมบัติทางไฟตรงในอุดมคติของไดโอด เนื่องจากการพิสูจน์สมการนี้จะอาศัยการประมาณต่างๆ มากมาย อย่างไรก็ตาม ในเบื้องต้นและในการใช้งานไดโอดพื้นฐานส่วนใหญ่นั้น จะสามารถใช้สมการนี้อธิบายคุณสมบัติดังกล่าวได้โดยไม่มีข้อผิดพลาดมากนัด ตัวแปรสำคัญที่แสดงคุณสมบัติในหัวข้อนี้ของไดโอดที่ปรากฏในสมการคือค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัว I_S

ในการหาค่า I_S ของไดโอดจากการวัดนั้น เราจะไม่สามารถหาค่า I_S ได้จากการวัดกระแสในขณะที่ไดโอดได้รับการไบอัสย้อนกลับ (ที่มีค่าไม่มากกว่าหรือใกล้เคียงแรงดันเบรคดาวน์) เนื่องจากในความจริงแล้ว กระแสขณะที่ไดโอดได้รับการไบอัสดังกล่าวจะ มีค่ามากกว่า I_S มาก เนื่องจากกระบวนการบางอย่าง ดังนั้นในทางปฏิบัติเราจะวัดค่า I_S นี้ได้ในขณะที่ไดโอดได้รับการไบอัสไปข้างหน้าเป็นหลัก

จุดสำคัญที่จะเน้นอีกประการหนึ่งเกี่ยวกับค่ากระแสของไดโอด คือการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของกระแสดังกล่าว โดยเราจะสรุปได้ว่ากระแส I_S จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขณะที่ V_D มีค่าคงที่ (หรืออีกนัยหนึ่งก็คือไดโอดจะนำกระแสมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขณะแรงดันไบอัสไดโอดคงที่) ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิอย่างมากของ I_S เป็นหลัก ถึงแม้ว่าในสมการ (1) จะได้แสดงการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในตัวแปร V_T ไว้แล้วก็ตาม

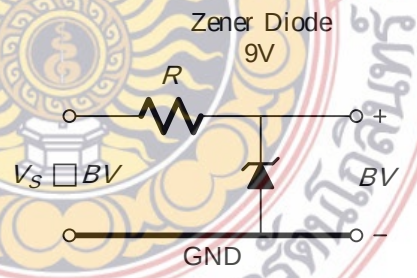
จากผลที่กล่าวข้างต้น เราสามารถสรุปคุณสมบัติสำคัญที่มีประโยชน์ของไดโอดได้ว่า “ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้ทางเดียว (คือในขณะไดโอดได้รับไบอัสไปข้างหน้า) และปริมาณกระแสที่ไดโอดนำ ที่ศักดาค่าคงที่ใดๆ จะ ขึ้นอยู่กับค่ากระแสย้อนกลับอิ่มตัวของไดโอดนั้น” อย่างไรก็ตามยังมีคุณสมบัติทางไฟตรงของไดโอด ที่มีความสำคัญและไม่สามารถใช้สมการที่ (1) มาอธิบายได้ ก็คือ คุณสมบัติที่เกิดจากปรากฏการณ์เบรกดาวน์ของไดโอดเมื่อได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยเราสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ ด้วยกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของไดโอดดังแสดงไว้ใน ภาพที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าปรากฏการณ์นีทำให้แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดมีค่าค่อนข้างคงที่ และไม่ขึ้นกับกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอดขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ เราเรียกแรงดันที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เบรกดาวน์นี้ว่า “**แรงดันเบรกดาวน์ของไดโอด (Break down Voltage: BV)**” โดยค่าของแรงดันนี้จะขึ้นกับไดโอดแต่ละชนิดแต่ละเบอร์



ภาพที่ 2 ปรากฏการณ์เบรกดาวน์ของไดโอด

นอกจากคุณสมบัติที่สรุปข้างต้น เรายังนำไดโอดมาใช้เป็นแรงดันอ้างอิงสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย แต่ในความเป็นจริงแล้ว แรงดันเบรกดาวน์ของไดโอดแบบธรรมดาทั่วไปจะมีค่าสูง (อาจจะมากกว่า 50 โวลต์) ดังนั้น ในการที่จะใช้งานไดโอดสำหรับงานดังกล่าว ผู้ผลิตจึงได้ออกแบบและสร้างไดโอดที่มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำ และสามารถควบคุมค่าแรงดันนี้ได้โดยผู้ผลิต เราเรียกไดโอดที่ใช้งานเฉพาะงานนี้ว่า “**ซีเนอร์ไดโอด**” เช่น ซีเนอร์ไดโอดขนาด 9 โวลต์จะหมายถึงไดโอดที่ถูกออกแบบมาให้มีแรงดันเบรกดาวน์ประมาณ 9 โวลต์ หรือใช้งานเป็นแรงดันอ้างอิง 9 โวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 3

สรุปคือ ซีเนอร์ไดโอดจะถูกใช้งานในช่วงที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับเป็นหลัก ดังนั้นคุณสมบัติในช่วงไบอัสไปข้างหน้าของซีเนอร์ไดโอดก็จะไม่มีความสำคัญ

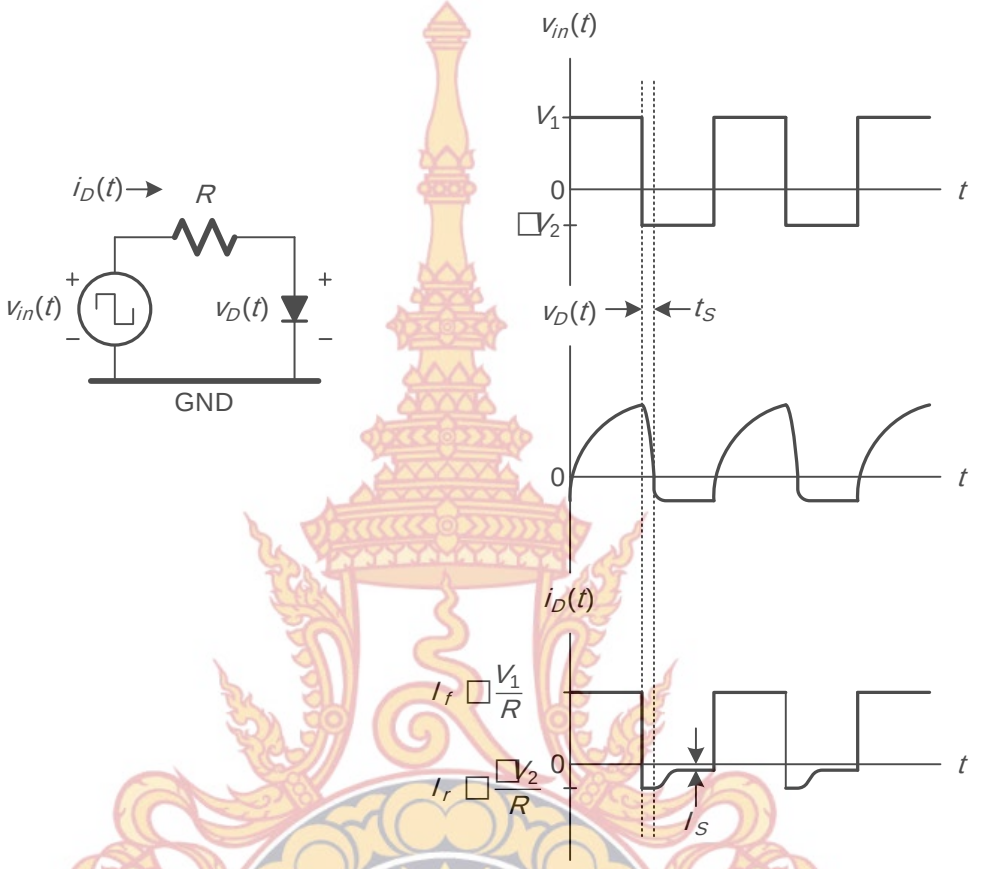


ภาพที่ 3 สัญลักษณ์และตัวอย่างการใช้งานซีเนอร์ไดโอดเป็นแรงดันอ้างอิง 9 โวลต์

3.3 คุณสมบัติทางด้านการสวิทซ์ของไดโอด

คุณสมบัติทางด้านสวิทซ์ของไดโอด (หรือคุณสมบัติที่สภาวะชั่วขณะของไดโอด) การใช้งานไดโอดในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสอย่างฉับพลัน เช่น งานด้านวงจรดิจิตอล เป็นต้น คุณสมบัติทางด้านสวิทซ์ของไดโอดจะเข้ามามีบทบาทสำคัญ โดยปกติแล้ว เราคงจะ

ต้องการให้การเปลี่ยนแปลงขอ งช่วงการทำงานของไดโอด จากช่วงไบอัสไปข้างหน้าไปยังช่วงไบอัสย้อนกลับ หรือกลับกันเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่ในความเป็นจริงแล้ว การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสำหรับไดโอดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 คุณสมบัติทางสวิทซ์ของไดโอด

จากรูปจะเห็ นได้ชัดเจนว่า ในการเปลี่ยนแปลง ดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เวลาค่าหนึ่ง ซึ่งก็คือเวลา t_S โดยเราจะเยกช่วงเวลานี้ว่า "เวลาหน่วงจากการสะสม (storage delay time)" ซึ่งสาเหตุหลักของการเกิดเวลาหน่วงดังกล่าวนี้ก็คือ ความเฉื่อยของประจุพาหะที่สะสม ในตัวไดโอด ทั้งในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณที่เป็นกลาง (คล้ายกับความเฉื่อยของประจุพาหะที่สะสมในตัวเก็บประจุที่เราคุ้นเคย จึงทำให้เกิดแรงดนที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันทีทันใด)

โดยปกติแล้ว เราสามารถลดเวลาหน่วงในการเปลี่ยนแปลงลงได้ โดยก ารควบคุมตัวแปรทางกายภาพของไดโอด เช่น การลดค่าเวลาชีวิต (life time) ของพาหะในสารกึ่งตัวนำ ที่ใช้ทำไดโอด โดยการโด๊บ (dope) ทอง ฯลฯ อย่างไรก็ตาม ไดโอดบางชนิดไม่ได้ถูกออกแบบให้ใช้กับงานการสวิทซ์ เช่น ไดโอดเร็คติไฟร์ เป็นต้น จึงไม่จำเป็นต้องถูกออกแบบให้มีค่า t_S ต่ำ ดังนั้น ในการเลือกใช้งานไดโอดสำหรับวงจรที่เราออกแบบ จึงต้องคำนึงถึงลักษณะของงานเป็นสำคัญ จุดสำคัญที่จะ

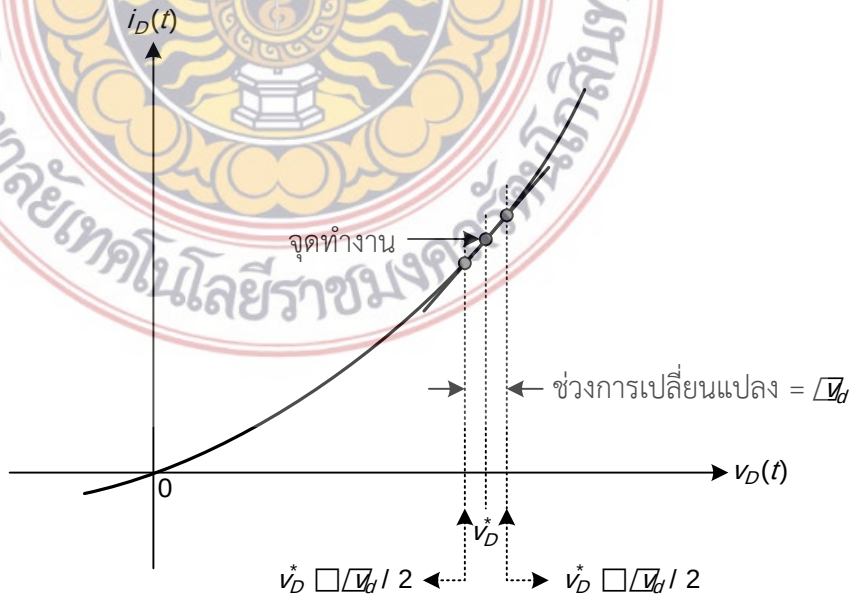
เน้นในหัวข้อรี้ก็คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าเวลา t_S ที่ขึ้นอยู่กับค่ากระแส I_f และ I_r (ดูภาพที่ 4 ประกอบ) โดยเวลา t_S จะมีค่ามากขึ้นถ้ากระแส I_f มีค่ามากขึ้น (ขณะ I_r คงที่) และจะมีค่าน้อยลงเมื่อ I_r มีค่าเพิ่มขึ้น (ขณะ I_f คงที่) ซึ่งทำให้เราสรุปได้ว่า การกล่าวถึงค่า t_S นี้ จะต้องกำหนดเงื่อนไขของกระแส I_f และ I_r ด้วย ซึ่งโดยปกติจะกำหนดเป็นอัตราส่วน I_r / I_f

3.4 คุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำ

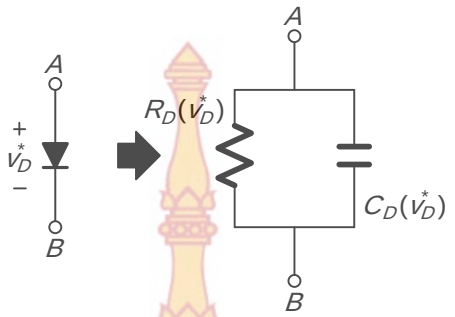
จากคุณสมบัติทั้งสองข้อที่กล่าวมาข้างต้นของไดโอด เราได้แสดงถึงคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของไดโอดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านสถิตย์ (กระแส, แรงดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง) และคุณสมบัติทางด้านพลวัตร (กระแส, แรงดันมีการเปลี่ยนแปลง) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพอเพียงกับการอธิบายคุณสมบัติพื้นฐานที่ใช้งานทั้งหมดของไดโอดแล้ว อย่างไรก็ตาม ขณะที่ไดโอดถูกใช้งานในลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสจำกัดอยู่ในช่วงที่เล็กมากอยู่ช่วงหนึ่ง ดังเช่นที่แสดงใน ภาพที่ 5 นั้น เราจะสามารถแสดงคุณสมบัติทางพลวัตรของไดโอด โดยการจำลองไดโอดด้วยอุปกรณ์เชิงเส้นดังแสดงไว้ใน ภาพที่ 6 เพื่อประโยชน์ในการช่วยให้การคำนวณคุณสมบัติดังกล่าวทำได้ง่ายขึ้น เราเรียกแบบจำลองดังกล่าวนี้ว่า **“แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำ (small-signal model)”** ของไดโอด แบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วยการขนานกันของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุโดยความต้านทาน R_D มีค่าเท่ากับ

$$R_D = \frac{V_T}{I_S e^{v_D / v_T}} \tag{3}$$

หรืออีกนัยหนึ่งก็คือส่วนกลับของความชันของสมการที่ (3) ที่แรงดันเท่ากับ v_D^* ส่วนค่าความเก็บประจุ C_D จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทางกายภาพของไดโอด โดยปกติค่า C_D จะเกิดจากผลของพาหะที่สะสมในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณที่เป็นกลางในตัวไอโอดเป็นหลัก มีค่าอยู่ในระดับพิโคฟารัด (เราจึงจะไม่กล่าวถึงในรายละเอียด)

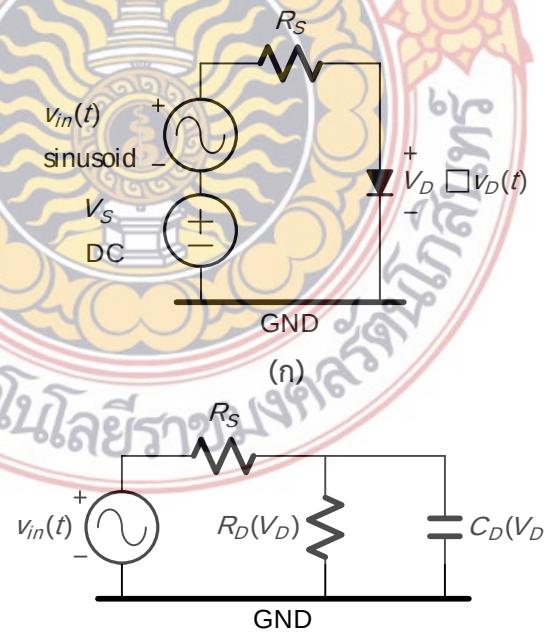


ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสของไดโอดที่จำกัดอยู่ในช่วงที่เล็กมากช่วงหนึ่ง



ภาพที่ 6 แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำของไดโอด

จุดสำคัญที่จะเน้นให้นักศึกษาจดจำไว้เกี่ยวกับการใช้งานแบบจำลองดังกล่าวคือ แบบจำลองนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสของไดโอดมีค่าต่ำมากๆ และมีค่าขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่กำหนดจุดกลางของการเปลี่ยนแปลง (v_D^* และ i_D^* ในภาพที่ 5) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า **"จุดทำงานของไดโอด"** อีกทั้งแบบจำลองดังกล่าวยังมีความสำคัญมากในการ คำนวณคุณสมบัติทางไฟสลับที่สัญญาณระดับต่ำของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่นักศึกษาจะได้เรียนต่อไป ภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างการใช้งานแบบจำลองของไดโอด โดยเราจะหาผลตอบสนองทางความถี่ของค่าอัตราขยายแรงดัน (v_{out} / v_{in}) โดยไดโอดถูกไบอัสไว้ให้มีจุดทำงานที่ V_D ด้วยแหล่งจ่าย V_S และ v_{in} เป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal signal) มีค่าแรงดันแบบยอดประมาณ 5 มิลลิโวลต์



ภาพที่ 7 ตัวอย่างวงจรที่ใช้แบบจำลองที่สัญญาณระดับต่ำของไดโอดเพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่ (ก) วงจรเริ่มต้น และ (ข) วงจรที่แสดงเฉพาะสัญญาณที่เปลี่ยนแปลง

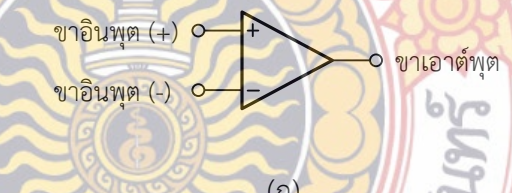
3.5 ออปแอมป์

วงจรขยายเชิงเนินการ (Operational amplifier) หรือเรียกสั้นๆว่า ออปแอมป์ (Op-AMP) เป็นอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายและได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะใช้งานง่าย มีเสถียรภาพทางวงจรสูง โดยในช่วงแรกๆ ออปแอมป์ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้อุปกรณ์แบบดิสครีต (discrete component) เช่น หลอดสุญญากาศและทรานซิสเตอร์ เทคโนโล ยีการผลิตสารกึ่งตัวนำได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ ออปแอมป์จึงถูกสร้างขึ้นในรูปวงจรรวม (Monolithic Op-AMP) นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา จึงมีออปแอมป์ให้ เลือกใช้งานมากมาย อีกทั้งมีราคาค่อนข้างถูก หาซื้อง่ายในปัจจุบัน

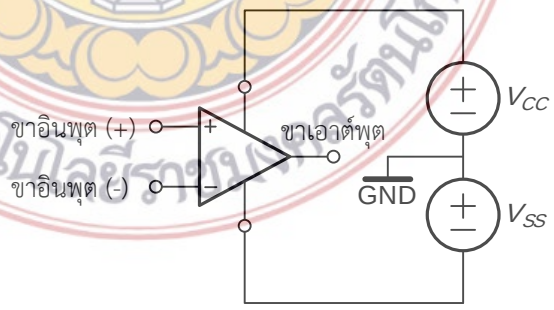
เราสามารถนำเอาออปแอมป์ไปใช้เป็นส่วนประกอบหลักในวง จรเชิงเส้น เช่น วงจรขยายผลต่างของสัญญาณ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำเอาออปแอมป์ไปใช้ในวงจรไม่เชิงเส้น เช่น วงจรเรียงกระแส (rectifier circuit) วงจรกำเนิดสัญญาณ (signal oscillator) วงจรปรับค่าขยายอัตโนมัติ (automatic gain control: AGC) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ ในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะการนำไปใช้ในวงจรที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น

ก) แบบจำลองของออปแอมป์

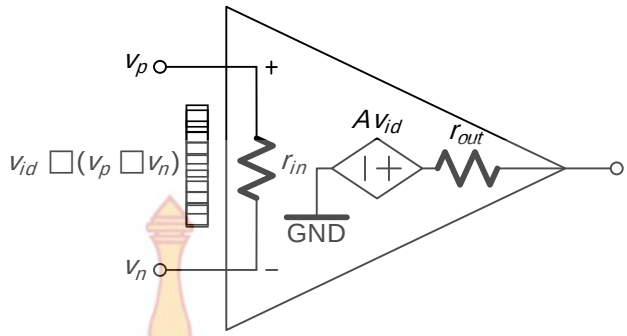
ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์ที่มีสามขั้ว กล่าวคือมีขั้วอินพุตขาบวก (non-inverting input terminal) ขั้วอินพุตขาลบ (inverting input terminal) และขั้วเอาต์พุต (output terminal) โครงสร้างภายในออปแอมป์ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอกทีฟ ดังนั้นเราจึงต้องจ่ายแรงดันไฟตรงให้กับออปแอมป์เพื่อให้ออปแอมป์ทำงาน



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 8 ออปแอมป์ (ก) สัญลักษณ์ทั่วไป (ข) การต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และ (ค) แบบจำลองอย่างง่าย

ออปแอมป์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นดังภาพที่ 8 โดยภาพที่ 8(ก) แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในวงจร มีการต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นดัง ภาพที่ 8(ข) ขณะภาพที่ 8(ค) แสดงแบบจำลองอย่างง่ายของออปแอมป์ จากแบบจำลองจะเห็นว่าออปแอมป์เป็นวงจรขยายแรงดันที่ทำหน้าที่ขยายผลต่างแรงดันของสัญญาณอินพุต ในทางอุดมคติออปแอมป์ (ideal op-amp) มีคุณสมบัติเป็นดังนี้

- อัตราขยายลูปเปิด (open-loop gain: A) มีค่าสูงมากเป็นอนันต์
- ความต้านทานขาเข้า r_{in} มีค่าสูงมากเป็นอนันต์
- ความต้านทานขาออก r_{out} มีค่าต่ำมากเป็นศูนย์
- ออปแอมป์จะขยายเฉพาะความต่างแรงดันที่ขาอินพุตบวกและลบ เท่านั้น นั่นแสดงว่าถ้าขาอินพุตบวกและลบมีคาเท่ากันจะไม่เกิดการขยายแรงดันขึ้นที่เอาต์พุต
- กระแสที่ไหลเข้าขาอินพุตบวกและลบมีค่าน้อยมากจนเป็นศูนย์ เนื่องจากความต้านทานขาเข้ามีค่าเป็นอนันต์
- ความต้านทานขาออก ที่มีค่าต่ำมากเป็นศูนย์นั้น จะไม่ส่งผลก ระทบต่อแรงดันเอาต์พุตแต่อย่างใด
- ออปแอมป์สามารถจ่ายและรับกระแส (source and sink) ได้ไม่จำกัด
- กระแสที่ไหลออกจากขาเอาต์พุตมีค่าน้อยมากจนเป็นศูนย์

ข) ความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์

ในทางปฏิบัติ ออ ปแอมป์มีคุณสมบัติที่ต่างจากอุดมคติหลายประการเช่น อัตราขยาย ความต้านทานขาเข้าและความต้านทานขาออก ระดับแรงดันเอาต์พุต แรงดันออฟเซททางอินพุต กระแสไบอัส แบนด์วิดท์ อัตราขยาย -แบนด์วิดท์ อัตราสลูว์และแบนด์วิดท์เต็มกำลัง มีรายละเอียดโดยคร่าวเป็นดังนี้

อัตราขยาย ความต้านทานขาเข้าและขาออก ในทางปฏิบัติ ออปแอมป์จะมีอัตราขยายและความต้านทานขาเข้าที่สูงมากแต่ไม่ถึงค่าอนันต์ ขณะเดียวกัน แม้ว่าความต้านทานขาออกจะมีค่าต่ำมาก แต่ก็ไม่ถึงศูนย์โอห์ม

ระดับแรงดันเอาต์พุต ในทางปฏิบัติ แม้ว่าอัตราขยายของออปแอมป์จะมีค่าสูง แต่เมื่อพิจารณาถึงระดับแรงดันเอาต์พุตที่ได้กลับพบว่ามีค่าไม่เกินแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงที่จ่ายให้กับออปแอมป์ จึงทำให้กราฟถ่ายโอนแรงดันของออปแอมป์จะมีช่วงอิ่มตัว (saturation region) กล่าวคือ ในช่วงอิ่มตัวจะมีค่าอัตราขยายต่ำมา

แรงดันออฟเซททางอินพุต แม้ว่าจะทำให้แรงดันอินพุตขาบวกและแรงดันอินพุตขาลบมีค่าเท่ากันได้โดยอาศัยการป้อนกลับแบบลบ (negative feedback) ก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาแรงดันเอาต์พุตที่ได้กลับมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ด้วยเหตุนี้ เราจึงต้องปรับให้แรงดันอินพุตขาบวกและขาลบมีค่าต่างกันเล็กน้อยจนทำให้แรงดันที่เอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ เราเรียกแรงดันอินพุตที่ขาออปแอมป์ซึ่งมีค่าต่างจากเดิมนี้ว่า “***แรงดันออฟเซททางอินพุต***” อย่างไรก็ดี ค่าแรงดันออฟเซทนี้เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของออปแอมป์แ บอร์นั้นๆ นอกจากนี้แล้ว ยังมีศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับ ***แรงดันออฟเซททางเอาต์พุต*** อีกด้วย ซึ่งจะเป็นการนิยามว่า เป็นแรงดันทางเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากการที่วงจรขยายออปแอมป์อินพุตเป็นศูนย์

กระแสไบอัสอินพุตและกระแสออฟเซท เป็นกระแสอินพุต ของออปแอมป์ที่เกิดจากการมีกระแสไหลเข้าหรือไหลออกจากขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์ เราเรียกค่าเฉลี่ยเลขคณิตของกระแสอินพุตทั้งสองขานี้ว่า “**กระแสไบอัสอินพุต**” และเรียกค่าความแตกต่างของกระแสระหว่างขาอินพุตทั้งสองว่า “**กระแสออฟเซท**”

แบนด์วิดท์ โดยทั่วไป ออปแอมป์ในสภาวะปกติซึ่งไม่มีการป้อนกลับจะมีแบนด์วิดท์แคบมาก แต่หากมีการป้อนกลับแบบลบเกิดขึ้นแล้วจะมีแบนด์วิดท์กว้างขึ้นตามสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$BW = BW_0 \left(\frac{A}{K}\right) \qquad (4)$$

เมื่อ BW แทนแบนด์วิดท์ของออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับ
BW แทนแบนด์วิดท์ของออปแอมป์ที่ไม่มีการป้อนกลับ
A แทนอัตราขยายของออปแอมป์ และ
K แทนอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ

อัตราขยาย -แบนด์วิดท์ คือ ผลคูณของอัตราขยายไฟตรงกับแบนด์วิดท์ขณะไม่มีการป้อนกลับของออปแอมป์

$$GBW = A' \ BW_0 \qquad (5)$$

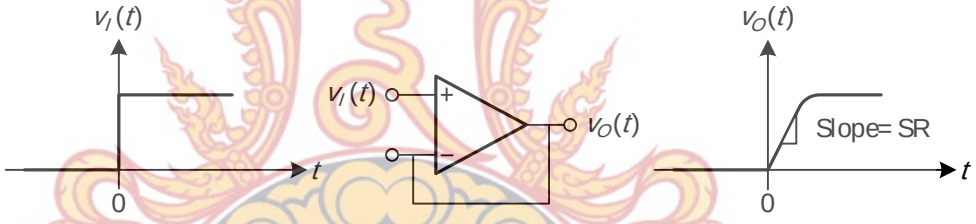
จากความสัมพันธ์ของสมการ อธิบายเพิ่มเติมได้ว่า หากต้องการอัตราขยายไฟตรงมีค่าสูงๆ แล้วผลที่ตามมาก็คือแบนด์วิดท์ของออปแอมป์จะลดลง นั่นเอง

อัตราสลูว์และแบนด์วิดท์เต็มกำลัง โดยอัตราสลูว์จะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์ มีค่าเป็นดังนี้

$$SR = \left.\frac{dv_{out}}{dt}\right|_{\max} \tag{6}$$

อัตราสลูว์สามารถวัดได้โดยการป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขนาดใหญ่ให้กับวงจรขยายสัญญาณแบบบัฟเฟอร์ (buffer amplifier) ส่วน**แบนด์วิดท์เต็มกำลัง** (full-power bandwidth: w_m) เป็นแบนด์วิดท์ ที่ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตสวิงได้สูงสุดโดยไม่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้นเลย ความถี่ของสัญญาณ w จะต้องมีค่าเท่ากับ

$$w \pounds\ w_m = \frac{SR}{|V_{out}|_{\max}} \tag{7}$$



ภาพที่ 9 การวัดอัตราสลูว์ของออปแอมป์โดยอาศัยการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันได

ค) การนำไปใช้งาน

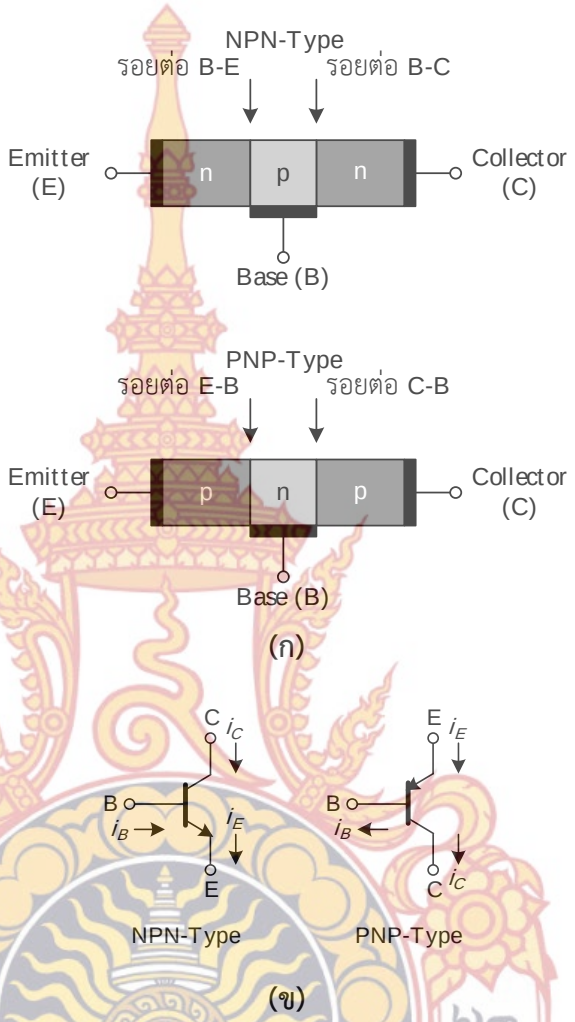
การนำเอาออปแอมป์ไปใช้งานนั้น ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวงจรประมวลผลสัญญาณเชิงเส้น เช่น วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting amplifier) วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (non-inverting amplifier) วงจรรวมแรงดันสัญญาณ (summing amplifier) วงจรขยายแรงดันผลต่าง (difference amplifier) และวงจรขยายเครื่องมือวัด (instrumentation amplifier) เป็นต้น

นอกจากนี้แล้ว เรายัง ใช้ออปแอมป์ในวงจรแบบ ไม่เป็นเชิงเส้นด้วย เช่น วงจรเร็คติไฟเออร์ (rectifier circuit) วงจรปรับอัตราขยายสัญญาณอัตโนมัติ (automatic gain control: AGC) วงจรชมิตต์ทริกเกอร์ (schmit-trigger circuit) วงจรกำเนิดสัญญาณรูปเหลี่ยม (oscillator circuit) เป็นต้น

3.6 ทรานซิสเตอร์แบบไบโพล่าร์

เป็นอุปกรณ์ที่มี 3 ขา ประกอบด้วยรอยต่อพี-เอ็น 2 ชุดต่อเข้าหากันแบบหันหลังชนกัน (back-to-back) ภาพที่ 10 แสดงโครงสร้างทางกายภา พและสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์แบบ

ไบโพลาร์ชนิด NPN และ PNP โดยภาพที่ 10(ก) แสดงโครงสร้างทางกายภาพ ส่วน ภาพที่ 10(ข) แสดงสัญลักษณ์ในเชิงวงจร โดยจากภาพที่ 10 จะเห็นได้ว่าทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ประกอบด้วยพื้นที่สารกึ่งตัวนำสามส่วนคือ อิมิตเตอร์ (emitter: E) เบส (base: B) และคอลเลกเตอร์ (collector: C)



ภาพที่ 10 ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN และ PNP **(ก)** โครงสร้างทางกายภาพ และ **(ข)** สัญลักษณ์เชิงวงจร

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด NPN มีขาอิมิตเตอร์และขาคอลเ ลกเตอร์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ประกบเข้าด้านซ้ายและขวามือโดยมีขาเบสซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีอยู่ตรงกลาง

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด PNP มีขาอิมิตเตอร์และขาคอลเลกเตอร์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ประกบเข้าด้านซ้ายและขวามือโดยมีขาเบสซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นอยู่ตรงกลาง

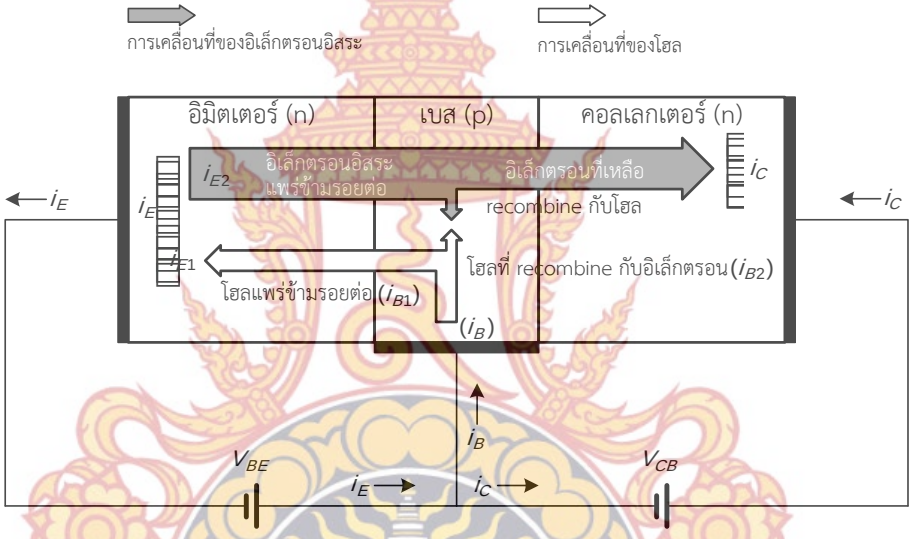
ทั้งทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP นั้นมีการทำงานแบ่งออกเป็น 3 สถานะ กล่าวคือ สถานะคัตออฟ (cut-off) สถานะแอกทีฟ (active) และสถานะอิ่มตัว (saturation) แต่ละสถานะใช้การพิจารณาจากลักษณะการไบอัสแบบไปข้างหน้า (forward bias) และย้อนกลับ (reverse bias) ดังนี้

สถานะ	BEJ	BCJ
สถานะคัตออฟ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ
สถานะแอกทีฟ	ไปข้างหน้า	ย้อนกลับ
สถานะอิ่มตัว	ไปข้างหน้า	ไปข้างหน้า

ก) การทำงานทางกายภาพ

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

สถานะคัตออฟ (cut-off) ถ้ารอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ และเบส-คอลเลกเตอร์ได้รับไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อทั้งสองเลย (ไหลน้อยมาก) นั่นคือ $i_B = i_C = i_E = 0$ จะเห็นได้ว่าในสถานะเช่นนี้ขาคอลเลกเตอร์จะถูกตัดขาดออกจากขาอิมิตเตอร์โดยสิ้นเชิง



ภาพที่ 11 การไบอัสในสถานะแอกทีฟไปข้างหน้าสำหรับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN

สถานะแอกทีฟ (active) กรณีของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะทำงานได้ถ้าให้รอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ ได้รับไบอัสไปข้างหน้า ส่วนรอยต่อเบส-คอลเลกเตอร์จะต้องได้รับไบอัสย้อนกลับ

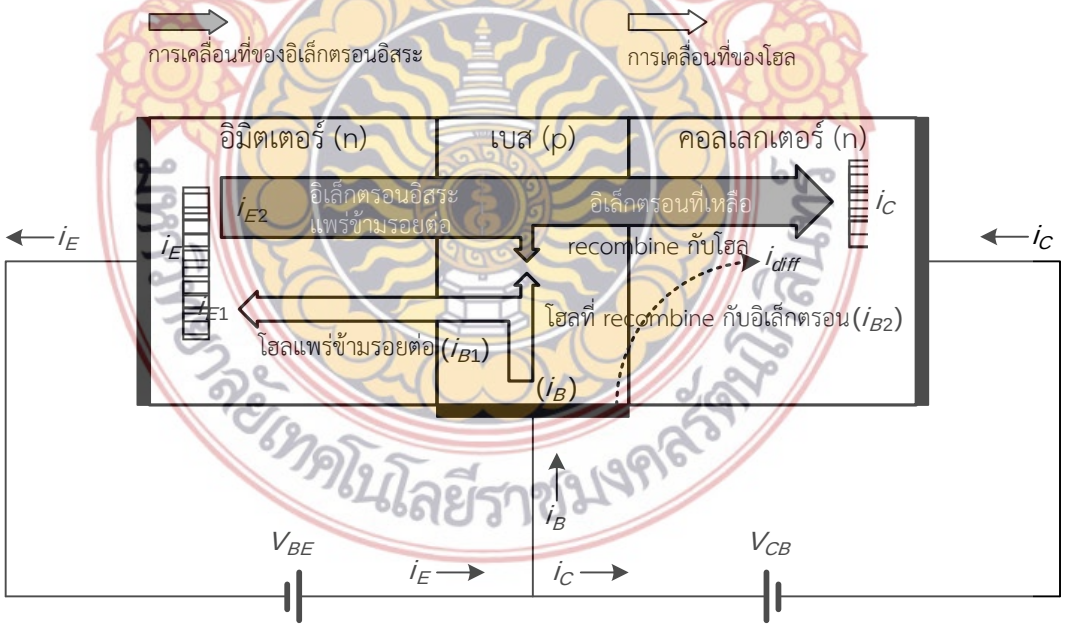
จากภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่า กระแส i_E ประกอบด้วยกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ไปยังเบส และกระแสโฮลที่เกิดจากการแพร่ของโฮลจากเบสไปยังอิมิตเตอร์ โดยทั่วไป ทรานซิสเตอร์ได้ถูกออกแบบให้กระแสอิเล็กตรอนมีขนาดใหญ่กว่ากระแสโฮลมาก ซึ่งสามารถทำได้โดยการแพร่ให้สารเจือในอิมิตเตอร์มี ความหนาแน่นสูงกว่าสารเจือในเบสมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในอิมิตเตอร์มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของโฮลในเบสมาก เช่นกัน

อิเล็กตรอนที่เกิดการแพร่จากอิมิตเตอร์เข้าสู่เบสนี้จะกลายเป็นพาหะส่วนน้อย (minority carriers) ในเบส [ขณะที่พาหะส่วนใหญ่ (majority carriers) เป็นโฮล] อิเล็กตรอนเหล่านี้บางส่วนจะรวมตัว (recombination) กับโฮลในเบส แต่เนื่องจากรอยต่อที่เบส-คอลเลกเตอร์ได้รับไบอัสย้อนกลับ ทำให้สนามไฟฟ้าที่บริเ วณรอยต่อจะดึงอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้ามาให้เลื่อนไปยังบริเวณคอลเลกเตอร์และเคลื่อนที่ออกจากทรานซิสเ ตอร์ไปสู่วงจรภายนอก การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะทำให้

เกิดกระแสอิเล็กตรอนวิ่งเข้าสู่ขาคอลเลกเตอร์ โดยเราจะเรียกกระแสดังกล่าวว่า กระแสคอลเล กเตอร์ (collector current: i_C) ทั้งนี้ เนื่องจากทรานซิสเตอร์โดยทั่วไปจะมีบริเวณ ที่เบสแคบ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามเบสเข้าไปสู่คอลเลกเตอร์ได้

พิจารณาภาพที่ 11 อีกครั้ง จะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลเข้าสู่ขาเบส ซึ่งเราเรียกว่า กระแสเบส (base current: i_B) จะประกอบด้วยกระแสสองส่วน กล่าวคือ กระแสเบสส่วนแรก (i_{B1}) เกิดจากกระแสโฮลที่แพร่ผ่านรอยต่อ เบส-อิมิตเตอร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ($i_{B1} = i_{E1}$) และกระแสเบสส่วนที่สอง (i_{B2}) นั้นเกิดจากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนในบริเวณเบส ทั้งนี้ เนื่องจากในสถานะสมดุลจะมีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่เข้ามาสู่บริเวณเบสในอัตราคงที่และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกับโฮลที่เบส ดังนั้น เพื่อให้จำนวนโฮลในบริเวณเบสมีค่าคงที่ในสถานะสมดุล จึงต้องมี โฮลเคลื่อนที่เข้ามาที่บริเวณเบสด้วยอัตราคงที่ การเคลื่อนที่ของโฮลดังกล่าวจะทำให้ เกิดการกระแส i_{B2} ไหลขึ้น โดยทั่วไปแล้ว เราต้องการให้กระแส i_B มีค่าน้อยๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองกรณี กล่าวคือ ทำให้เกิดการแพร่สารเจือบริเวณเบสอย่างเบาบางจะทำให้ i_{B1} มีค่าน้อยๆ ได้ หรือการสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีบริเวณเบสแคบๆ จะทำให้เกิดการรวมตัวของกระแสที่เบสน้อยลง นั่นคือจะได้ i_{B2} มีค่าน้อยๆ ด้วย

สถานะอิ่มตัว (saturation) ถ้ารอยต่ออิมิตเตอร์ -เบส และคอลเลกเตอร์ -เบสได้รับไบอัสตรง (forward bias) ดังภาพที่ 12 จะเกิดการแพร่ของพาหะส่วนใหญ่ข้ามรอยต่อคอลเลกเตอร์ -เบส จะทำให้มีกระแสไหลจากเบสไปยังคอลเลกเตอร์ได้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า กระแสดังกล่าวจะไหลไปในทางเดียวกับกระแสเบส i_B แต่จะมีทิศสวนทางกับกระแส i_C หากเทียบกับ ในสถานะแอกทีฟจะพบว่ากระแสเบส i_B ในสถานะอิ่มตัวนี้มีค่าสูงขึ้นกว่าในสถานะแอกทีฟ ขณะที่กระแสคอลเล็กเตอร์ i_C จะลดลง ในที่สุดในสถานะอิ่มตัวนี้จะมีอัตราขยายกระแส b ลดลง



ภาพที่ 12 การไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN ในสถานะอิ่มตัวอย่างอ่อน

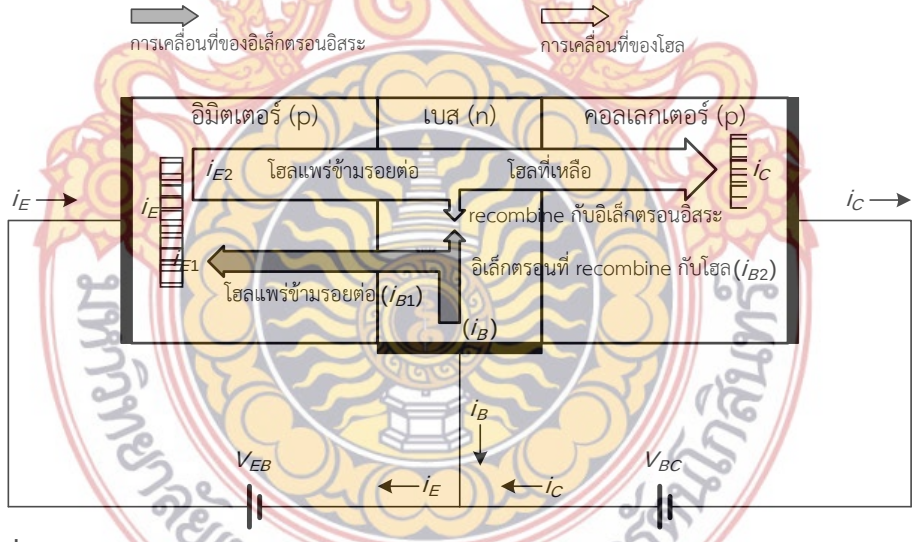
นอกจากนี้ ถ้าเราให้แรงดันที่เบส -คอลเลกเตอร์ V_{BC} มีค่าสูงมากพอ จะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ i_C มีค่าตกลงจนเป็นศูนย์ เนื่องจากกระแสที่เกิดจากการเลื่อนของอิเล็กตรอนจากเบสไปสู่คอลเลกเตอร์นั้นจะถูกหักล้างด้วยกระแสที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนจากคอลเลกเตอร์สู่เบส และเมื่อแรงดันที่เบส -คอลเลกเตอร์ V_{BC} มีค่าสูงขึ้นไปอีก กระแสคอลเลกเตอร์ i_C จะเริ่มไหลย้อนกลับ

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

สถานะ	EBJ	CBJ
สถานะคัตออฟ	ย้อนกลับ	ย้อนกลับ
สถานะแอกทีฟ	ไปข้างหน้า	ย้อนกลับ
สถานะอิ่มตัว	ไปข้างหน้า	ไปข้างหน้า

สถานะคัตออฟ (cut-off) ถ้ารอยต่ออิมิตเตอร์ -เบส และคอลเลกเตอร์ -เบสได้รับไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) จะไม่มีกระแสไหลผ่านรอยต่อทั้งสองเลย (ไหลน้อยมาก) นั่นคือ $i_B = i_C = i_E = 0$ จะเห็นได้ว่าในสถานะเช่นนี้ขาคอลเลกเตอร์จะถูกตัดขาดออกจากขาอิมิตเตอร์โดยสิ้นเชิง

สถานะแอกทีฟ (active) กรณีของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะทำงานได้ถ้าให้รอยต่ออิมิตเ ตอร์-เบส ได้รับไบอัสไปข้างหน้า (มีกระแสไหลจากอิมิตเตอร์ไปยังเบส) ส่วนรอยต่อคอลเลกเตอร์ -เบส จะต้องได้รับไบอัสย้อนกลับ



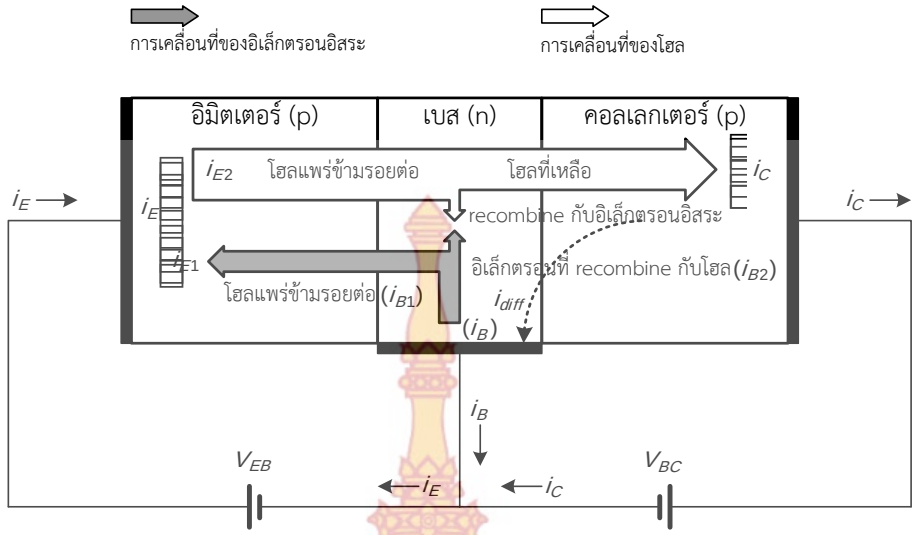
ภาพที่ 13 การไบอัสในสถานะแอกทีฟไปข้างหน้าสำหรับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP

จากภาพที่ 13 จะเห็นได้ว่า กระแส i_E ประกอบด้วยกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแพร่ของอิเล็กตรอนจากเบสไปยังอิมิตเตอร์ (i_{E1}) และกระแสโฮลที่เกิดจากการแพร่ของโฮลจาก อิมิตเตอร์ไปยังเบส (i_{E2}) โดยทั่วไป ทรานซิสเตอร์ ชนิด PNP ได้ถูกออกแบบให้กระแส โฮลมีขนาดใหญ่กว่ากระแส อิเล็กตรอน มาก (i_{E2} ? i_{E1}) ซึ่งสามารถทำได้โดยการแพร่ให้สารเจือในอิมิตเตอร์มีความหนาแน่นสูงกว่าสารเจือในเบสมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นของ โฮลในอิมิตเตอร์มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในเบสมาก เช่นกัน

โฮลที่เกิดการแพร่จากอิมิตเตอร์เข้าสู่เบสนี้จะกลายเป็นพาหะส่วนน้อย (minority carriers) ในเบส [ขณะที่พาหะส่วนใหญ่ (majority carriers) เป็นอิเล็กตรอน] โฮลเหล่านี้บางส่วนจะรวมตัว (recombination) กับอิเล็กตรอนอิสระในเบส แต่เนื่องจากรอยต่อที่คอลเลกเตอร์ -เบส ได้รับไบอัสย้อนกลับ ทำให้สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจะดึงโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาให้เลื่อนไปยังบริเวณคอลเลกเตอร์ และเคลื่อนที่ออกจากทรานซิสเตอร์ไปสู่วงจรภายนอก การเคลื่อนที่ของ โฮลดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแส โฮล วิ่งเข้าสู่ขาคอลเลกเตอร์ โดยเราจะ เรียก กระแสดังกล่าวว่า ก ระแสคอลเลกเตอร์ (collector current: i_C) ทั้งนี้ เนื่องจากทรานซิสเตอร์โดยทั่วไปจะมีบริเวณ ที่เบสแคบ โฮลส่วนใหญ่จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามเบสเข้าไปสู่คอลเลกเตอร์ได้

พิจารณา ภาพที่ 13 อีกครั้ง จะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหล ออกจาก ขาเบส ซึ่งเราเรียกว่า กระแสเบส (base current: i_B) จะประกอบด้วยกระแสสองส่วน กล่าวคือ กระแสเบสส่วนแรก (i_{B1}) เกิดจากกระแสโฮลที่แพร่ผ่านรอยต่ออิมิตเตอร์-เบส ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ($i_{B1} = i_{E1}$) และกระแสเบสส่วนที่ สอง (i_{B2}) นั้นเกิดจากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนในบริเวณเบส ทั้งนี้เนื่องจากในสถานะสมดุลจะมี โฮลแพร่ เข้ามาสู่บริเวณเบสในอัตราคงที่และ โฮลเหล่านี้จะเกิดการรวมตัวกับ อิเล็กตรอนอิสระ ที่เบส ดังนั้น เพื่อให้จำนวน อิเล็กตรอนอิสระ ในบริเวณเบส มีค่าคงที่ในสถานะสมดุล จึงต้องมี อิเล็กตรอนอิสระ เคลื่อนที่เข้ามาที่บริเวณเบสด้วยอัตราคงที่ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ ดังกล่าวจะทำให้เกิดการกระแส i_{B2} ไหลขึ้น โดยทั่วไปแล้ว เราต้องการให้กระแส i_B มีค่าน้อยๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็นสองกรณี กล่าวคือ ทำให้เกิดการแพร่สารเจือบริเวณเบสอย่างเบาบางจะทำให้ i_{B1} มีค่าน้อยๆ ได้ หรือการสร้างทรานซิสเตอร์ที่มีบริเวณเบสแคบๆ จะทำให้เกิดการรวมตัวของกระแสที่เบสน้อยลง นั่นคือจะได้ i_{B2} มีค่าน้อยๆ ด้วย

สถานะอิ่มตัว (saturation) ถ้ารอยต่ออิมิตเตอร์ -เบส และคอลเลกเตอร์ -เบสได้รับไบอัสตรง (forward bias) ดังภาพที่ 13 จะเกิดการแพร่ของพาหะส่วนใหญ่ข้ามรอยต่อคอลเลกเตอร์ -เบส จะทำให้มีกระแสไหลจาก คอลเลกเตอร์ ไปยัง เบสได้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ก ระแสดังกล่าวจะไหลไปในทางเดียวกับกระแสเบส i_B แต่จะมีทิศสวนทางกับกระแส i_C (ดังภาพที่ 14) หากเทียบกับในสถานะแอกทีฟจะพบว่า กระแสเบส i_B ในสถานะอิ่มตัวนี้มีค่าสูงขึ้นกว่าในสถานะแอกทีฟ ขณะ ที่กระแสคอลเล็กเตอร์ i_C จะลดลง ในที่สุดในสถานะอิ่มตัวนี้จะมีอัตราขยายกระแส b ลดลง

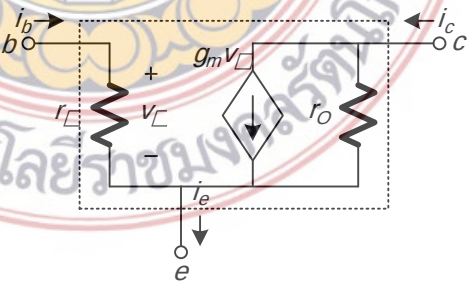


ภาพที่ 14 การไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด PNP ในสถานะอิ่มตัวอย่างอ่อน

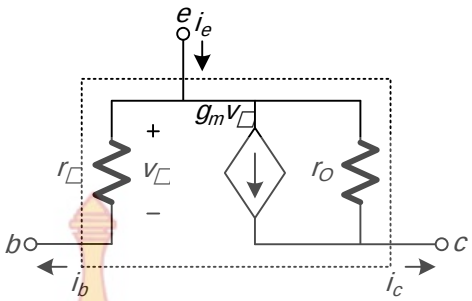
ข) แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก

ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN และ PNP มีแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal model) เป็นดังภาพที่ 15 โดยภาพที่ 15(ก) และ (ข) เป็นแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP ตามลำดับโดยมีความต้านทานที่เชื่อต่อระหว่างขาเบสและคอลเลกเต อร์แทนค่าด้วย $r_p = V_T / I_B = bV_T / I_C$ มีแรงดันตกคร่อมค่าเท่ากับ v_p ส่วนระหว่างขาคอลเล็กเตอร์และเบสนั้น มีค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ สำหรับสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal transconductance: g_m) เท่ากับ I_C / V_T (หรือบางครั้งอาจจะแทนด้วย อัตราขยายกระแส $b = I_C / I_B$) อย่างไรก็ดี กระแส i_C นอกจากจะขึ้นกับแรงดันที่เบส -อิมิตเตอร์แล้ว ยังมีค่าขึ้นกับแรงดันที่เบส-คอลเลกเตอร์อีกด้วย

เนื่องจากเมื่อแรงดันย้อนกลับ ที่ตกคร่อมรอยต่อเบส -คอลเลกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น บริเวณปลอดพาหะรอบๆ รอยต่อดังกล่าวจะมีขนาดกว้างขึ้น ส่งผลให้ความกว้างที่เบสมีค่าแคบลง และกระแส i_C มีค่าสูงขึ้น เราเรียกว่า **“ปรากฏการณ์เออร์ลีย์ (Early effect)”** ทำให้เกิดความต้านทานระหว่างขาคอลเลกเตอร์และเบส (r_o) ด้วย



(ก)

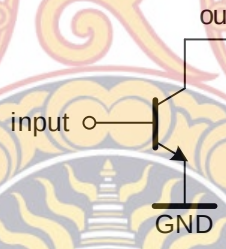


(ข)

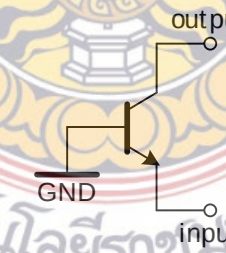
ภาพที่ 15 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กแบบไฮบริดพายของทรานซิสเตอร์ชนิด
(ก) NPN และ (ข) PNP

ค) การนำทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ไปใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณ

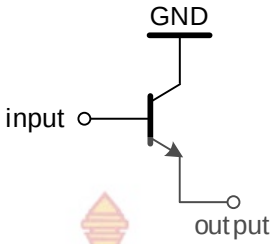
การใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ไปใช้ในการขยายสัญญาณ เราสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter) วงจรขยายแบบเบสร่วม (common base) และวงจรขยายแบบคอลเลกเตอร์ร่วม (common collector) ซึ่งวงจรขยายแต่ละแบบ แสดงได้ดังภาพที่ 16 (แสดงเฉพาะโครงสร้าง)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 16 ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ (ก) วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม (ข) วงจรขยายแบบเบสร่วม และ (ค) วงจรขยายแบบคอลเลกเตอร์ร่วม

โดยภาพที่ 16(ก) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ มีค่าอัตราขยายสูง เกิดการกลับเฟสของสัญญาณทางเอาต์พุตเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต มีความต้านทานขาเข้าสูงปานกลาง และมีความต้านทานขาออกสูง

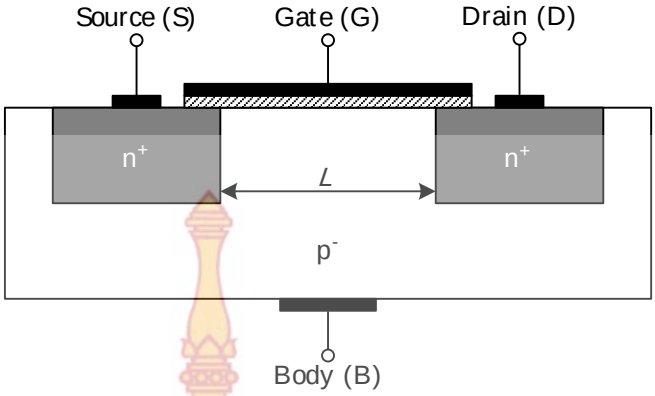
ภาพที่ 16(ข) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ มีค่าอัตราขยายสูง เกิดการกลับเฟสของสัญญาณทางเอาต์พุตเมื่อเทียบกับสัญญาณอินพุต มีความต้านทานขาเข้ามีค่าต่ำกว่า ภาพที่ 16(ก) มาก และอัตราขยายโดยรวมของวงจรก็มีค่าต่ำมากเช่นกัน ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าเท่ากับความต้านทานภายนอกที่ต่อเข้าที่ขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้น เราจึงใช้วงจรขยายนี้ในโหมดกระแสทางกว่าโหมดแรงดัน (สัญญาณทางอินพุตจะอยู่ในรูปกระแสเสียเป็นส่วนใหญ่)

ส่วนภาพที่ 16(ค) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ อัตราขยายมีค่าประมาณ 1 มีความต้านทานขาเข้าสูง ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าต่ำ เราจึงใช้เป็นวงจรบัฟเฟอร์

3.7 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าหรือที่เรียกกันว่า “**มอสเฟต**” ย่อมาจากคำว่า Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เพราะในกระบวนการผลิตสมัยใหม่สามารถบรรจุวงจรรวมทางด้านดิจิตอลที่มีความซับซ้อนให้อยู่บนฐานรองเดียวกันได้ จึงทำให้ได้วงจรรวมขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้ว มอสเฟต แบ่งได้สองประเภทคือ NMOS (N-channel MOSFET) และ PMOS (P-channel MOSFET) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 4 ขา

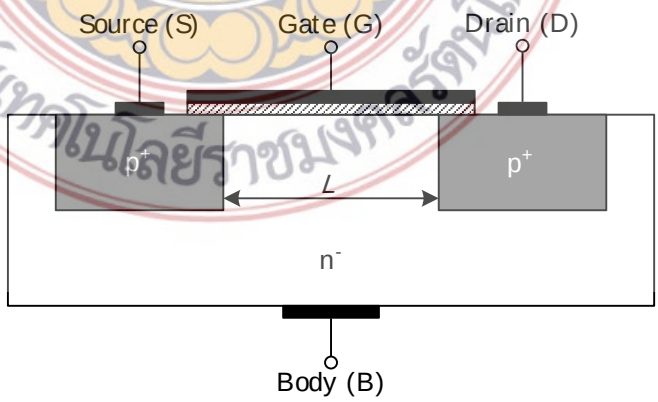
กรณีทรานซิสเตอร์ประเภท NMOS ประกอบด้วย ขาเกท (gate: G) เป็นขั้วที่ทำหน้าที่ต่อกับชั้นตัวนำ ส่วนขาเดรน (drain: D) และ ขาซอร์ส (source: S) เป็นขั้วที่ต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n^+) ส่วนขาบอดี้ (body: B) เป็นขาที่ต่ออยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p^-) ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ภาคตัดขวางของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท NMOS

จากภาพที่ 17 จะเห็นว่า ระหว่างขาเกทและขาบอดี้ ประกอบด้วยชั้นตัวนำ [สมัยก่อนทำจากโลหะ อลูมิเนียม แต่ปัจจุบันจะใช้โพลีซิลิกอน (poly-silicon)] ถัดลงมาเป็นชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือเรียกสั้นๆ ว่าชั้นออกไซด์ (Oxide) และชั้นถัดมาเรียกว่าชั้นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เมื่อพิจารณาภาพที่ 17 อีกครั้ง จะเห็นได้ว่า NMOS มีโครงสร้างที่สมมาตร เราสามารถสลับกันระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สได้ แต่ในทางปฏิบัติ เราจะให้แรงดันที่ขาเดรนมีค่าสูงกว่าขาซอร์ส ($V_D > V_S$) เสมอ ส่วนแรงดันที่ป้อนให้ที่ขาเกทนั้น ถ้ามีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขาเดรนและขาซอร์สแล้ว ($V_G < V_D, V_S$) จะทำให้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้านี้ไม่ทำงาน จึงไม่มีกระแสไหลจากขาเดรนไปยังขาซอร์สได้ (เสมือนเปิดวงจรระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส : $I_{DS} = 0$) ในทางตรงข้าม หากเราให้แรงดันที่ขาเกทสูงจะเกิดช่องนำกระแสระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สได้ ยังผลให้เกิดกระแสไหลจากขาเดรน ไปหาขาซอร์ส ($I_{DS} > 0$) การต่อใช้งานในวงจร ขาบอดี้นิยมต่อเข้ากับแรงดันต่ำสุดของวงจร

กรณีทรานซิสเตอร์ประเภท PMOS ประกอบด้วย ขาเกท (gate: G) เป็นขั้วที่ทำหน้าที่ต่อกับชั้นตัวนำ ส่วนขาเดรน (drain: D) และ ขาซอร์ส (source: S) เป็นขั้วที่ต่ออยู่กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p^+) ส่วนขาบอดี้ (body: B) เป็นขาที่ต่ออยู่กับโครงสร้างของอุปกรณ์ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n^-) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ภาคตัดขวางของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท PMOS

พิจารณาภาพที่ 18 จะเห็นได้ว่า PMOS มีโครงสร้างที่สมมาตร สามารถสลับขาเดรนกับขาซอร์สได้ ในทางปฏิบัติ เราจะให้แรงดันที่ขา ซอร์สมีค่าสูงกว่าขา เดรน ($V_S > V_D$)เสมอ ส่วนแรงดันที่ป้อนให้ที่ขาเกทนั้น ถ้ามีค่ามากกว่าแรงดันที่ขาเดรนและขาซอร์สแล้ว ($V_G > V_D, V_S$) จะทำให้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้านี้ไม่ทำงาน จึงไม่มีกระแสไหลจากขา ซอร์สไปยังขาเดรนได้ (เสมือนเปิดวงจรระหว่าง ขาซอร์สและขาเดรน: $I_{SD} = 0$) ในทางตรงข้าม หากเราให้แรงดันที่ขาเกทสูงจะเกิดช่องนำกระแสระ หว่างขา ซอร์ส กับขา เดรน ได้ ยังผลให้เกิดกระแสไหลจากขา ซอร์ส ไปหาขา เดรน ($I_{SD} > 0$)การต่อใช้งานในวงจร ขาบอดี้นิยมต่อเข้ากับแรงดันสูงสุดของวงจร

ก) การทำงานทางกายภาพ

กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด NMOS

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ สมมติให้ ทุกขาของทรานซิสเตอร์ประเภท NMOS ถูกต่อเข้ากับกราวด์ กรณีเช่นนี้จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นที่บริเวณรอยต่อ (p^--n^+) นั่นคือรอยต่อ B-S และรอยต่อ B-D

เมื่อเริ่มทำให้แรงดันที่เกทมีค่าเป็นลบ ($V_G < 0$) โฮลในบริเวณขาบอดี้จะถูกดึงดูดขึ้นมาบริเวณข้างบน ทำให้เกิดบริเวณ p^+ ขึ้นเรียกว่า **"บริเวณรวมตัว (accumulation region)"** ขึ้นใต้ชั้นออกไซด์

ในทางตรงข้าม ถ้าทำให้แรงดันที่เกทมีค่าเป็นบวกเล็กน้อย ($v_{GS} > 0$) โฮลจะถูกผลักออกจากบริเวณข้างบน ทำให้เกิด **"บริเวณปลอดพาหะ (depletion region)"** ขึ้นใต้ชั้นออกไซด์

ถ้าเราให้แรงดันที่เกทมีค่าเป็นบวกเพิ่มสูงขึ้นถึง ***แรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน*** (threshold voltage: V_{tn}) แล้ว สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์จะดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระที่ เป็นพาหะส่วนน้อยในบริเวณขาบอดี้ขึ้นมาทำให้เกิด **"ชั้นผันแปร (inversion layer)"** ชนิด N ขึ้นใช้ชั้นออกไซด์ ทั้งนี้ชั้นผันแปรจะเสมือนเป็น **"ช่องนำกระแส (channel)"** เชื่อมต่อระหว่างบริเวณเดรนและซอร์สภายใต้เงื่อนไข $v_{GS} = v_{GD} > V_{tn}$ โดยความต้านทานของช่องนำกระแส ($R_{channel}$) มีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระภายในช่องนำกระแสและแปรผันโดยตรงกับแรงดัน $V_{eff} = v_{GS} - V_{tn}$

หลังจากเกิดช่องนำกระแสระหว่างขาเดรนกับขาซอร์สแล้ว หากเราป้อนแรงดัน v_{DS} ระหว่างขาเดรนและซอร์สจะทำให้ เกิดกระแสไหลจากขาเดรนไปยังขาซอร์สได้ค่าเท่ากับ $i_{DS} = v_{DS} / R_{channel}$ นั่นแสดงว่า ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าประเภท NMOS นี้จะทำตัวเสมือนเป็นตัวต้านทานที่ถูกควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า หรือหากพิจารณาในรูปกระแสอาจกล่าวได้ว่า ทรานซิสเตอร์นี้ใช้สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมชั้นออกไซด์ในการควบคุมกระแส เราจึงเรียกทรานซิสเตอร์นี้ว่าเป็น **"ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า"**

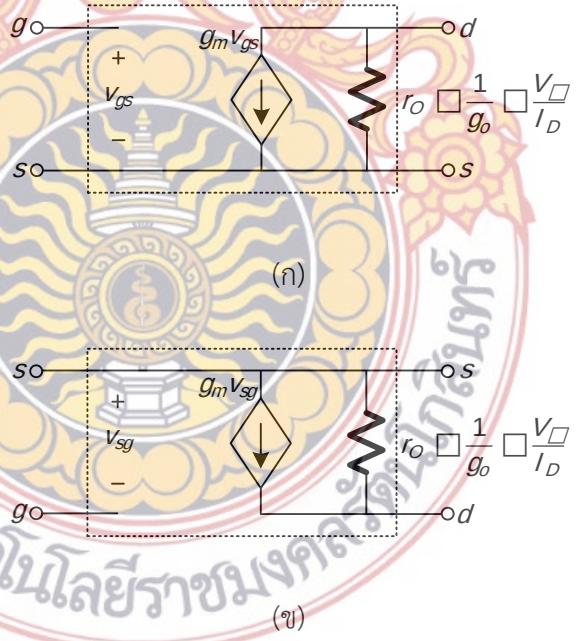
กรณีทรานซิสเตอร์ชนิด PMOS

การอธิบายการทำงานของทรานซิสเตอร์ไฟฟ้าประเภท PMOS สามารถอธิบายเช่นเดียวกับ NMOS แต่มีแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนเป็น V_{tp} น้อยกว่ าศูนย์ ($V_{tp} < 0$) และ $V_{eff} = v_{SG} - |V_{tp}|$

สถานะ	เงื่อนไข	ช่องนำกระแส
คัตออฟ	$v_{SG} < \|V_{tp}\|$ หรือ $V_{eff} < 0$	ไม่มี
ไทรโอด	$v_{SG} > \|V_{tp}\|$ และ $v_{SD} < V_{eff}$ หรือ $V_{eff} > v_{SD} > 0$	ต่อเนื่องระหว่างเดรนและซอร์ส
แอกทีฟ	$v_{SG} > \|V_{tp}\|$ และ $v_{SD} > V_{eff}$ หรือ $v_{SD} > V_{eff} > 0$	ถูกตัดขาด ณ จุดใกล้ซอร์ส

ข) แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก

การวิเคราะห์วงจรขยายสัญญาณที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า จะใช้ การวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal model) ของทรานซิสเตอร์ เพราะสามารถใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าช่วยวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้

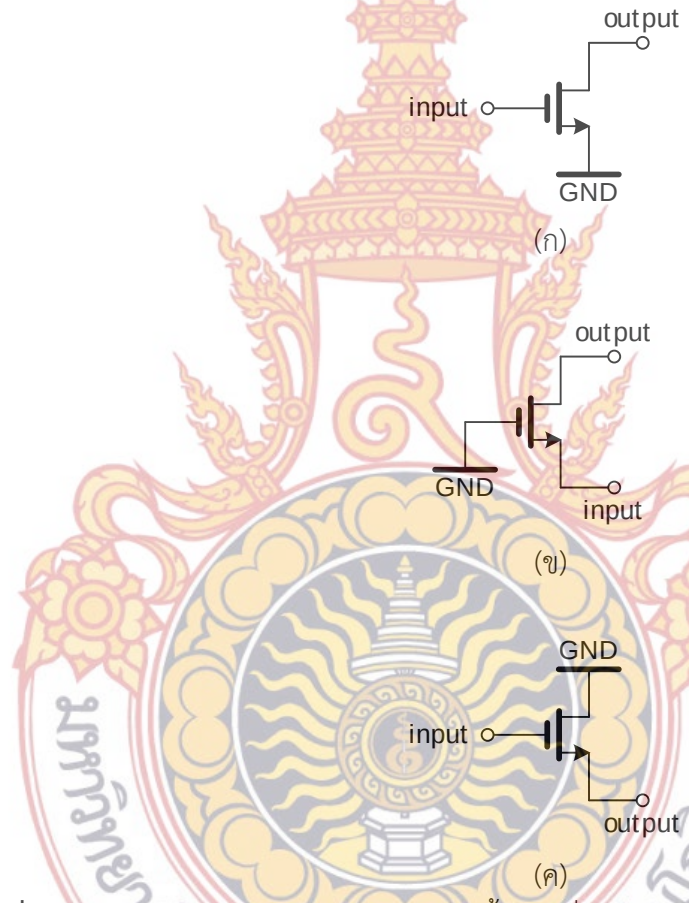


ภาพที่ 19 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของทรานซิสเตอร์สนามไ ฟฟ้าที่รวมผลของการแปรผันความยาวช่องกระแส กรณี (ก) NMOS และ (ข) PMOS

จากภาพที่ 19 เป็นแบบจำลอง ณ ความถี่ต่ำประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส ค่าเท่ากับ $g_m v_{gs}$ ซึ่งถูกควบคุมด้วยแรงดันระหว่างขาเกทและขาซอร์ส (v_{gs}) และความต้า นทานทางเอาต์พุตซึ่งต่อขนานระหว่างขาเดรนและขาซอร์ส r_o มีค่าเท่ากับ $1/ g_o = V_l / I_D$

ค) การนำทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าไปใช้งานเป็นวงจรขยายสัญญาณ

การใช้ทรานซิสเตอร์แบบ สนามไฟฟ้า ไปใช้ในการขยายสัญญาณ เราสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะคือ วงจรขยายแบบซอร์สร่วม (common source) วงจรขยายแบบเกทร่วม (common gate) และวงจรขยายแบบเดรนร่วม (common drain) ซึ่งวงจรขยายแต่ละแบบแสดงได้ดังภาพที่ 20 (แสดงเฉพาะโครงสร้าง)



ภาพที่ 20 ลักษณะของวงจรขยายสัญญาณแบบพื้นฐานที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (ก) วงจรขยายแบบซอร์สร่วม (ข) วงจรขยายแบบเกทร่วม และ (ค) วงจรขยายแบบเดรนร่วม

โดยภาพที่ 20(ก) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคือ อัตราขยาย มีค่าสูง และเกิดการกลับเฟสกันระหว่าง สัญญาณทางเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต มีความต้านทานขาเข้า สามารถกำหนดจากความต้านทานภายนอกที่ต่อเข้าที่ขาเกท ส่วนความต้านทานขาออก มีค่าเท่ากับความต้านทาน r_o ขนานกับความต้านทานภายนอกที่ต่อที่ขาเดรน

ภาพที่ 20(ข) เป็นวงจรขยายสัญญาณ ที่มีลักษณะเด่นคือ สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมีเฟสเดียวกัน มีอัตราขยายสัญญาณค่อนข้างต่ำ เรื่องจากความต้านทานขาเข้ามีค่าต่ำ ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าเท่ากับความต้านทานภายนอกที่ต่อเข้าที่ขาเดรนของทรานซิสเตอร์

ส่วนภาพที่ 20(ค) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีลักษณะเด่นคื อ อัตราขยายมีค่าใกล้เคียง 1 มีความต้านทานขาเข้าสูง กำหนดได้จากความต้านทานภายนอกซึ่งต่อเข้าที่ขาเกท ส่วนความต้านทานขาออกมีค่าต่ำ ด้วยเหตุนี้ เรา จึงนำไปใช้เป็นวงจรบั๊ปเฟอร์ (buffer amplifier หรือบางครั้งเรียกว่าวงจรกันชน)

4. กล่าวสรุป

ในบทนี้ เราได้ทราบวิธีการใ ช้งานโปรแกรมเบื้องต้น ทีละขั้นตอนแบบ step-by-step พร้อมรูปภาพประกอบซึ่งได้ช่วยให้ผู้อ่านสามารถทำตามได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งได้ทราบการเรียกใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนี้ เรายังได้อธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่สำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญเช่น ไดโอด ออปแอมป์ ทรา นซิสเตอร์แบบไบโพลาร์และ แบบสนามไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อให้นักศึกษาและผู้ที่สนใจได้ศึกษาในรายประเด็นที่สำคัญ โดยเฉพาะคุณสมบัติทางไฟตรงและไฟสลับ รวมไปถึงลักษณะการนำไปใช้งานในรายงานฉบับนี้ด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

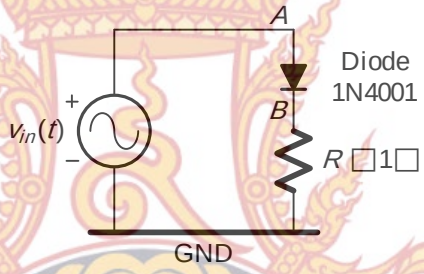
1. กล่าวนำ

ในบทนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ในลักษณะ ต่างๆ เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีมากมายหลายชนิดในท้องตลาดให้เหม าะสมกับงานที่ต้องการ อีกทั้ง เพื่อให้นักศึกษาได้เข้าใจถึงการใช้งานโปรแกรมทางวิศวกรรมศาสตร์และให้สามาร ถใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

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) พล๊อตความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านไดโอด

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

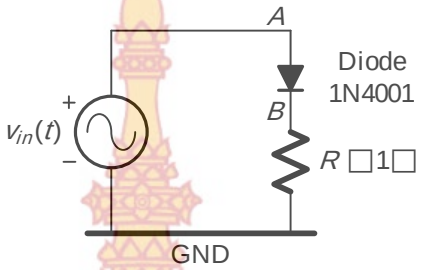
8) พล๊อตความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านไดโอด

9) หาค่าแรงดันเบรกดาวน์ บันทึกค่าเก็บไว้

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

11) บันทึกผลในตารางโดยเรียงลำดับเบอร์ไดโอดตาม ค่าแรงดันเบรกดาวน์ จากมากไปหาน้อย (ถ้าไดโอดตัวใดไม่สามารถทราบค่าแรงดันเบรกดาวน์ดังกล่าวให้ระบุในตารางบันทึกผลว่า มีค่าเกินกว่าช่วงที่วัดได้)

การทดลองตอนที่ 2.1.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติทางไฟตรงพื้นฐานของไดโอด



ภาพที่ 22 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด

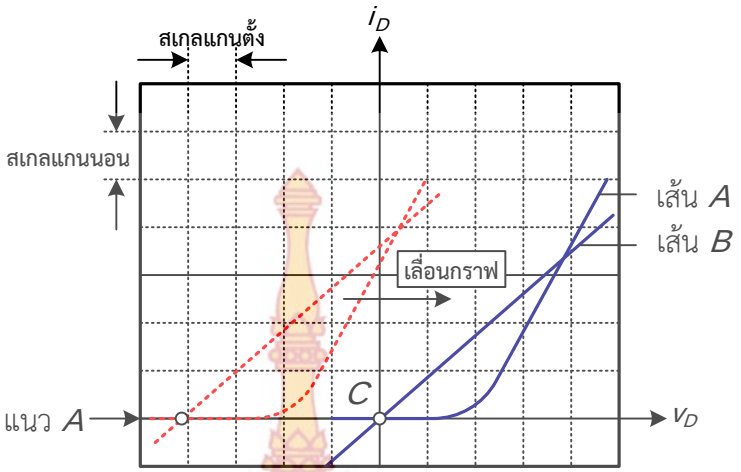
1) ต่อวงจรตามภาพที่ 2 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001

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



ภาพที่ 23 ตัวอย่างภาพที่ปรากฏบนหน้าจอออสซิลโลสโคปขณะไดโอดได้รับไบอัสไปข้างหน้า

5) เราจะได้กราฟความสัมพันธ์ของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและ แรงดันที่ตกคร่อมไดโอด 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

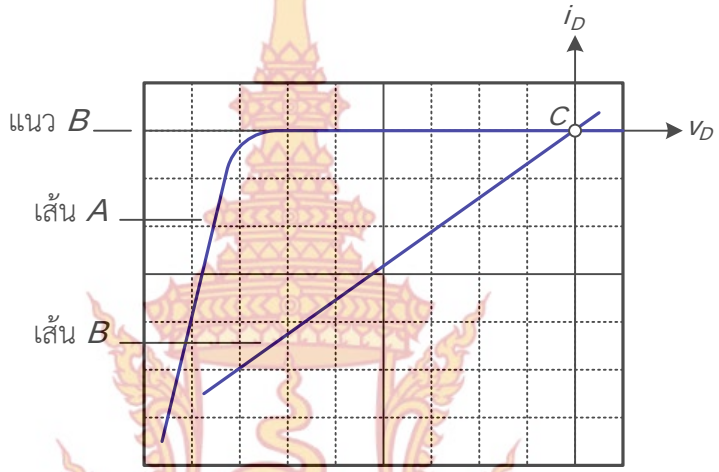
10) ปรับปุ่มต่างๆ ของออสซิลโลสโคปเป็นดังนี้

- 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

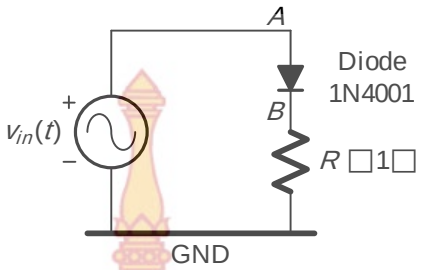
15) ปรับปุ่มเลือกอินพุตไปอยู่ที่ CH2 นักศึกษาจะเห็นว่าเส้น B จะหายไป โดยเส้น B นี้มีประโยชน์เพียงเพื่อช่วยให้ เราตั้งแนวแรงดัน 0 โวลต์ได้เท่านั้น จากนั้นบันทึกรูปกราฟที่เหลือ (เส้น A) ลงในกระดาษกราฟ โดยอย่าลืมบันทึกสเกลที่กล่าวมาแล้วลงในรูปกราฟด้วย

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

17) บันทึกผลในตารางโดยเรียงลำดับเบอร์ไดโอดตามค่าแรงดันเบรกดาวน์ จากมากไปหาน้อย (ถ้าไดโอดตัวใดไม่สามารถทราบค่าแรงดันเบรกดาวน์ดังกล่าวให้ระบุในตารางบันทึกผลว่ามีค่าเกินกว่าช่วงที่วัดได้)

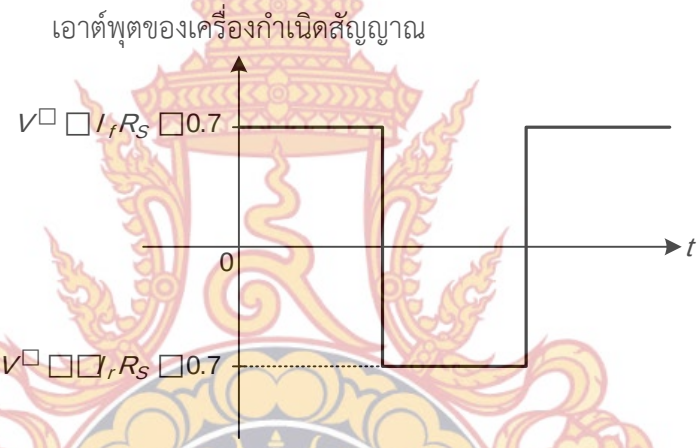
ตอนที่ 2.2 ศึกษาคุณสมบัติการสวิทซ์ของไดโอด

การทดลองตอนที่ 2.2.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติการสวิทซ์ของไดโอด



ภาพที่ 25 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของไดโอด

1) วาดวงจรตามภาพที่ 5 โดยใช้ไดโอดเบอร์ 1N4001



ภาพที่ 26 การกำหนดค่า V^+ และ V^- ของสัญญาณรูปเหลี่ยม

2) ป้อนสัญญาณแบบ สี่เหลี่ยม 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) พล็อตความสัมพันธ์ของแรงดันที่ตกคร่อม ณ จุด A และ B เพื่อหาค่าเวลา t_S

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

5) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา 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 $V^+ = I_r R_S + 0.7$ 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

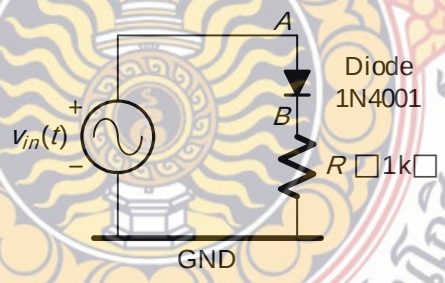
5) เปลี่ยนค่า I_f และ I_r เป็นดังตาราง โดยยังคงใช้ R_S ค่าเดิม แล้วทำซ้ำข้อ 2) ถึงข้อ 4)

6) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา 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

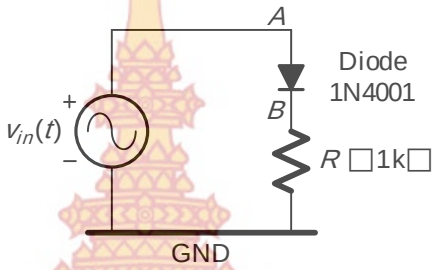
2) ป้อนสัญญาณแบบไซน์ มีขนาดคงที่ตลอดเท่ากับ 10 มิลลิโวลต์ ทุกๆ ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง มีค่าออฟเซทเท่ากับ 0.65 โวลต์ โดยเริ่มต้น ณ ความถี่ 100 เฮิรตซ์

3) ปรับค่าความถี่ของสัญญาณให้เป็นไปตามตารางที่ 4 โดยในแต่ละความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรให้วัดค่าแรงดันแบบพีคของ 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) ป้อนสัญญาณแบบ ไซน์ 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

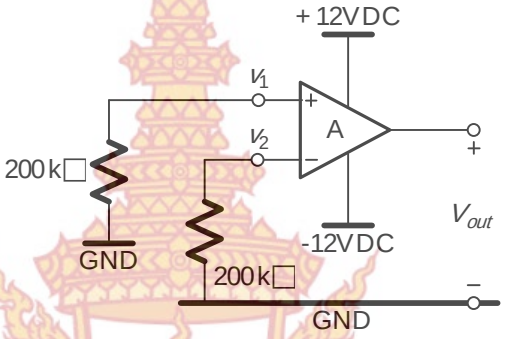
I_f(mA)	I_r(mA)	I_r / I_f
10	10	1.00
15	10	0.67
20	10	0.50
30	10	0.33
100	10	0.10
10	20	2.0
10	40	4.0
10	60	6.0
10	80	8.0
10	100	10.0

ตารางที่ 6 ขนาดและเฟสของสัญญาณทางอินพุตและเอาต์พุต

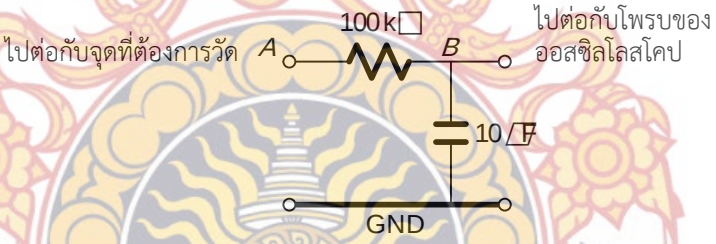
ความถี่ (Hz)	V_{in} (peak voltage)	V_{out} (peak voltage)	$20\log(V_{out} / V_{in})$ (dB)	มุมของ V_{out} (องศา)
100				
300				
500				
800				
1k				
3k				
5k				
8k				
10k				
30k				
50k				
80k				
100k				
300k				

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 เพื่อวัดสัญญาณที่ขาบวก ของออปแอมป์ ซึ่งหากได้แรงดันไฟตรงที่ราบเรียบให้บันทึกค่าลงในตารางที่ 3
3) ใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณที่ขาลบของออปแอมป์ บันทึกค่าลงในตารางที่ 3
4) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ใหม่ แล้วทำซ้ำข้อ 2) และข้อ 3)
5) เปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ใหม่อีกเบอร์ แล้วทำซ้ำข้อ 2) และข้อ 3)

6) ใช้กฎของโอห์ม $V = I' R$ ซึ่งในที่นี้ $R = 200\,k\Omega$ เพื่อคำนวณหาค่ากระแส I แต่ละขาออกมา (I^+ และ I^-) แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3
7) หาค่ากระแสเฉลี่ยจากความสัมพันธ์ $I_{av} = (I^+ + I^-)/2$ แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3

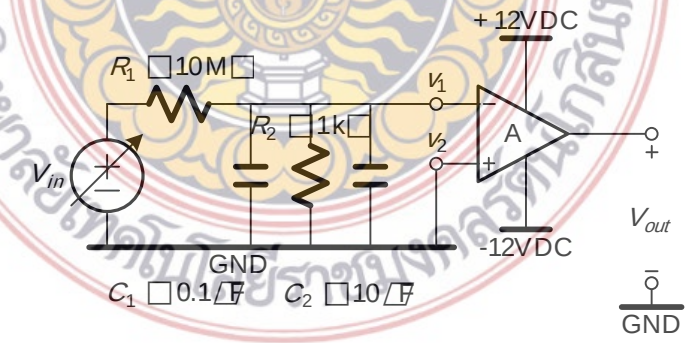
การทดลองตอนที่ 3.1.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติกระแสไบอัสด้านเข้าของออปแอมป์

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 9(ก) โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ปรับออสซิลโลสโคปให้เป็นการวัดสัญญาณไฟตรง (DC input) แล้ววัดแรงดันที่ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ สังเกตผลที่ได้จากออสซิลโลสโคป ถ้าเป็นแรงดันไฟตรงที่ราบเรียบให้อ่านค่าที่วัดได้พร้อม บันทึกค่าลงในตารางที่ 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 $V = I' R$ ซึ่งในที่นี้ $R = 200\,k\Omega$ เพื่อคำนวณหาค่ากระแส I แต่ละขาออกมา (I^+ และ I^-) ของออปแอมป์ทุกเบอร์ แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3
7) หาค่ากระแสเฉลี่ยจากความสัมพันธ์ $I_{av} = (I^+ + I^-)/2$ ของออปแอมป์ทุกเบอร์ แล้วบันทึกผลในตารางที่ 3

ตอนที่ 3.2 ศึกษาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

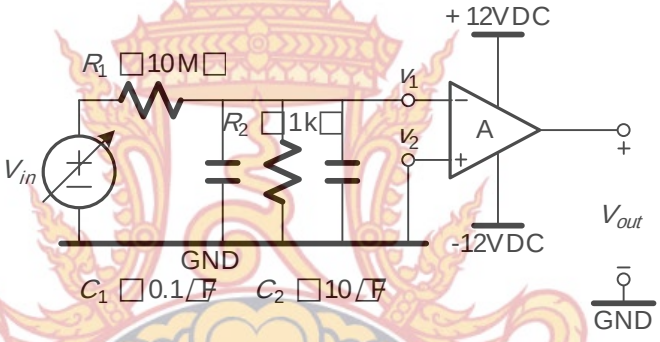


ภาพที่ 30 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

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)

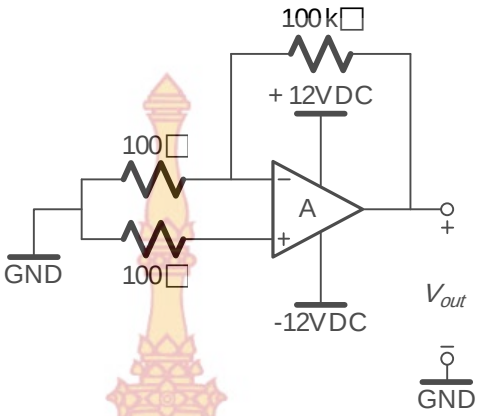
การทดลองตอนที่ 3.2.2 <u>การวัด</u>คุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์



ภาพที่ 31 วงจรทดลองเพื่อหาคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ทางปฏิบัติ

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 31 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) กำหนดให้ V_{in} ที่ต่อเข้าไปในวงจร ซึ่งได้จาก เป็นแหล่งจ่าย กำลังงาน ไฟตรง (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

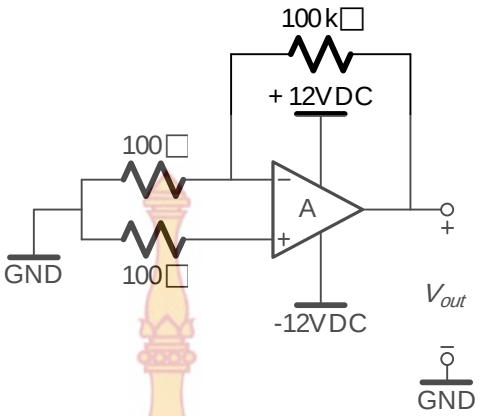
การทดลองตอนที่ 3.3.1 **<u>การจำลอง</u>** ผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติ

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

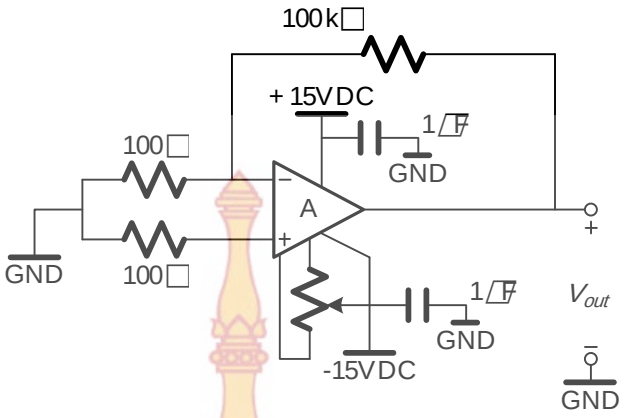
1) ต่อวงจรตามภาพที่ 33 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ใช้ออสซิลโลสโคปต่อเข้าทางเอาต์พุตของวงจร โดยตั้งค่าการวัดสัญญาณไฟตรง (DC input)
3) วัดค่าแรงดันไฟตรงที่เอาต์พุต บันทึกผลลงในตารางที่ 4
4) จากวงจรจะได้อัตราขยายแรงดันสัญญาณมีค่าประมาณ

$$A_v = \frac{R_f}{R_1} = 1,000$$

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

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

ตอนที่ 3.4 ศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ



ภาพที่ 34 วงจรทดลองเพื่อศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติโดยใช้โปรแกรม

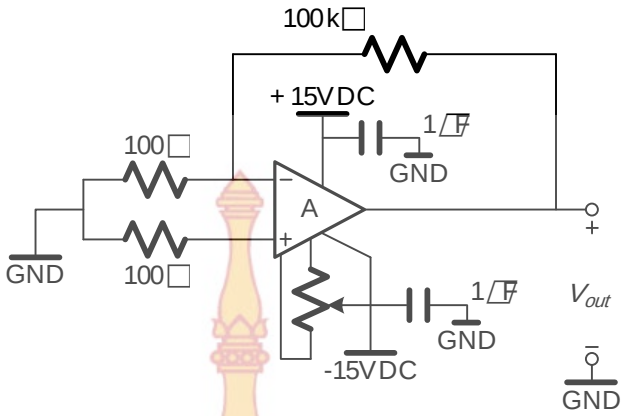
การทดลองตอนที่ 3.4.1 **การจำลอง**การแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ

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 **การวัด**การแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ



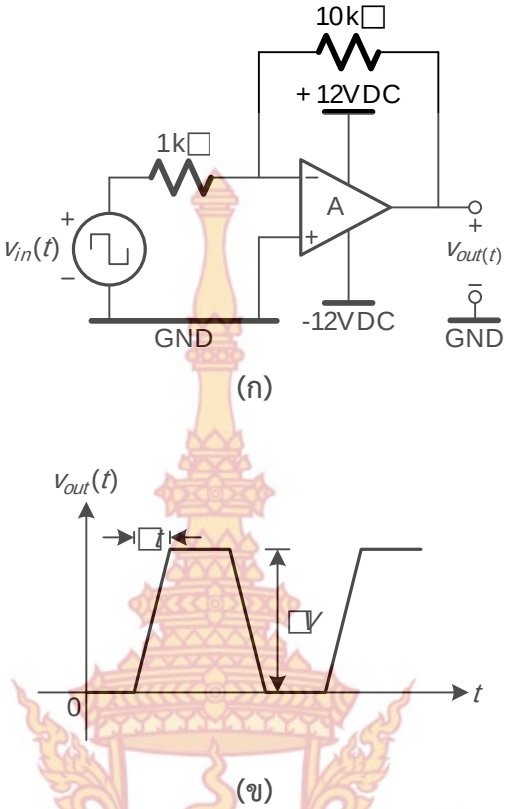
ภาพที่ 35 วงจรทดลองเพื่อศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติโดยการต่อวงจรจริง

1) ต่อวงจรตามภาพที่ 35 โดยใช้ไฟเลี้ยง ± 15 โวลต์ จ่ายให้กับออปแอมป์เบอร์ uA741
2) ใช้ความต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ขนาด 1 กิโลโอห์ม ต่อเข้าที่ขาออฟเซททั้งสอง ของออปแอมป์ (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



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 จนกระทั่ง สัญญาณเอาต์พุตเป็นดังภาพที่ 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

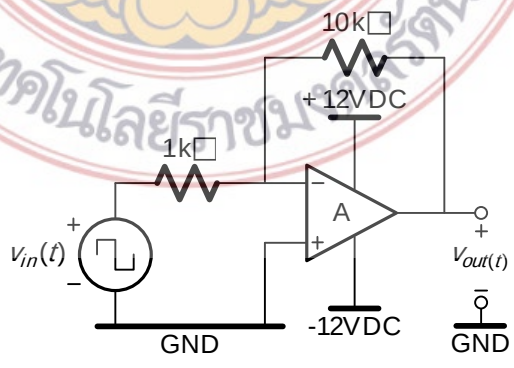
$$SR = \left.\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t}\right|_{max}$$

6) เปลี่ยนสัญญาณอินพุตเป็นรูปคลื่นไซน์ (sinusoidal wave) ซึ่งได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) ความถี่ 10 กิโลเฮิรตซ์ แล้วป้อนให้กับ อินพุตของวงจร 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 จนกระทั่ง สัญญาณเอาต์พุตเริ่มกลายเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม (triangular wave) และมีขนาดลง แล้วบันทึกค่าความถี่ที่ได้ลงในตารางที่ 6
5) ป้อนขนาดสัญญาณอินพุต จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 20 โวลต์พีค-พีค โดยใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณที่เอาต์พุต
6) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 4)
7) คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง โดยใช้สูตร

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

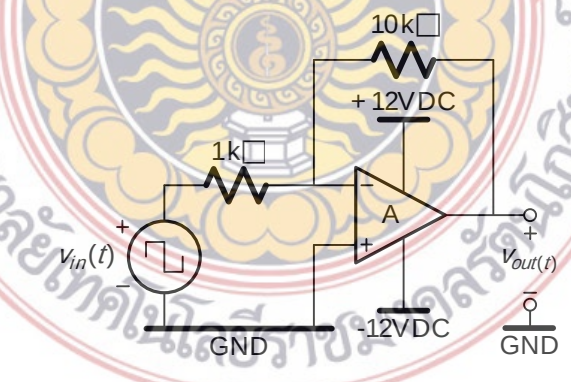
ในที่นี้ SR เป็นค่าอัตราสลูว์ที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา

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) ปรับขนาดของแหล่งกำเนิดซึ่งป้อนเข้าทาง อินพุตของวงจร จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 10 โวลต์พีค-พีค โดยใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัด
4) จากนั้นใช้อินพุตค่าเดิมที่ได้ในข้อ 3) แต่ปรับความถี่ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตเริ่มกลายเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม (triangular wave) และมีขนาดลง แล้วบันทึกค่าความถี่ที่ได้ลงในตารางที่ 6
5) ปรับเปลี่ยน ขนาดสัญญาณอินพุต ที่ได้จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ จนกระทั่งได้แรงดันสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 20 โวลต์พีค-พีค โดยใช้ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัด
6) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 4)
7) คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง โดยใช้สูตร

$$f_{\max} = \frac{SR}{2pV_p}$$

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		
	D V	D t	SR	D V	D t	SR

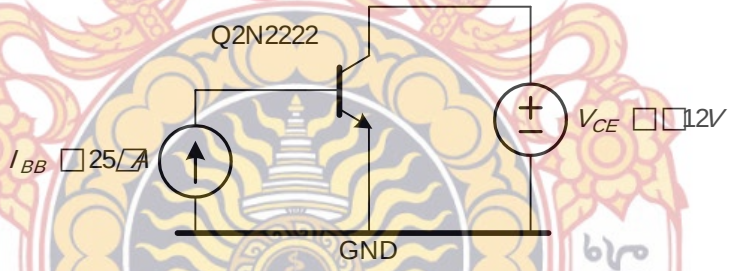
ตารางที่ 11

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

4. ศึกษาเรื่องทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

ตอนที่ 4.1 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

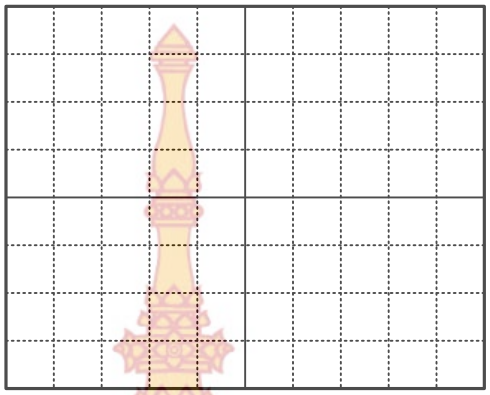
การทดลองตอนที่ 4.1.1 <u>การจำลอง</u>คุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์



ภาพที่ 39 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์โดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 39 โดยใช้ไฟเลี้ยง +12 โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งเป็นชนิด NPN
2) ต่อแหล่งจ่ายกระแสดีซี $I_{BB} = 25\,\mu A$
3) ปรับเปลี่ยนค่าไฟเลี้ยงจาก 0 โวลต์ ไปจนถึง 12 โวลต์ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม
4) ปรับเปลี่ยนค่ากระแสดีซีจาก $I_{BB} = 25\,\mu A$ เรื่อยไปจนถึง $I_{BB} = 25\,\mu A$ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ $5\,\mu A$ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม

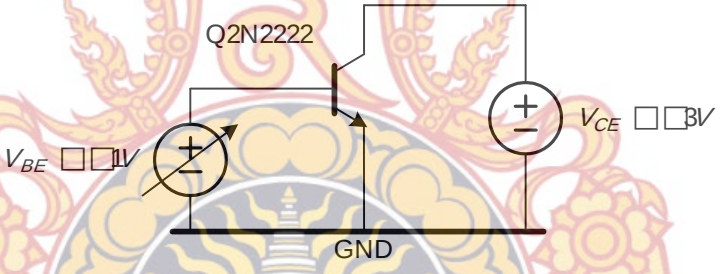
5) ใช้คำสั่ง probe พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ คอลเลคเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ (I_C) กับแรงดันที่คอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) พร้อมกับบันทึกรูปกราฟที่ได้



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

6) จับกลุ่มอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากกราฟเพื่อแสดงให้เห็นถึงความเข้าใจ

7) วาดวงจรใหม่ตามภาพที่ 40 ข้างล่าง



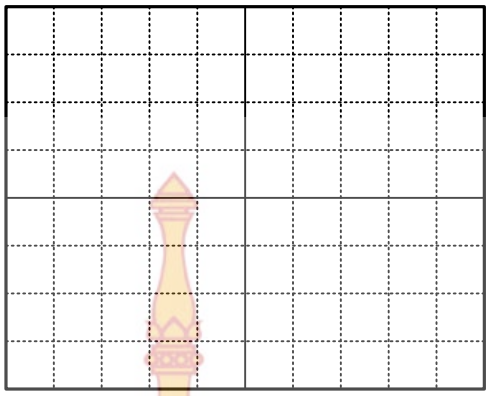
ภาพที่ 40 วงจรทดลองสำหรับข้อ 7

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



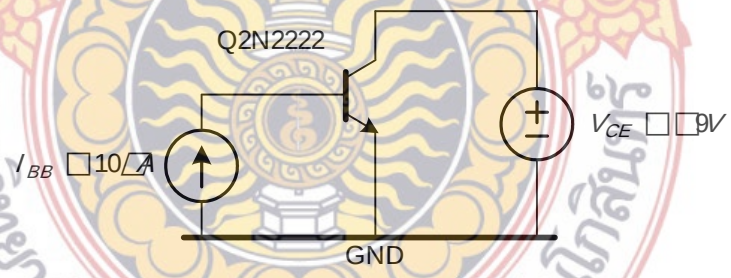
12) จากนั้นเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง $V_{CE} = +4$ โวลต์ เข้าที่ขาคอลเลคเตอร์เทียบกราวด์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 2N2222 ซึ่งเป็นชนิด NPN
13) แล้วทำซ้ำตามข้อที่ 9) ถึง 11) อีกครั้ง พล็อตผลตอบสนองลงในกราฟเดียวกับข้อ 11)
14) จากนั้นเปลี่ยนแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยง $V_{CE} = +5$ โวลต์ เข้าที่ขาคอลเลคเตอร์เทียบกราวด์ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์เบอร์ 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>** คุณสมบัติ แบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์



ภาพที่ 41 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติ แบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ โดยใช้โปรแกรม

1) ต่อวงจรตาม ภาพที่ 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

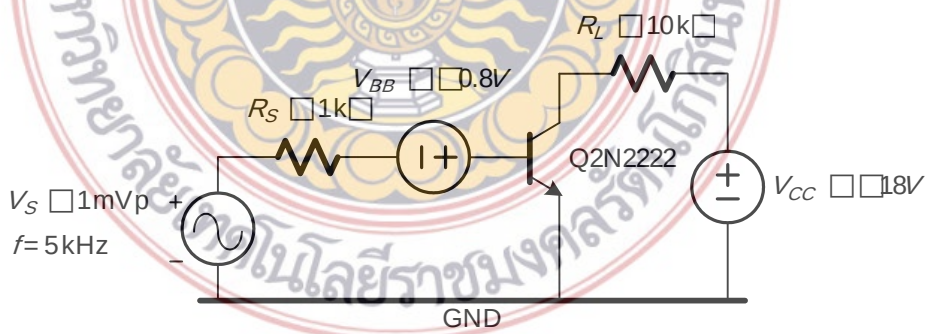
ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้	ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้
BetaDC		BetaAC	
GM		CBE	
RPI		CBC	
Ro		FT	

5) วาดแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ พร้อมระบุ ค่าลงในแบบจำลอง**ให้**สอดคล้องกับตารางข้างต้น

แบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์พร้อมค่าอุปกรณ์ (ในกรอบสี่เหลี่ยมข้างบน)

ตอนที่ 4.3 ศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วม

การทดลองตอนที่ 4.3.1 **<u>การจำลอง</u>**ค่าทางไฟตรง และฟังก์ชันส่งผ่าน ของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมอย่างง่าย



ภาพที่ 42 วงจรทดลองเพื่อศึกษาค่าทางไฟตรงและฟังก์ชันส่งผ่านของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมอย่างง่ายโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตามภาพที่ 42 โดยมีทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิด NPN เบอร์ 2N2222 ความต้านทาน $R_S = 1\text{kW}$ และ $R_L = 10\text{kW}$
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 (b_{DC}) ค่ากระแสเบส (I_B) และ ค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_C)

I_B = ...

I_C = ...

b_{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

$I_C = b_{DC} I_B$ = ...

9) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากข้อ 4) และ ข้อ 8) มีค่าเท่ากันหรือต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

10) .....

.....

.....

.....

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

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

12) เปรียบเทียบค่าที่ได้จากข้อ 4) และ ข้อ 11) มีค่าเท่ากันหรือต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

.....

.....

.....

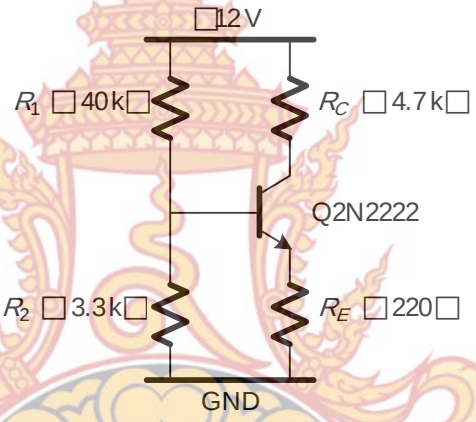
.....

13) เซทค่าฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function) ในโปรแกรม โดยการพิจารณาที่โหนดเอาต์พุต และชื่อของแหล่งกำเนิดทางอินพุต

14) บันทึกค่าความต้านทานทางอินพุตที่ได้จากโปรแกรม

R_{in} = ...โอห์ม

การทดลองตอนที่ 4.3.2 <u>การจำลอง</u> วงจรขยาย สัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแบบมี R_E และ C_E



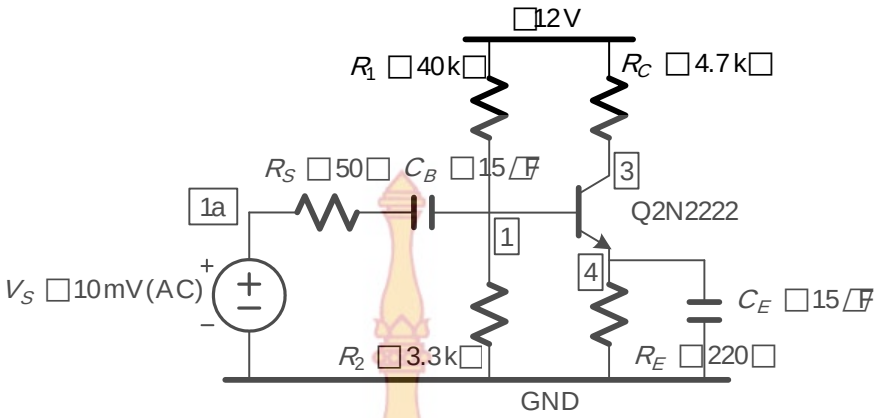
ภาพที่ 43 วงจรทดลองเพื่อศึกษาวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแบบมี R_E และ C_E โดยใช้โปรแกรม

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

2) ใช้การวิเคราะห์ค่าทางไฟตรง (DC Analysis) บันทึกค่าลงในตารางข้างล่าง

ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรม	ตัวแปร	ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรม
b_{DC}		V_{CE}	
b_{AC}		V_{BE}	
b_{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 $I(RS)$ = ...

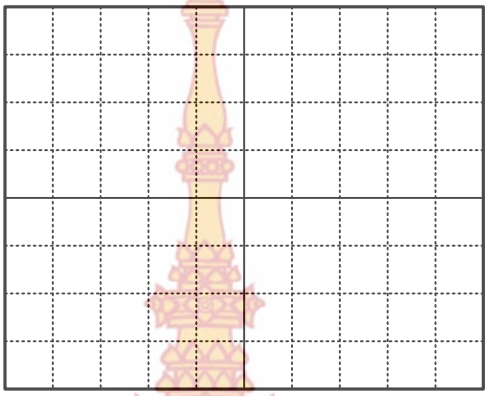
9) คำนวณหาอัตราขยายกระแส $I(RC)/I(RS)$

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

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

$V(3)$ = ...

$V(1)$ = ...

$V(1a)$ = ...

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

14) คำนวณหาอัตราขยายสัญญาณ โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 12)

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

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

15) เปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากข้อ 14) และข้อ 7) เหมือนกันหรือต่างกันอย่างไร จงอธิบาย

16) ใช้โปรแกรมอ่านค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์โดยรวม (Total Harmonic Distortion: THD) บันทึกค่าที่ได้

$\%THD$ = ...

17) ลบตัวเก็บประจุ C_E ที่ต่อขนาน R_E ออกจากโปรแกรม

18) ทำซ้ำข้อ 12) ถึง 16) อีกครั้ง

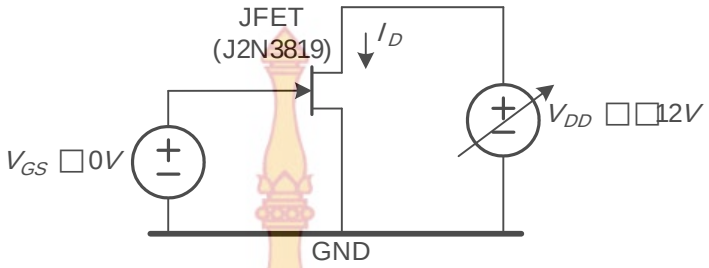
19) คำนวณหาอัตราขยายของวงจรจากสมการ

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

5. การทดลองเรื่องทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

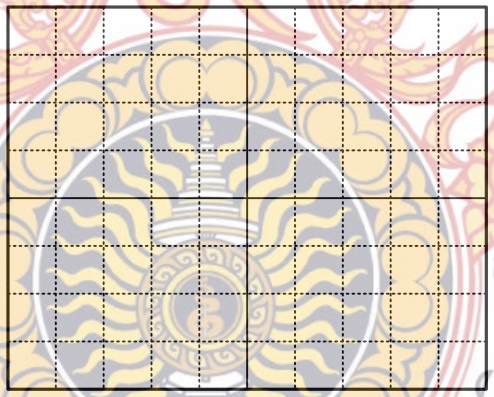
ตอนที่ 5.1 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

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



ภาพที่ 45 วงจรทดลองเพื่อ ศึกษาคุณสมบัติ ทางไฟตรงทาง เอาต์พุต ของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตาม ภาพที่ 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



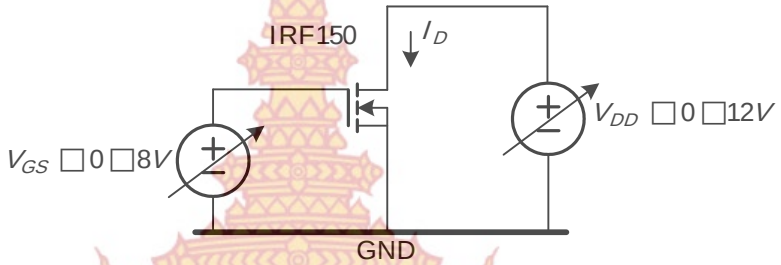
4) เปลี่ยนแรงดัน V_{GS} จาก 0 โวลต์ เป็น - 1 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับทรานซิสเตอร์แบบเจเฟ็ท (JFET) ชนิด N (*n*-channel)
5) จากนั้นปรับเปลี่ยนค่าไฟเลี้ยง V_{DD} จาก 0 โวลต์ ไปจนถึง 12 โวลต์ โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม ซ้ำอีกครั้ง
6) ใช้การวิเคราะห์แบบไฟตรง (DC analysis) และใช้คำสั่ง 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

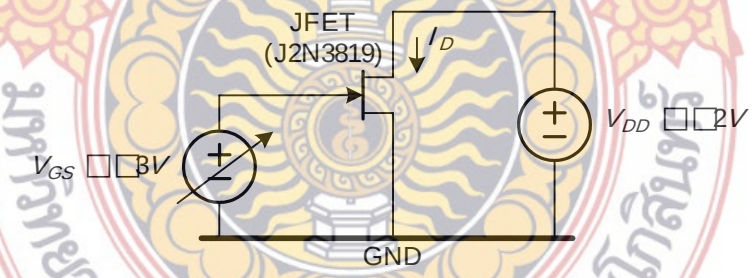
9) ให้นักศึกษาทดลองเปลี่ยนทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าจากเบอร์ J2N3819 เป็นเบอร์**ใหม่** คือ IRF150 (Power MOSFET ชนิด Enhancement MOSFET) ตามภาพที่ 26



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

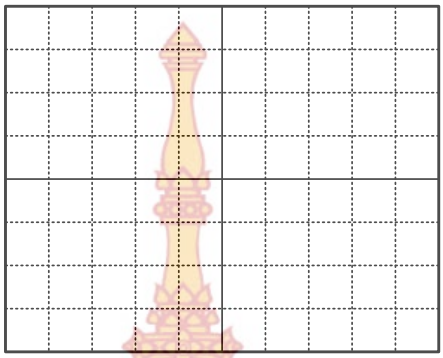
การทดลองตอนที่ 5.1.2 <u>การจำลอง</u> คุณสมบัติ ทางไฟตรงทาง ***<u>อินพุต</u>*** ของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 47 วงจรทดลองเพื่อ ศึกษาคุณสมบัติ ทางไฟตรงทาง อินพุต ของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตาม ภาพที่ 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

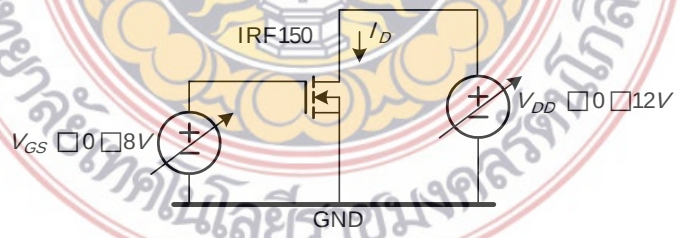


4) เปลี่ยนแรงดัน V_{DD} จาก + 2 โวลต์ เป็น + 6 โวลต์ เพื่อป้อนให้กับทรานซิสเตอร์แบบเจเฟ็ท (JFET) ชนิด N (*n*-channel)
5) จากนั้นใช้คำสั่งในโปรแกรมปรับเปลี่ยนค่าแรงดันจาก V_{GS} = - 3 โวลต์ เพิ่มขึ้นทีละ 0.01 โวลต์ ไปจนถึง V_{GS} = 0 โวลต์ ด้วยการเซทค่าในโปรแกรม ซ้ำอีกครั้ง
6) ใช้การวิเคราะห์แบบไฟตรง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

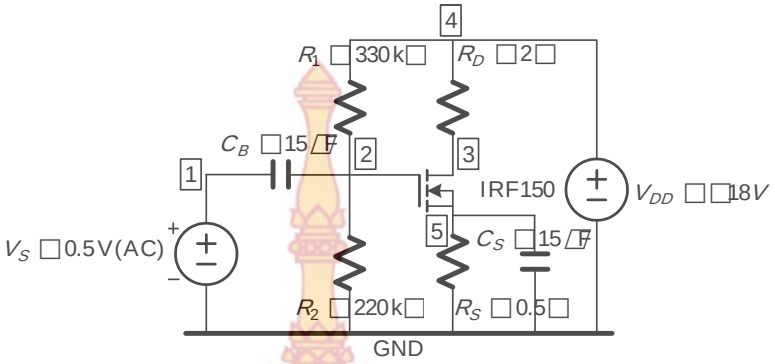


ภาพที่ 48 วงจรทดลองสำหรับข้อ 9) โดยใช้โปรแกรม

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> คุณสมบัติ วงจรขยายสัญญาณแบบ ซอร์ส ร่วมโดยใช้แหล่งจ่าย ac เป็นสัญญาณอินพุต



ภาพที่ 49 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์ส ร่วมโดยใช้แหล่งจ่าย ac เป็นสัญญาณอินพุตโดยใช้โปรแกรม

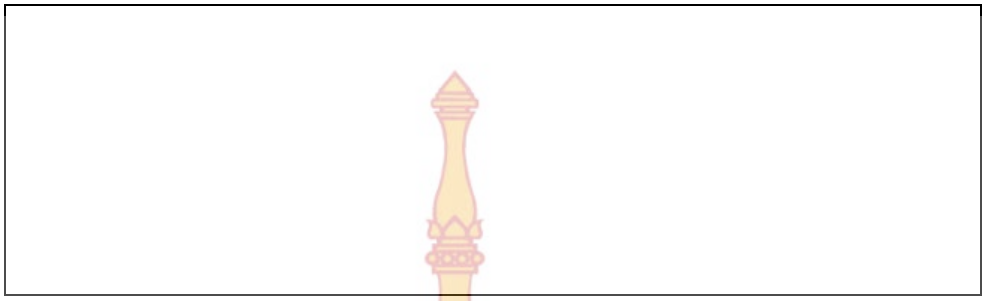
1) วาดวงจรตาม ภาพที่ 49 โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบ สนามไฟฟ้า (ชนิด *n*-channel Enhancement MOSFET) ความต้านทาน $R_1 = 330\,\text{kW}$, $R_2 = 220\,\text{kW}$, $R_D = 2\text{W}$ และ $R_S = 0.5\text{W}$ ส่วนตัวเก็บประจุมีค่า $C_S = 15\,mF$
2) ใช้แหล่งจ่ายไฟ $V_{DD} = +18$ โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟ็ท (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} = ...

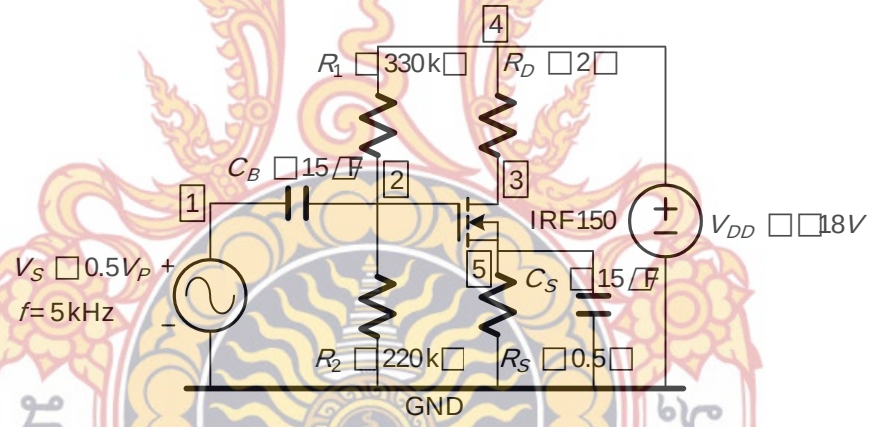
7) บันทึกผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้ลงในกราฟข้างล่าง



8) จากข้อมูลที่ได้ในข้อ 6) คำนวณอัตราขยาย A_v ได้เท่ากับ

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

การทดลองตอนที่ 5.2.2 <u>**การจำลอง**</u> คุณสมบัติ วงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่ายรูปไซน์ เป็นสัญญาณอินุต



ภาพที่ 50 วงจรทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโ ดยใช้แหล่งจ่ายรูปไซน์ เป็นสัญญาณอินุตโดยใช้โปรแกรม

1) วาดวงจรตาม ภาพที่ 50 โดยใช้ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (ชนิด *n*-channel Enhancement MOSFET) ความต้านทาน $R_1 = 330\,\text{kW}$, $R_2 = 220\,\text{kW}$, $R_D = 2\text{W}$ และ $R_S = 0.5\text{W}$ ส่วนตัวเก็บประจุมีค่า $C_S = 15\,mF$
2) ใช้แหล่งจ่ายไฟ $V_{DD} = +12$ โวลต์ จ่ายให้กับทรานซิสเตอร์แบบมอสเฟ็ท (MOSFET) ชนิด N (*n*-channel) เบอร์ IRF150
3) ป้อนแหล่งจ่ายสัญญาณ รูปไซน์ (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 พล๊อตกราฟแรงดันสัญญาณที่โหนด 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** *จำลอง* **คุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้** *แหล่งจ่าย ac* **เป็นสัญญาณอินพุต)**

9) ใช้โปรแกรมอ่านค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์โดยรวม (Total Harmonic Distortion: THD) บันทึกค่าที่ได้

$\%THD =$ .....

6. กล่าวสรุป

ในบทนี้ เราได้ทราบ ถึงวิธีการดำเนินการวิจัย โดยพยายามศึกษาคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด ออปแอมป์ และลักษณะวงจรขยายที่ ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์และ ะแบบสนามไฟฟ้า เป็นต้น ผ่านทางการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และมีบางการทดลองสามารถเทียบผลกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ (เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวัดและทดสอบในห้องปฏิบัติการ) จะเห็นได้ว่าการดำเนินการวิจัยจะช่ วยให้ผู้ที่ต้องการศึกษาหรือนักศึกษาที่ต้องการผลวิจัย ลำดับขั้นตอนไปใช้งานในการทำความเข้าใจอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิจารณ์ข้อมูล

1. กล่าวนำ

สำหรับในบทนี้ จะเป็นการนำแนวทางการทดลอง ตามที่ได้อธิบายไปแล้วในบทที่ 3 มาให้นักศึกษาได้ทดลองตามลำดับขั้นในแต่ละหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยได้ใช้กลุ่มนักศึกษาจำนวน 2 กลุ่มที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

กลุ่มที่ 1 เป็นนักศึกษาในชั้นปีที่ 1 ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2555 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม (หลักสูตรปริญญาตรี 4 ปีปกติ เทียบโอนรายวิชา) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่เรียนวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรมที่มีเข้าฟังบรรยายและลงมือปฏิบัติโดยใช้การทดลองจริงเป็นหลัก

กลุ่มที่ 2 เป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 2 ภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2556 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม (หลักสูตรปริญญาตรี 4 ปีปกติ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ โดยทั้ง 2 กลุ่มนั้นสอนโดยให้อาจารย์ที่สอนเป็นตัวแปรคงที่ (สอนโดยอาจารย์คนเดียวกัน เพื่อเป็นการจำกัดตัวแปรในการทดลอง)

การดำเนินการวิจัยให้ได้มาซึ่งผลการศึกษาของ ทั้งกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ได้รับความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร.กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้สอนในรายวิชา ENG 2135 อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม โดยได้นำแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้ไป ทดลองใช้ในการสอนเพื่อเก็บข้อมูลประกอบการวิจัย โดยพยายามอ้างอิงกับเนื้อหาในรายวิชาที่มีอยู่เดิมให้มากที่สุด โดยผู้วิจัยได้ขอเข้าไปสังเกตการณ์ให้ทราบว่าเกิดปัญหาอย่างไรบ้าง เพื่อให้เป็นตามแนวคิดของผู้วิจัยให้ได้มากที่สุด

2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เรื่องการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไดโอด

ผลการจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงพื้นฐานของไดโอด

จากผลการนำวิธีดำเนินการวิจัยไปใช้กับนักศึกษา เนื่องจากเป็นการทดลองในช่วงแรกๆ ที่นักศึกษาเพิ่งจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ทำให้การเซทค่าตัวแปรต่างๆ ไม่ทราบว่าจะเลือกใช้แหล่งกำเนิดอย่างไร ให้มีความเหมาะสมกับการทดลอง ดังนั้นผู้วิจัยขอแยกเป็นประเด็นย่อยๆ ได้ เพื่อเป็นข้อสังเกตให้กับผู้ที่จะนำวิธีดำเนินการวิจัยไปใช้ ดังนี้

1) นักศึกษาบางคนหาตัวอุปกรณ์ไม่พบ เนื่องจากไม่ได้เพิ่มไลบรารี (library) ของตัวอุปกรณ์ที่จะใช้งาน
2) นักศึกษาบางคนเลือกใช้อุปกรณ์ไม่ตรงตามเบอร์ที่กำหนดให้
3) เลือกแหล่งกำเนิดไม่ถูกต้องตามที่โจทย์กำหนด
4) เซทค่าตัวแปรไม่เหมาะสม
5) เลือกชนิดของการจำลองการทำงาน (simulate) ไม่ถูกต้อง

6) ไม่สามารถแก้ปัญหาข้อผิดพลาดที่เกิดจากการวาดลงจรได้
7) พล๊อตความสัมพันธ์ไม่ตรงตามต้องการ
8) ไม่สามารถอ่านค่าได้ แม้ว่าจะมีกราฟความสัมพันธ์แล้วก็ตาม

ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟตรงพื้นฐานของไดโอด

เนื่องจากเป็นการออสซิล โลสโคปทั้งสองแชนแนลโดยเลือกอินพุตแบบ Dual นั้น แล้วใช้การอ่านค่าด้วยตาเปล่าของนักศึกษาเอง ผลจากการทดลองพบว่า สามารถเห็นกราฟการนำกระแสของไดโอดขณะที่ได้รับไบอัสตรงและได้รับไบอัสกลับ ผู้อ่านค่าจะต้องปรับสเกลของออสซิลโลสโคปให้เหมาะสมเพื่อที่จะอ่านค่าได้ใกล้เคียงเหมาะสมกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม

แต่เมื่อเปลี่ยนเบอร์ของไดโ อด ก็จะต้องปรับสเกลของออสซิลโลสโ คปใหม่อีกครั้ง เพื่อให้กราฟที่ได้เหมาะสมและถูกต้องโดยจะต้องปรับระดับการเลื่อนขึ้น-ลงของกราฟด้วย

นักศึกษาจะต้องพล๊อตกราฟการตอบสนองด้วยตนเองบนกระดาษ ให้สอดคล้องกับหน้าจอออสซิลโลสโคป เพื่อที่จะเห็นการเปลี่ยนแปลง ของกราฟที่เกิดขึ้น ซึ่งจะพบว่าเมื่อไดโอดเป็นเบอร์ที่ต่างกันกราฟที่ได้ก็จะมีความต่างกันด้วย

ข้อพึงระวัง

ข้อสังเกตให้กับผู้ที่จะนำวิธีดำเนินการวิจัยไปใช้ ดังนี้

1) นักศึกษาจะต้องปรับสเกลของออสซิลโลสโคปทั้งแกนตั้งแ ละแกนนอนพร้อมทั้งบันทึกสเกลที่ปรับด้วย เพื่อประกอบการอ่านค่าให้ได้ถูกต้อง
2) เนื่องจากต้องใช้ออสซิลโลสโคปทั้งสองแชนแนล ผู้สอนจะต้องกำชับนักศึกษาไม่ให้สลับแชนแนลของออสซิลโลสโคปอย่างเด็ดขาด มิฉะนั้นจะทำให้ผลการทดลองที่ได้ผิดไป
3) หากค่าเบรกดาวน์ของไดโอดมีค่าต่ำมาก ๆ (ติดลบมากๆ) เครื่องมือวัดอาจจะไม่สามารถแสดงให้เห็นจริงได้ด้วยวิธีการที่ดำเนินการวิจัย

ผลการจำลองคุณสมบัติการสวิทช์ของไดโอด

เนื่องจากเป็นการทดสอบคุณสมบัติการสวิทช์ของไดโอด ดังนั้น สัญญาณที่ใช้ในการทดสอบจึงเป็นสัญญาณรูปเหลี่ยม ความถี่ต่ำ ซึ่งในการจำลองนี้ได้สมมติให้ไดโอดนำกระแสที่แรงดันไบอัสตรงเท่ากับ 0.7 โวลต์ การพล๊อตกราฟแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างจุด A และจุด B จะช่วยหาค่าเวลา t_s ได้ อย่างไรก็ดี หากเปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์อื่นๆ แล้วค่าเวลา t_s ที่ได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

ผลการวัดคุณสมบัติการสวิทช์ของไดโอด

เราใช้สัญญาณทดสอบคุณสมบัติการสวิทช์ของไดโอด เป็นสัญญาณรูปเหลี่ยมเหมือนกับการจำลองด้วยโปรแกรม โดยให้สัญญาณที่แสดงบนหน้าจอออสซิลโลสโคปนั้นมีเพียง 1-2 ลูกคลื่นเท่านั้น เพื่อความสะดวกในการอ่านค่าเวลา t_s โดยอาจารย์ผู้สอนจะต้องกำชับนักศึกษาให้บันทึกสเกลทั้งในแกนนอนและแกนตั้งของออสซิลโลสโคปให้เหมาะสม จากนั้นหาค่าเวลา t_s จากกราฟที่บันทึกได้ อีกทั้งให้นักศึกษาพล๊อตกราฟความสัมพันธ์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา t_s (แกนตั้ง) กับค่า I_r / I_f (แกนนอน) ของไดโอดตามเบอร์ที่กำหนด โดยใช้กระดาษเซมิล็อค

การเปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์อื่นจะช่วยให้นักศึกษาเข้าใจการหาค่าเวลา t_s ได้ดียิ่งขึ้น ด้วยการทำซ้ำวิธีการเดิม การเปรี ยบเทียบค่าเวลา t_s ของไดโอดจะช่วยให้เข้าใจได้ว่าไดโอดเบอร์อะไรมีความเหมาะสมในการใช้งานเป็นสวิทซ์ (พิจารณาจาค่าเวลา t_s ที่น้อยๆ นั่นเอง)

เรื่องการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไดโอด

ผลการจำลองคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอด

การจำลองในหัวข้อการหาคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอดนี้ เราใช้สัญญาณทดสอบเป็นสัญญาณแบบไซน์ที่มีขนาดแรงดันต่ำ เช่น 10 มิลลิโวลต์ แล้วค่อยๆ ปรับเพิ่มความถี่ไปเรื่อยๆ โดยในแต่ละความถี่อาจารย์ผู้สอนจะต้องให้นักศึกษาวัดแรงดันอินพุตและเอ าต์พุตแบบพีค (peak voltage) พร้อมทั้งอ่านค่าความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในแต่ละความถี่ด้วย บันทึกค่าเพื่อพล็อตกราฟอัตราขยายของสัญญาณเทียบกับแต่ละความถี่ พร้อมพล็อตเฟสของสัญญาณเทียบกับความถี่ด้วย

ผลการวัดคุณสมบัติทางสัญญาณระดับต่ำของไดโอด

เราใช้วิธีการเช่นเดียวกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม เพียงแต่การอ่านค่าความต่างเฟสของสัญญาณจะใช้วิธีลิสซาจูส เท่านั้น ส่วนการพล็อตกราฟก็ทำเช่นเดียวกัน แต่อย่างลืมว่าให้พล็อตกราฟลงบนกระดาษเซมิล็อคเท่านั้น จากนั้นก็เปลี่ยนไดโอดเป็นเบอร์อื่นๆ ทำวิธีการเช่นเดียวกัน ข้อพึงระวังในการอ่านค่าจะต้องปรับออสซิลโลสโคปให้แสดงอย่างเหมาะสมเพื่อที่จะอ่านค่าได้อย่างชัดเจน

เรื่องคุณลักษณะบางประการของออปแอมป์ที่แตกต่างจากอุดมคติ

ผลการจำลองคุณสมบัติกระแสไบอัสด้านเข้าของออปแอมป์

เนื่องจากในทางอุดมคติกระแสที่ไหลเข้าทั้งขาบวก และขาลบของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์ แต่ด้วยความไม่สมดุลของวงจรภายในออปแอมป์เอง ทำให้เกิดกระแสไหลเข้าที่ขาบวกและขาลบของออปแอมป์ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ต้องการ ดังนั้นในที่นี้จึงต้องหาแรงดันที่ขาบวกและขาลบของออปแอมป์ภายใต้แรงดันไฟเลี้ยงที่จะใช้งาน โดยการต่อความต้านทานที่ขาบวกและขาลบค่าสูงๆ เช่น 200 กิโลโอห์ม เพื่อที่จะใช้คำสั่ง probe ในการวัด จากนั้นใช้ความสัมพันธ์กฎของโอห์มในการหากระแสที่ไหลเข้าและออกจากออปแอมป์ทั้งสองขา โดยหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต

ผลการวัดคุณสมบัติกระแสไบอัสด้านเข้าของออปแอมป์

ให้นักศึกษาต่อความต้าน ทานค่าสูงๆ เช่น 200 กิโลโอห์ม เข้าที่ขาบวกและขาลบของออปแอมป์ โดยต่อไฟเลี้ยงให้กับออปแอมป์ให้เหมือนกับที่จะนำออปแอมป์ไปใช้งาน ใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันที่ขาบวก และขาลบเทียบกราวด์ โดยจะต้องปรับสเกลในแกนตั้งและแกนนอนของออสซิลโลสโคปให้เหมาะสมเพื่อที่จะอ่านค่าได้ อย่างถูกต้องและเหมาะสม จากนั้นใช้กฎของโอห์มในการหาค่ากระแสที่ไหลเข้าและออกจากออปแอมป์ทั้งด้านขาบวกและขาลบ บันทึกค่ากระแสเฉลี่ยแบบเลขคณิตที่ได้ ทำเช่นเดียวกันนี้กับออปแอมป์เบอร์อื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบค่ากระแสด้าน ข้าวของ

ออปแอมป์ ให้นักศึกษาบอกด้วยว่าออปแอมป์ ที่ได้ทดสอบเบอร์ไหนดีกว่ากัน (พิจารณาจากค่าเฉลี่ยของกระแสด้านเข้าที่ต่ำที่สุด)

เรื่องคุณลักษณะบางประการของออปแอมป์ที่แตกต่างจากอุดมคติ

ผลการจำลองคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

เนื่องจากในทางอุดมคติหากแรงดันทางด้านอินพุตของออปแอมป์เท่ากับศูนย์แล้ว จะทำให้แรงดันทางเอาต์พุตมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย แต่เนื่องจากผลความไม่สมดุลของกระแสไบอัสทางด้านขาข้าวของออปแอมป์จึงทำให้เกิดแรงดันออฟเซททางด้านอินพุตขึ้นมา ดังนั้น ในการใช้งานออปแอมป์จึงต้องหาแรงดันอินพุตออฟเซทนี้ วิธีการคือจะต้องป้อนแรงดันอินพุตเริ่มจากค่า เท่ากับศูนย์เพิ่มขึ้นทีละน้อยแล้ววัดแรงดันที่ได้ทางเอาต์พุตทีละค่า เราเรียกแรงดันที่ป้อนทางอินพุต ที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับศูนย์ว่าเป็นแรงดันอินพุตออฟเซท บันทึกค่าที่ได้

ผลการวัดคุณสมบัติแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์

เนื่องจากแรงดันอินพุตออฟเซทมีค่าน้อย ในที่นี้จึงต้องต่อความต้านทานขนาด 1 กิโลโอห์มที่ขาลบเทียบกราวด์แล้วใช้วิธีการเช่นเดียวกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมในการหาค่าแรงดันอินพุตออฟเซท เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองการทำงานและการวัดด้วยออสซิลโลสโคป จากนั้นเปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์อื่น เทียบค่าแรงดันอินพุตออฟเซทที่หาค่าได้พร้อมกับบอกด้วยว่าออปแอมป์เบอร์อะไรที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติที่เข้าใกล้อุดมคติมากกว่า

ศึกษาผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติ

การจำลองผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติ

ตามแนวคิดของแรงดันอินพุตออฟเซทที่ได้ ใช้คำสั่ง probe วัดความแตกต่างของแรงดันระหว่างขาบวกและลบ แล้วใช้แรงดันดังกล่าวเป็นค่าอินพุตของวงจร พร้อมกับใช้คำสั่ง probe วัดค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจร จากนั้นหาอัตราขยายของวงจร บันทึกค่าที่ได้ โดยวงจรขยายที่ใช้ออปแอมป์แบบนี้จะต้องออกแบบให้มีอัตราขยายสูงๆ เพื่อประโยชน์ในการหาค่าอัตราขยาย

การวัดผลของแรงดันออฟเซททางอินพุตของออปแอมป์ต่อวงจรในทางปฏิบัติ

ใช้ออสซิลโลสโคปทั้งสองแชนแนลวัดแรงที่ขาบวกและขาลบเพื่อหาค่าแรงดันอินพุต บันทึกค่าไว้ แล้วใช้ออสซิลโลสโคปแชนแนลใดก็ได้วัดแรงดันเอาต์พุต แต่ต้องตั้งค่าในการวัดเป็นแบบไฟตรง จากนั้นหาค่าอัตราขยายของวงจรที่ได้ เปรียบเทียบกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม

ศึกษาการแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ

การจำลองเพื่อแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ

การปรับความต้านทานแบบปรับค่าได้ตามรูปในการใช้โปรแกรมจะใช้คำสั่งที่ปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานในโปรแกรม เช่น parametric sweep เป็นต้น จะช่วยให้แรงดันออฟเซทมีค่าลดลงได้ โดยให้วัดแรงดันอินพุตออฟเซทตามการทดลองที่ผ่านมา

การวัดเพื่อแก้ค่าแรงดันออฟเซทในทางปฏิบัติ

การปรับค่าความต้านทานในทางปฏิบัติสามารถทำได้ด้วยกา รใช้ความต้านทานแบบปรับค่าได้ โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟค่าลบ ปรับค่าความต้านทานไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้แรงดันเอาต์พุตเป็นศูนย์โวลต์ อย่างไรก็ดีหากไม่สามารถปรับให้ได้เท่ากับศูนย์โวลต์แล้วให้ปรับเปลี่ยนการต่อความต้านทานปรับค่าได้จากแหล่งจ่ายไฟค่าลบเป็นค่าบวก เปรี ยบเทียบแรงดันอินพุตที่ได้กับการจำลองด้วยโปรแกรม ให้นักศึกษาเปลี่ยนออปแอมป์เป็นเบอร์ใหม่แล้วทำซ้ำอีกครั้ง

ศึกษาอัตราสลูว์

การจำลองอัตราสลูว์

การจำลองอัตราสลูว์ด้วยโปรแกรมนั้นให้ใช้สัญญาณรูปเหลี่ยมป้อนเข้าทางอินพุตของวงจร โดยใช้การวิเคราะห์แบบ transient เพื่อหาค่า ΔV_{out} และ Δt ทางด้านเอาต์พุตของวงจร จากนั้นแทนค่าเข้าไปในสมการเพื่อหาอัตราสลูว์

นอกจากนี้แล้ว เรายังสามารถหาอัตราสลูว์ของออปแอมป์ได้จากการป้อนสัญญาณอินพุตแบบไซน์ โดยการเพิ่มขนาดให้มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุตถูกตัดยอดทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นหาค่า ΔV_{out} และ Δt ทางด้านเอาต์พุตเพื่อหาอัตราสลูว์ของวงจร

การวัดอัตราสลูว์

ให้นักศึกษาป้อนสัญญาณรูปเหลี่ยมเข้าทางด้านอินพุตของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting amplifier) ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางเอาต์พุตประกอบการหาค่า ΔV_{out} และ Δt จากนั้นแทนค่าเข้าไปในสมการเพื่อหาอัตราสลูว์ของวงจร

ทำซ้ำข้างต้นหากแต่เปลี่ยนสัญญาณรูปเหลี่ยมเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์แล้วเพิ่ มขนาดแรงดันอินพุตจนกระทั่งได้เอาต์พุตถูกตัดยอดด้านบนและด้านล่าง บันทึกค่า ΔV_{out} และ Δt ทางด้านเอาต์พุตเพื่อหาอัตราสลูว์ของวงจร

ให้นักศึกษาลองเปรียบเทียบอัตราสลูว์ที่ได้ทั้งสองกรณี พร้อมกับทำซ้ำทั้งสองกรณีกับ ออปแอมป์เบอร์อื่นๆ จากผลการทดลองที่ได้ให้เปรียบเทียบอัตราสลูว์ของออปแอมป์เบอร์ต่างๆ ที่ได้ว่าเบอร์ใดมีค่าอัตราสลูว์ที่สูงกว่า

ข้อพึงระวัง ให้นักศึกษาปรับออสซิลโลสโคปเป็นแบบวัดไฟตรง

ศึกษาค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง

การจำลองค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง

การศึกษาค่าแบนด์วิดท์กำลังของออปแอมป์นี้ ทำได้ด้วยการ ป้อนสัญญาณรูปไซน์ให้กับอินพุตของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting amplifier) โดยเพิ่มขนาดสัญญาณทางด้านอินพุตไปเรื่อยๆ ใช้การวิเคราะห์สัญญาณแบบ transient และใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณเอาต์พุตจนกระทั่งได้ขนาด 10 โวลต์พีค-พีค จากนั้นปรับความถี่ไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง สัญญาณทางเอาต์พุตเริ่มกลายเป็นรูปสามเหลี่ยม บันทึกขนาดและความถี่ที่ได้ จากนั้นเพิ่มขนาดของสัญญาณไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้สัญญาณทางเอาต์พุตมีขนาด 20 โวลต์พีค-พีค คำนวณหาค่าแบนด์วิดท์กำลังของออปแอมป์

ทำซ้ำกับออปแอมป์เบอร์อื่นๆ เปรียบเทียบค่าแบนด์วิดท์กำลังที่ได้ เบอร์ใดมีค่ามากกว่า ให้เรียงจากค่ามากไปหาค่าน้อย

การวัดค่าแบนด์วิดท์ของกำลัง

ทำเหมือนกับการจำลองการทำงานด้วยการใช้โปรแกรม แต่ป้อนสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณแล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางเอาต์พุต พ ร้อมกับคำนวณเพื่อหาค่าแบนด์วิดท์กำลัง เปรียบเทียบค่าที่ได้กับการจำลองด้วยโปรแกรม จากนั้นทำเช่นเดียวกันกับออปแอมป์เบอร์อื่นๆ เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับการหาค่าแบนด์วิดท์กำลังของออปแอมป์

เรื่องทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

การจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

การศึกษาคุณสมบัติทางด้านเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ในที่นี้จะอาศัยการพล๊อตกราฟความสัมพันธ์ของกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) เทียบกับแรงดันที่คอลเลคเตอร์ -อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ที่กระแสเบสต่างๆ ผลการ ศึกษาพบว่า ณ กระแสเบสสูงๆ จะทำให้กระแสคอลเลคเตอร์สูงตามไปด้วย ณ แรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์เพิ่มสูงขึ้น กระแสคอลเลคเตอร์ไม่ได้มีค่าคงที่ สังเกตได้จากกราฟที่ซึ่งมีความชัน ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความต้านทานทางเอาต์พุต ของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ไม่ได้มีค่าสูงเป็นอนันต์เหมือนดั่งเช่นในทฤษฎี นั่นเอง

ขณะที่หากเปลี่ยนกระแสเบสซึ่งต่อเข้ากับทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ทางอินพุตเป็นแรงดันไฟดีซีเข้าที่เบสเทียบกราวด์ แล้วค่อยๆ เพิ่มค่าแรงดันทีละเล็กน้อย การใช้คำสั่ง probe วัดปริมาณกระ แสเบสของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ เราพบว่าการป้อนให้แรงดันที่คอลเลคเตอร์ -อิมิตเตอร์ค่าสูงจะทำให้ แรงดันที่เบสเทียบกราวด์มีค่าสูงตามไปด้วย

ศึกษาคุณสมบัติแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

การจำลองคุณสมบัติแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

การหาแบบจำลองไฮบริดของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์จะ ต้องไบอัสให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะทำงานตามแรงดันคอลเลคเตอร์ -อิมิตเตอร์ และกระแสเบสตามที่กำหนด โปรแกรมวิเคราะห์จะช่วยหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองไฮบริดมาให้โดยนักศึกษาจะต้องใช้คำสั่ง Examine Output อย่างไรก็ดี หากนักศึ กษาให้แรงดันคอลเลคเตอร์ -อิมิตเตอร์ และกระแสเบสมีค่าเปลี่ยนไปจากเดิมค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองไฮบริดก็จะเปลี่ยนแปลงด้วย โดยในการจำลองด้วยโปรแกรมนี้นักศึกษาจะต้องอ่านค่าออกมาพร้อมกับระบุค่าในแบบจำลองตามพื้นที่ที่กำหนดให้ (วาดรูปแบบจำลองไฮบริดพร้อมระบุค่าพารามิเตอร์ด้วย)

ศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วม

การจำลองค่าทางไฟตรงและฟังก์ชันส่งผ่านของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมอย่างง่าย

ในการจำลองการทำงานของวงจรขยายสัญญาณนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงและฟังก์ชันส่งผ่านของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่ วมอย่างง่าย ในการทดลองได้ใช้การดูผลลัพธ์

จากการใช้คำสั่ง Examine Output ที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยมือ เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ทั้งสองกรณีแล้ว พบว่ามีค่าที่เท่ากัน อีกทั้งการทดลองนี้ยังสอนให้นักศึกษารู้จักการเซทค่าฟังก์ชัน ส่งผ่านในโปรแกรม โดยการพิจารณาที่โหนดเอาต์พุตและการใช้ชื่อของแหล่งกำเนิดทางอินพุต จะทำให้เราสามารถหาค่าความต้านทานทางอินพุตของวงจรโดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมช่วยได้อย่างรวดเร็ว

การจำลองวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วมแบบมี R_E และ C_E

ผลจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านๆ มาจะช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจรได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเรานำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมมาประยุกต์ใช้ในหัวข้อนี้ ซึ่งจะเป็นการเริ่มวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟตรง การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไฮบริด และการป้อนสัญญาณเข้าไปทางอินพุตของวงจรหาฟังก์ชันส่งผ่านเพื่อหาความต้านทานทางอนพุตของวงจรขยายในกรณีนี้ พร้อมกับการใช้คำสั่ง probe ในการหาค่าแรงดันสัญญาณแบบ ac ที่โหนดต่างๆ ตามที่กำหนดจะทำให้เราสามารถหาอัตราขยายสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถหาอัตราขยายกระแสสัญญาณที่ไหลที่จุดใดๆ ได้ตามต้องการ

นอกจากนี้ หากป้อนสัญญาณอินพุตแบบไซน์ แล้วให้โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณแบบชั่วขณะ ก็สามารถทดสอบอัตราขยายแรงดัน ณ ความถี่ที่เราป้อนเข้าไปได้ หมายรวมถึงการทดสอบความสัมพันธ์ในเชิงเฟสของสัญญาณระหว่างอินพุตและเอาต์พุตได้

อนึ่ง โปรแกรมยังให้ข้อมูลค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์โดยรวมได้ (Total Harmonic Distortion: THD) จากการใช้คำสั่ง Examine Output ซึ่งค่าที่อ่านได้ การใช้เวลาในการรันโปรแกรมที่เหมาะสมจะช่วยให้ได้ค่า THD ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงได้ แต่ต้องปรับแลก (trade off) กับเวลาที่ใช้ในการรันโปรแกรม

อีกทั้ง การศึกษาผลกระทบจากตัวเก็บประจุที่ต่อขนานที่อิมิตเตอร์เทียบกราวด์โดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์นี้จะช่วยให้เห็นความแตกต่างของผลตอบสนองที่ได้อย่างชัดเจน โดยการทำซ้ำกับวิธีการดังกล่าวข้างต้นโดยในขั้นตอนนี้ให้นักศึกษาปลดตัวเก็บประจุ C_E ออกจากวงจร นั่นเอง

เรื่องทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

ศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

การจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงทางเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงทางเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้านี้ หากเรากำหนดให้แรงดันที่ขาเกทเทียบขาซอร์สมีค่าคงที่ เราพบว่า ให้แรงดันไฟตรงที่ขาเดรนเทียบขาซอร์สให้มีค่าสูงขึ้น จะทำให้กระแสที่เดรนไหลเพิ่มตามด้วย อย่างไรก็ดี หากทำให้แรงดันที่เกทเทียบขาซอร์สมีค่าสูงขึ้นจากเดิม เราก็จะพบว่ากระแสเดรนก็จะไหลเพิ่มสูงขึ้นอีกเช่นกัน โดยจะไหลมากกว่ากรณีที่แรงดันเกทเทียบขาซอร์สมีค่าต่ำกว่า นั่นเอง

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเข้าใจ ในการจำลองการทำงานในหัวข้อนี้ได้ทดลองเปลี่ยนทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าเป็นเบอร์อื่นๆ แล้วทำตามขั้นตอนทดลองที่ผ่านๆ มา การอภิปรายผลเทียบกันจะช่วยให้นักศึกษาที่จำลองผลมีความเข้าใจมากยิ่งขึ้น อาจารย์ผู้สอนต้องกำชับให้นักศึกษามีการอภิปรายเชิงเปรียบเทียบกับเพื่อนๆ นักศึกษาในห้องด้วย

การจำลองคุณสมบัติทางไฟตรงทาง*อินพุต*ของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟตรงทางอินพุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า โดยการกำหนดให้แรงดันที่ขาเดรนเทียบขาซอร์ส (ซึ่งในที่นี้เทียบกราวด์) มีค่าคงที่ การปรับเปลี่ยนแรงดันที่ขาเกทเทียบขอซอร์สให้ค่อยๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย โดยการสั่งให้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟตรง แล้วใช้คำสั่ง probe ในการพล็อตกระแสเดรนที่ไหลในวงจร เราพบว่าหากทำให้แรงดันที่ขาเดรนเทียบขาซอร์สมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การทำให้กระแสเดรนไหลเท่าเดิมจะต้องลดแรงดันที่ขาเกท เทียบขาซอร์สให้น้อยลง

นอกจากนี้ การเปลี่ยนทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าให้เป็นเบอร์อื่นๆ จะมีส่วนช่วยให้นักศึกษาได้เข้าใจการคุณสมบัติทางอินพุตของทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้าได้ดีขึ้น พร้อมกับจัดกลุ่มอภิปรายผลที่ได้

ศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วม

การจำลองคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่าย ac เป็นสัญญาณอินพุต

จากการศึกษาคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วม โดยใช้แหล่งจ่าย ac เป็นสัญญาณอินพุตนั้น จะต้องใช้การวิเคราะห์ทางโปรแกรมทั้งแบบไฟตรง (DC analysis) และแบบ ac (AC analysis) เพื่อหาค่าทางไฟตรงและคุณสมบัติทางไฟสลับ (ac) ผลการศึกษาพบว่า เราสามารถหาอัตราขยายแรงดันที่โหนดต่างๆ ของวงจร ณ ความถี่ใดๆ ก็ได้ ตามต้องการ

การจำลองคุณสมบัติวงจรขยายสัญญาณแบบซอร์สร่วมโดยใช้แหล่งจ่ายรูปไซน์ เป็นสัญญาณอินพุต

ในหัวข้อนี้ นักศึกษาจะได้ทราบวิธีการหาอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณ ณ ความถี่ที่เราป้อนให้กับวงจร โดยที่สัญญาณอินพุตเป็นคลื่นรูปไซน์ โปรแกรมจะต้องวิเคราะห์แบบชั่วขณะ (transient analysis) แล้วใช้คำสั่ง probe วัดสัญญาณ ณ โหนดที่ต้องการวัดและทดสอบ ในที่นี้จะวัดที่ความถี่ที่ป้อนให้กับวงจรและเป็นความถี่เดียวกับตัวอย่างที่ผ่านมา จากนั้นหาอัตราขยายสัญญาณพบว่ามีค่าเท่ากับตัวอย่างที่ผ่านมา เนื่องจากเป็นวงจรขยายสัญญาณเดียวกัน และใช้ความถี่ทดสอบเดียวกัน นั่นเอง อีกทั้งการหาค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์โดยรวม (Total Harmonic Distortion: THD) ก็มีความสำคัญเช่นกัน และเราก็สามารถหาได้อย่างง่ายโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์จากการพิจารณาค่าจากคำสั่ง Examine Output

3. กล่าวสรุป

ผลการศึกษาในส่วนของการทดลองด้วยโปรแกรม

จากการที่นักศึกษาใช้โปรแกรมช่วยในการจำลองการทำงานของวงจร โดยในช่วงแรกเป็นการฝึกหัดใช้โปรแกรมเริ่มตั้งแต่การเรียกใช้งานโปรแกรม การเรียกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ออกมาวางในพื้นที่การวาดวงจร การกำหนดค่าอุปกรณ์ การต่ออุปกรณ์เข้าหากันผ่านทางลายเส้น (wire) การเลือกชนิดของการวิเคราะห์ให้ตรงกับความต้องการ

ผลการเรียนรู้ของนักศึกษาในช่วงนี้ค่อนข้างช้า เนื่องจากนักศึกษามีข้อจำกัดทางด้านการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ก็ได้รับความสนใจจากนักศึกษา มีการยกมือสอบถามเป็นระยะๆ เกี่ยวกับการเซทค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำ เป็นต้องใช้ในการจำลองการทำงาน รวมไปถึงสอบถามเกี่ยวกับการเลือกชนิดของการวิเคราะห์ โดยนักศึกษาได้เรียนรู้ในช่วงแรกผ่านตัวอย่างประกอบง่ายๆ

ส่วนในการปฏิบัติการหลังจากนั้น จะอ้างอิงวิธีการทดลองในแต่ละหัวข้อที่ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 ตาม โดยแต่ละการทดลองจะใช้ เวลาไม่มากนัก แต่นักศึกษาจะได้ใช้โปรแกรมอย่างเข้าใจ การต่อวงจรในโปรแกรมไม่ต้องกังวลว่าจะเกิดความเสียหายขึ้นกับตัวอุปกรณ์หรือเครื่องมือทดลองแต่อย่างใด

ดังนั้น ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจึงมีความเหมาะสมมาก เช่น ถ้าต้องการจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับค่ามากๆ ให้ กับตัวไดโอดก็สามารถทำได้ รวมไปถึงการใช้คำสั่ง probe ช่วยในการวัดกระแสหรือแรงดันค่าต่ำ ๆ เช่น กระแสไบอัสด้านเข้าที่ขาของออปแอมป์ เป็นต้น ข้อดีของการใช้โปรแกรมคือ ไม่มีข้อจำกัดทางด้านพิสัย (range) ของการวัดเลย ทำให้ค่าที่วัดโดยใช้คำสั่ง probe มีค่าถูกต้อง แม่นยำ ตรงตามทฤษฎีที่เรียนในห้องบรรยาย

โดยรวมแล้วนักศึกษามีความสนใจ ใส่ใจ และมีความกระตือรือร้น สูงมาก ในการซักถามเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีคำถามนอกห้องเรียนโดยเอาตัวอย่างต่างๆ มาถามเพื่อที่จะใช้โปรแกรมจำลองการทำงานกับวงจรที่นักศึกษาสนใจ

ผลการศึกษาในส่วนของการทดลองจริง

การทดลองจริงในห้องปฏิบัติการนั้น ได้ใช้การทดลองที่เหมือนและคล้ายกับการจำลองการทำงานของวงจรโดยใช้โปรแกรม พบว่าในช่วงแรกเริ่มนั้นต้องมีการอธิบายเครื่องมือวัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการว่าประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟตรง แหล่งกำเนิดสัญญาณและออสซิลโลสโคป ซึ่งโดยส่วนใหญ่นักศึกษาได้ทราบข้อมูลการใช้งานเครื่องมือวัดมาแล้ว เพราะส่วนใหญ่เป็นนักศึกษาที่เรียนจบในชั้นประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงทำให้สามารถใช้เครื่องมือวัดได้อย่างคล่องแคล่ว

อย่างไรก็ดี ผู้สอนต้องช่วยระวังการต่อวงจรมิฉะนั้นแ ล้วจะเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ แต่ มีการทดลอง บางเรื่อง ไม่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติจริงเช่น การทดลองหาแรงดันเบรกดา วน์ของไดโอด เพราะต้องใช้แรงดันสูงมากป้อนให้กับไดโอดซึ่งถูกจำกัดด้วยแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการและไม่สามารถวัดได้ เพราะอุปกรณ์ไดโอดจะเสียหายก่อนที่จะอ่านค่าได้

นอกจากนี้ การทดลองเรื่องคุณลักษณะบางประการของออปแอมป์ที่แตกต่างจากอุดมคตินักศึกษาต้อง setup ค่าพร้อมทั้งอ่านค่าอย่างระมัดระวังเพื่อให้ค่าที่อ่านได้มีความถูกต้อง ผิดพลาดน้อยที่สุด ก่อนที่จะนำไปเปรียบเทียบกับผลก ารจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม ในส่วนนี้ได้ผลที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม ทั้งนี้ ค่าความผิดพลาดเกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ผู้อ่านค่าผลการทดลอง นักศึกษาเกิดทักษะการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ทั้งสองกรณี อีกทั้งนักศึกษาได้ทักษ ะการใช้ออสซิลโลสโคปเพิ่มขึ้น มี ทักษะทางปฏิบัติ แต่ด้วยขีดจำกัดของเครื่องมือวัดและทดสอบในห้องปฏิบัติการจึงต้องแบ่งกลุ่มย่อยในการทดลองเพื่อให้นักศึกษาได้ใช้เครื่องมือวัดกันทุกคน

ขณะเดียวกันการทดลองในส่วนของทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์และแบบสนามไฟฟ้านั้น มีข้อจำกัดทางด้านตัวอุปกรณ์ที่ใช้และการปรับเปลี่ยนแรงดันไบอัสที่ต้องจ่ายให้กับวงจร ในที่นี้จึงมีเฉพาะผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเท่านั้น

บทที่ 5
บทสรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการวิจัยในหัวข้อเรื่อง “การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมควบคู่กับการปฏิบัติจริงในห้องปฏิบัติการไปสู่ความเข้าใจในเรื่องของอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม” ทำให้ผู้วิจัยทราบข้อจำกัดของนักศึกษาที่มาเรียนในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ พื้นที่ศาลายา ว่ามีความรู้พื้นฐานมากน้อยเพียงใด ด้วยนักศึกษาที่มาเรียนมีพื้นฐานความรู้ที่แตกต่างกันมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะมาตรฐานการศึกษาของแต่ละสถาบันการศึกษาที่นักศึกษาจบมาทั้งจากหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) มีเครื่องมือวัดและทดสอบ รวมถึง คุณสมบัติของอาจารย์ผู้สอนที่ค่อนข้างแตกต่างกัน แม้ว่านักศึกษาจะจบในหลักสูตรเดียวกันแต่ไม่ได้แปลว่าจะมีความรู้ใกล้เคียงกัน

เมื่อนำ วิธีดำเนินการวิจัยที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ไปใช้กับนักศึกษาที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชา ENG 2135 อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม ผู้วิจัยพบว่านักศึกษามีความอยากรู้ อยากเห็น มีความกระตือรือร้นในการศึกษา เมื่อพิจารณาถึงแรงจูงใจในการศึกษาพบว่าส่วนหนึ่งเกิดจากการที่ผู้สอน ได้เอาใจใส่นักศึกษา ช่วยตอบปัญหาที่สงสัยให้กับนักศึกษาอย่างกระจ่างแจ้ง รวมไปถึงการที่นักศึกษาได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองการทำงานของวงจร เพราะผู้สอนสามารถให้รายละเอียดต่างๆ ที่แสดงถึงการทำงาน การหาคำตอบจากผลการจำลองการทำงานประกอบ ซึ่งเป็นวิธีการใ หม่สำหรับการเรียนรู้ของนักศึกษา

ด้วยเครื่องมือวัดและทดสอบพื้นฐานที่มีในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมได้จัดซื้อมานานมากแล้ว เครื่องมือส่วนใหญ่ไม่อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ หากใช้งานได้ก็มีความผิดพลาด (error) สูง ซึ่งการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับผลกา รจำลองการทำงานนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งในการทดลองจริง อย่างไรก็ดี ผู้วิจัยและนักศึกษาบางกลุ่มได้ใช้เครื่องมือที่มีในห้องวิจัยของอาจารย์ซึ่งมีเพียง 1 ชุด ทำการทดลองแล้วเปรียบเทียบผลที่ได้ พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัย

ดังจะเห็นได้ว่า โครงการวิจัยฯ นี้ มีวิธีดำเนินการวิจัยทั้งสองส่วนคือส่วนที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรมซึ่งได้อธิบายขั้นตอนการทดลองอย่างเป็นลำดับ -ขั้นตอน เพื่อให้ผู้นำวิธีการดำเนินการวิจัยไปใช้งาน และในส่วนที่สองเป็นส่วนที่ทำการทดลองจริงด้วยเครื่องมือวัดและทดสอบ ผู้วิจัยก็ให้ขั้นตอน การทดลองอีกเช่นกัน เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมแล้ว อาจารย์ผู้สอนอื่นๆ ที่ต้องการนำวิธีการวิจัยไปใช้ กับรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศว กรรมที่ในห้องปฏิบัติการมีเครื่องมือที่ครบถ้วน เช่น แหล่งจ่ายกำลังงาน (power supply) เครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator) และออสซิลโลสโคป (oscilloscope) เป็นต้น แต่ถ้าหากห้องปฏิบัติการใดไม่มีเครื่องมือวัดและทดสอบก็สามารถให้นักศึกษาเรียนเฉพาะในส่วนที่จำลอง การทำงานด้วยโปรแกรม เท่านั้นก็เพียงพอกับเนื้อหาของรายวิชาอิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม (แต่จะไม่ได้ทักษะปฏิบัติในห้องปฏิบัติการจริง)

อย่างไรก็ดี หากอาจารย์ผู้สอนสามารถจัดหาเครื่องมือวัดและทดสอบได้ ก็จะช่วยให้นักศึกษาได้รับความรู้ เกิดการเปรียบเทียบการจำลองการทำงา นกับการวัดจริงในห้อง ปฏิบัติการได้ยังมีส่วนช่วยเสริม ให้นักศึกษาสามารถใช้เครื่องมือวัดและทดสอบได้อย่างคล่องแคล่ว ถูกต้องและเหมาะสมอีกด้วย แต่ถ้าจำ นวนเครื่องมือไม่เพียงพอกับจำนวนนักศึกษาที่จะทดลองแต่ละครั้ง ก็สามารถใช้การแบ่งกลุ่มเพื่อทดลองได้

3. ปัญหาที่พบในการทำวิจัย

ในช่วงแรกของการให้นักศึกษาได้ทำตามวิธีดำเนินการวิจัยโดยผู้วิจัย จะเกิดปัญหาคือ การเรียนรู้ของนักศึกษาจะค่อนข้างช้า เนื่องจากต้องมีทักษะการใช้งานคอมพิวเตอร์ด้วย ทั้งผู้วิจัยจะต้องสอนการใช้งานโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วย ซึ่งหากมีอาจารย์ผู้ช่วยในห้องปฏิบัติการฯ จะทำให้การเรียนรู้ของนักศึกษาทำได้ดีขึ้น รวดเร็วขึ้น เพราะสามารถช่วยแก้ปัญหาเฉพาะหน้าให้กับนักศึกษาแต่ละคนได้ทันท่วงที แต่ถ้ามีผู้สอนเพียงท่านเดียวแล้วจะต้องสอนอย่างช้าๆ ทีละขั้นตอนให้นักศึกษาทำไปพร้อมๆ กัน แต่ถ้าใครสงสัยอะไรก็ให้ถามได้เพื่ อที่จะได้ตอบข้อสงสัยให้กับนักศึกษาคนอื่นได้ทราบไปพร้อมๆ กันด้วย แต่ก็จะใช้เวลาค่อนข้างมาก อย่างไรก็ดี ปัญหานี้จะน้อยลงหากให้นักศึกษานำโปรแกรมที่เป็น student version ไปฝึกใช้งานที่บ้านตนเองพร้อมทั้งโจทย์ตัวอย่างง่ายๆ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณสามถึงสี่สัปดาห์ นักศึกษา มีความคุ้นเคยกับโปรแกรมมากขึ้นก็ ผู้สอนก็สามารถสอนได้ทันตามเวลาที่กำหนด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บรรณานุกรม

J. D. Ryder, ***Electronic Fundamentals and applications: Integrated and Discrete Systems*, 5th**, New Delhi: Prentic-Hall, Inc., 1976.

S. R. Fleeman, ***Electronic Devices: Discrete and Integrated***, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1990.

J. Keown, ***Pspice and circuit analysis*, 2nd**, New York: Macmillan Publishing Company, 1994.

D. E. Johnson, J. R. Johnson, J. L. Hilburn, and P. D. Scott, ***Electric Circuit Analysis*, 3rd**, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1997.

จิรยุทธ์ มหัธธนกุล, ***อิเล็กทรอนิกส์*,** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2548.

B. Razavi, ***Fundamentals of Microelectronics***, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์ , **เอกสารประกอบการบรรยายวิชา อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม** , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 2555.

http://www.cadence.com/products/orcad/pages/downloads.aspx#cd

www.neduet.edu.pk/electronics/electronics/pdf/OrcadTutorial.pdf

http://ecee.colorado.edu/~bart/ecen3250/f05/spice/startup.pdf

ภาคผนวก

เพื่อเป็นการประเมินผลการใช้

คำถามก่อนและหลังการทดลอง

1. ข้อใดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ก. ไดโอด
ข. ออปแอมป์
ค. ทรานซิสเตอร์
ง. ถูกทุกข้อ

2. อุปกรณ์ในข้อใดมีขาต่อใช้งาน 2 ขา

ก. ไดโอด
ข. ออปแอมป์
ค. ทรานซิสเตอร์
ง. ถูกทุกข้อ

3. PSPICE เป็นชื่อของอะไร

ก. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
ข. โปรแกรมทางวิศวกรรม
ค. ชื่อของวงจร
ง. โปรแกรมพิมพ์รายงาน

4. ข้อใดเป็นความ**แตกต่าง**ของการใช้โปรแกรมช่วยจำลองการทำงานและการต่อวงจรจริง

ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรมกับวงจรจริงเป็นคนละตัวกัน
ข. มีความถูกต้องน้อยกว่าการต่อวงจรจริง
ค. ใช้เวลามากกว่าจะได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ
ง. มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง

5. ข้อใด**ไม่ใช่**เครื่องมือวัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน

ก. สเปกตรัมอะนาไลเซอร์
ข. โวลต์มิเตอร์
ค. แอมป์มิเตอร์
ง. ออสซิลโลสโคป

6. ออปแอมป์ในทาง**อุดมคติ** มีคุณสมบัติเป็นอย่างไร

ก. อัตราขยายลูปเปิดสูง
ข. ความต้านทานทางเอาต์พุตสูง
ค. กระแสทางอินพุตสูง
ง. ถูกทุกข้อ

7. ข้อใด**ไม่ใช่** ปัญหาของออปแอมป์ในทางปฏิบัติ

ก. กระแสไบอัสด้านเข้า
ข. อัตราสลูว์
ค. แรงดันออฟเซททางอินพุต
ง. ถูกทุกข้อ

8. ตามรูป เป็นสัญลักษณ์ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง มีตัวถัง (package) เป็นพลาสติก อยากทราบว่าเป็นตัวถังแบบใด

ก. TO-92
ข. TO-126
ค. TO-143
ง. TO-220

9. จากรูป เครื่องมือนี้เรียกว่าอะไร

ก. แหล่งจ่ายไฟตรง
ข. แหล่งกำเนิดสัญญาณ
ค. ออสซิลโลสโคป
ง. โวลต์มิเตอร์

10. จากรูป เครื่องมือนี้เรียกว่าอะไร

ก. แหล่งจ่ายไฟตรง
ข. แหล่งกำเนิดสัญญาณ
ค. ออสซิลโลสโคป
ง. โวลต์มิเตอร์

11. จากรูป เครื่องมือนี้เรียกว่าอะไร

ก. แหล่งจ่ายไฟตรง
ข. แหล่งกำเนิดสัญญาณ
ค. ออสซิลโลสโคป
ง. โวลต์มิเตอร์

12. ข้อใดเป็นชื่อของวงจรขยายสัญญาณแบบต่างๆ ที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์

ก. Inverting amplifier
ข. Common base amplifier
ค. Summing amplifier
ง. Differential amplifier

13. ขณะไดโอดอุดมคติได้รับไบอัสตรง จะมีแรงดันตกคร่อมค่าเท่าใด

ก. 0 โวลต์
ข. 0.7 โวลต์
ค. 0.3 โวลต์
ง. ไม่มีข้อถูก

14. เราใช้เครื่องมือชนิดใดในการแสดงการกลับเฟสของวงจรขยายสัญญาณแบบอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter) ได้อย่างเหมาะสม

ก. แหล่งกำเนิดสัญญาณ
ข. ออสซิลโลสโคป
ค. สเปกตรัมอนาไลเซอร์
ง. แอมป์มิเตอร์

15. วงจรกันชนหรือวงจรขยายแบบบั๊ปเฟอร์ (buffer amplifier) ทำหน้าที่อะไร

ก. กันแรงดันที่ไม่เท่ากัน
ข. กันกระแสที่ไม่เท่ากัน
ค. กันกำลังงานที่ไม่เท่ากัน
ง. กันความต้านทานที่ไม่เท่ากัน

16. วงจรกันชนหรือวงจรขยายแบบบั๊ปเฟอร์ (buffer amplifier) สร้างได้จากอุปกรณ์ใดต่อไปนี้

ก. ออปแอมป์
ข. ทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์
ค. ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า
ง. ถูกทุกข้อ

17. แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของไดโอดประกอบขึ้นจากอุปกรณ์ตามข้อใด

ก. R ขนาน C
ข. R อนุกรม C
ค. R ขนาน L
ง. R อนุกรม L

18. การป้อนสัญญาณไซนูซอยด์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ (signal generator) ให้กับวงจร จากนั้นใช้ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ช่วยวัดสัญญาณจากการทดลองจริง อยากทราบว่า ในการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมภายใต้กรณีเดียวกันนี้ จะใช้แหล่งจ่ายชนิดใด และใช้การวิเคราะห์แบบใดจากโปรแกรม

ก. แหล่งจ่ายแบบ VAC และวิเคราะห์แบบ AC sweep
ข. แหล่งจ่ายแบบ VAC และวิเคราะห์แบบ transient
ค. แหล่งจ่ายแบบ VSIN และวิเคราะห์แบบ transient
ง. แหล่งจ่ายแบบ VSIN และวิเคราะห์แบบ AC sweep

19. แหล่งกำเนิดสัญญาณอินพุตมีสมการเป็น $v_{in}(t) = 150\sin(2p' 100' 10^3 t)$ อยากทราบว่าสัญญาณนี้เป็นสัญญาณอะไร มีขนาดและความถี่เท่าใด

ก. สัญญาณไซนูซอยด์ ขนาด $2p$ โวลต์ ความถี่ 100 เฮิรตซ์
ข. สัญญาณไซนูซอยด์ ขนาด 150 โวลต์ ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์
ค. สัญญาณรูปเหลี่ยม ขนาด 300 โวลต์ ความถี่ 100 กิโลเฮิรตซ์
ง. สัญญาณรูปเหลี่ยม ขนาด 150 โวลต์ ความถี่ 100 เฮิรตซ์

20. การป้อนสัญญาณแรงดันรูปเหลี่ยมจากโปรแกรมใช้แหล่งจ่ายสัญญาณใดต่อไปนี้

ก. VPWL
ข. VPULSE
ค. IPWL
ง. IPULSE

ประวัติผู้วิจัย

1. **ชื่อ – นามสกุล** นายเชิงชาย สมประชา
2. **ตำแหน่ง** อาจารย์
3. **ที่อยู่**

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
เลขที่ 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล
จังหวัดนครปฐม 73170
โทรศัพท์ 0-2889-4585 ต่อ2640 โทรศัพท์ 081 17790877
E-mail: cherngche@yahoo.com

4. **ประวัติการศึกษา**

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5. **สาขาวิชาการที่มีความชานาญพิเศษ**

นอกเหนือจากการศึกษา

6. **ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย**

"ใส่ชื่อผลงานวิจัยที่ผ่านมา พร้อมระบุปีที่ได้รับการสนับสนุน"
หน่วยงานที่ให้ทุน/แหล่งทุน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์