

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โปรแกรมเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรขยายเสียง

ขนาดเล็กโดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม

PROGRAM SELECTING ELECTRONIC DEVICES FOR SMALL SIZE
AMPLIFIER BY USING GENETIC ALGORITHM



28
2552
2551

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 103986
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2552

b. 12102480
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรขยายเสียงขนาดเล็ก โดยใช้
เจเนติกอัลกอริทึม

PROGRAM SELECTING ELECTRONIC DEVICES PROGRAM FOR A LOW
POWER AMPLIFIER CIRCUIT BY USING GENETIC ALGORITHM

ผู้จัดทำ

1. นายปติณญา สุรินดี๊ะ รหัสประจำตัว 49015283
2. นางสาวเปรมฤทัย พยิมซ้อน รหัสประจำตัว 49015287
3. นายสิทธิชัย บุษสัน รหัสประจำตัว 49015309



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โปรแกรมเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม
สำหรับวงจรขยายเสียงขนาดเล็กโดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม**

นายปติณญา	สุรินตะ
นางสาวปรมฤทัย	พยัมซ้อน
นายสิทธิชัย	บุหลัน
อาจารย์สุภกิจ	นุทยะสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2551

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาการใช้เจเนติกอัลกอริทึมเลือกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรขยายขนาดเล็ก เจเนติกอัลกอริทึมทำหน้าที่คัดเลือกอุปกรณ์โดยพิจารณาจาก แรงดัน และ อัตราขยายที่ผู้ใช้อื่นเข้ามา ต่อจากนั้นเจเนติกอัลกอริทึมจึงใช้กระบวนการทางพันธุกรรมค้นหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุด

วงจรขยายสัญญาณขนาดเล็กที่ใช้เจเนติกค้นหาประกอบด้วย Fixed bias, Self-bias, Voltage divider และ Direct coupling ฐานข้อมูลของทรานซิสเตอร์มีจำนวน 200 ตัว ซึ่งเป็นเบอร์ที่มีขายในท้องตลาด และนิยมใช้กัน

การทดสอบการทำงาน โครงการนี้ได้นำเอาวงจรที่เลือกอุปกรณ์ด้วยเจเนติกอัลกอริทึม นำมาทดลองด้วยโปรแกรมจำลองการทำงาน Nation instrument electronic workbench ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าวงจรเลือกอุปกรณ์ให้ผลลัพธ์ของสัญญาณเทียบเท่ากับวงจรที่จำลองการทำงาน

**Program selecting electronic devices
for small size amplifier by using genetic algorithm**

Mr. Patinya	Surinta
Miss. Preamruthai	Payakson
Mr. Sitthichai	Buhlan
Mr. Supakit	Nootayasakul Advisor

Academic Year 2008

ABSTRACT

This thesis study using genetic algorithm selects appropriately electronic devices in small-circuit amplifier. The genetic algorithm works as a selector electronic device considering from, which the value assigned by customer, supply voltage and output gain. After getting the value, the appropriate devices are selected by genetic algorithm.

Type of small-circuit amplifiers finding by genetic algorithm are fixed-bias, self-bias, voltage divider bias and direct couple circuit. In database of electronic device such as transistor, we use a favorite kind that is more than 200 devices.

In experimentation, we use software namely National Instrument Electronic Workbench to simulate the devices having found by genetic algorithm. Experimenting result, comparing the signal and voltage value from software simulation and the circuit from genetic algorithm is quite a similar result.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์สุภกิจ นุตยะสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งกรุณาสละเวลาให้
ความรู้และคำแนะนำตลอดการทำโครงการ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้เป็นที่รัก, ผู้ให้กำลังใจและให้โอกาส
การศึกษาอันมีค่ายิ่ง

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	IV
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	
2.1 Genetic Algorithm.....	3
2.1.1 Genetic Algorithm (ขั้นตอนทางพันธุศาสตร์).....	3
2.1.2 องค์ประกอบของ Genetic Algorithm.....	4
2.1.2.1 Chromosome Encoding.....	4
2.1.2.2 Initial population.....	5
2.1.2.3 Fitness Function.....	6
2.1.2.4 Genetic Operator.....	6
2.1.2.5 Parameter.....	10
2.1.3 ขั้นตอนการทำงานของ Genetic Algorithm.....	10
2.2 ทรานซิสเตอร์.....	11
2.2.1 การจำแนกทรานซิสเตอร์.....	12
2.2.1.1 ทรานซิสเตอร์แบบ Low Power.....	12
2.2.1.2 ทรานซิสเตอร์แบบ High Power.....	13
2.2.2 การจัดไบแอสให้ทรานซิสเตอร์.....	13
2.2.3 ทิศทางการไหลของกระแส.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2.4	ลักษณะการจัดวงจรทรานซิสเตอร์	17
2.2.4.1	วงจรเบสร่วม (Common Base).....	17
2.2.4.2	วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter Circuit)	19
2.2.4.3	วงจรคอลเลกเตอร์ร่วม (Common Collector Circuit).....	21
2.2.5	เส้นโหลดไฟกระแสตรงและจุดทำงาน (Load line analysis and Operating Point).....	22
2.3	วงจรรขยายกำลัง.....	27
2.3.1	ทรานซิสเตอร์ในวงจรรขยายสัญญาณ	27
2.3.2	วงจรรขยายคลาสเอ (Class A)	30
2.3.3	วงจรรขยายคลาสบี (Class B)	35
2.3.4	วงจรรขยายคลาสเอบี (Class AB).....	38
2.3.5	วงจรรขยายคลาสซี (Class C)	40
2.3.6	วงจรไบแอสแบบคงที่ (Fixed-Bias Circuit)	41
2.3.7	วงจรอิมิตเตอร์ไบแอส (Emitter Bias Circuit).....	44
2.3.8	วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider Bias Circuit)	48
2.3.9	วงจรไบแอสแบบแรงดันป้อนกลับ (DC Bias with Voltage Feedback)	49
บทที่ 3	การออกแบบ GA AMP	52
3.1	การทำงานของโปรแกรม	54
3.2	การออกแบบ GA Fixed Bias	55
3.3	การออกแบบ GA Emitter Stabilized Bias.....	56
3.4	การออกแบบ GA Voltage Feedback Bias.....	57
3.5	การออกแบบ GA Voltage Divider Bias.....	57
3.6	การออกแบบ GA Direct-coupled.....	58
บทที่ 4	การทดลองและผลการทดลอง	61
4.1	รูปร่างหน้าตาของโปรแกรม GA AMP V.1.1	61
4.2	การทดลอง.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.1 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias	62
4.2.1.1 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 1.....	63
4.2.1.2 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 2.....	66
4.2.1.3 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 3.....	70
4.2.1.4 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 4.....	73
4.2.2 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Voltage Divider Bias	77
4.2.2.1การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Divider Bias ครั้งที่ 1.....	77
4.2.2.2 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Divider Bias ครั้งที่ 2.....	81
4.2.2.3 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Divider Bias ครั้งที่ 3.....	85
4.2.2.4 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Divider Bias ครั้งที่ 4.....	89
4.2.3 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Emitter Bias	93
4.2.3.1การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Emitter Bias ครั้งที่ 1.....	94
4.2.3.2 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Emitter Bias ครั้งที่ 2.....	98
4.2.3.3 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Emitter Bias ครั้งที่ 3.....	102
4.2.3.4 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Emitter Bias ครั้งที่ 4.....	106
4.2.4 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Voltage Feedback Bias	110
4.2.4.1การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 1.....	110
4.2.4.2 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 2.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.4.3 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 3.....	118
4.2.4.4 การทดลอง GA AMP	
หาค่าวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 4.....	122
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป.....	127
บรรณานุกรม	130



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะการ Crossover กับ Binary Encoding	9
2.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า β ของทั้งสองวงจร	46
5.1 ตารางเทียบอัตราการขยายที่ได้จากโปรแกรม GA AMP กับ โปรแกรม Simulate	127
5.2 ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม GA AMP	127



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การสุ่มหาประชากรเริ่มต้นจำนวน 4 โครโมโซม	6
2.2 ถึงสัดส่วนของค่าความเหมาะสม.....	7
2.3 การ Crossover.....	7
2.4 การ Crossover แบบขวางและแบบตั้งฉาก.....	8
2.5 การ Crossover กับข้อมูลที่เป็นรูปแบบ Permutation Encoding.....	9
2.6 การ Mutation	9
2.7 การ Mutation กับโครโมโซมรูปแบบ Permutation Encoding.....	10
2.8 การขั้นตอนการทำงานของ Genetic Algorithm.....	11
2.9 โครงสร้างทรานซิสเตอร์ PNP โครงสร้างทรานซิสเตอร์ NPN.....	12
2.10 สัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ PNP ทรานซิสเตอร์ NPN.....	12
2.11 ทรานซิสเตอร์แบบ Low Power.....	13
2.12 ทรานซิสเตอร์แบบ High Power	13
2.13 การไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์	14
2.14 การทำงานด้านอินพุทของทรานซิสเตอร์.....	14
2.15 การทำงานด้านเอาต์พุทของทรานซิสเตอร์	15
2.16 การต่อทรานซิสเตอร์เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน.....	16

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ทิศทางการไหลและปริมาณกระแสต่างๆของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN.....	16
2.18 ทิศทางการไหลและปริมาณกระแสต่างๆของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP	16
2.19 วงจรขยายแบบเบสร่วม	18
2.20 วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม.....	19
2.21 วงจรขยายแบบคอลเลคเตอร์ร่วม.....	21
2.22 กราฟความสัมพันธ์ของจุดทำงาน.....	22
2.23 วงจรและกราฟที่ต้องการหาเส้นโหลดจุดทำงาน.....	23
2.24 กราฟเส้นโหลดและจุดทำงาน (Q).....	24
2.25 วงจรและกราฟที่ใช้ในการคำนวณตัวอย่าง 2.1.....	25
2.26 เส้นโหลด DC และจุด Q กำหนดลงบนกราฟใน 2.25(b).....	26
2.27 กราฟค่าสูงสุดของทรานซิสเตอร์.....	26
2.28 ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายสัญญาณ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุต และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้.....	27
2.29 การต่อไบแอสทรานซิสเตอร์ทำให้ได้รูปคลื่นเอาต์พุตที่สมบูรณ์.....	28
2.30 เมื่อต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับสัญญาณเอาต์พุตทำให้ได้สัญญาณสวิงในช่วงบวกลบ.....	28
2.31 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า R_B และ R_C เพื่อหาจุดไบแอสที่เหมาะสม.....	29

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 (a) เป็นตัวอย่างวงจรรขยายของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP.....	30
(b) สัญญาณเอาต์พุตที่สวิงได้สูงสุดโดยไม่เพี้ยน.....	30
(c) การผิดเพี้ยนเมื่อสัญญาณสวิงสูงเกินไป.....	30
2.33 รูปสัญญาณของกระแสคอลเล็กเตอร์ซึ่งทำงานในคลาสต่างๆ.....	31
2.34 วงจรรขยายคอมมอนคอลเล็กเตอร์.....	32
2.35 รูปคุณลักษณะการส่งผ่านระหว่างแรงดันอินพุต – เอาต์พุต.....	32
2.36 รูปสัญญาณสูงสุดที่จุดต่างๆของวงจรรขยายภาคเอาต์พุตคลาสเอ.....	33
2.37 วงจรรขยายคลาสเอ.....	34
2.38 กราฟการทำงานวงจรรขยายคลาสเอ.....	35
2.39 วงจรรขยายคลาสบี.....	35
2.40 คุณสมบัติการส่งผ่านของวงจรรขยายคลาสบี.....	36
2.41 การเกิดความเพี้ยนตรงรอยต่อสัญญาณ.....	37
2.42 วงจรรขยายคลาสเอบี.....	38
2.43 คุณสมบัติการส่งผ่านของวงจรรขยายคลาสเอบี.....	40
2.44 วงจรรขยายคลาสซี.....	40
2.45 วงจรไบแอสแบบคงที่.....	41

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.46 เส้นโหลดและจุดการทำงาน	42
2.47 (a) การเปลี่ยนแปลงของจุดทำงานเมื่อเพิ่มค่า I_B	43
(b) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโหลดสายและจุดทำงานของการเพิ่มค่า R_C	43
2.48 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโหลดสายและจุดทำงานของการลดค่า V_{cc}	43
2.49 วงจรไบอัสแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์ (Emitter Bias Circuit).....	44
2.50 ลักษณะของ Collector - Emitter loop.....	45
2.51 (a) การไบอัสแบบคงที่ของวงจร DC และ (b) เพิ่ม R_E	46
2.52 วงจรไบอัสแบบแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider Bias Circuit).....	48
2.53 (a) การวาดรูปใหม่ของวงจรทางด้านอินพุท	48
(b) วงจร Thevenin	48
2.54 (a) การไบอัสกลับของวงจร DC	50
(b) วงจรทางด้านอินพุท	50
3.1 รูปแบบโครโมโซมของ Genetic โดยทั่วไป.....	55
3.2 วงจรขยายแบบ Fixed Bias	55
3.3 รูปแบบโครโมโซมของ GA Fixed Bias	55
3.4 วงจรขยายแบบ Emitter Stabilized Bias.....	56

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 รูปแบบโครโมโซมของ GA Em.....	57
3.6 วงจรขยายแบบ Voltage Feedback Bias.....	57
3.7 รูปแบบโครโมโซมของ GA CM VOFE.....	57
3.8 วงจรขยายแบบ Voltage Divider Bias.....	58
3.9 รูปแบบโครโมโซมของ GA CM VODI.....	58
3.10 วงจรขยายแบบ Voltage Direct-coupled.....	59
3.11 รูปแบบโครโมโซมของ GA CM DI.....	59
4.1 รูปร่างหน้าตาของโปรแกรม.....	61
4.2 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Fixed Bias.....	63
4.3 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	63
4.4 รูปการต่อวงจร Fixed Bias 1 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	64
4.5 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	64
4.6 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร.....	64
4.7 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน VC ของวงจร.....	64
4.8 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน I_B ของวงจร.....	65
4.9 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร.....	65

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	65
4.11 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	66
4.12 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT.....	66
4.13 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	67
4.14 รูปการต่อวงจร Fixed Bias 2 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	67
4.15 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	67
4.16 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร.....	68
4.17 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน VC ของวงจร.....	68
4.18 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน I_B ของวงจร.....	68
4.19 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร.....	68
4.20 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	69
4.21 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	69
4.22 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT.....	70
4.23 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	70
4.24 รูปการต่อวงจร Fixed Bias 3 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	71
4.25 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	71

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	71
4.27 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร	71
4.28 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	72
4.29 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	72
4.30 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	72
4.31 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	73
4.32 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	73
4.33 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP	74
4.34 รูปการต่อวงจร Fixed Bias 4 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10	74
4.35 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator	74
4.36 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	75
4.37 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร	75
4.38 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	75
4.39 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	75
4.40 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	76
4.41 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	76

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT.....	77
4.43 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Voltage Divider Bias.....	77
4.44 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	78
4.45 รูปการต่อวงจร Voltage Divider Bias 1 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	78
4.46 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	78
4.47 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร.....	79
4.48 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร.....	79
4.49 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร.....	79
4.50 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร.....	79
4.51 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร.....	80
4.52 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร.....	80
4.53 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	80
4.54 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	81
4.55 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT.....	81
4.56 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	82
4.57 รูปการต่อวงจร Voltage Divider Bias 2 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	82

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.58 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator	82
4.59 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจรถ	83
4.60 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจรถ	83
4.61 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจรถ	83
4.62 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจรถ	83
4.63 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจรถ	84
4.64 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจรถ	84
4.65 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	84
4.66 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	85
4.67 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT.....	85
4.68 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	86
4.69 รูปการต่อวงจรถ Voltage Divider Bias 3 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10	86
4.70 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator	86
4.71 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจรถ	87
4.72 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจรถ	87
4.73 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจรถ	87

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.74 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	87
4.75 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	88
4.76 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร.....	88
4.77 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	88
4.78 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	89
4.79 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT.....	89
4.80 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	90
4.81 รูปการต่อวงจร Voltage Divider Bias 4 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10	90
4.82 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator	90
4.83 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	91
4.84 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร	91
4.85 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร	91
4.86 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	91
4.87 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	92
4.88 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร.....	92
4.89 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	92

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.90 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	93
4.91 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	93
4.92 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Emitter Bias.....	94
4.93 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP	92
4.94 รูปการต่อวงจร Emitter Bias 1 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	95
4.95 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator	95
4.96 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	95
4.97 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร	96
4.98 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร	96
4.99 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	96
4.100 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	96
4.101 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร	97
4.102 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope	97
4.103 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	97
4.104 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	98
4.105 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	98

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.106 รูปการต่อวงจร Emitter Bias 2 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	99
4.107 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	99
4.108 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร.....	99
4.109 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร.....	100
4.110 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร.....	100
4.111 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร.....	100
4.112 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร.....	100
4.113 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร.....	101
4.114 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	101
4.115 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	101
4.116 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT.....	102
4.117 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	102
4.118 รูปการต่อวงจร Emitter Bias 3 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	103
4.119 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	103
4.120 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร.....	103
4.121 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร.....	103

XX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.122 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจรถ	104
4.123 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจรถ	104
4.124 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจรถ	102
4.125 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจรถ	102
4.126 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope	105
4.127 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope	105
4.128 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	106
4.129 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP	106
4.130 รูปการต่อวงจรถ Emitter Bias 4 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10	107
4.131 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator	107
4.132 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจรถ	107
4.133 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจรถ	107
4.134 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจรถ	108
4.135 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจรถ	108
4.136 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจรถ	108
4.137 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจรถ	108

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.138 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	109
4.139 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	109
4.140 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	110
4.141 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Voltage Feedback Bias.....	110
4.142 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	111
4.143 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias 1 ของโปรแกรม Electronics Workbench 10.....	111
4.144 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	112
4.145 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	112
4.146 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร	112
4.147 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร	112
4.148 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร.....	113
4.149 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร.....	113
4.150 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร	113
4.151 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope	113
4.152 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope.....	114
4.153 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	114

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.154 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	115
4.155 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias 2 ของโปรแกรม Electronic Workbench 10	115
4.156 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	116
4.157 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	116
4.158 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร	116
4.159 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร	116
4.160 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	117
4.161 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	117
4.162 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร	117
4.163 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope	115
4.164 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope	118
4.165 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	118
4.166 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP.....	119
4.167 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias 3 ของโปรแกรม Electronic Workbench 10	119
4.168 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator.....	120
4.169 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	120

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.170 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน VC ของวงจร	120
4.171 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร	120
4.172 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	121
4.173 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	121
4.174 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร	121
4.175 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope	121
4.176 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope	122
4.177 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	122
4.178 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP	123
4.179 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias 4 ของโปรแกรม Electronic Workbench 10	123
4.180 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator	124
4.181 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร	124
4.182 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน VC ของวงจร	124
4.183 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร	124
4.184 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร	125
4.185 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร	125

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.186 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร	125
4.187 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope	125
4.188 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope	126
4.189 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT	126



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้มีความก้าวหน้าและพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง และยังสามารถค้นคว้าให้ก้าวหน้าไปเรื่อยๆ โดยในระบบที่คิดค้นขึ้นมาใหม่ส่วนใหญ่มักจะเป็นระบบที่เลียนแบบให้มีความใกล้เคียงกับมนุษย์หรือใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด จึงได้มีแนวคิดที่ว่า จะทดลองหาอุปกรณ์ที่จะนำมาทำเครื่องขยายเสียง โดยใช้หลักการเลียนแบบการถ่ายทอดทางพันธุกรรมซึ่งจะใช้ค่าอัตราการขยายที่เราต้องการเป็นตัวกำหนด โดยจะเริ่มจากวงจรขยายในภาคแรกของเครื่องเสียง คือวงจรขยายในคลาสเอเพื่อจะเป็นจุดเริ่มต้นของการค้นคว้าเพื่อศึกษาวงจรที่ใหญ่ขึ้นต่อไป

เนื่องจากเหตุนี้จึงได้มีการคิดค้นระบบในการออกแบบวงจรขยายเสียงโดยการใช้जेเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นหลักการจำลองรูปแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม มาช่วยในการแก้ปัญหาในการเลือกใช้อุปกรณ์ โดยที่กำหนดอัตราการขยายของแรงดันและแรงดันไฟที่ใช้เข้าไปในโปรแกรมและให้โปรแกรมใช้หลักการทำงานของजेเนติกในการค้นหาอุปกรณ์ที่มีความสอดคล้องกันมากที่สุดออกมา

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงาน และขั้นตอนการทำงานของกระบวนการทางजेเนติกอัลกอริทึม เพื่อให้เข้าใจถึงรายละเอียดต่างๆและการประยุกต์เพื่อการนำไปใช้งาน
2. ศึกษาแนวทางการนำกระบวนการทางजेเนติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้ในการทดลองกับวงจรขยายเสียงขนาดเล็ก โดยใช้जेเนติกอัลกอริทึมค้นหาค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าแรงดัน Output ตามที่ต้องการ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการทำงานของजेเนติกอัลกอริทึมในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ได้รับความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการทดลองการค้นหาลูปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม
3. ได้รู้ถึงหลักการการทำงานของเครื่องขยายเสียงในภาคต่างๆ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการแก้ปัญหาโดยการใช้อัลกอริทึมเพื่อหาลูปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยเทียบกับอัตราการขยายแรงดันและค่าของแหล่งจ่ายไฟที่ป้อนเข้าไป โดยที่อุปกรณ์ที่ถูกเลือกออกมานั้นจะมาจากอุปกรณ์ที่เราทำการเก็บข้อมูลไว้ ซึ่งวงจรที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเพียงภาคแรกๆ ของวงจรถยายเสียงขนาดใหญ่ นั่นก็คือวงจรถยายในคลาสเอซึ่งการทดลองนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการออกแบบวงจรให้หาลูปกรณ์ในส่วนอื่นต่อไป

1.5 ส่วนประกอบของของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการออกแบบวงจรถยายเสียง โดยใช้อัลกอริทึม ซึ่งเป็นหลักการจำลองรูปแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม มาช่วยในการแก้ปัญหาในการเลือกใช้อุปกรณ์ โดยการกำหนดอัตราการขยายของแรงดันและแรงดันไฟที่ใช้เข้าไปในโปรแกรมและให้โปรแกรมใช้หลักการทำงานของ เจเนติกในการค้นหาลูปกรณ์ที่มีความสอดคล้องกันมากที่สุดออกมา

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ขอบเขตของงานวิจัย และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโครงการ ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีเจเนติกอัลกอริทึมและวงจรถยายภาคเอาต์พุต

บทที่ 3 กล่าวถึงชิ้นงานของโครงการนี้ คือ โปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยใช้อัลกอริทึมทำการหาลูปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมสำหรับวงจรถยายเสียงขนาดเล็ก โดยเทียบกับอัตราการขยายแรงดันและค่าของแหล่งจ่ายไฟที่ป้อนเข้าไป

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นบทวิจารณ์และสรุป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 Genetic Algorithm

เจเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการแก้ปัญหาทางคอมพิวเตอร์โดยนำหลักการของพันธุศาสตร์ในวิชาชีววิทยาเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา โดยการจำลองรูปแบบการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมมา ประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาเหล่านี้

2.1.1 Genetic Algorithm (ขั้นตอนทางพันธุศาสตร์)

Genetic Algorithm (ขั้นตอนทางพันธุศาสตร์) คือ วิธีแก้ปัญหาหนึ่งที่ใช้ในการค้นหา (search) เพื่อให้ได้จุดที่เหมาะสมที่สุด ที่เรียกว่า Optimum points โดยได้พัฒนาและจำลองวิธีการมาจากกระบวนการทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตจากทฤษฎีวิวัฒนาการหรือทฤษฎีการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต โดยทฤษฎีนี้เป็นของ Charles Darwin ซึ่งจากทฤษฎีนี้ John Holland นักวิทยาศาสตร์สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ได้ทำการคิดค้นการลอกเลียนแบบขั้นตอนธรรมชาติของการพัฒนาสิ่งมีชีวิตขึ้นในปีคริสต์ศักราช 1970 โดยพัฒนาขึ้นร่วมกับเพื่อนร่วมงานและนักศึกษาของมหาวิทยาลัย Michigan ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยที่เขามีจุดมุ่งหมายเพื่อ

1. อธิบายการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางธรรมชาติของพันธุกรรม
2. เพื่อที่จะนำกลไกการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มาประยุกต์ใช้กับการเขียนโปรแกรม ซึ่งมีความหวังว่าจะเป็นการค้นพบที่มีความสำคัญทั้งกับกลไกทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต และการคิดค้นประดิษฐ์ทางวิทยาศาสตร์

จากการคิดค้นของ John Holland ทำให้สามารถค้นหาและแก้ปัญหาให้ได้จุดที่เหมาะสมที่สุดซึ่งอาจจะเป็นจุดต่ำสุด (Minimum point) หรือจุดสูงสุด (Maximum point) สำหรับหลักการของวิธีการค้นหาแบบ Genetic Algorithm คือสิ่งมีชีวิตทั้งหมดจะมีทั้งลักษณะที่ดีและไม่ดี ในการกำหนดว่าสิ่งมีชีวิตไหนมีลักษณะที่ดีหรือไม่ดีนั้นจะถูกกำหนดจาก Optimization Theory ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะที่ดีนั้นจะได้รับการสนับสนุนให้มีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมเพื่อให้ได้สิ่งมีชีวิตใหม่ที่ดีขึ้น ในส่วนที่มีลักษณะที่ไม่ดีจะไม่ถูกสนับสนุนหรือไม่นำส่วนนี้มาพิจารณาดังนั้นในหลักการทำงานของ Genetic Algorithm จึงถูกนำเสนอข้อมูลในรูปแบบโครโมโซมนั้นหมายความว่า คำตอบที่สามารถเป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาจะถูกนำมาแปลงเป็นโครโมโซมเพื่อนำโครโมโซมไปใช้ในกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม โดยจะใช้ Fitness Function (ค่าความเหมาะสม) ที่มีความสอดคล้องกับ Objective Function (วัตถุประสงค์) กำหนดให้แต่ละโครโมโซม และโครโมโซมเหล่านั้นจะถูกนำมาพิจารณาว่าโครโมโซมใดควรนำมาสืบสายพันธุ์ต่อไปหรือโครโมโซมใดไม่ควรนำมาสืบสายพันธุ์ และจากการหาคำตอบโดยใช้โครโมโซม ในแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละรุ่นจะมีการสุ่ม (Generations) คำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา จึงทำให้ Genetic Algorithm สามารถหาคำตอบที่มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดได้สมบูรณ์และเหมาะสมที่สุด

2.1.2 องค์ประกอบของ Genetic Algorithm มีรายละเอียดดังนี้

2.1.2.1 Chromosome Encoding

Chromosome Encoding เป็นวิธีการที่ใช้ในการนำเสนอทางเลือกที่สามารถจะเป็นไปได้ของแต่ละปัญหา การเข้ารหัสโครโมโซม Chromosome Encoding โครโมโซมของแต่ละสมาชิกของประชากรจะแสดงถึงตัวแปรตัดสินใจทั้ง 9 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยขอบเขตของขนาดแรงบิดของแอกชูเอเตอร์ที่ข้อต่อทั้งสามของแขนกล และพิกัดของตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของ End-effect or ตามแกนทั้งสามคือแกน x แกน y และแกน z ซึ่งเมื่อนำเข้ามารวมกันจะกลายเป็นหนึ่งโครโมโซมจะได้แบบแผนของการเข้ารหัสโครโมโซมสามแบบที่แตกต่างกันคือ โครโมโซมที่เป็นแบบเกรย์ Gray Code แบบจำนวนเต็ม Integer Code และโครโมโซมแบบจำนวนจริง Real Code พิสัยของขนาดแรงบิดสำหรับข้อต่อทั้งสามจะถูกแบ่งออกเป็น 31 จุด ค้นหา Search Point โดยมีการค้นหา Search Step เป็น 0.50 นิวตัน/เมตร ในทำนองเดียวกันพิสัยของการค้นหา Search Range ตำแหน่งที่แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายที่แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ในปริภูมิคาร์ทีเซียนก็ถูกแบ่งโดยมีขั้นค้นหาเป็น 0.001 เมตร จึงเป็นผลให้มี 31 จุดค้นหาของแต่ละพิกัดสำหรับแต่ละแกน ดังนั้นถ้าใช้รูปแบบโครโมโซมแบบเกรย์ ซึ่งการเข้ารหัสแบบเกรย์ต้องใช้ความยาว 5 บิต เพื่อแสดงตัวแปรตัดสินใจเพียงหนึ่งตัว ความยาวทั้งหมดของโครโมโซมแบบเกรย์ในปัญหานี้จึงมีค่าเป็น 45 บิต และจะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ใช้ เลขฐานสอง จำนวน 5 บิตแทนตัวแปรตัดสินใจที่แบ่งออกเป็น 31 จุด แต่จะมีค่าที่เกินกว่าช่วงที่พิจารณาเกิดขึ้น จึงมีการส่งค่ากลับให้อยู่ในปริภูมิค้นหาที่เราสนใจโดยการเปลี่ยนค่าตัวเลขที่บิตที่สำคัญ ปัญหานี้จึงหมดไป ส่วนกรณีของการใช้โครโมโซมแบบจำนวนเต็ม จะไม่มีปัญหาแบบนี้เกิดขึ้น เนื่องจากยีนหนึ่งตัวสามารถนำมาแสดงถึงตัวแปรตัดสินใจได้โดยยีนแต่ละตัวจะมีค่าอัสลิลอยู่ในกลุ่มของจำนวนเต็ม 31 ค่าตั้งแต่ 0 ถึง 30 จึงเป็นผลให้ โครโมโซมแบบนี้มีความยาวเท่ากับจำนวนตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 9 นั่นเอง พิจารณาการใช้โครโมโซมที่มีรูปแบบเป็นเลขจำนวนจริง ลักษณะพิเศษของโครโมโซมรูปแบบนี้คือ ยีนแต่ละตัวจะมีค่าอัสลิลเป็นตัวเลขจำนวนจริงที่แสดงถึงค่าของตัวแปรตัดสินใจความยาวของโครโมโซมจะเท่ากับกรณีที่ใช้โครโมโซมแบบจำนวนเต็มคือมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรตัดสินใจเช่นกัน

การกำหนดความแข็งแรงและการแบ่งส่วนความแข็งแรง Fitness Assignment and Fitness Sharing แล้วใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้น ในการกำหนดค่าความแข็งแรงของ สมาชิกในประชากรแต่ละตัว สำหรับการแบ่งส่วนความแข็งแรงจะใช้ฟังก์ชันการแบ่งส่วนแบบสามเหลี่ยม Triangular sharing function ระเบียบวิธีการคัดเลือก Selection Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบโครโมโซมที่ได้จากปัญหา ในการถอดรหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับปัญหา และในปัจจุบันปัญหามีมากมาย จึงทำให้รูปแบบของโครโมโซมมีความแตกต่างกันออกไปตามปัญหานั้นๆ เช่น

- Binary ทุกตำแหน่งของยีนบนโครโมโซมจะมีค่าเป็นบิต 0 หรือ 1 เช่น
โครโมโซม A : 00110010001110

Chromosome A	101100101100101011100101
Chromosome B	111111100000110000011111

- Value Encoding หรือ Direct ทุกตำแหน่งของยีนบนโครโมโซมจะมีค่าบางค่าที่สามารถเชื่อมโยงไปยังปัญหาได้ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง คำสั่ง หรืออื่นๆ รูปแบบโครโมโซมแบบนี้สามารถใช้ได้กับปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อนค่าได้

Chromosome A	1.2324 5.3243 0.4556 2.3293 2.4545
Chromosome B	ABDJEIFJDHDIERJFDLDFLFEGTYTGABA
Chromosome C	(back), (back), (right), (forward), (left)

- Permutation Encoding เป็นการกระทำดับแรกก่อนที่จะเข้ากระบวนการของ Genetic Algorithm ประชากรที่เกิดจากการสุ่ม Random เพื่อนำประชากรเข้าไปในกระบวนการ ในการสุ่มจะต้องสุ่มให้ได้จำนวนเท่ากับขนาดของรุ่นที่ได้กำหนดไว้โดยที่ยังไม่มีการสนใจค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม B :
9 5 2 1 4 6 7 8 3

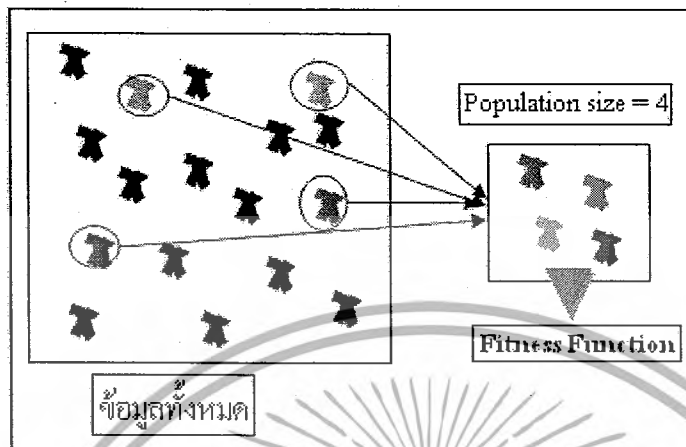
Chromosome A	1 5 3 2 6 4 7 9 8
Chromosome B	8 5 6 7 2 3 1 4 9

2.1.2.2 Initial population

Initial population คือ ลักษณะที่เป็นต้นแบบหรือต้นกำเนิดที่จะนำเข้าไปในกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม โดยการสุ่มเลือกเรื่องสร้างประชากรต้นแบบขึ้นมา เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของขั้นตอนการวิวัฒนาการ ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มเข้ากระบวนการของ เจนติกอัลกอริทึม โดยประชากรกลุ่มแรกหรือประชากรต้นกำเนิดจะเกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสุ่มเลือกขึ้นมาจากกลุ่มของประชากรทั้งหมดที่มีอยู่ โดยในการสุ่มเลือกจะทำการสุ่มตามจำนวนของประชากรที่ได้กำหนดไว้เป็น Parameter ของ Algorithm



รูปที่ 2.1 การสุ่มหาประชากรเริ่มต้นจำนวน 4 โครโมโซม

2.1.2.3. Fitness Function

Fitness Function ก็ เป็นวิธีการสำหรับประเมินค่าความเหมาะสม เพื่อให้คะแนนแต่ละทางเลือกของคำตอบต่างๆ อย่างเหมาะสม โครโมโซมทุกตัวจะมีค่าความเหมาะสมของตัวเอง เพื่อใช้สำหรับพิจารณาว่าโครโมโซมตัวนั้นเหมาะสมหรือไม่ที่จะนำมาใช้ในการสืบทอดพันธุกรรม สำหรับสร้างโครโมโซมรุ่นใหม่ โดยวิธีการสำหรับวัดค่าความเหมาะสมนั้นจะใช้สมการที่สอดคล้องกับแต่ละปัญหา เช่น กำหนดให้ค่าความเหมาะสม = จำนวนของบิต 1 ทั้งหมดในโครโมโซม A : 100011100 ดังนั้นโครโมโซม A มีค่าความเหมาะสมเท่ากับ 4

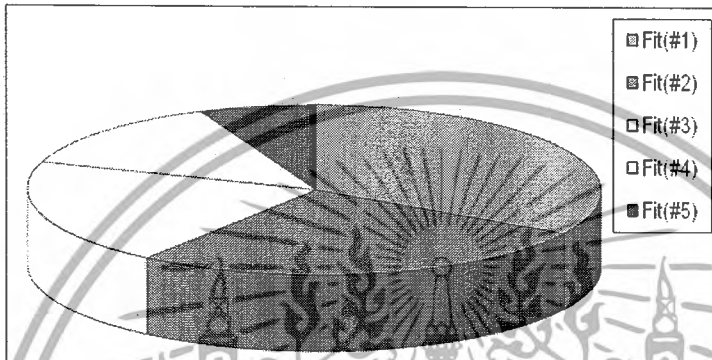
2.1.2.4. Genetic Operator

Genetic Operator ซึ่งเป็นวิธีการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของข้อมูลทุกขั้นตอน ได้แก่ Selection, Crossover และ Mutation

- Selection เพื่อให้เกิดการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตนั้น โดยคัดเลือกมาเป็นโครโมโซมพ่อและโครโมโซมแม่ หรือที่เรียกว่า Parent ในการสืบสายพันธุ์ ทำให้เกิดปัญหาว่าจะทำอย่างไรให้เกิดจากคัดเลือกโครโมโซมที่น่าพอใจ เพื่อที่จะเกิดการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตตามทฤษฎีของ Charles Darwin จึงทำให้เกิดรูปแบบมากมายในการเลือกโครโมโซมที่น่าพอใจที่สุดเพื่อนำไปสืบสายพันธุ์ทำให้เกิดรูปแบบการคัดเลือกมากมายเพื่อให้เกิดผลลัพธ์ที่น่าพอใจที่สุด เช่น การคัดเลือกแบบ Roulette Wheel การคัดเลือกแบบ Ranking การคัดเลือกแบบ Elitist และอื่นๆมากมายหลายวิธีเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการคัดเลือกโครโมโซมที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

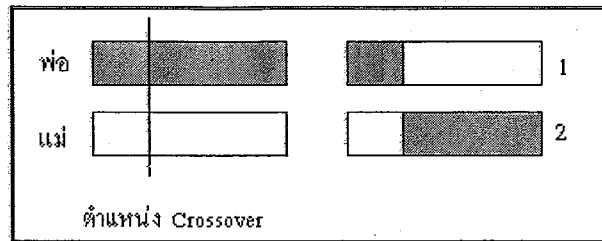
1. การคัดเลือกแบบ Roulette wheel คือ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่ามีโอกาสถูกเลือกมากกว่า อธิบายได้จากรูปต่อไปนี้ เมื่อแสดงถึงวงล้อที่โครโมโซมทั้งหมดอาศัยอยู่ ขนาดพื้นที่ของวงล้อคือสัดส่วนของค่าความเหมาะสมที่เหมาะสมของทุกโครโมโซม ค่าที่มากที่สุดคือส่วนที่ใหญ่ที่สุดตามตัวรูปที่ 2.2 เมื่อมีการหมุนวงล้อ โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากจะมีโอกาสถูกเลือกได้บ่อย



รูปที่ 2.2 สัดส่วนของค่าความเหมาะสม

2. การคัดเลือกแบบ Ranking คือ เลือกประชากรที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุด โดยที่ไม่สนใจประชากรตัวอื่นเลย
3. การคัดเลือกแบบ Elitist เป็นแนวคิดที่ป้องกันการหาของเส้นทางที่ดีที่สุด หมายความว่ามีการคัดลอกโครโมโซมที่ดีที่สุดไว้ก่อน ส่วนประชากรส่วนที่เหลือจะที่จะต้องคัดเลือกจะใช้วิธีการเลือกแบบอื่น

- Crossover เป็นกระบวนการที่สำคัญ Genetic Algorithm เมื่อเกิดการ Crossover ขึ้นในทางพันธุศาสตร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลาย ซึ่งการ Crossover จะต้องอาศัยวิวัฒนาการเป็นเวลานาน จึงสามารถเลือกเอาคำตอบที่เหมาะสมกับความต้องการได้มากที่สุดและ ขั้นตอนในการ Crossover คือ นำ 2 โครโมโซม Parent มาผสมกันเพื่อให้ได้โครโมโซมใหม่ขึ้นมา จากนั้นใช้วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ สุ่มตำแหน่ง Crossover และทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่ง Crossover ของพ่อและคัดลอกทุกอย่างหลังตำแหน่ง Crossover ของแม่รวมกันจะได้ลูกตัวที่ 1 ออกมา จากนั้นทำการคัดลอกทุกอย่างที่อยู่หน้าตำแหน่ง Crossover ของแม่ และคัดลอกหลังตำแหน่ง Crossover ของพ่อรวมกันจะได้ลูกตัวที่ 2 ออกมาดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การ Crossover

เราสามารถเลือกตำแหน่งอื่นๆ ในการ Crossover ได้ขึ้นอยู่กับ การเข้ารหัส Chromosome

ลักษณะของการ Crossover จะสร้างตามลักษณะของปัญหาซึ่งสามารถปรับปรุงได้ตามประสิทธิภาพของ Genetic Algorithm

การ Crossover มี 2 แบบด้วยกัน คือ แบบขวาง (horizontal) และแบบตั้งฉาก (vertical) ดังรูปที่ 2.4 ในการ Crossover แบบขวางจะต้องมีการดำเนินการกับข้อมูลที่เป็น array 2 มิติเท่านั้น แต่ในกรณีการ Crossover แบบตั้งฉากจะสามารถทำได้กับข้อมูลทุกรูปแบบทั้งแบบมิติเดียวหรือ 2 มิติ



รูปที่ 2.4 การ Crossover แบบขวางและแบบตั้งฉาก

เทคนิคของการ Crossover ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับการใช้รูปแบบโครโมโซมแบบต่างๆ ตัวอย่างการ Crossover กับรูปแบบโครโมโซมแบบต่างๆ เช่น การ Crossover กับ Binary Encoding ที่มีลักษณะการ Crossover หลายลักษณะดังตารางที่ 1

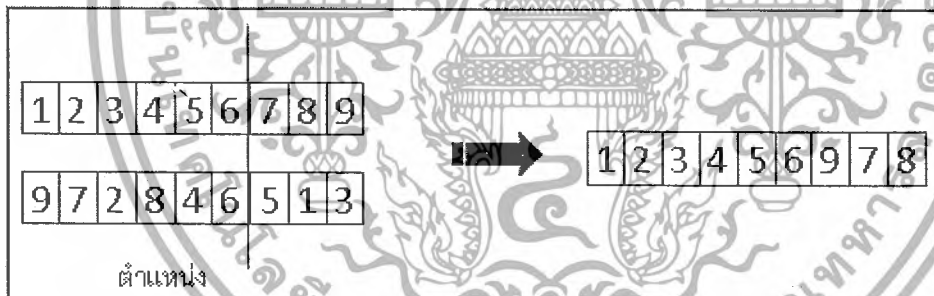
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ลักษณะการ Crossover กับ Binary Encoding

ลักษณะการ Crossover	พ่อ	แม่	ลูกที่ 1	ลูกที่ 2
Single Point	11 0110010	00 1011111	111011111	000110010
Two Point	11 011001 0	00 101111 1	111011110	000110011
Arithmetic	110110010	001011111	000010010 AND	111111111 OR

- | คือ ตำแหน่ง Crossover
- Single point คือ สุ่มตำแหน่ง Crossover เพียง 1 ตำแหน่ง
- Two point คือ สุ่มตำแหน่ง Crossover เพียง 2 ตำแหน่ง
- Arithmetic คือ การใช้ Operator AND และ OR

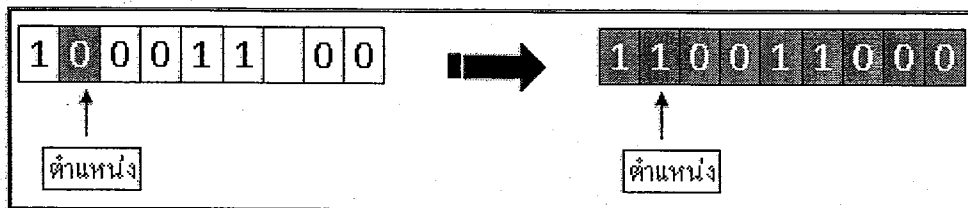
การ Crossover กับ Permutation Encoding คือ จะคัดลอกข้อมูลจากตำแหน่งแรก ถึงตำแหน่ง Crossover ของ parent ตัวแรก และอ่านข้อมูลจาก parent ตัวที่สองถ้าข้อมูลบางตัวที่ไม่เหมือนกับ parent ตัวแรกก็จะเพิ่มเข้าไป



รูปที่ 2.5 การ Crossover กับข้อมูลที่เป็นรูปแบบ Permutation Encoding

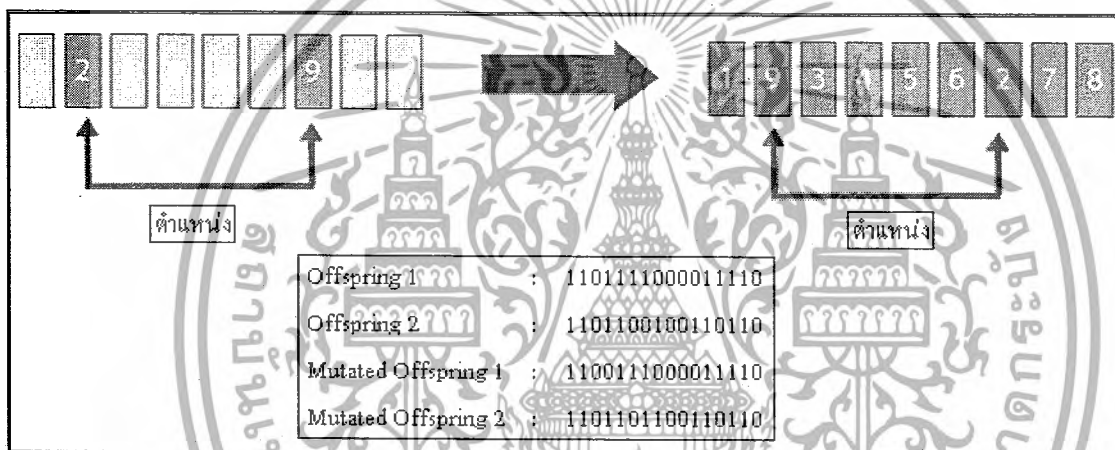
- Mutation เกิดขึ้นหลังจากการ Crossover เสร็จสิ้นจะทำการสุ่มประชากร เปลี่ยนแปลงผลที่ได้จากการ Crossover หมายความว่า รุ่นลูกที่เกิดจากผสม จากรุ่นพ่อแม่แล้วจึงนำรุ่นลูกมาดำเนินการ Mutation ต่อไป ซึ่งการ Mutation ทางพันธุศาสตร์จะทำให้ได้ลักษณะใหม่ๆ เกิดขึ้น ขั้นตอนในการ Mutation เมื่อได้ตำแหน่ง Mutation แล้วเปลี่ยน แปลงค่า ณ ตำแหน่งที่สุ่มนั้น ในตัวอย่างต่อไปนี้จะดำเนินการ Mutation กับรูปแบบโครโมโซมแบบ Binary เราจะสุ่มเลือก bit เพียงเล็กน้อย จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าจาก 1 เป็น 0 หรือจาก 0 เป็น 1 ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การ Mutation

สำหรับการ Mutation สามารถเกิดได้มากกว่า 2 ตำแหน่งขึ้นอยู่กับความถี่ที่อยู่ภายใต้ความน่าจะเป็นของการ Mutation เทคนิคของการ Mutation ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับการใช้รูปแบบโครโมโซมแบบต่างๆ ในที่นี้จะยกตัวอย่างของการ Mutation กับโครโมโซมรูปแบบ Permutation Encoding ที่ใช้กับปัญหาของ Travelling Salesman



รูปที่ 2.7 การ Mutation กับโครโมโซมรูปแบบ Permutation Encoding

2.1.2.5 Parameter

Parameter เป็นวิธีการที่ใช้ในการสร้างจำนวนโครโมโซมรุ่นถัดไป ถ้ากำหนดให้จำนวนโครโมโซมในแต่ละรุ่นมากจะทำให้ Genetic Algorithm ประมวลผลได้ช้าลง เช่น ขนาดของประชากร Population size ความน่าจะเป็นของ Crossover หรือ Probability Crossover ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ที่ 60% - 95% ความน่าจะเป็นของ Mutation หรือ Probability Mutation ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ที่ 0%-1% และจำนวนโครโมโซมที่ใช้ในการสร้างรุ่นถัดไป ถ้ากำหนดให้จำนวนโครโมโซมในแต่ละรุ่นมากจะทำให้ Genetic Algorithm ประมวลผลได้ช้าลง

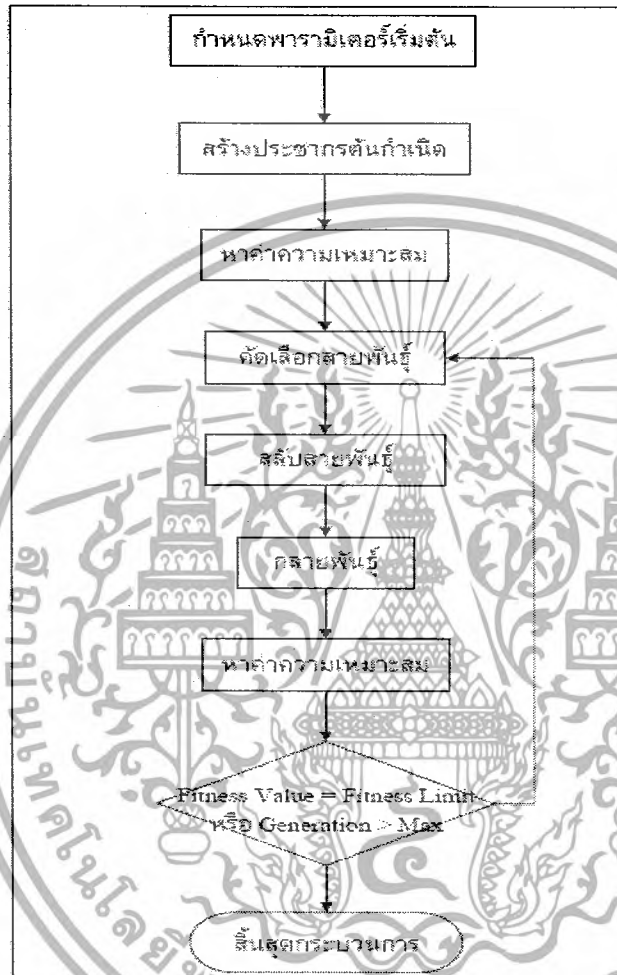
2.1.3 ขั้นตอนการทำงาน Genetic Algorithm

ขั้นตอนการทำงานค้นหาคำตอบของ Genetic Algorithm อย่างง่าย มีดังนี้

- เริ่มทำการค้นหา ปัญหาที่เกิดขึ้น
- ถ้ายังไม่พบคำตอบ แต่ครบจำนวนรอบที่ได้กำหนดไว้ ก็จะหยุดทำการค้นหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการค้นหาจนพบเป้าหมายหรือคำตอบที่ต้องการ ก็จะหยุดทำการค้นหา
- พบว่าคำตอบที่ได้ เริ่มเข้าสู่คำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด เช่น คำตอบที่ได้จากประชากรแต่ละรุ่น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือคงที่เป็นจำนวนที่ติดต่อกัน ถึงร้อยละ 95



รูปที่ 2.8 การขั้นตอนการทำงานของ Genetic Algorithm

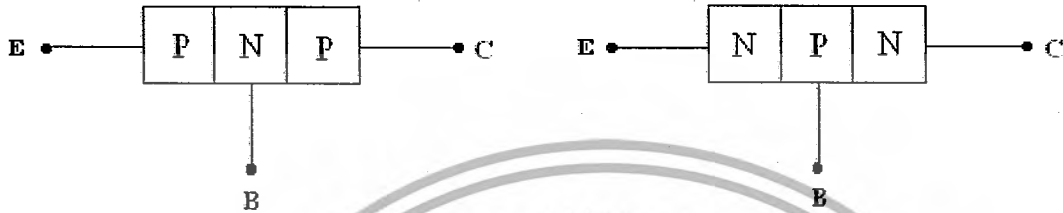
2.2 ทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์สร้างมาจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำชนิด P และชนิด N มารวมกัน โดยทำให้เกิดรอยต่อระหว่างเนื้อสารนี้สองรอยต่อ โดยสามารถจัดทรานซิสเตอร์ได้ 2 ชนิด คือ

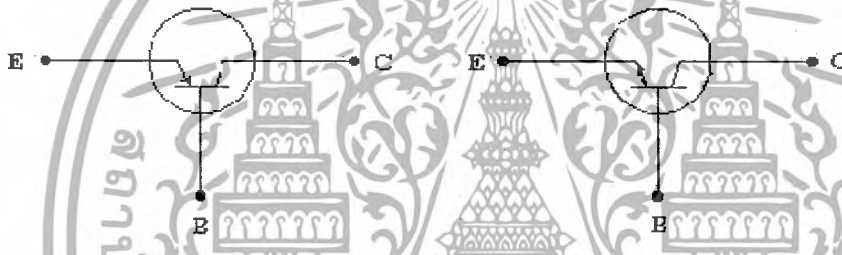
1. ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด n จำนวน 2 ชั้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด p จำนวน 1 ชั้น
2. ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด p จำนวน 2 ชั้นต่อเชื่อมกับสารกึ่งตัวนำชนิด n จำนวน 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อจากเนื้อสารทั้ง 3 นี้ มีจุดต่อเป็นขาทรานซิสเตอร์ เพื่อใช้เชื่อมต่อหรือบัดกรีกับอุปกรณ์อื่น ดังนั้นทรานซิสเตอร์จึงมี 3 ขา มีชื่อเรียกว่า คอลเลคเตอร์ (สัญลักษณ์ C) อิมิตเตอร์ (สัญลักษณ์ E) และ เบส (สัญลักษณ์ B) รูปร่างโครงสร้าง (รูปที่ 2.9) และสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ (รูปที่ 2.10)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทรานซิสเตอร์ PNP โครงสร้างทรานซิสเตอร์ NPN



รูปที่ 2.10 สัญลักษณ์ทรานซิสเตอร์ PNP ทรานซิสเตอร์ NPN

2.2.1 การจำแนกทรานซิสเตอร์

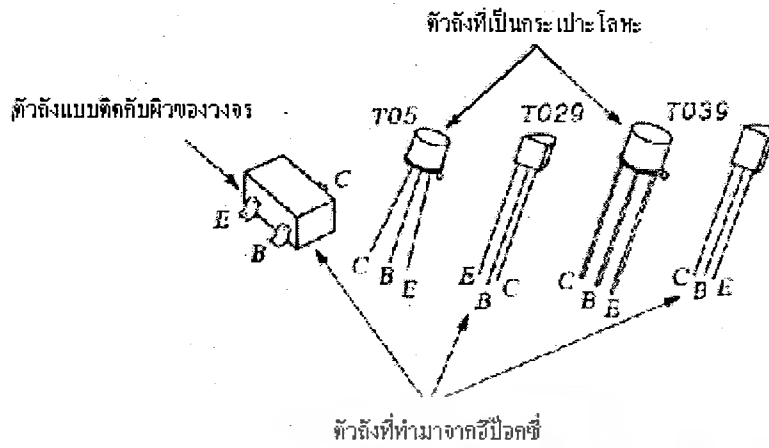
ทรานซิสเตอร์ถูกผลิตให้มีค่าแรงดัน ค่ากระแส และอัตราทนกำลังหลายค่า โดยผลิตให้มีขนาดและรูปร่างแบบแตกต่างกัน ตัวถังของทรานซิสเตอร์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ดังนี้

- อัตราทนแรงดันตั้งแต่ร้อยละ ๑ ไปจนถึงหลายร้อยโวลต์
- อัตราทนกระแสตั้งแต่มีลลิแอมป์ไปจนถึง 50 แอมแปร์หรือมากกว่า
- อัตราทนกำลังตั้งแต่มีลลิวัตต์ถึงหลายร้อยวัตต์

2.2.1.1 ทรานซิสเตอร์แบบ Low Power

จะบรรจุอยู่ในตัวถังที่เป็นโลหะพลาสติกหรืออีพ็อกซี รูปลักษณะของทรานซิสเตอร์ประเภท Low Power ทั้ง 4 ชนิด โดยจะมีลวดตัวนำยื่นออกมาจากส่วนล่างของตัวถัง เหตุผลที่ถูกออกแบบในลักษณะนี้เนื่องจาก เมื่อใช้ทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ในวงจรจะต้องเสียบขาทรานซิสเตอร์ในช่องเสียบบนแผ่นวงจรก่อนที่จะทำการบัดกรี

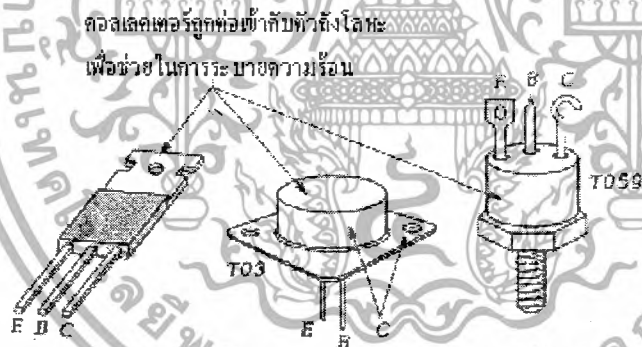
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ทรานซิสเตอร์แบบ Low Power

2.2.1.2 ทรานซิสเตอร์แบบ High Power

ทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ถูกออกแบบเพื่อให้สามารถติดตั้งโครงสร้างที่เป็นโลหะ ทั้งนี้เพื่อให้โลหะที่ทรานซิสเตอร์ติดตั้งอยู่ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับทรานซิสเตอร์ประเภทนี้ สำหรับลวดตัวนำที่ต่อยื่นออกมาจะเป็นขาต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ ถ้าในกรณีที่มี 2 ขา โดยขาที่ยื่นออกมาจะหมายถึง ขาเบส และขาอิมิตเตอร์ ส่วนตัวถังจะทำหน้าที่เป็นขาคอลเลกเตอร์



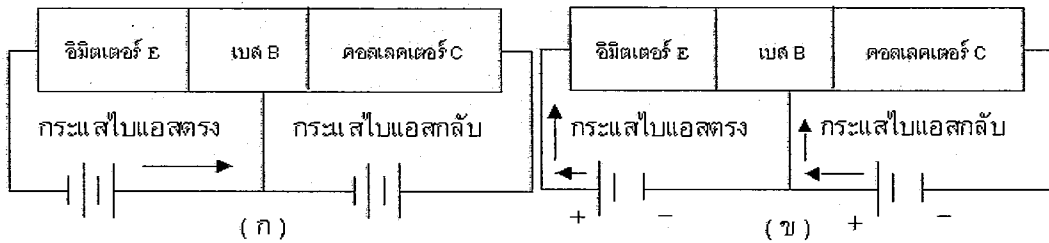
รูปที่ 2.12 ทรานซิสเตอร์แบบ High Power

2.2.2 การจัดไบแอสให้ทรานซิสเตอร์

ทำไมจึงต้องมีทั้ง ไบแอสตรงและไบแอสกลับ เหตุผลคือ ทำให้ขาเบสและอิมิตเตอร์เป็นขั้วเข้า ในเมื่อต้องการให้กระแสในวงจรอินพุท มีลักษณะการเพิ่มและลดตามสัญญาณเข้า ขั้วเข้าจะต้องได้รับการไบแอสตรง สำหรับขั้วออกจะใช้ขาคอลเลกเตอร์และขาเบส ในกรณีวงจรเอาต์พุทหรือวงจรออกเราต้องการให้กระแสเอาต์พุทถูกควบคุมด้วยกระแสอินพุท จึงต้องพยายามไม่ให้กระแสเอาต์พุทขึ้นกับแรงดันของวงจรเอาต์พุทนั่นคือ จัดการไบแอสให้เป็นไบแอสกลับ ทั้งนี้เพราะกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากเบตเตอร์ในการไบแอสแบบนี้เป็นกระแสรั่วไหล ซึ่งมีค่าน้อยมาก

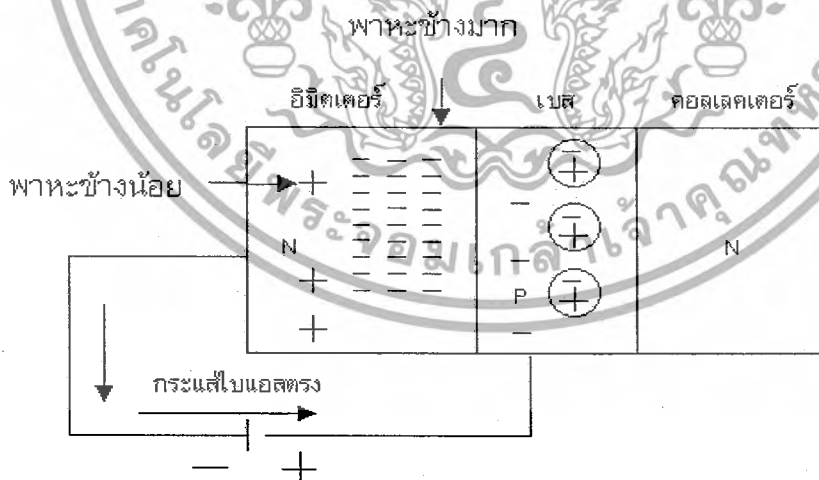
ไม่ค่อยมีผลอะไรกับกระแสเอาต์พุทที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การไบแอสให้กับทรานซิสเตอร์

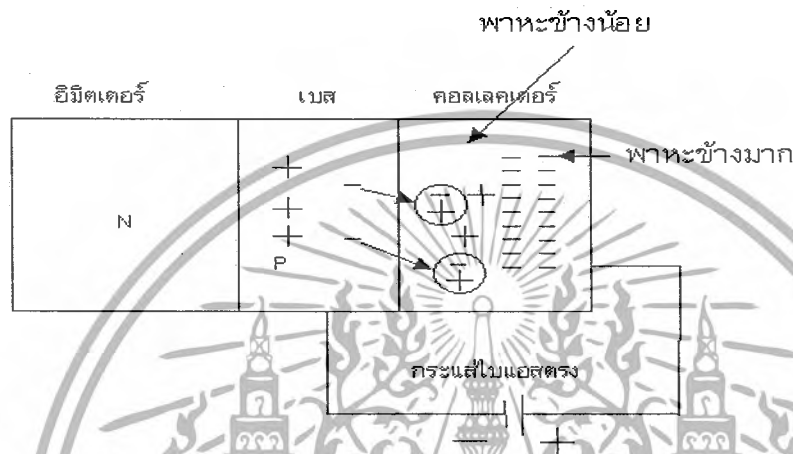
การทำงานของทรานซิสเตอร์ NPN โดยสมมติว่าถ้าทรานซิสเตอร์ต่อเฉพาะวงจรอินพุตแต่เพียงอย่างเดียว เราจะเห็นว่าลักษณะเช่นนี้จะเป็นตัวไดโอดที่ต่อในลักษณะไบแอสตรง กระแสที่ไหลข้ามรอยต่อจึงเป็นกระแสของพาหะข้างมาก โดยการเกิดการรวมตัว (Recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนที่ตรงบริเวณรอยต่อ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว แต่อย่างไรก็ดีทรานซิสเตอร์ยังมีส่วนแตกต่างจากไดโอดในเรื่องของการผสมสารเจือปนหรือโด๊ป (Dope) ที่ทำให้พาหะข้างมากในแต่ละส่วนมีค่าแตกต่างกันและปริมาณเนื้อสารทั้งด้าน P และ N ก็มีค่าต่างกันด้วย กล่าวคือ ส่วนของเบสของทรานซิสเตอร์จะมีขนาดเล็ก ๆ และมีจำนวนพาหะข้างมากจากการโด๊ปน้อยกว่าทางด้านอีมิเตอร์ ดังนั้นจึงมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระจากทางด้าน N ไหลเข้ามาทางด้าน P มากกว่า การเคลื่อนที่ของโฮลก็วิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น จึงมีอิเล็กตรอนอิสระเหลือจากการรวมตัวเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระในส่วนที่เหลืออยู่เนื้อสารทางด้านเบสดังนั้นกระแสที่ไหลครบวงจรจึงมีได้ไม่มากนักขึ้นอยู่กับจำนวนโฮลทางด้าน P ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การทำงานด้านอินพุตของทรานซิสเตอร์

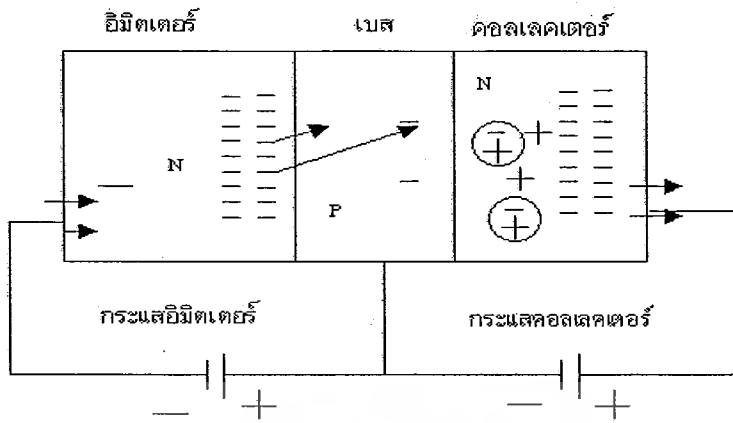
เมื่อต่อวงจรเฉพาะทางด้านเอาต์พุตแต่เพียงอย่างเดียว โดยการต่อไบแอสกลับระหว่างขั้วเบสกับคอลเลคเตอร์ จึงเหมือนกับการไบแอสกลับไดโอดธรรมดา กระแสที่เกิดขึ้นจึงเป็นกระแสรั่วไหลที่เกิดจากพาหะข้างน้อยที่มารวมตัวกันที่รอยต่อในทรานซิสเตอร์ NPN จะมีพาหะข้างน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านคอลเลคเตอร์ในรูปแบบของโพล ส่วนในทรานซิสเตอร์ PNP จะมีพาหะข้างน้อยทางด้านคอลเลคเตอร์ในรูปแบบของอิเล็กตรอนอิสระ ส่วนของคอลเลคเตอร์จะต้องได้รับการโด้ป ให้จำนวนพาหะข้างน้อยมีค่ามากพอที่จะก่อให้เกิดกระแสไบแอสกลับได้ ส่วนในการไบแอสกลับที่รอยต่อระหว่างอิมิตเตอร์และเบสจะต้องให้มีการไหลของกระแสกลับได้น้อย ดังนั้นในขณะที่ยังไม่ได้ต่อวงจรทางด้านอินพุทกระแสไบแอสกลับทางด้านเอาต์พุทควรมีค่าน้อย ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การทำงานด้านเอาต์พุทของทรานซิสเตอร์

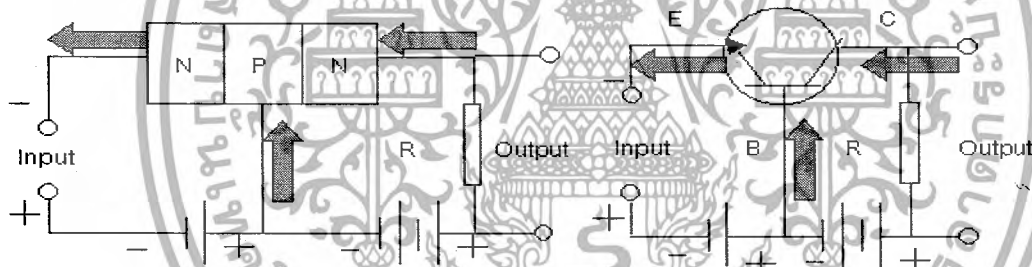
เมื่อทำการต่อไบแอสทั้งสองแบบพร้อม ๆ กัน กระแสอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์มีค่าสูงและเกือบเท่ากัน ส่วนกระแสเบสมีค่าน้อยมาก เนื่องจากความกว้างของสารที่ใช้เป็นเบสมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ ประการที่สอง การเติมสารเจือปนลงในอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์มีค่าไม่เท่ากัน อิมิตเตอร์จะถูกเติมสิ่งเจือปนที่เป็นพาหะข้างมากเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะผลทำให้พาหะข้างมากไหลเข้าไปเบสได้มาก อิเล็กตรอนอิสระทางด้านอิมิตเตอร์จะเข้ามาด้านเบสแต่พาหะข้างมากของเบสมีจำนวนไม่มากนัก ดังนั้นการรวมตัว จึงเป็นไปได้น้อย ขณะเดียวกันทางคอลเลคเตอร์ถูกทำให้มีพาหะข้างน้อยเป็นจำนวนมาก ทำให้มีกระแสรั่วไหลที่มาจากเบสเป็นไปได้มาก เพราะที่เบสจะมีอิเล็กตรอนเหลือจากการข้ามอิมิตเตอร์จึงเกิดการรวมกับพาหะข้างน้อยทางด้านคอลเลคเตอร์ได้ จึงเกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์ไปยังคอลเลคเตอร์ได้ โดยปกติแรงดันไบแอสตรงรอยต่ออิมิตเตอร์และเบสจะมีค่าน้อยมีค่าอยู่ราว ๆ 0.2 โวลต์ ถึง 0.7 โวลต์ ส่วนแรงดันไบแอสกลับทางด้านเบสและคอลเลคเตอร์จะมีค่าสูง อาจจะสูงถึง 10 โวลต์ หรือมากกว่านั้น เมื่อแรงดันไบแอสกลับมีค่าสูงมากกระแสรั่วไหลก็จะมีค่าสูงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยด้วย



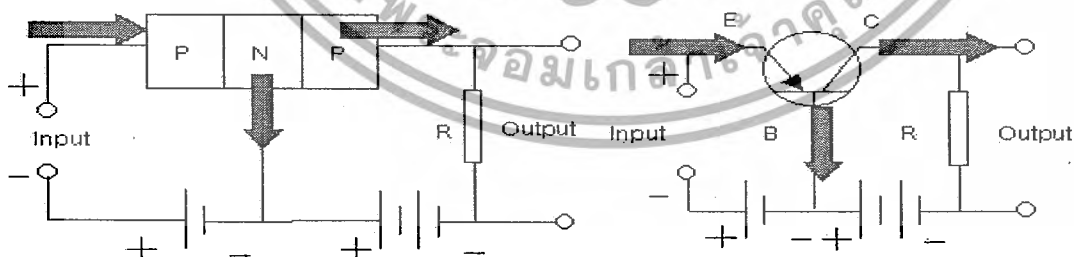
รูปที่ 2.16 การต่อทรานซิสเตอร์เพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน

2.2.3 ทิศทางการไหลของกระแส

ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ก็จะมีการทำงานเหมือนกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ผิดกันตรงที่ขั้วเบสเดออร์และทิศทางการไหลของกระแสจะเป็นตรงกันข้ามเท่านั้นเอง



รูปที่ 2.17 ทิศทางการไหลและปริมาณกระแสต่างๆของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN



รูปที่ 2.18 ทิศทางการไหลและปริมาณกระแสต่างๆของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 2.17 และรูปที่ 2.18 จะเห็นลักษณะเปรียบเทียบกันระหว่างสัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ NPN ได้เป็นอย่างดี สรุปได้ว่าในทรานซิสเตอร์ชนิด PNP กระแสอีมิเตอร์จะพุ่งเข้าหาตัวทรานซิสเตอร์ ตามทิศทางลูกศรของสัญลักษณ์ที่ขา E แล้วแบ่งออกไปเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ส่วน ส่วนใหญ่จะพุ่งออกไปทางขา C ส่วนน้อยจะพุ่งออกทางขา B สำหรับในทรานซิสเตอร์ชนิด NPN กระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์ที่พุ่งเข้าหาตัวทรานซิสเตอร์จะมารวมกันที่อิมิตเตอร์ กลายเป็นกระแสอิมิตเตอร์แล้วพุ่งออกนอกตัวทรานซิสเตอร์ไปตามทิศทางลูกศรของสัญลักษณ์

แต่ไม่ว่าทิศทางการไหลของกระแสจะเป็นอย่างไรก็ตาม กระแสอิมิตเตอร์จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสเบสและกระแสคอลเลกเตอร์เสมอ เขียนความหมายนี้ให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$I_E = I_B + I_C \quad (2.1)$$

I_E = กระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์

I_B = กระแสที่ไหลผ่านขาเบส

I_C = กระแสที่ไหลผ่านขาคอลเลกเตอร์

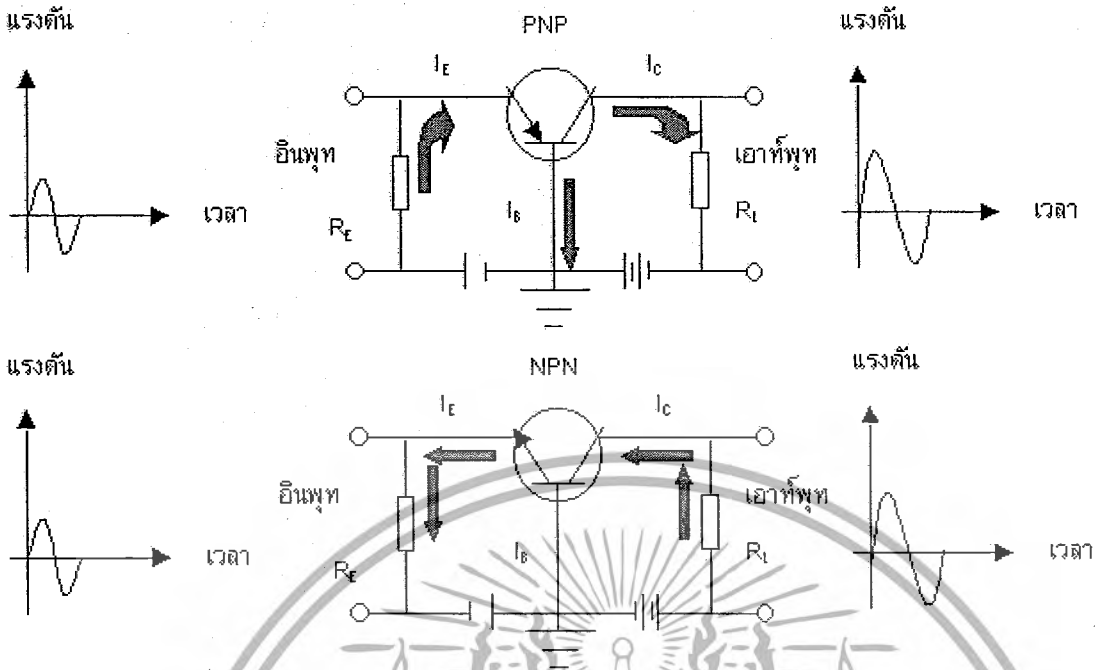
2.2.4 ลักษณะการจัดวงจรทรานซิสเตอร์

การจัดวงจรของทรานซิสเตอร์ที่มีขั้วอินพุตและเอาต์พุต มีหลักการจัดวงจร โดยอ้างอิงจากขาของทรานซิสเตอร์ และเพื่อให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ในภาวะแอคทีฟ (Active) จะต้องป้อนแรงดันระหว่างขาต่าง ๆ ให้ถูกต้อง โดยทฤษฎี แรงดันที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานได้ จะมีค่าประมาณ 0.2 โวลต์ สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดเยอรมันเนียม และประมาณ 0.6 โวลต์ สำหรับทรานซิสเตอร์ชนิดซิลิคอน โดยหลักการสามารถจัดวงจรพื้นฐานได้ 3 แบบ คือ

- วงจรเบสร่วม
- วงจรอิมิตเตอร์ร่วม
- วงจรคอลเลกเตอร์ร่วม

2.2.4.1 วงจรเบสร่วม (Common Base)

ในวงจรขยายเบสร่วม สัญญาณอินพุตจะถูกป้อนเข้ามาทางด้านอิมิตเตอร์ และสัญญาณเอาต์พุตจะปรากฏคร่อมตัวต้านทาน R_L ที่คอลเลกเตอร์ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตจะทำให้กระแสอิมิตเตอร์ (I_E) เกิดการเปลี่ยนแปลงไปกับสัญญาณ และเป็นผลทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย สัญญาณเอาต์พุตที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_L มีค่ามาก แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสอิมิตเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับกระแสคอลเลกเตอร์ เพื่อที่จะให้ขยายสัญญาณที่เอาต์พุต ตัวต้านทาน R_L จะต้องมีค่ามากกว่าตัวต้านทานอินพุต



รูปที่ 2.19 วงจรขยายแบบเบสร่วม

อัตราขยายกระแสของวงจรเบสร่วม (α)

ตามที่เราทราบแล้วว่าอัตราขยายกระแสคือค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสเอาต์พุตกับกระแสอินพุต สำหรับวงจรเบสร่วมอัตราขยายกระแสหมายถึงค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และกระแสอิมิตเตอร์ เรียกชื่อเป็นภาษากรีกว่า แอลฟา (α) โดยกำหนดเป็นสมการได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \tag{2.2}$$

α = อัตราขยายกระแสของวงจรเบสร่วม

I_E = กระแสที่ไหลผ่านขาอิมิตเตอร์

I_C = กระแสที่ไหลผ่านขาคอลเลคเตอร์

สำหรับวงจรเบสร่วม อัตราขยายกระแสของวงจรมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ทั้งนี้เพราะกระแสอิมิตเตอร์จะมีค่ามากกว่ากระแสคอลเลคเตอร์เสมอ

อัตราขยายกำลังงานและอัตราขยายแรงดันของวงจรเบสร่วม (α) ถึงแม้ว่าวงจรเบสร่วมจะไม่ให้ผลในเรื่องอัตราขยายกระแสอย่างแท้จริงทั้งนี้เพราะค่าแอลฟาของตัวทรานซิสเตอร์มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง แต่เนื่องจากการไบแอสแรงดันทางด้านอิมิตเตอร์กับเบสทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

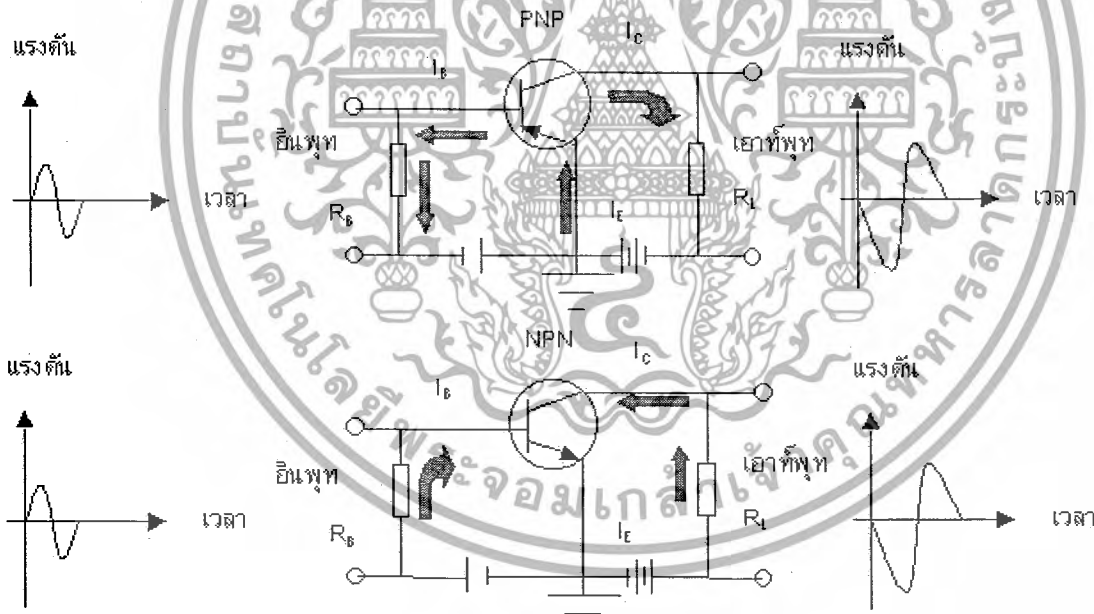
ความต้านทานอินพุทมีค่าต่ำมาก และที่คอลเลคเตอร์ถูกไบแอสกลับทำให้ความต้านทานเอาต์พุทมีค่าสูงมาก

ในการใช้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณสามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุทกับแรงดันอินพุท ในเทอมของอัตราขยายแรงดันซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{อัตราขยายทางแรงดันของวงจรเบสร่วม} = \frac{\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุท}}{\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาต์พุท}} \quad (2.3)$$

2.2.4.2 วงจรอิมิตเตอร์ร่วม (Common Emitter Circuit)

ในวงจรอิมิตเตอร์ร่วมขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะต่อร่วมอยู่ระหว่างอินพุทและเอาต์พุทเปรียบเทียบกับหลอดแล้ว ขาอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ก็เหมือนกับคาโอด ดังนั้นวงจรอิมิตเตอร์ร่วมจึงให้คุณสมบัติในการขยายสัญญาณ วงจรที่แสดงทั้งสองภาพนี้เป็นวงจรพื้นฐานของวงจรอิมิตเตอร์ร่วม



รูปที่ 2.20 วงจรขยายแบบอิมิตเตอร์ร่วม

สัญญาณอินพุทจะถูกป้อนเข้าทางด้านเบสและสัญญาณทางด้านเอาต์พุทจะตกคร่อมตัวต้านทาน R_L ที่ขั้วคอลเลคเตอร์ เมื่อกระแส (I_B) สูงขึ้นจะเป็นผลทำให้กระแสอิมิตเตอร์สูงขึ้นตามด้วย นั่นคือ กระแสคอลเลคเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้น และในกรณีที่กระแสลดลงกระแสคอลเลคเตอร์ก็จะลดลงด้วย หรือกล่าวได้ว่ากระแสคอลเลคเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับกระแสเบส แรงดันที่เกิดขึ้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาท์พุทจะมีช่วงการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุทเป็นผลทำให้เกิดอัตราขยายสัญญาณได้ จากวงจรรูปที่ 2.20 ที่เป็นทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ในขณะที่กระแสเบสไหลออกจากขั้วเบสผ่านตัวต้านทาน R_L แต่กระแสคอลเลคเตอร์จะไหลผ่านจากขั้วคอลเลคเตอร์มายังตัวต้านทาน R_L เมื่อสัญญาณอินพุททางหนึ่งบวกผ่านเข้ามาจะทำให้แรงดันของการไบแอสตรงระหว่างขั้วเบสและขั้วอิมิตเตอร์ลดลง หรือส่วนของกระแสที่ไหลเข้าจะมีค่าลดลง เป็นผลทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ลดลง ดังนั้นค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โหลดจึงมีค่าลดลง และในทำนองเดียวกันเมื่อสัญญาณอินพุทลดลงมาทางครึ่งลบจะทำให้กระแสเบสมีค่าสูงขึ้นเป็นผลทำให้กระแสคอลเลคเตอร์และแรงดันตกคร่อมโหลดมีค่าสูงขึ้น นั่นคือ สัญญาณเอาท์พุทที่เกิดขึ้นจะมีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณอินพุท

อัตราขยายกระแสของวงจร (β)

อัตราขยายกระแสของวงจรคือ อัตราส่วนของกระแสเอาท์พุทต่อกระแสอินพุท กระแสเอาท์พุทของวงจรอิมิตเตอร์ร่วมคือกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) ส่วนกระแส อินพุทของวงจรอิมิตเตอร์ร่วมคือกระแสเบส (I_B) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเบสและกระแสคอลเลคเตอร์เรียกเป็นภาษากรีกว่า เบต้า (β) เขียนเป็นสมการ

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.4)$$

β = อัตราขยายกระแสของวงจรเบสร่วม

I_B = กระแสที่ไหลผ่านขาเบส

I_C = กระแสที่ไหลผ่านขาคอลเลคเตอร์

อัตราขยายแรงดันและกำลังงาน

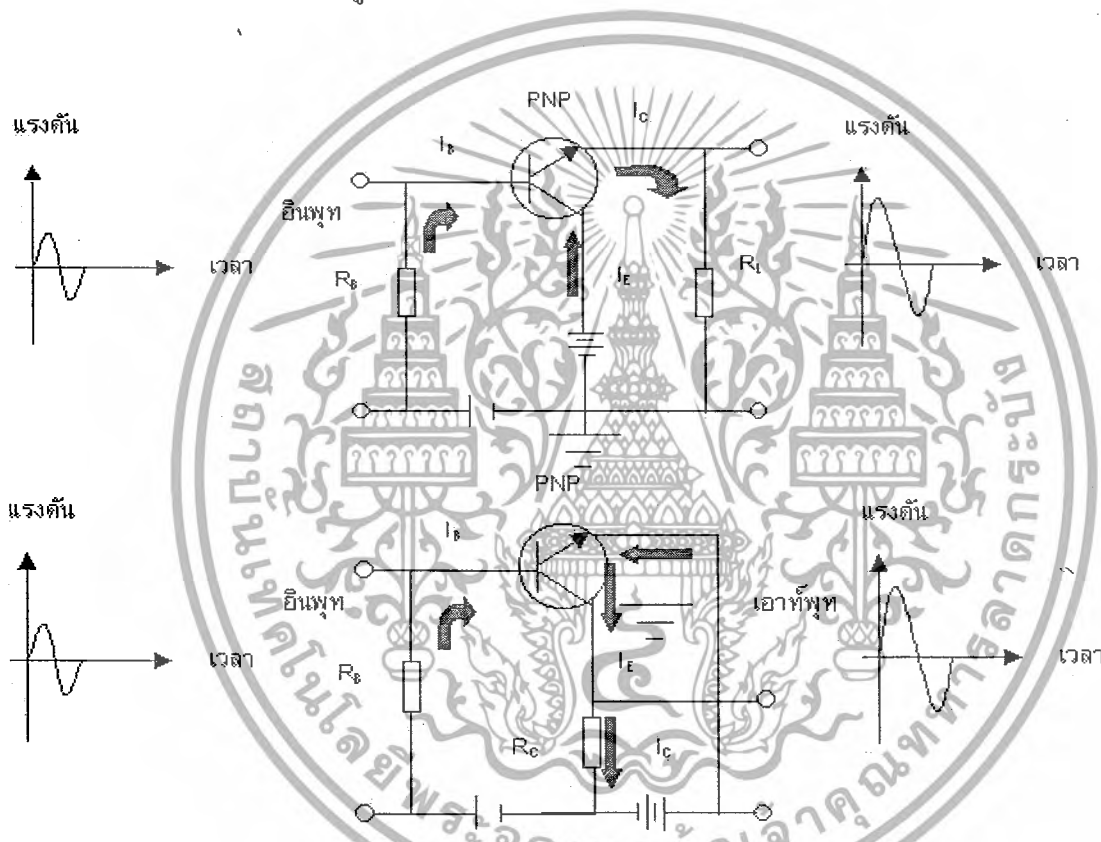
ในวงจรอิมิตเตอร์ร่วม ความต้านทานที่เกิดจากการไบแอสกลับทางด้านเอาท์พุทระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์และอิมิตเตอร์มีค่าประมาณ $30 \text{ K}\Omega$ ถึง $300 \text{ K}\Omega$ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำกว่าความต้านทานระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบส ($300 \text{ K}\Omega$ ถึง $5 \text{ M}\Omega$) ของวงจรเบสร่วม ทั้งนี้เพราะการไบแอสกลับในวงจรเบสร่วมจะเป็นการไบแอสกลับโดยตรงระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์กับเบส เหมือนกับการไบแอสกลับตัวไดโอดซึ่งต่างกับการไบแอสกลับระหว่างคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์ เพราะมีชั้นของโลหะกึ่งตัวนำถึงสามชั้นต่อเชื่อมติดกัน ส่วนทางด้านอินพุทจะเป็นการไบแอสตรงระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ จะมีค่าความต้านทานทางด้านอินพุทราว ๆ 300Ω ถึง $2,000 \Omega$ ซึ่งต่างจากวงจรเบสร่วมซึ่งจะมีค่าความต้านทานเพียง 30Ω ถึง 150Ω เท่านั้น โดยที่ความต้านทานทางด้านอินพุทระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์มีค่าต่ำ และทางเอาท์พุทคอลเลคเตอร์กับอิมิตเตอร์มีค่าสูง และทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เบสมีค่าเพียงเล็กน้อย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสทางด้านเอาต์พุต (I_C) ได้มากมาย ดังนั้นวงจรอิมิตเตอร์ร่วมจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการขยายสัญญาณและกำลังงานซึ่งให้อัตราขยายได้สูงมาก

2.2.4.3 วงจรคอลเลคเตอร์ร่วม (Common Collector Circuit)

ในวงจรขยายแบบขั้วคอลเลคเตอร์ร่วมนั้นหมายความว่าต่อขั้วคอลเลคเตอร์ร่วมระหว่างอินพุตและเอาต์พุต โดยปกติแล้วขั้วคอลเลคเตอร์จะไม่ต่อลงกราวด์โดยตรง แต่จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร ดังนั้นวงจรคอลเลคเตอร์ร่วมก็คือวงจรอิมิตเตอร์ร่วมที่ใช้แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานอิมิตเตอร์นั่นเอง ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 วงจรขยายแบบคอลเลคเตอร์ร่วม

วงจรขยายแบบนี้โดยทั่วไปเรียกว่า วงจรขยายอิมิตเตอร์ฟอลโลวเออร์ (Emitter Follower) โดยให้สัญญาณอินพุตป้อนเข้าทางเบส และสัญญาณเอาต์พุตจะตกคร่อมตัวต้านทาน R_L ที่ขั้วอิมิตเตอร์เช่นเดียวกับวงจรทั่ว ๆ ไป แรงดันของสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าจะมีผลในทางช่วยเสริมหรือหักล้างแรงดันไฟตรงที่ทำให้การไบแอสตัวทรานซิสเตอร์อยู่ เมื่อสัญญาณอินพุตทางครึ่งบวกป้อนเข้ามายังวงจรจะช่วยเสริมกระแสเบสจากการไบแอสให้มีความสูงขึ้นเป็นผลทำให้เกิดกระแสอิมิตเตอร์สูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ตกคร่อมตัวอิมิตเตอร์ก็จะมีค่าสูงขึ้น และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

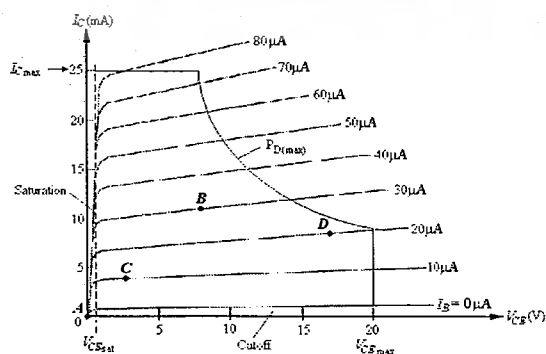
ในการทำงานเดียวกันสัญญาณทางครึ่งลบป้อนเข้ามาจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ของกระแสจากกรไบแอสลง ทำให้กระแสอิมิตเตอร์ลดลงด้วย สัญญาณเอาต์พุตจึงมีค่าลดลง

วงจรถอดเลกเตอร์ร่วมมีข้อแตกต่างจากวงจรมิตเตอร์และเบสร่วมคือมีความต้านทานทางอินพุตสูงและทางเอาต์พุตต่ำ ดังนั้นอัตราขยายทางแรงดันจึงมีค่าต่ำโดยทั่วไปน้อยกว่าหนึ่ง ส่วนอัตราขยายกระแสของวงจรเช่นนี้ จะมีค่าสูงที่สุดเพราะเป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสอิมิตเตอร์กับ

2.2.5 เส้นโหลดไฟกระแสตรงและจุดทำงาน (Load line analysis and Operating Point)

ในวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์ ผลของการจ่ายแรงดันกระแส DC ให้กับวงจรจะทำให้ได้จุดทำงาน (operating point) หรือจุดสงบ (quiescent point) ค่าหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร โดยที่สัญญาณเอาต์พุต AC ของวงจรเมื่อมีการทำงานจะมีค่าแกว่งผ่านจุดทำงาน โดยจุดทำงานเป็นค่ากึ่งกลางของการแกว่ง การพิจารณาจุดสงบของวงจรจะดูจากกราฟคุณสมบัติของเอาต์พุต (output characteristic) ดังในรูปที่ 2.22 โดยจุดทำงานที่เหมาะสมนั้นควรอยู่ภายใน active region โดยเป็นตำแหน่งใดก็ได้ จากรูปที่ 2.22 กำหนดให้ A, B, C และ D เป็นจุดทำงาน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าจุดทำงานที่แตกต่างกันจะทำให้การตอบสนองที่ต่างกัน จากรูปที่ 2.22 ที่จุดทำงาน A ซึ่งมีค่า $I_C = 0$ และ $V_{CE} = 0$ เมื่อพิจารณาสัญญาณที่ถูกขยาย จะเห็นได้ว่าแรงดัน V_{CE} มีโอกาสที่จะเปลี่ยนไปได้ทางเดียวเท่านั้น คือ เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ I_C สำหรับจุดทำงาน B อยู่ในตำแหน่งที่เป็นบริเวณกึ่งกลางของ V_{CE} สูงสุดและ I_C สูงสุด จึงทำให้ทั้ง V_{CE} และ I_C สามารถเปลี่ยนค่าโดยเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้อย่างเต็มที่ ที่จุดทำงาน C เป็นจุดที่การเปลี่ยนแปลงของค่าของ V_{CE} และ I_C ในช่วงลดค่า มีได้ไม่มากถึงแม้ว่าในช่วงเพิ่มค่า จะแกว่งได้มากก็ตาม กราฟความสัมพันธ์ในบริเวณดังกล่าวไม่ค่อยเป็น Linear จึงทำให้อาต์พุตมีการบิดเบือน (Distortion) มาก และสำหรับจุดทำงาน D เป็นจุดที่มีค่าจำกัดสูงสุดทางด้านกำลังของทรานซิสเตอร์มากเกินไป ทำให้เมื่อมีการใช้งานจริงต้องควบคุมไม่ให้แรงดันเอาต์พุตแกว่งเกินค่าสูงสุด เป็นการจำกัดการทำงาน จากรูปที่ 2.22 จะเห็นได้ว่า จุด B เป็นจุดที่เหมาะสมกับการทำงานมากที่สุด เนื่องจากเอาต์พุตสามารถแกว่งได้กว้างที่สุด



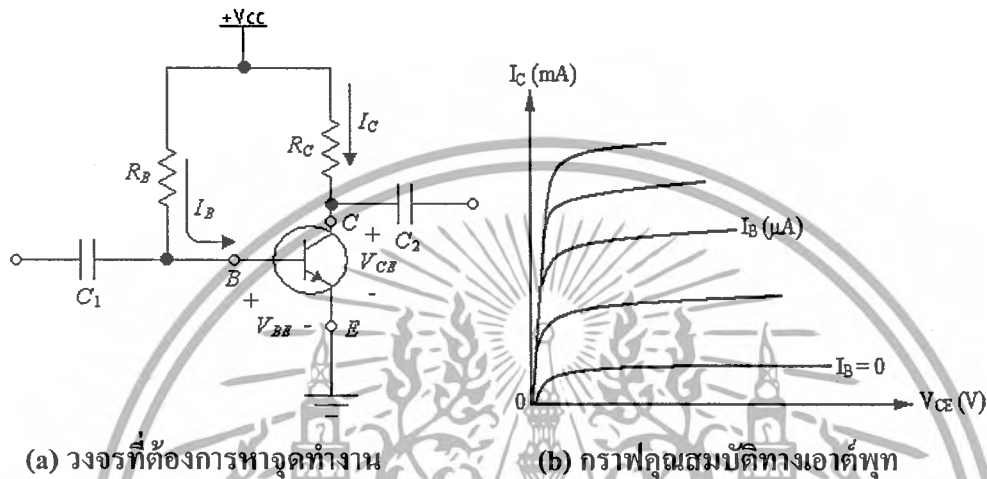
รูปที่ 2.22 กราฟความสัมพันธ์ของจุดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาจุดทำงาน

การหาจุดทำงาน หรือ จุดสงบสามารถหาได้โดยทำการหาเส้นโหลดไฟกระแสตรง (DC load line) บนกราฟคุณสมบัติ (characteristic) เสียก่อน และกำหนดค่ากระแสที่ไหลเข้ามาทางอินพุท ก็สามารถหาจุด Q ออกมาได้ตามต้องการ

ขั้นตอนการหาเส้นโหลด และจุด Q



(a) วงจรที่ต้องการหาจุดทำงาน

(b) กราฟคุณสมบัติทางเอาต์พุท

รูปที่ 2.23 วงจรและกราฟที่ต้องการหาเส้นโหลดจุดทำงาน

จากรูปที่ 2.23 (a) หาค่าสมการแรงดันในส่วนเอาต์พุทของวงจรโดยใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ ใส่ลูปวงจรแรงดันด้วยทิศทางกระแสไหลของกระแส I_C ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} -V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} &= 0 \\ \therefore V_{CC} &= I_C R_C + V_{CE} \end{aligned} \quad (2.5)$$

การหาเส้นโหลด DC ทำได้โดยการกำหนดทำงานของทรานซิสเตอร์ใน 2 สถานะคือ สถานะทำงานที่จุดอิ่มตัว และสถานะการทำงานที่จุด cut off

ที่จุดอิ่มตัว ให้ $V_{CE} = 0$ V แทนค่าลงในสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} I_C R_C + 0 \text{ V} &= V_{CC} \\ \therefore I_C R_C &= V_{CC} \end{aligned} \quad (2.6)$$

ที่จุด Cut off ให้ $I_C = 0$ mA แทนค่าลงในสมการที่ (2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(0 \text{ mA}) R_C + V_{CE} = V_{CC}$$

$$\therefore V_{CE} = V_{CC} \quad (2.7)$$

นำค่าในสมการที่ (2.6) และ (2.7) ไปกำหนดตำแหน่งลงบนแกน I_C และ แกน V_{CE} บนกราฟคุณสมบัติทำการลากเส้นตรงต่อจุดทั้งสองจะได้เส้นตรงที่เรียกว่าเส้นโหลด DC

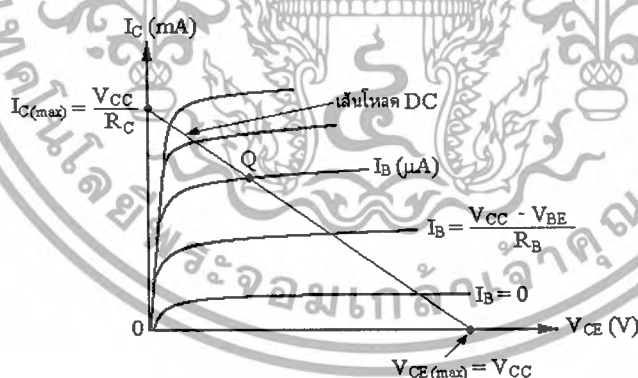
การหาจุดทำงาน (จุด Q) ของวงจรทำได้โดยหาค่ากระแสอินพุตที่ไหลเข้ามา หาได้จากสมการแรงดันในส่วนอินพุตของวงจร ใช้กฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ ไล่ลูปวงจรแรงดันด้วยทิศทางกรไหลของกระแส I_B ได้ดังนี้

$$-V_{CC} + I_B R_B + V_{BE} = 0$$

$$I_B R_B = V_{CC} - V_{BE}$$

$$\therefore I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (2.8)$$

นำค่ากระแส I_B ในสมการที่ (2.8) ไปหาดำแหน่งเส้นกราฟของ I_B ในกราฟคุณสมบัติเกิดจุดตัดระหว่างเส้นกราฟ I_B กับเส้นโหลด DC จุดตัดนี้คือ จุดทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ลักษณะกราฟที่ได้ออกมาแสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กราฟเส้นโหลดและจุดทำงาน (Q)

แรงดัน V_{CE} ของทรานซิสเตอร์ คือ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขา B และ ขา E ของทรานซิสเตอร์ขณะทรานซิสเตอร์ทำงาน แรงดันนี้เป็นไบแอสตรง เหมือนแรงดันไบแอสในตัวไดโอด เกิดแรงดันตกคร่อมตรงรอยต่อโดยประมาณดังนี้

ทรานซิสเตอร์เป็นชนิดซิลิกอน (Si)

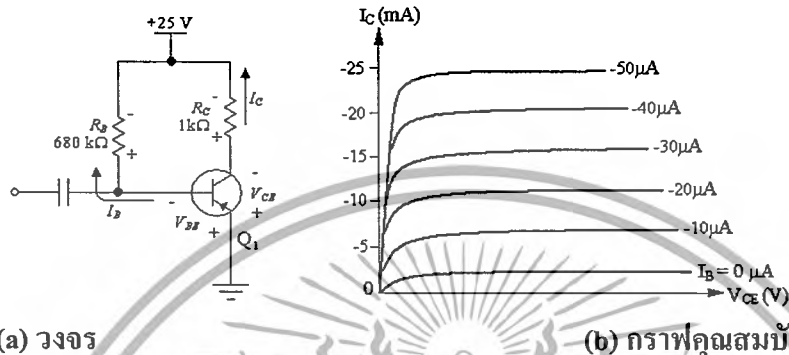
$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์เป็นชนิดเจอร์เมเนียม (Ge)

$$V_{BE} = 0.3 \text{ V}$$

ตัวอย่าง 2.1 จงหาจุดทำงาน Q ของวงจร เมื่อ Q1 เป็นชนิดซิลิกอน (Si)



รูปที่ 2.25 วงจรและกราฟที่ใช้ในการคำนวณตัวอย่าง 2.1

วิธีทำ

หาสมการแรงดันที่เอาต์พุต $-V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} = 0$

ให้ $I_C = 0 \text{ mA}$, $V_{CC} = V_{CE} = -25 \text{ V}$

ให้ $V_{CE} = 0 \text{ V}$, $I_C R_C = V_{CC}$

$$\therefore I_{C_{\max}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{-25 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = -25 \text{ mA}$$

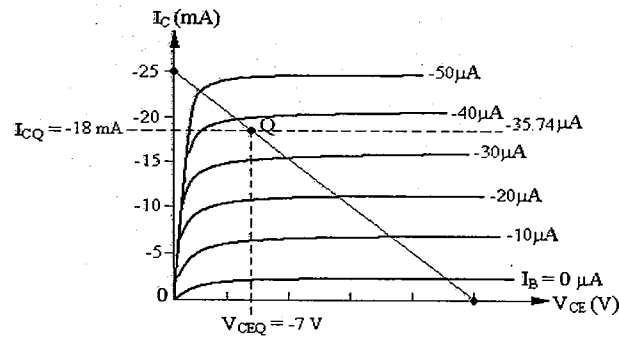
นำค่า $V_{CE} = -25 \text{ V}$ และ $I_C = -25 \text{ mA}$ ไปกำหนดตำแหน่งลงบนแกน I_C และ V_{CE} ของกราฟคุณสมบัติทางเอาต์พุต ได้เส้นโหลด DC ออกมา แสดงดังรูปที่ 2.26

หาสมการแรงดันที่อินพุต $-V_{CC} + I_B R_B + V_{BE} = 0$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{-25 \text{ V} - (-0.7 \text{ V})}{80 \text{ k}\Omega} = -35.74 \text{ mA}$$

นำค่า $I_B = -35.74 \text{ mA}$ ไปหาดำแหน่งเส้นกราฟของ I_B ในกราฟคุณสมบัติทางเอาต์พุต ได้จุดตัดระหว่าง I_B กับเส้นโหลด DC เกิดจุด Q ของวงจร แสดงดังรูปที่ 2.26

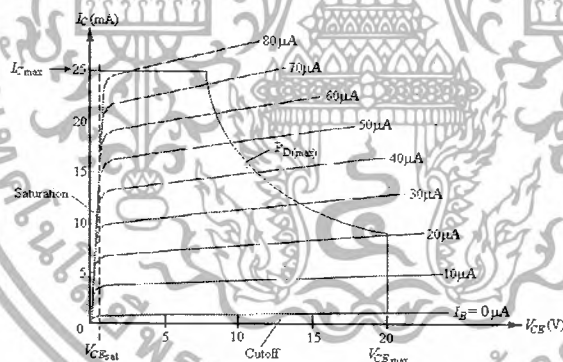
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 เส้นโหลด DC และจุด Q กำหนดลงบนกราฟในรูปที่ 2.25(b)

จากรูปที่ 2.26 ที่จุด Q จะได้ $V_{CEQ} = -7 \text{ V}$, $I_{CQ} = 18 \text{ mA}$

การจัดไบแอสให้ตัวทรานซิสเตอร์ทำงานมีผลต่อการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้จุดทำงานของวงจรเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การทำงานของตัวทรานซิสเตอร์มีขีดจำกัดเช่นเดียวกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอื่นๆ การเลือกจุดทำงาน การเลือกค่าไบแอสทั้งแรงดันและกระแส ต้องคำนึงถึงค่าสูงสุดที่ทรานซิสเตอร์ตัวนั้นๆ ทุนได้ ซึ่งจะถูกลบไว้ในข้อมูลรายละเอียดของตัวทรานซิสเตอร์ หรือแสดงค่าออกมาในรูปกราฟคุณสมบัติทางเอาต์พุตของวงจรทรานซิสเตอร์ แสดงไว้ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 กราฟค่าสูงสุดของทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 2.27 แสดงกราฟคุณสมบัติทางเอาต์พุตของวงจรทรานซิสเตอร์ การกำหนดค่าไบแอสของวงจรสามารถทำได้โดยกำหนดจุดทำงานบนกราฟคุณสมบัติในย่านทำงาน (active region) ของทรานซิสเตอร์ไม่เกินค่าสูงสุดที่แสดงไว้ในกราฟ คือแกนแนวตั้ง (I_C) แสดงค่ากระแสคอลเลกเตอร์สูงสุด ($I_{C \max}$) ไว้ ส่วนแกนแนวนอน (V_{CE}) แสดงค่าแรงดันคร่อมที่ตัวทรานซิสเตอร์ระหว่างขา C กับขา E สูงสุด ($V_{CE \max}$) ไว้ และที่เส้นโค้งแสดงค่าการสูญเสียกำลังไฟฟ้าคงที่สูงสุด ($P_{D \max}$) ไว้ ในส่วนปลายของค่าดังกล่าวมาเป็นย่านคัตออฟ (cutoff region) กำหนดค่าโดย $I_B \leq 0 \mu\text{A}$ และย่านอิ่มตัว (Saturation region) กำหนดค่าโดย $V_{CE} \leq V_{CE \text{ sat}}$

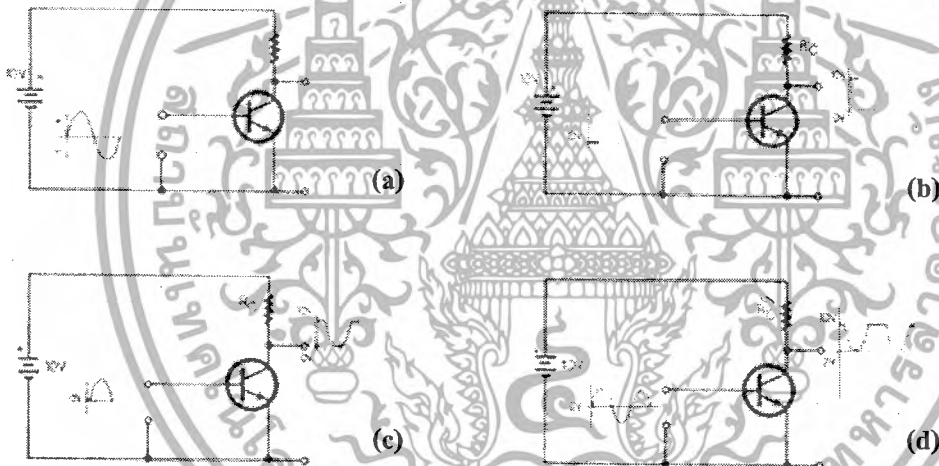
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วงจรขยายกำลัง

สัญญาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น สัญญาณเสียง สัญญาณวิทยุ สัญญาณในระบบไฟฟ้า การนำสัญญาณเหล่านี้มาใช้งานโดยตรงอาจจะไม่สะดวก เนื่องจากสัญญาณที่ได้มีกำลังต่ำเกินไป ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขยายกำลังก่อนนำไปใช้งาน วงจรขยายกำลังในทางอุดมคติถือว่าประสิทธิภาพการขยาย 100% แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียบางส่วน วงจรขยายที่นำไปใช้งานแบ่งออกเป็น คลาส A, คลาส B, คลาส AB และคลาส C แต่ละคลาสมีประสิทธิภาพต่างกัน

2.3.1 ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายสัญญาณ

ด้วยคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ที่มีการขยายกระแสด้วยค่า เบต้า (β) ทำให้เราสามารถนำทรานซิสเตอร์มาต่อเป็น วงจรขยายสัญญาณได้ ลองดูการต่อวงจรง่าย ๆ ดังรูปที่ 2.28(a) และป้อนสัญญาณอินพุตทางขา B เราจะมาดูสัญญาณเอาต์พุตทางขา C ว่าเป็นอย่างไร โดยที่ V_S มีค่า 10 โวลต์ และป้อนสัญญาณเป็นคลื่นรูปไซน์



รูปที่ 2.28 ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายสัญญาณ เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่ได้

เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นศูนย์โวลต์ ดังรูปที่ 2.28(b) จะไม่เกิดกระแส I_B ผลก็คือ I_C ไม่เกิดด้วย ดังนั้น แรงดันที่ R_C จึง มีค่าเป็นศูนย์โวลต์ ทำให้แรงดัน V_{CE} เท่ากับ V_S คือ 10 โวลต์ และทำงานเองเดียวกัน เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าน้อยกว่า 0.65 โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าเป็น 10 โวลต์ เช่นกัน

เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะครึ่งรูปคลื่นไซน์ในช่วงบวก (ไซเคิลบวก) ดังรูปที่ 2.28 (c) ในช่วงนี้จะเกิด I_B ตามคลื่นรูปไซน์ด้วยจึงทำให้ I_C เกิดตามไปด้วย เมื่อ I_B มากขึ้น I_C จะมากด้วย ผลทำให้เกิดแรงดันที่ R_C มากขึ้น แรงดัน V_{CE} จึงเริ่มลดลง เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าสูงสุดจะทำให้แรงดัน V_{CE} มีค่าลดลงมากที่สุดจนถึง 0 โวลต์และเมื่อสัญญาณอินพุตเริ่มลดลง

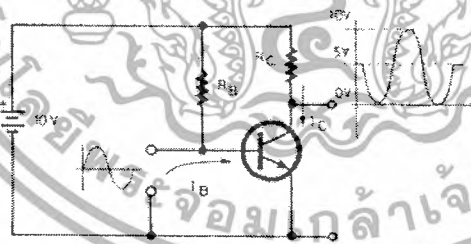
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเอาต์พุตจะเริ่มเพิ่มขึ้น เป็นที่สังเกตว่าในช่วงนี้สัญญาณเอาต์พุตจะกลับเฟส (ตรงข้ามกัน) กับสัญญาณอินพุต คือ เมื่อ สัญญาณอินพุตมีแรงดันมากขึ้น สัญญาณเอาต์พุตจะมีแรงดันลดลง

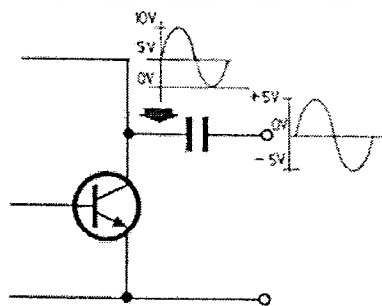
ในช่วงสัญญาณอินพุตเป็นครึ่งโวลต์ในช่วงลบ (ไซเคิลลบ) ดังรูปที่ 2.28(d) ในช่วงนี้ขา B, E ของทรานซิสเตอร์ จะได้รับ ไบแอสกลับ ทำให้ไม่มี I_B จึงไม่เกิด I_C ด้วย ผลก็คือได้แรงดัน V_{CE} เป็น 3.14 โวลต์ และเมื่อสัญญาณ อินพุต มีค่าเป็นไซเคิลบวกอีก ก็จะได้แรงดัน V_{CE} ลดลงเป็นคลื่นรูปไซน์ครึ่งคลื่นเช่นกัน

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.28 จะเห็นว่าเมื่อต่อวงจรดังรูปจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ผิดเพี้ยน คือ มีการขยายเพียงครึ่งไซเคิล เท่านั้น อีกครึ่งไซเคิล (ลบ) ถูกตัดทิ้งไป จึงต้องหาวิธีแก้ไขด้วยการให้ไบแอสแก่ทรานซิสเตอร์ทางขา B ก่อน ดังตัวอย่างง่าย ๆ ตามรูปที่ 2.29 ด้วยการใส่ตัวต้านทาน R_B ต่อเข้ากับขา B และ V_S วิธีนี้ทำให้ขณะปกติไม่มีสัญญาณเข้าหรือสัญญาณเข้ามีค่าเป็น 0 โวลต์ตัว R_B จะทำให้มี I_B ค่าหนึ่งซึ่งทำให้เกิด I_C ที่ทำให้มีแรงดันที่ R_C มีค่าประมาณ 1/2 ของ V_S ในที่นี้คือ 5 โวลต์(เรียกสภาวะนี้ว่าจุดสงบ) เมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นครึ่ง ไซเคิลบวก I_B จะเพิ่มขึ้นทำให้ V_{CE} ลดลงต่ำสุดมาเหลือ 0 โวลต์พอดี และเมื่อสัญญาณอินพุตมีค่าเป็นครึ่ง ไซเคิลลบ I_B จะลดลง ทำให้ V_{CE} มีค่าเพิ่มขึ้น

ด้วยวิธีการให้ไบแอสตามรูปที่ 2.29 จะทำให้เกิดการขยายสัญญาณเต็มรูปคลื่น คือสัญญาณเอาต์พุตจะสวิงหรือแกว่ง ระหว่าง 0 โวลต์ กับ V_S โดยมีจุดสงบที่ 1/2 ของ V_S เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตสวิงได้มากที่สุด และสัญญาณดังกล่าว เมื่อ ไปขับปลั๊กผ่าน C ดังรูปที่ 2.30 ก็จะได้สัญญาณเป็นไฟสลับในช่วงบวกกลับได้



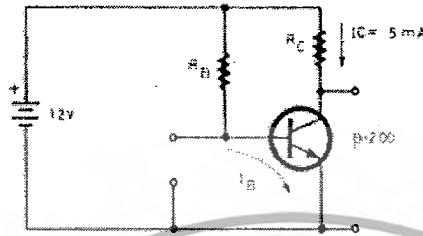
รูปที่ 2.29 การต่อไบแอสทรานซิสเตอร์ทำให้ได้รูปคลื่นเอาต์พุตที่สมบูรณ์



รูปที่ 2.30 เมื่อต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับสัญญาณเอาต์พุตทำให้ได้สัญญาณสวิงในช่วงบวกกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 2.2 ต้องการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ซึ่งมีค่าเบต้า (β) เท่ากับ 200 ใช้ แรงดันขนาด 12 โวลต์ และให้มี I_C ในสภาวะสงบเป็น 5 mA จงหาค่า R_B และ R_C ในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า R_B และ R_C เพื่อหาจุดไบแอสที่เหมาะสม

วิธีการคำนวณทำได้ง่าย โดยคิดจากสภาวะสงบหรือไม่มีสัญญาณเข้า ซึ่งจะได้แรงดันที่ R_C เท่ากับ 1/2 ของ 12 โวลต์คือ

$$V_{RC} = \frac{12}{2} = 6$$

และสภาวะสงบนี้มี I_C เป็น 5 mA ดังนั้นหาค่า R_C ได้

$$R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{6}{5 \times 10^{-3}}$$

$$R_C = 1.2 \text{ K}\Omega$$

จากนั้นทำการหา R_B ได้ โดยเริ่มจากหาค่า I_B ก่อน

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5 \times 10^{-3}}{200} = 25 \mu\text{A}$$

$$V_{RB} = 12 - 0.65 = 11.35 \text{ V}$$

$$R_B = \frac{V_{RB}}{I_B} = \frac{11.35}{25 \mu\text{A}}$$

$$R_B = 454 \text{ K}\Omega \text{ หรือ } 470 \text{ K}\Omega$$

อีกตัวอย่างของวงจรซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ดังรูปที่ 2.32(a) โดยที่ เบต้า มีค่า 150 เท่า และพิจารณาที่จุดสงบ หรือไม่มีสัญญาณป้อนเข้า เริ่มต้นหาค่า I_B โดยหาค่าแรงดันที่ R_B ซึ่งจะมีค่า

$$V_{RB} = 12 - 0.65 = 11.35 \text{ V}$$

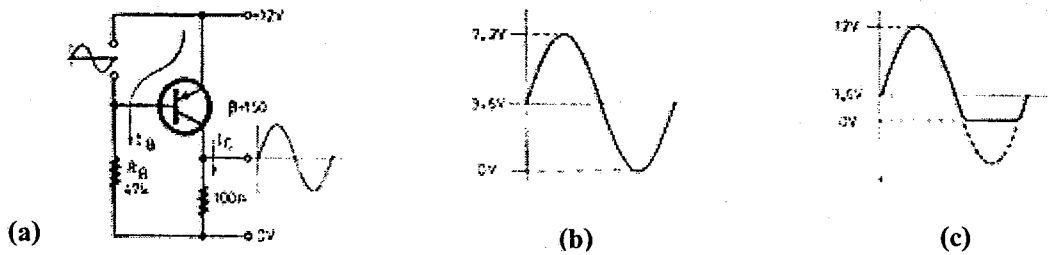
$$I_B = \frac{11.35}{25 \mu\text{A}} = 0.24 \text{ mA}$$

$$I_C = 150 \times 0.24 \text{ mA} = 36 \text{ mA}$$

$$V_{RC} = 36 \text{ mA} \times 100 = 3.6 \text{ V}$$

$$V_{CE} = 12 - 3.6 = 8.4 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32

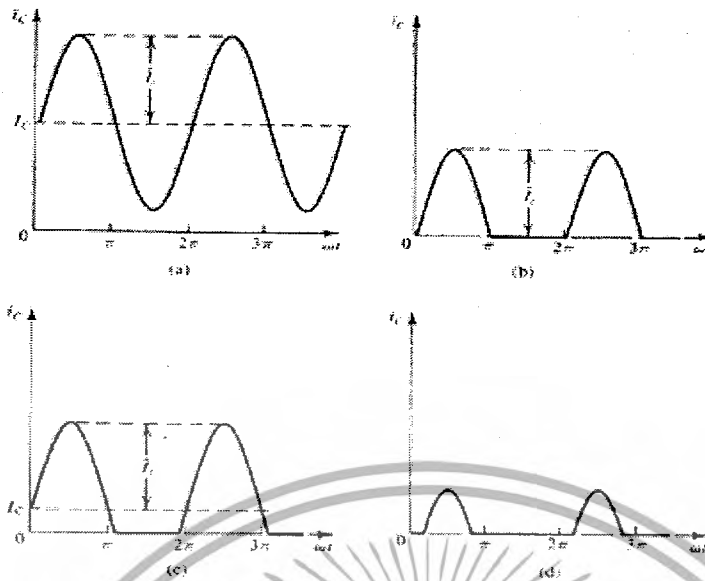
- (a) เป็นตัวอย่างวงจรรขยายของทรานซิสเตอร์ชนิด PNP
 (b) สัญญาณเอาต์พุตที่สวิงได้สูงสุดโดยไม่เพี้ยน
 (c) การผิดเพี้ยนเมื่อสัญญาณสวิงสูงเกินไป

จากตัวอย่างแรงดันที่จุดสงบอยู่ที่ 3.6 V และกระแสมีค่ามากถึง 36 mA เมื่อพิจารณาให้ดีจะพบว่า แรงดันเอาต์พุตควรจะมีสวิงไปสูงสุดเพียง 7.2 V และต่ำสุด 0 V ดังรูปที่ 2.32(b) จึงจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่ไม่ผิดเพี้ยน แต่ถ้ายอมให้แรงดันเอาต์พุตสวิงขึ้นไปสูงสุดถึง 12 V (โดยป้อนสัญญาณอินพุตเข้ามาแรง ๆ) สัญญาณเอาต์พุตจะเกิดการผิดเพี้ยนดังรูปที่ 2.32(c) ทั้งนี้เพราะว่าในครึ่งไซเคิลหลังแรงดันจะลดลงต่ำสุดเพียง 0 โวลต์ ในช่วงนี้สัญญาณจึงถูกขลิบหรือตัดยอดทิ้งไป

การไบแอสที่จุดสงบที่ค่าแรงดันต่าง ๆ จึงทำให้เกิดผลของการขยายสัญญาณในครึ่งไซเคิลบวกและลบในคลาสต่าง ๆ เช่น ใน รูปที่ 2.29 ไบแอสอยู่ที่ $1/2$ ของ V_s เรียกว่า คลาสเอ แต่ในรูปที่ 2.32 ทรานซิสเตอร์ขยายในไซเคิลบวกได้สูง ส่วนไซเคิลลบไม่ได้ เรียกว่า คลาสบี และมีวิธีการต่อให้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวขยายร่วมกัน โดยไบแอสให้ตัวแรกขยายในไซเคิลบวกอย่างเดียวและตัวที่สองขยายในไซเคิลลบอย่างเดียวแล้วนำเอาเอาต์พุตของทั้งสองตัวมารวมกันจะได้สัญญาณเอาต์พุตสวิงได้สูงขึ้น วิธีนี้จัดอยู่ในคลาสบี ซึ่งคลาสต่าง ๆ เหล่านี้ถูกนำไปใช้ในวงจรรขยายเสียงต่าง ๆ

2.3.2 วงจรรขยายคลาสเอ (Class A)

โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้วงจรรขยายคอมมอนคอลเลกเตอร์เป็นวงจรรขยายภาคเอาต์พุตคลาสเอซึ่งเป็นเพราะคุณสมบัติที่มีความต้านทานเอาต์พุตที่ค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 2.33 รูปสัญญาณของกระแสคอลเลกเตอร์ซึ่งทำงานในคลาสต่างๆ

คุณลักษณะการส่งผ่าน (Transfer Characteristic)

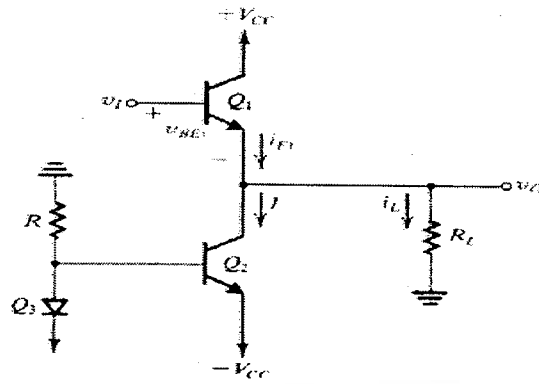
จากวงจรขยายคอมมอนคอลเลกเตอร์ซึ่งไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่สร้างขึ้นจากทรานซิสเตอร์ Q_2 ให้มีกระแสไหลเท่ากับ I ดังวงจรในรูปที่ 2.34 ทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำหน้าที่เป็นวงจรตามแรงดัน (voltage follower) พิจารณาจาก $i_{E1} = I + i_L$ ดังนั้นเพื่อให้ Q_1 ทำงานในช่วงแอกที่ฟอยู่ตลอดเวลากระแสไบแอส I ต้องมีค่ามากกว่าขนาดของกระแสเอาต์พุตด้านลบ (negative load current) คุณสมบัติการส่งผ่านของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 2.34 และจากสมการ

$$V_O = V_I - V_{BE1} \quad (2.9)$$

พิจารณาจากสมการที่ (2.9) แรงดันเอาต์พุต V_O ได้จากผลต่างของแรงดันอินพุต V_I กับความต่างศักย์ที่เบส - อิมิตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 (V_{BE1}) ถ้าเราจะประมาณให้การเปลี่ยนแปลงของ V_{BE1} ซึ่งเปลี่ยนไป 60 mV เมื่อกระแสคอลเลกเตอร์เปลี่ยนไป 10 เท่านั้นน้อยมากจนถือว่ามีค่าคงที่ เราจะได้รูปคุณสมบัติการส่งผ่านดังรูปที่ 2.34 พิจารณาจากรูปพบว่าขอบเขตของสัญญาณเอาต์พุตด้านบวกขึ้นกับแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} และแรงดันอิมิตัว์ที่คอลเลกเตอร์-อิมิตอร์ของ Q_1 (V_{CE1sat}) ดังสมการ

$$V_{Omax} = V_{CC} - V_{CE1sat} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 วงจรขยายคอมมอนคอลเลคเตอร์

และขอบเขตของสัญญาณเอาต์พุตด้านลบนั้นจะขึ้นกับการหยุดทำงาน (Cutoff) ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ดังสมการ

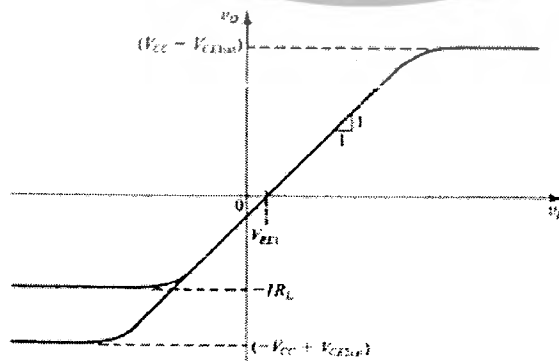
$$V_{Omin} = -IR_L \tag{2.11}$$

หรือถูกกำหนดโดยทรานซิสเตอร์ Q_2 ออกจากช่วงการทำงานที่แอกทีฟไปสู่ช่วงอิ่มตัว ดังนั้น

$$V_{Omin} = -V_{CC} + V_{CE2sat} \tag{2.12}$$

จากสมการที่ (2.12) ทำให้เราสามารถหาค่ากระแสไบแอสของวงจรขยายภาคเอาต์พุตคลาสเอ็ดังรูปที่ 2.34 ได้สมการ

$$I \geq \frac{|-V_{CC} + V_{CE2sat}|}{R_L} \tag{2.13}$$

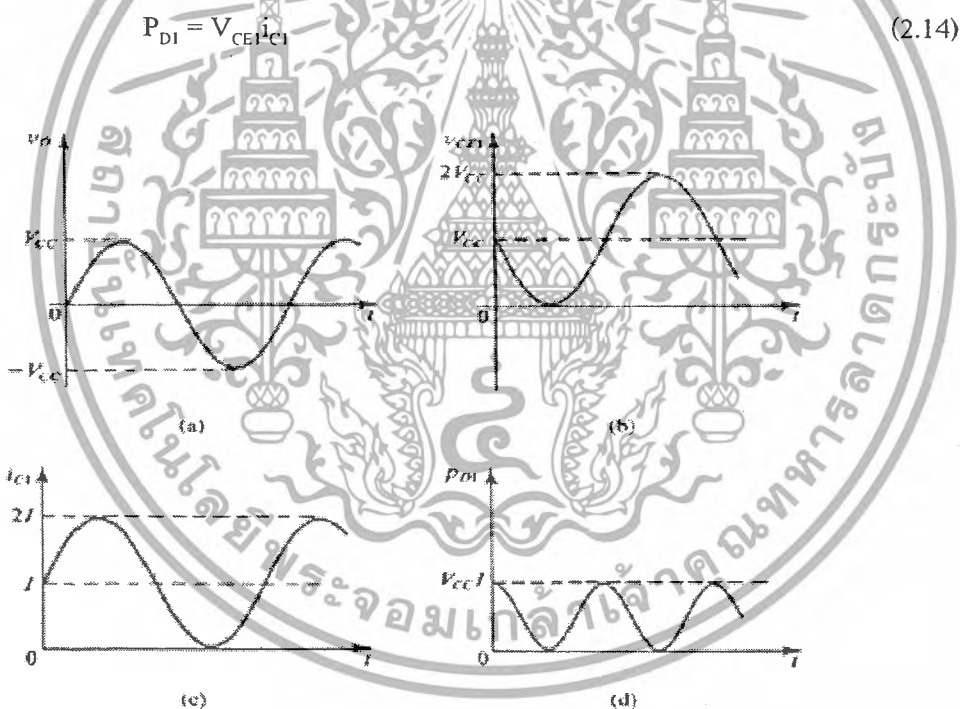


รูปที่ 2.35 รูปคุณลักษณะการส่งผ่านระหว่างแรงดันอินพุต - เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรขยายภาคเอาต์พุตคลาสเอดังรูปที่ 2.34 จำยสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณไซน์ซึ่งมีจุดเริ่มต้นของสัญญาณ (input offset voltage) เท่ากับ V_{BE1} ไม่คิดผลของแรงดันคอลเลกเตอร์อิมิตัว (V_{CEsat}) และถ้าเลือกกระแสไบแอสวงจร I ให้เหมาะสมแล้ว เราพบว่าสัญญาณเอาต์พุต V_o จะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอินพุตและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ถึงแหล่งจ่ายไฟ $\pm V_{CC}$ ซึ่งจะเป็นระดับสัญญาณสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงได้ ส่วนกระแสคอลเลกเตอร์ i_{C1} นั้นเปลี่ยนแปลงมากขึ้นหรือน้อยลงตามสัญญาณอินพุตและจะพบว่ากระแสมากที่สุดที่เพิ่มขึ้นได้จะเป็นสมองเท่าของกระแสไบแอส และกระแสน้อยที่สุดจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.36 ดังนั้นเราจำเป็นต้องเลือกแหล่งจ่ายไฟตรงและกระแสไบแอสวงจรให้เหมาะสมกับสัญญาณอินพุตและความต้านทานโหลด R_L

รูปสัญญาณกำลังงานสูญเสียชั่วขณะ (Instantaneous power dissipation) (p_{DI}) แสดงดังรูปที่ 2.36(d) นั้นได้จากผลคูณของกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคร่อมคอลเลกเตอร์-อิมิตอร์ของ Q_1 ซึ่งหาได้จาก



รูปที่ 2.36 รูปสัญญาณสูงสุดที่จุดต่างๆของวงจรขยายภาคเอาต์พุตคลาสเอ

พิจารณาจากรูป พบว่ากำลังงานสูญเสียสูงสุดมีค่าเท่ากับกำลังสูงสุดที่จุดทำงาน นั่นคือ วงจรขยายภาคเอาต์พุตคลาสเอจะมีค่ากำลังงานสูญเสียมากที่สุดเมื่อสัญญาณเอาต์พุตเป็นศูนย์ และประสิทธิภาพของวงจรขยายภาคเอาต์พุตนั้นกำหนดได้โดย

$$n = \frac{P_L}{P_S} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P_L คือ กำลังงานเฉลี่ยที่โหลด (average load power) ซึ่งมีค่า

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{V_O^2}{R_L} \quad (2.16)$$

และกำลังงานเฉลี่ยที่แหล่งจ่าย P_S

$$P_S = 2V_{CC}I \quad (2.17)$$

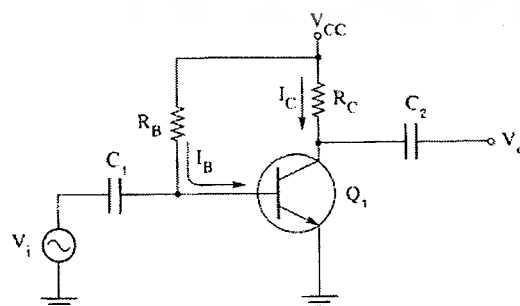
จากสมการที่ (2.14) และ (2.15) เราสามารถคำนวณประสิทธิภาพได้สมการ

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\frac{1}{2} V_O^2}{4 I_{R_L} V_{CC}} \\ &= \frac{\frac{1}{2} V_O V_O}{4 I_{R_L} V_{CC}} \end{aligned} \quad (2.18)$$

เมื่อ $V_O \leq V_{CC}$ และ $V_O \leq I_{R_L} R_L$ จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ

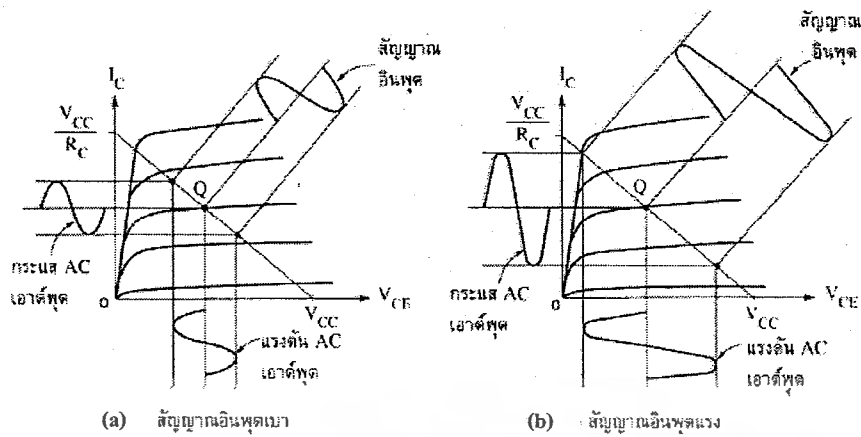
$$V_O = V_{CC} = I_{R_L} R_L \quad (2.19)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพสูงสุดจะเท่ากับ 25% เนื่องจากขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะถูกจำกัดด้วยแรงดันอิมิตต์ของทรานซิสเตอร์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง ดังนั้นเมื่อหลีกเลี่ยงความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เราจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายแรงดัน $\pm V_{CC}$ กับแหล่งจ่ายกระแส I ให้มากกว่าข้อกำหนดตามสมการข้างต้นซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพที่เป็นไปได้จะอยู่ในช่วง 10% - 20% เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงไม่นิยมใช้วงจรขยายภาคเอาต์พุตคลาสเอในวงจรขยายทั่วไปที่จ่ายกำลังเอาต์พุตเกิน 1W แต่จะใช้ในวงจรเครื่องขยายเสียงความเที่ยงตรงสูง (hi-fidelity audio power amplifier)



รูปที่ 2.37 วงจรขยายคลาสเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.38 กราฟการทำงานวงจรขยายคลาสเอ

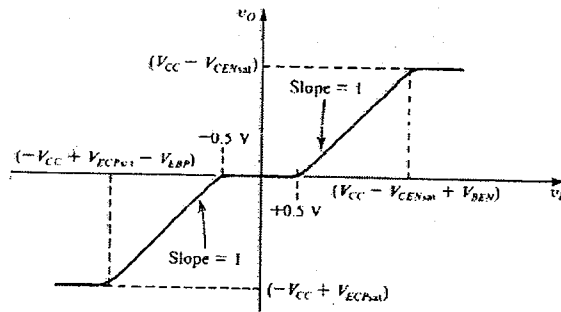
2.3.3 วงจรขยายคลาสบี (Class B)



รูปที่ 2.39 วงจรขยายคลาสบี

จากวงจรขยายคลาสบีดังรูปที่ 2.39 ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์คู่เหมือน (Complementary) Q_N และ Q_P จากโครงสร้างของวงจรเมื่อแรงดันอินพุตเป็นศูนย์จะไม่มีกระแสคอลเลกเตอร์ไหลในวงจรนั้นคือทรานซิสเตอร์ทั้งคู่ทำงานในช่วงคัทออฟและจะได้แรงดันเอาต์พุต V_o เป็นศูนย์ เมื่อแรงดันอินพุตเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5V ทรานซิสเตอร์ Q_N เริ่มนำกระแสได้และจะทำงานในลักษณะของคอมมอนคอลเลกเตอร์โดยที่ $V_o = V_i - V_{BE_N}$ ในขณะเดียวกัน Q_P จะไม่สามารถนำกระแสเพราะถูกไบแอสกลับที่เบส-อิมิตเตอร์ ในทางกลับกันเมื่อแรงดันอินพุตด้านลบต่ำกว่า -0.5V เข้ามาที่จุดอินพุตจะทำให้ Q_P นำกระแสได้และ Q_N จะทำหน้าที่จ่ายกระแสด้านลบให้กับโหลดซึ่งการทำงานจะเป็นลักษณะคอมมอนคอลเลกเตอร์เช่นเดียวกัน จากการที่ทรานซิสเตอร์ทั้งคู่สลับกันจ่ายกระแสให้กับโหลด ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าวงจรทำงานแบบพุช-พูล (push-pull)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 คุณสมบัติการส่งผ่านของวงจรขยายคลาสบี

คุณลักษณะการส่งผ่าน

คุณสมบัติการส่งผ่านของวงจรขยายเอาต์พุตคลาสบีแสดงดังรูป 2.40 จากรูปเราพบว่า ในช่วงที่แรงดันอินพุตที่มีค่าประมาณ -0.5V ถึง 0.5V จะไม่มีแรงดันเอาต์พุตที่ไหลเลย นั่นคือ สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็นศูนย์ อันเนื่องมาจากจำเป็นต้องใช้สัญญาณอินพุตในการทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองเริ่มนำกระแสซึ่งในกรณีที่อินพุตเป็นสัญญาณไซน์ เราจะได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณไซน์ที่เกิดความเพี้ยนตรงรอยต่อระหว่างรูปสัญญาณด้านบวกกับด้านลบ (crossover distortion) ดังรูปที่ 2.41

กำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพ

ในการคำนวณกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพเราจะไม่คิดผลของความผิดเพี้ยนตรงรอยต่อของสัญญาณและจะกำหนดให้แรงดันเอาต์พุตเป็นสัญญาณรูปไซน์มีขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ V_o ซึ่งกำลังงานเฉลี่ยที่ไหลจะเป็น

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{V_o^2}{R_L} \quad (2.20)$$

และกำลังงานเฉลี่ยที่จ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายไฟซึ่งมีค่าเท่ากับทั้งด้านบวกและด้านลบหาได้จากผลคูณของแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง V_{CC} กับกระแสเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{V_o}{\pi R_L}$ ดังนั้น

$$P_{S+} = P_{S-} = \frac{1}{\pi} \frac{V_o}{R_L} V_{CC} \quad (2.21)$$

$$P_D = P_S - P_L \quad (2.26)$$

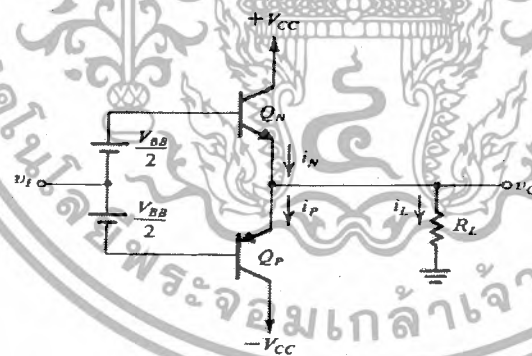
แทน P_S จากสมการ (2.22) และ P_L จากสมการ (2.20) ลงในสมการ (2.26) เราจะได้

$$P_D = \frac{2 V_O}{\pi R_L} V_{CC} - \frac{1 V_O^2}{2 R_L} \quad (2.27)$$

จากสมการ (2.23) พบว่ากำลังงานสูญเสียขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต V_O และเนื่องจากการทำงานของวงจรมีลักษณะสมมาตร (symmetry) ดังนั้น กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจึงมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังงานสูญเสียทั้งหมด P_D

2.3.4 วงจรขยายคลาสเอบี (Class AB)

วงจรขยายคลาสบีนั้นมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงแต่มีข้อเสียที่รูปสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มีความเพี้ยนรบกวนต่อในขณะที่วงจรขยายคลาสเอไม่เกิดปัญหานี้แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ พิจารณารูปที่ 2.40 เมื่อ $|V_{BE}|$ มีค่าประมาณ 0.5V ทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแส ดังนั้นถ้าไบแอสทรานซิสเตอร์แต่ละตัวด้วยแรงดันนี้เราก็จะได้วงจรขยายคลาสเอบีดังแสดงในรูป 2.42 ซึ่งจะทำให้เราได้วงจรที่มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับวงจรขยายเอาต์พุตคลาสบีและไม่เกิดความเพี้ยนรบกวนเหมือนวงจรขยายคลาสเอ



รูปที่ 2.42 วงจรขยายคลาสเอบี

เมื่อ $V_i = 0$ จะได้ $V_O = 0$ แรงดันตรงคร่อมเบสอีมีเตอร์มีค่าเป็น $V_{BE}/2$ กำหนดให้ทรานซิสเตอร์มีคุณสมบัติเหมือนกันเราจะได้กระแสคอลเลกเตอร์ของทั้งสองมีค่าดังสมการ

$$i_N = i_P = I_Q = I_S e^{V_{BE}/V_T} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจร เมื่อ V_1 มีค่าเป็นบวกทำให้ศักดาที่เบสของทรานซิสเตอร์ Q_N และ Q_P สูงขึ้นแรงดันที่จุดเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกเท่ากับ

$$V_O = V_1 + \frac{V_{BE}}{2} - V_{BEN} \quad (2.29)$$

ซึ่งส่งผลให้กระแสไหล i_L ไหลผ่าน R_L ดังนั้น i_N จึงมีค่ามากขึ้น i_P ไหลน้อยลง ที่จุดเอาต์พุตเราพบว่า

$$i_N = i_P + i_L \quad (2.30)$$

การที่ i_N มีค่ามากขึ้นนั้นแสดงว่า V_{BEN} มีค่ามากขึ้นด้วย แต่แรงดันไบแอส V_{BB} มีค่าคงที่ ดังนั้น V_{BEP} จึงมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสคอลเล็กเตอร์ ที่พิจารณาจากวงจร

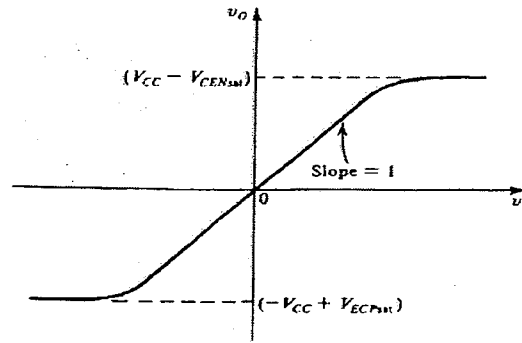
$$V_{BEN} + V_{BEP} = V_{BB}$$

$$V_T \ln\left(\frac{i_N}{I_S}\right) + V_T \ln\left(\frac{i_P}{I_S}\right) = 2V_T \ln\left(\frac{I_Q}{I_S}\right) \quad (2.31)$$

$$I_N i_P = I_Q^2 \quad (2.32)$$

สมการด้านบนแสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันเอาต์พุตเป็นบวกทรานซิสเตอร์ Q_N ทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับโหลดและทำงานเสมือนเป็นวงจรขยายคอมมอนคอลลเล็กเตอร์ ในทางกลับกันเมื่อแรงดันอินพุตเป็นลบทรานซิสเตอร์ Q_P จะเป็นตัวจ่ายกระแสซึ่งจะได้แรงดันเอาต์พุตประมาณเท่ากับแรงดันอินพุต สิ่งที่สำคัญเราพอสรุปได้คือเมื่อแรงดันอินพุตมีค่าน้อย ทรานซิสเตอร์ทั้งคู่สามารถนำกระแสในลักษณะสลับกันคือเมื่อ Q_N นำกระแสมากขึ้น กระแสที่ไหลผ่าน Q_P จะมีค่าน้อยลงด้วยขนาดที่เท่ากันแต่เมื่อแรงดันอินพุตมีขนาดใหญ่วงจรจะทำงานในลักษณะเดียวกันกับวงจรขยายคลาสบี คุณสมบัติการส่งผ่านแสดงดังรูป 2.43 ซึ่งสังเกตว่าจะไม่เกิดความเพี้ยนรอยต่อระหว่างสัญญาณด้านบวกและด้านลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



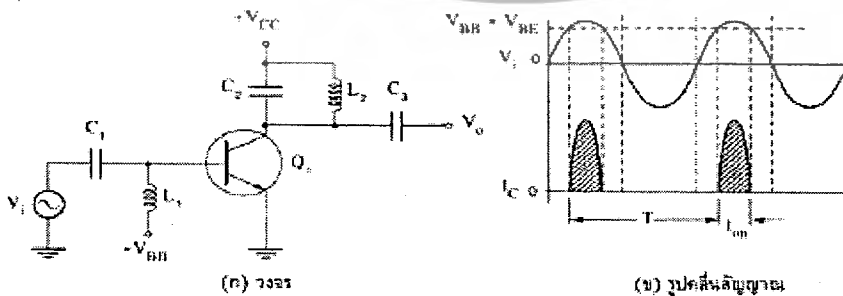
รูปที่ 2.43 คุณสมบัติการส่งผ่านของวงจรขยายคลาสเอบี

กำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพ

การคำนวณกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของวงจรขยายคลาสเอบีนั้นคล้ายกับการคำนวณของวงจรขยายคลาสบี สิ่งที่แตกต่างกันก็คือวงจรขยายภาคเอาต์พุตของคลาสเอบีนั้นมีกำลังงานสูญเสียที่จุดทำงานซึ่งสูญเสียไปที่ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวมีค่าเท่ากับ $V_{CC}I_0$ เมื่อ I_0 คือ กระแสไบแอสซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีค่าน้อยกว่ากระแสไหลดมากส่งผลให้กำลังงานสูญเสียที่จุดทำงานมีค่าน้อยมากจนละทิ้งไปได้ ดังนั้น เราจึงสามารถคำนวณกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพได้เช่นเดียวกับวงจรขยายคลาสบี ในกรณีที่กระแสไบแอสมีค่าค่อนข้างสูงซึ่งทำให้เราไม่สามารถที่จะละทิ้งกำลังงานสูญเสียที่จุดทำงานไปได้ เราสามารถนำกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่จุดทำงานรวมกับกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากสัญญาณอินพุตแล้วนำไปคำนวณประสิทธิภาพซึ่งจะทำให้ได้คำตอบที่ถูกต้องมากขึ้น

2.3.5 วงจรขยายคลาสซี (Class C)

เป็นวงจรขยายสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามาน้อยกว่า 180° เป็นบางส่วนของซีกบวก หรือบางส่วนของซีกลบ การทำงานต่ำกว่าคัตออฟ ในวงจรนี้ไม่สามารถขยายสัญญาณเชิงได้ นิยมใช้ในวงจรจูนของวิทยุหรือระบบสื่อสาร โดยจะต่อกับวงจรกรอง RF เพื่อกรองความถี่ฮาร์โมนิกส์ออกไป

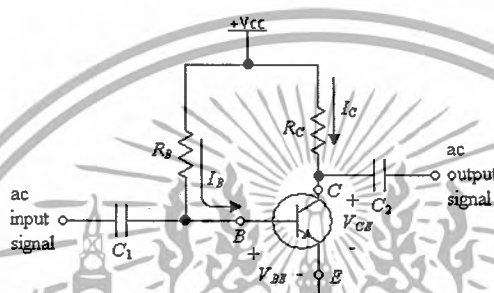


รูปที่ 2.44 วงจรขยายคลาสซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 วงจรไบแอสแบบคงที่ (Fixed-Bias Circuit)

เป็นวงจรไบแอสคงตัวของวงจรแบบอิมิตเตอร์ร่วม จากรูปที่ 2.45 เป็นทรานซิสเตอร์แบบ NPN อย่างไรก็ตามสำหรับทรานซิสเตอร์แบบ PNP ก็สามารถวิเคราะห์และคำนวณได้ในแบบเดียวกันโดยการเปลี่ยนทิศทางกระแสและขั้วแรงดันทั้งหมดในการวิเคราะห์ด้าน DC จากรูปจะเห็นว่าวงจรแยกสัญญาณ ac ของอินพุตออกโดยใช้ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 ทั้งยังช่วยป้องกันการไหลของกระแส DC ออกจากวงจรด้วย ดังนั้นการคำนวณจึงไม่ต้องนำสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตมาคำนวณ การไบแอสของวงจรเกิดจากแหล่งจ่ายแรงดัน V_{CC} แหล่งเดียวเท่านั้น



รูปที่ 2.45 วงจรไบแอสแบบคงที่

การคำนวณเพื่อหาจุดทำงานของวงจรในรูป จะใช้การคำนวณโดยจะแยกพิจารณาวงจรส่วนอินพุตซึ่งเป็นการไหลของ I_B และวงจรส่วนเอาต์พุตเป็นการไหลของ I_C

วงจรส่วนอินพุต (Input Equation Base - Emitter)

สมการของวงจรหาได้ด้วย KVL ที่อินพุตของทรานซิสเตอร์ ได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} V_{CC} &= I_B R_B + V_{BE} \\ \therefore I_B &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \end{aligned} \quad (2.33)$$

และ $V_{BE} = V_B - V_E$

เมื่อ $V_E = 0$ ดังนั้น

$$V_{BE} = V_B \quad (2.34)$$

วงจรส่วนเอาต์พุต (Output Equation Collector - Emitter)

จากความสัมพันธ์คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_C = \beta I_B \quad (2.35)$$

สมการของวงจรหาได้ด้วย KVL ที่เอาต์พุท ได้สมการดังนี้

$$\therefore V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (2.36)$$

และ $V_{CE} = V_C - V_E$

แต่ $V_E = 0$ ดังนั้น

$$V_{CE} = V_C \quad (2.37)$$

การอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ (Transistor Saturation)

สำหรับการใช้งานวงจรรขยายของทรานซิสเตอร์ จำเป็นต้องไม่ให้ทรานซิสเตอร์ถึงจุดอิ่มตัว เนื่องจากจะทำให้สัญญาณเอาต์พุทเกิดการบิดเบือน (Distorted)

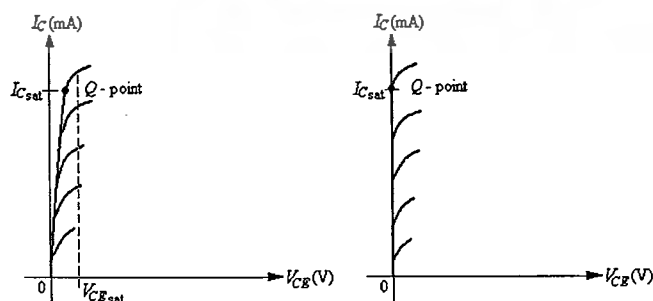
เมื่อทรานซิสเตอร์อิ่มตัวจะทำให้แรงดัน V_{CE} มีค่าโดยประมาณเท่ากับศูนย์ (ในทางปฏิบัติ V_{CE} จะมีค่าเป็นแรงดันต่ำๆ ซึ่งจะมีผลต่อการใช้งานน้อยมาก)

เมื่อทรานซิสเตอร์ถึงจุดอิ่มตัว

$$\begin{aligned} V_{CE} &\cong 0 \text{ V} \\ R_{CE} &= \frac{V_{CE}}{I_C} = \frac{0 \text{ V}}{I_{C \text{ sat}}} \\ &= 0 \Omega \end{aligned}$$

สำหรับวงจร โปแอสดงตัวจะมีค่ากระแส I_C ดังสมการ

$$I_{C \text{ max}} = \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (2.38)$$



(a) เส้นโหลด

(b) จุดการทำงาน

รูปที่ 2.46 เส้นโหลดและจุดการทำงาน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนของจุดทำงานเมื่อค่า I_B เปลี่ยน

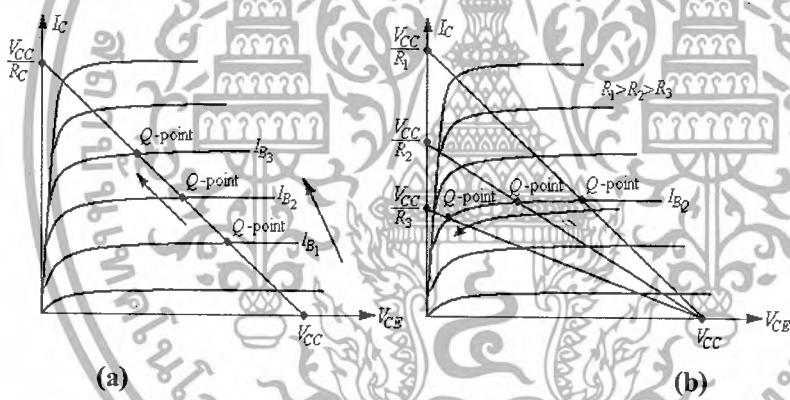
จุดทำงาน (Q -point) ของวงจรจะเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนค่า R_B ซึ่งจะส่งผลให้ I_B เปลี่ยนรูปดังรูปที่ 2.46(a) โดย จุดทำงานอยู่บนเส้นโหลดนี้ นั่นคือถ้าเพิ่มค่า I_B จะทำให้จุดทำงานอยู่ที่ตำแหน่ง V_{CE} ต่ำลง แต่ I_C จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าลดค่า I_B จุดทำงานจะเลื่อนไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ V_{CE} เพิ่มขึ้นแต่ I_C ลดลง ซึ่งทำให้เราสามารถเปลี่ยนจุดทำงานโดยการเปลี่ยนค่า R_B หรือ I_B ได้

การเปลี่ยนของจุดทำงานเมื่อค่า R_C เปลี่ยน

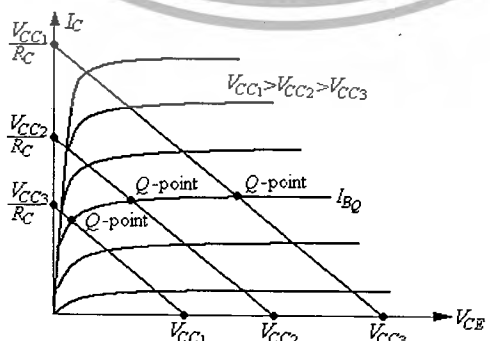
ถ้าหากวงจรมีการเปลี่ยนแปลงค่า R_C ในขณะที่คงค่า V_{CC} ไว้จะทำให้เส้นโหลดเปลี่ยนค่าความลาดชัน (Slope) ไปซึ่งเมื่อพิจารณาที่ I_B ค่าเดิมจุด Q - point จะถูกทำให้ย้ายไปในตำแหน่งที่ต่างกันดังรูปที่ 2.46(b)

การเปลี่ยนของจุดทำงานเมื่อค่า V_{CC} เปลี่ยน

ถ้าวงจรมีการเปลี่ยนแปลงค่า V_{CC} ในขณะที่ค่าอื่นคงที่ จะทำให้จุดตัดของเส้นโหลดบนแกนตั้ง (I_C) และแกนนอน (V_{CE}) เปลี่ยนไปโดยค่าความชันของเส้นโหลดจะเท่ากัน ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ I_B ค่าเดิม จุดทำงานจะถูกทำให้เปลี่ยนตำแหน่งไปเช่นเดียวกับรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 (a) การเปลี่ยนแปลงของจุดทำงานเมื่อเพิ่มค่า I_B
 (b) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโหลดสายและจุดทำงานของการเพิ่มค่า R_C

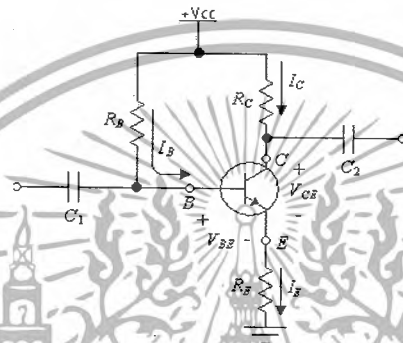


รูปที่ 2.48 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงโหลดสายและจุดทำงานของการลดค่า V_{cc}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7 วงจรอิมิตเตอร์ไบแอส (Emitter Bias Circuit)

การไบแอสแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์ คือ วงจรไบแอสแบบคงที่ที่เพิ่มตัวต้านทานค่าคงที่ (R_E) เข้าไปในวงจรขาอิมิตเตอร์ เนื่องจากการไบแอสแบบที่กล่าวมาของวงจรทรานซิสเตอร์ มักจะมีปัญหาเรื่องเสถียรภาพของจุดทำงาน เนื่องจากจุดทำงานสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นผลมาจากพารามิเตอร์บางอย่างของทรานซิสเตอร์มีค่าเปลี่ยนไป เช่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจะทำให้ ค่า β เพิ่มขึ้น, V_{BE} ลดลง ดังนั้นในการใช้งานที่ต้องการวงจรที่มีเสถียรภาพจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงวงจรจากวงจรพื้นฐาน



รูปที่ 2.49 วงจรไบแอสแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์ (Emitter Bias Circuit)

วงจรส่วนอินพุท (Input Equation Base - Emitter)

พิจารณาวงจรอินพุท จาก KVL :

$$V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \quad (2.39)$$

$$\text{จาก } I_E = (\beta + 1) I_B \quad (2.40)$$

$$\text{ดังนั้น } V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_E$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E} \quad (2.41)$$

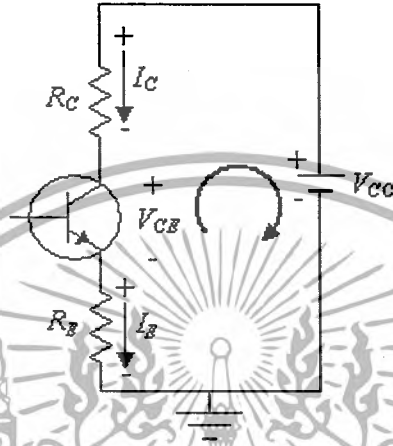
ต้านทาน Emitter ที่ปรากฏในวงจรอินพุท จะมีค่าเป็น $(\beta + 1)R_E$ หรือหมายความว่า การพิจารณาจากทางด้านอินพุทจะเห็น R_E มีค่าเป็น $(\beta + 1)$ เท่าของค่าจริง ซึ่งทำให้วงจรภายนอกมองเห็นค่าความต้านทานอินพุทมีค่าโดยประมาณ

$$R_i = (\beta + 1)R_E \quad (2.42)$$

วงจรส่วนเอาต์พุต (Output Equation Collector - Emitter)

พิจารณาวงจรเอาต์พุต เมื่อเพิ่ม R_E แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวงจรเอาต์พุตดังนี้ จาก

KVL



รูปที่ 2.50 ลักษณะของ Collector - Emitter loop

พิจารณา รูปที่ 2.50 ใช้ KVL :

$$V_{CC} = I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C \quad (2.43)$$

เมื่อ $I_E \cong I_C$ เพราะฉะนั้น

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_B + R_E) \quad (2.44)$$

แรงดันที่ขาต่างๆของทรานซิสเตอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_E = I_E R_E \quad (2.45)$$

$$\text{จาก } V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_C = V_{CE} + V_E$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C \quad (2.46)$$

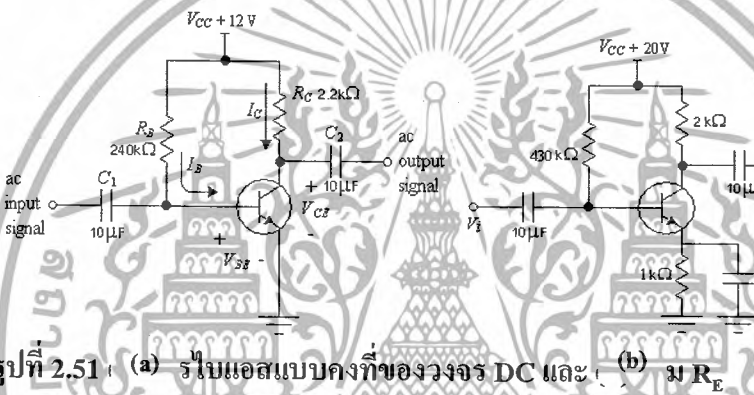
เอกสารนี้และเอกสารที่ส่งมอบให้เป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_B = V_{BE} - V_E \tag{2.47}$$

การปรับปรุงเสถียรภาพของการไบแอส (Bias Stability Improvement)

การเพิ่ม Emitter resistor เข้ากับวงจรจะทำให้ stability ของวงจรดีขึ้น เช่น ระดับ DC bias currents และ voltages จะมีเปลี่ยนแปลงไปไม่มากเมื่ออุณหภูมิภายนอก และค่า β ของทรานซิสเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง.

ตัวอย่าง 2.3 จากวงจรในรูปที่ 2.51(a) และ 2.51(b) จะมีแรงดันและกระแสไบแอสของวงจรเป็นอย่างไร เมื่อค่า β เป็น 50 และ 100



รูปที่ 2.51 (a) ร์ไบแอสแบบคงที่ของวงจร DC และ (b) มี R_E

วิธีทำ

ตารางที่ 2.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า β ของทั้งสองวงจร

The Circuit	β	$I_C(\mu A)$	$I_C(mA)$	$V_{CE}(V)$
Without R_E	50	47.08	2.35	6.83
	100	47.08	4.71	1.64
With R_E	50	47.08	2.35	6.83
	100	36.3	3.63	9.11

สำหรับวงจรไบแอสที่ไม่มี R_E เมื่อค่า β มีการเปลี่ยนแปลงด้วยสาเหตุใดก็ตาม จะทำให้ค่ากระแสและแรงดันไบแอส I_C และ V_{CE} เปลี่ยนแปลงไปมากซึ่งจากตัวอย่างเมื่อ β เปลี่ยนไป 100% จะทำให้ I_C มีการเปลี่ยนแปลงถึง 100% และ V_{CE} เปลี่ยนไป 76% เมื่อเทียบกับ วงจรที่มี R_E ค่ากระแสไบแอส I_C มีการเปลี่ยนแปลงไป 81% ในขณะที่ V_{CE} เปลี่ยนไปเพียง 35%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน V_{CE} ของวงจรที่มี R_E ไม่เปลี่ยนไปมากก็เนื่องจากว่าเมื่อ β มีค่าเพิ่มขึ้นค่า I_B จะลดลงเนื่องจากสมการ I_B เกี่ยวข้องกับ β ในขณะที่วงจรไม่มี R_E ค่า I_B ไม่ขึ้นกับค่า β ดังสมการ

$$I_{B(\text{without } R_E)} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (2.48)$$

$$I_{B(\text{with } R_E)} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad (2.49)$$

และจากการที่ $I_C = I_B$ ก็จะส่งผลทำให้ค่ากระแส I_C ของวงจรที่มี R_E มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากซึ่งจะทำให้ V_{CE} มีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่มากด้วย

สถานะอิ่มตัว (Saturation State)

สถานะทรานซิสเตอร์อิ่มตัวหมายถึงการที่ทรานซิสเตอร์นำกระแส หรือ ON อย่างเต็มที่ ซึ่งในการออกแบบจะให้แรงดันตกคร่อม V_{CE} มีค่าเป็น 0 หรือเปรียบเสมือนมีการ short circuit ที่ขา collector และขา emitter โดยที่ค่ากระแส I_C ที่สถานะอิ่มตัวมีค่าเป็น

$$I_{C\text{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (2.50)$$

ซึ่งค่า R_E ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากระแส collector saturation มีค่าต่ำกว่าวงจรไบแอสแบบคงที่ซึ่งไม่มี R_E

การวิเคราะห์เส้นโหลด (Load-Line Analysis)

การวิเคราะห์เส้นโหลดของวงจร Emitter bias ไม่แตกต่างจากวงจร Fixed-bias ปกติมากนัก ซึ่งจะทำให้การหาจุดตัดแกนตั้งและแกนนอนที่ $V_{CE} = 0 \text{ V}$ และ $I_C = 0 \text{ mA}$

จากสมการวงจรเอาต์พุต (Collector-Emitter)

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C (R_C + R_E) \quad (2.51)$$

จุดตัดแกนตั้งของ V-I Plot ที่ $V_{CE} = 0$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (2.52)$$

และจุดตัดแกนนอนของ V-I Plot ที่ $I_C = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{CE} = V_{CE} \quad (2.53)$$

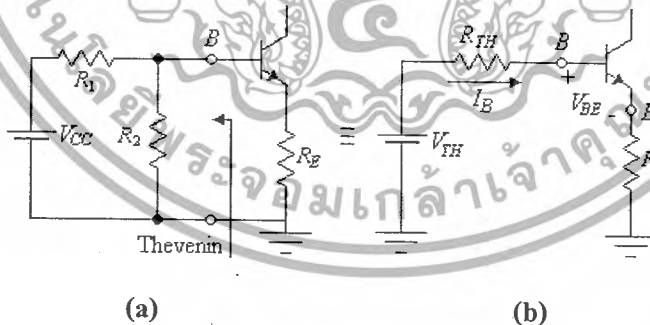
2.3.8 วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider Bias Circuit)

วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดันคือวงจรไบแอสแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์ โดยเพิ่มตัวต้านทานค่าคงที่ที่ต่อร่วมกับขาเบสเทียบกับกราวด์ เนื่องจาก I_C และ V_{CEQ} เป็นฟังก์ชันของอัตราขยายกระแส β และค่า β มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (temperature sensitive) ซึ่งจะทำให้ค่า I_C และ V_{CE} ของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามอุณหภูมิ

วงจรที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดันนี้ จะทำให้ค่าของกระแสและแรงดันไบแอสมีผลกระทบน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า β หรือ ไม่ขึ้นกับค่าอัตราขยายกระแส (Independent of the transistor beta)



รูปที่ 2.52 วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน (Voltage-Divider Bias Circuit)



รูปที่ 2.53 (a) การวาดรูปใหม่ของวงจรทางด้านอินพุต

(b) วงจร Thevenin

วงจรอินพุต (Input Circuit)

สมการของวงจรจะวิเคราะห์ค่าออกมาในรูปวงจรเทวินิน โดยหาค่าความต้านทานเทวินิน (R_{TH}) และหาค่าแรงดันเทวินิน (V_{TH}) จากวงจรสมมูลออกมา นำไปหาค่ากระแส I_B ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_{TH} คือความต้านทานของ terminal เมื่อให้ Voltage Source ลัดวงจร

$$R_{TH} = R_1 || R_2 \quad (2.54)$$

ส่วน V_{TH} คือ แรงดันปรากฏที่ terminal

$$\begin{aligned} V_{TH} &= V_{R_2} \\ &= \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} \end{aligned} \quad (2.55)$$

ดังนั้นได้เป็นวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.39 ใช้ KVL :

$$V_{TH} = I_B R_{TH} + V_{BE} + I_E R_E$$

จาก $I_E = (\beta + 1) I_B$
 ดังนั้น $I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_{TH} + (\beta + 1) R_E} \quad (2.56)$

และ $I_C = \beta I_B \quad (2.57)$

วงจรเอาต์พุต (Output Circuit)

สมการของวงจรหาได้โดย KVL ที่เอาต์พุต ได้สมการดังนี้

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \quad (2.58)$$

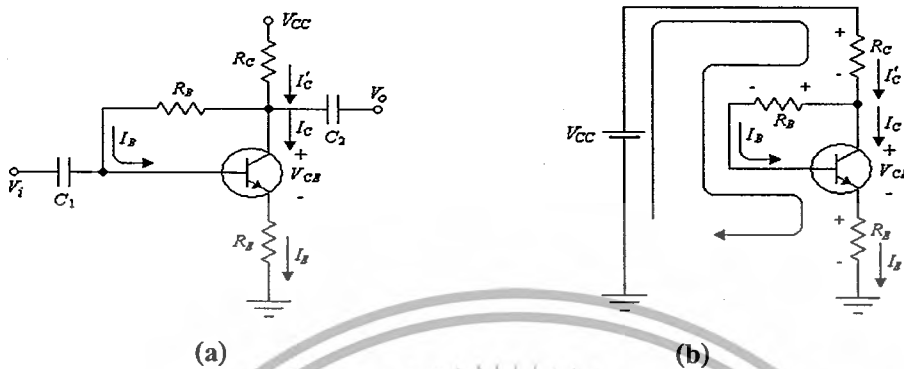
การหาค่า V_C , V_E และ V_B ก็สามารถหาได้เช่นเดียวกับใน วงจรเอาต์พุตของ วงจรแบบรักษาระดับที่ขาอิมิตเตอร์เพราะเป็นวงจรที่มีส่วนประกอบเหมือนกัน

2.3.9 วงจรไบแอสแบบแรงดันป้อนกลับ (DC Bias with Voltage Feedback)

วงจรไบแอสแบบแรงดันป้อนกลับ คือ การจัดวงจรไบแอสที่ขาเบสใหม่ โดยใช้ตัวต้านทานค่าคงที่ต่อคร่อมขาเบสกับขา Collector มีผลให้ระดับแรงดันที่ขาเบสสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตามค่าระดับแรงดันที่ขา Collector เปรียบเสมือนกับเป็นแรงดันป้อนกลับจากเอาต์พุตมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุท วงจรทำงานได้คงที่ต่ออุณหภูมิ การปรับปรุงให้มีเสถียรภาพสามารถทำได้ดังวงจรในรูปที่ 2.54



รูปที่ 2.54 (a) การไบอัสกลับของวงจร DC
(b) วงจรทางด้านอินพุท

วงจรอินพุท (Input Circuit)

สมการของวงจรหาได้ด้วย KVL ที่อินพุทของทรานซิสเตอร์ ได้สมการดังนี้:

$$V_{CC} = I_C R_C + I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \quad (2.59)$$

แทนค่า $I_C = \beta I_B$ และ $I_E \cong I_C$ จะได้

$$V_{CC} = \beta I_B R_C + I_B R_B + V_{BE} + \beta I_B R_E \quad (2.60)$$

หรือ

$$V_{CC} = V_{BE} + I_B R_B + \beta I_B (R_C + R_E)$$

ดังนั้น

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)} \quad (2.61)$$

วงจรเอาต์พุท (Output Circuit)

สมการของวงจรหาได้โดย KVL ที่เอาต์พุท ได้สมการดังนี้

$$V_{CC} = I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C \quad (2.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $I_C \cong I_C$ และ $I_E \cong I_C$ จะได้

$$V_{CC} = V_{CE} + I_C(R_C + R_E) \quad (2.63)$$

เพราะฉะนั้น

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) \quad (2.64)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ GA AMP

จากหลักการของเจเนติกอัลกอริทึมที่มีการถอดรหัสโครโมโซมออกเป็นแบบเฉพาะในแต่ละงาน แต่โดยทั่ว ๆ ไปเรามักจะเห็นการแบ่งโครโมโซมออกเป็นเลขฐาน 2 คือเป็น 0001101010 เป็นต้น เหมือนตัวอย่างในรูปที่ 3.1 จากหลักการนี้ เราจึงได้ดัดแปลงการถอดรหัสนี้มาใช้ในวงจรขยายเสียง ซึ่งใช้ในภาคแรกๆ ของวงจรขยายเสียง โดยทั่วไปมักจะใช้คลาสเอเป็นการขยายเสียงในภาคแรก เนื่องจากเป็นคลาสที่มีลักษณะการขยายสัญญาณที่เต็มรูปคลื่น ทำให้สัญญาณที่ได้ออกมาเกิดความผิดเพี้ยนน้อยที่สุดในบรรดาจำพวกคลาสที่ใช้ในการขยายเสียง

วงจรที่นิยมนำมาออกแบบเป็นวงจรขยายใน คลาสเอ ซึ่งจะมีรูปแบบการต่อวงจรเป็น Common Emitter เนื่องจากว่าเป็น Common ที่มีการขยายได้หลากหลายความถี่ (ความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยิน ได้จะอยู่ที่ 20Hz – 20KHz) สาเหตุที่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากเป็นวงจรที่ออกแบบง่าย และให้เสถียรภาพที่คงที่ วงจรไม่มีความซับซ้อน

และจากที่เจเนติกอัลกอริทึมมีการหาค่า Fitness เพื่อเป็น Generations ต่อไป เราจึงได้ดัดแปลงหลักการนี้โดยการหาค่าการเข้าใกล้อัตราขยายแรงดันของทรานซิสเตอร์ จากค่าที่เรากำหนดเข้าไป ซึ่งหลักการนี้จะเป็นการออกแบบวงจรในขั้นแรกของการออกแบบวงจรเครื่องเสียงที่มีขนาดใหญ่ต่อไป

Flowchart การทำงานของ GA AMP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การทำงานของโปรแกรม

1. เริ่มจากการเลือกโครโมโซมต้นแบบ โดยปกติหากเป็นตามธรรมชาติจะมีโครโมโซมต้นแบบเพียงสองตัวคือ ตัวของพ่อและของแม่แต่ในการทดลองนี้เราจะสร้างโครโมโซมต้นแบบมา 30 ตัว โดยมีการเรียงลักษณะของโครโมโซมตามรูปแบบโครโมโซมของ GA AMP แบบต่างๆ ตามวงจร
2. เมื่อได้โครโมโซมต้นแบบแล้ว ก็ทำการคำนวณหาอัตราการขยายของวงจรแต่ละตัวโดยการใช้หลักการคำนวณตามสูตรการคำนวณของทรานซิสเตอร์และใส่ค่าที่ได้ไปในช่องของ AV
3. ทำการจัดลำดับความสำคัญของโครโมโซมโดยการจัดให้โครโมโซมที่มีค่า AV ใกล้เคียงกับที่ได้กำหนดไว้ให้มีความสำคัญมากที่สุดและตัวที่มีค่า AV ใกล้เคียงกำหนดให้มีความสำคัญน้อยลงตามลำดับเพื่อจะได้มีความน่าจะเป็นในการถูกเลือก (ความน่าจะเป็นในการอยู่รอด) สูง
4. เข้ากระบวนการ Roulette Wheel Selection เพื่อหาโครโมโซมที่มีความน่าจะเป็นในการอยู่รอดมากที่สุดออกมา 30 คู่
5. นำเอาโครโมโซมที่ได้จากการ Selection ทั้งหมดมาทำการครอส โอเวอร์ (Crossover) และมิวเตชัน (Mutation) ตามอัตราการ Selection และอัตราการครอส โอเวอร์ที่ได้ทำการตั้งค่าเอาไว้โดยจะเริ่มทำการครอส โอเวอร์ก่อนเป็นคู่ๆ โดยใช้หลักการสุ่มเป็นตัวเลขออกมาและนำไปเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ของการครอส โอเวอร์ที่ได้กำหนดไว้ เมื่อทำการครอส โอเวอร์จนครบทุกตัวในโครโมโซมหลังจากนั้นก็ให้นำโครโมโซมนั้นไปทำการมิวเตชันโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์มิวเตชันอีกทีก็จะได้โครโมโซมที่เป็น New Generations จำนวน 30 โครโมโซม
6. นำโครโมโซมใหม่ (New Chromosome) ที่ได้ทั้งหมดมาทำการหาค่า AV โดยการใช้สูตรการคำนวณทางทรานซิสเตอร์ เพื่อหาค่า Fitness ออกมา
7. นำโครโมโซมต้นแบบมารวมกับโครโมโซมใหม่
8. ทำการคัดเลือกโครโมโซมที่มีอัตราการขยาย AV ใกล้เคียงกับอัตราการขยาย AV ที่กำหนดไว้ออกมา 30 ตัว เพื่อนำมาเป็นโครโมโซมต้นแบบของรุ่นต่อไป
9. ดูว่าค่าอัตราการขยาย AV ของโครโมโซมที่ดีที่สุดมีค่าคงที่แล้วจึงทำการหยุดการทำงานของเจนติกอัลกอริทึมแต่หากว่าค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นยังไม่คงที่ก็ให้กลับไปทำการหาค่า Fitness ใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยกลับไปทำในขั้นตอนที่ 3 ใหม่อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบ GA Fixed Bias

ในวงจรขยายแบบ Fixed Bias นั้นประกอบไปด้วย ตัวต้านทานสองตัวคือ RB, RC และ ทรานซิสเตอร์ 1 ตัว ดังในรูปที่ 3.2 ส่วน C หรือตัวเก็บประจุนั้นเราจะไม่นำมาคิดในภาค DC เนื่องจาก C นั้นจะเป็นตัวกั้นสัญญาณไฟ DC เพียงเท่านั้น ดังนั้นจึงแบ่งลักษณะโครโมโซมของวงจร Fixed Bias ได้ดังรูปที่ 3.3

1	0	0	1	1
---	---	---	---	---

รูปที่ 3.1 รูปแบบโครโมโซมของ Genetic โดยทั่วไป



รูปที่ 3.2 วงจรขยายแบบ Fixed Bias

	TR#	Hfe	RB	RC	Vcc	AV
	▲	▲	▲	▲	▲	▲
หมายเลขของ	ค่า Hfe ของ					
ทรานซิสเตอร์	ทรานซิสเตอร์			แรงดันที่จ่าย		อัตราขยาย
				ให้กับวงจร		ของวงจร

รูปที่ 3.3 รูปแบบโครโมโซมของ GA Fixed Bias

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

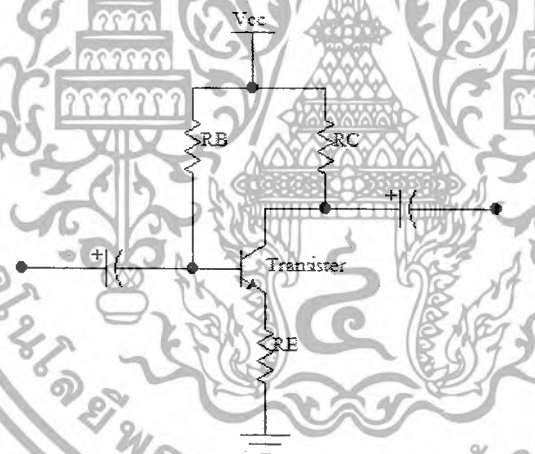
ในการทดลองนี้จะขอเรียกโครโมโซมของ Fixed Bias นี้ว่า CM Fix เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ และเพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างโครโมโซมโดยทั่วไปกับโครโมโซมของวงจรขยายทรานซิสเตอร์

เมื่อกดเริ่มโปรแกรม โปรแกรมจะทำการสุ่มข้อมูลจากฐานข้อมูลที่ได้เก็บเอาไว้ขึ้นมา โดยจะดึงข้อมูลของหมายเลขทรานซิสเตอร์ RB และ RC ขึ้นมา ส่วนค่าของ Vcc นั้นจะได้มาจากการป้อนค่าในตอนเริ่มโปรแกรม โดยที่โปรแกรมจะทำการสุ่มโครโมโซมขึ้นมาจำนวน 30 ชุด (30 Chromosomes)

โดยค่าอัตรา Fitness ของ CM Fix นั้นจะได้มาจากสูตรการคำนวณหาอัตราขยายแรงดันของ Fixed Bias จากนั้นโปรแกรมก็จะเข้าสู่กระบวนการของ GA AMP ต่อไป

3.3 การออกแบบ GA Emitter Stabilized Bias

ในวงจรขยายเสียงแบบอิมิตเตอร์นั้นประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์ 1 ตัว, ความต้านทาน RB, RC และ RE ดังรูปที่ 3.4 ดังนั้นโครโมโซมของวงจรขยายเสียงแบบ Emitter Stabilized Bias ซึ่งจะขอเรียกว่า CM Em จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 วงจรขยายแบบ Emitter Stabilized Bias

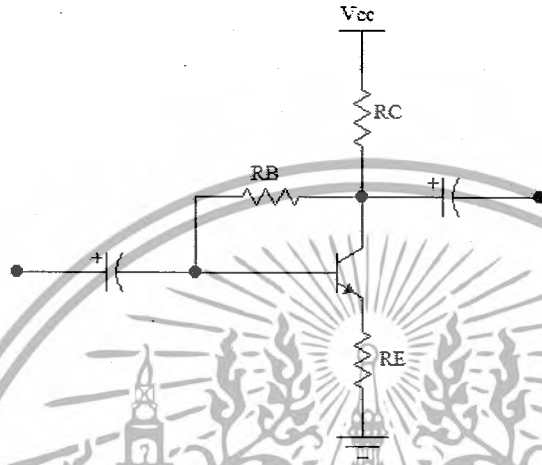
	TR#	Hfe			Vcc	AV	
		▲	▲	▲	▲	▲	
หมายเลขของ ทรานซิสเตอร์	ค่า Hfe ของ ทรานซิสเตอร์	RB	RC	RE	แรงดันที่จ่าย ให้กับวงจร	อัตราขยาย ของวงจร	

รูปที่ 3.5 รูปแบบ โครโมโซมของ GA Em

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบ GA Voltage Feedback Bias

วงจรขยายเสียงแบบ Voltage Feedback Bias นั้นจะประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์ 1 ตัว, ความต้านทาน R_B , R_C และ R_E ดังในรูปที่ 3.6 และเมื่อนำมาจัดเรียงให้อยู่รูปของ โครโมโซมและขอเรียกชื่อว่า CM VOFE ก็จะได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 วงจรขยายแบบ Voltage Feedback Bias

TR# Hfe RB RC RE แรงดันที่จ่ายให้กับวงจร AV อัตราการขยายของวงจร

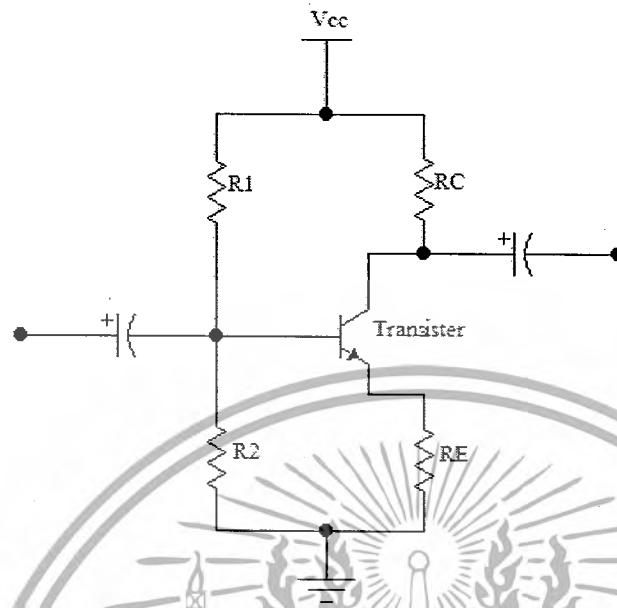
หมายเลขของ ทรานซิสเตอร์ ค่า Hfe ของ ทรานซิสเตอร์

รูปที่ 3.7 รูปแบบโครโมโซมของ GA CM VOFE

3.5 การออกแบบ GA Voltage Divider Bias

วงจรขยายสัญญาณแบบ Voltage Divider Bias เป็นวงจรที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากที่สุดเนื่องจากเป็นวงจรที่ออกแบบได้ง่ายและมีเสถียรภาพในการทำงานดีที่สุด และมีอัตราความผิดพลาดน้อย วงจรประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ 1 ตัว, ความต้านทาน R_1 , R_2 , R_C และ R_E ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และจากวงจรดังกล่าวก็จะสามารถจัดวางโครโมโซมได้ดังรูปที่ 3.9 และขอเรียกโครโมโซมนี้ว่า GA CM VODI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 วงจรขยายแบบ Voltage Divider Bias

TR# Hfe Vcc AV

หมายเลขของ ค่า Hfe ของ R1 R2 RC RE แรงดันที่จ่าย อัตราการขยาย

ทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์ ให้กับวงจร ของวงจร

รูปที่ 3.9 รูปแบบโครโมโซมของ GA CM VODI

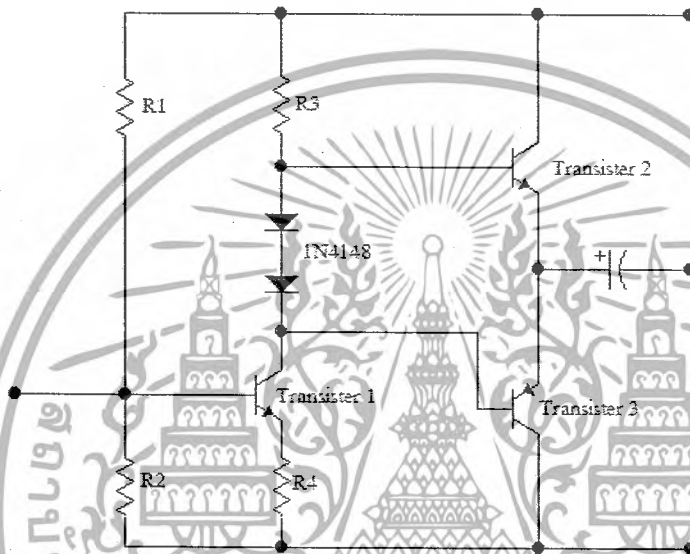
3.6 การออกแบบ GA Direct-coupled

ในวงจรขยายแบบ Direct-coupled นั้นจะมีความซับซ้อนอยู่ตรงที่ว่าต้องขยายสัญญาณ 2 ครั้ง ซึ่งในครั้งแรกนั้นจะทำการขยายใน คลาสเอ และทำการขยายอีกครั้งใน class B แต่ทำการขยายทีละครั้ง คลื่น และนำมาต่อกันทางภาค OUTPUT ในการขยายลักษณะนี้ก็จะทำให้สามารถขยายสัญญาณได้มากขึ้นแต่ก็จะมีข้อเสียอยู่ตรงที่การนำสัญญาณกลับมาต่อกันนั้นอาจจะทำให้ไม่ติดกันเป็นคลื่นชวยเวปได้ และในวงจรนี้โดยปกติการใช้งานนั้นจะต้องผู้ที่ทำการต่อวงจรเป็นผู้ปรับความต้านทานให้เหมาะสมกับตัวทรานซิสเตอร์อีกทีจึงทำให้การออกแบบวงจรนี้มีความยุ่งยากในการใช้งานอยู่บ้าง

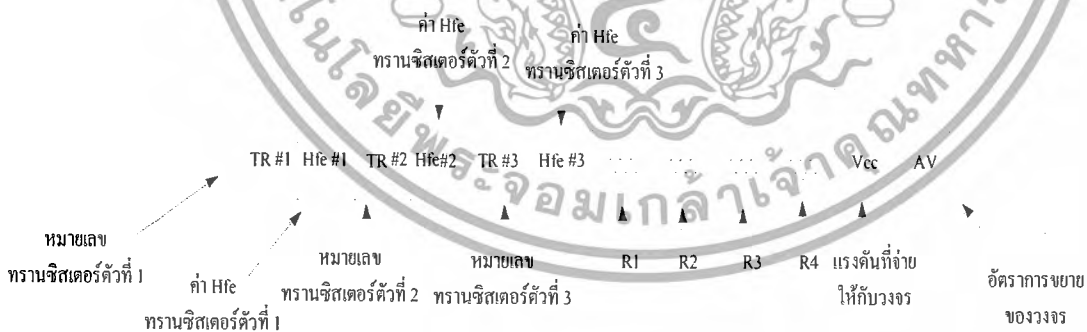
วงจรขยาย Direct-coupled ประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์จำนวน 3 ตัว โดยที่ทรานซิสเตอร์ตัวที่ 1 จะเป็นตัวขยายสัญญาณในครั้งแรกในคลาสเอ และส่งให้ทรานซิสเตอร์ตัวที่ 2 และ ตัวที่ 3 ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายกันคนละครั้งคลื่นแล้วนำกลับมารวมกันทาง OUTPUT และวงจรขยายแบบ Direct-coupled ยังประกอบด้วยความต้านทาน R1, R2, R3 และ R4 ดังในรูปที่ 3.10 จากรูปดังกล่าวเราสามารถนำค่าต่างๆ มาจัดเรียงให้อยู่ในรูปของโครโมโซมได้ดังรูปที่ 3.11 ส่วนไดโอดนั้นเราไม่นำเข้ามาอยู่ในโครโมโซม เนื่องจากว่าเป็นค่ามาตรฐานที่วงจรนี้ต้องใช้เบอร์นี้หรือเบอร์ที่ตอบสนองความถี่ได้สูงๆเพื่อรักษาเสถียรภาพของวงจรเอาไว้ และขอเรียกโครโมโซมนี้ว่า CM DI



รูปที่ 3.10 วงจรขยายแบบ Voltage Direct-coupled



รูปที่ 3.11 รูปแบบโครโมโซมของ GA CM DI

เมื่อเราได้ทำการออกแบบตัวโครโมโซมแล้ว เราก็สามารถนำโครโมโซมเหล่านี้ไปเข้ากระบวนการของเจเนติกอัลกอริทึมตาม Flowchart การทำงานของ GA AMP และได้เขียนโปรแกรมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานในลักษณะตาม Flowchart ออกมาเป็นโปรแกรม GA AMP V.1.1 ซึ่งจะมีผลการทดลองใน
บทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

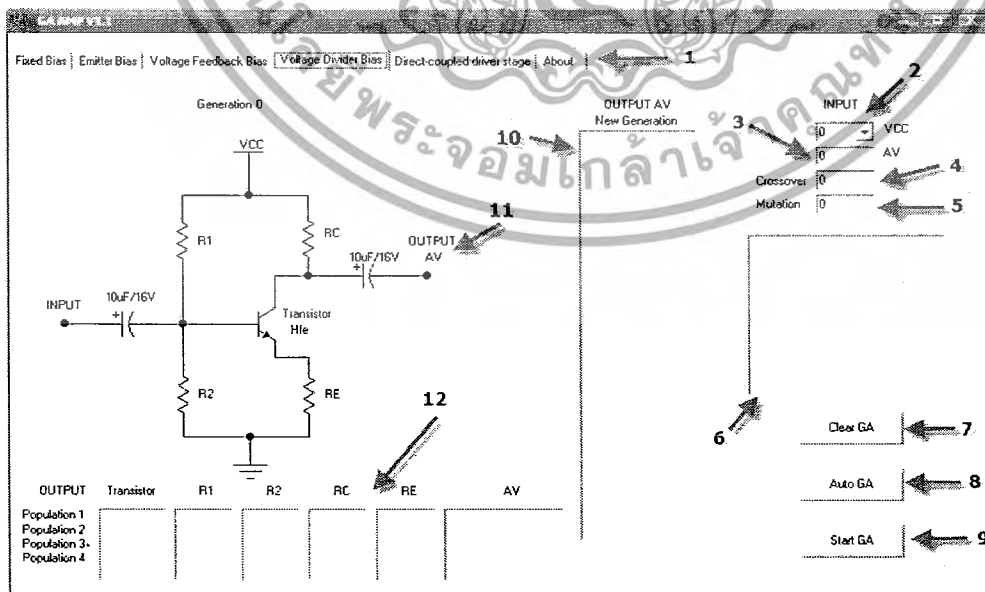
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

จากที่ได้กล่าวมาในบทต่างๆข้างต้นก็ได้นำมาเขียนเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับค้นหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในวงจรขยายเสียงขนาดเล็ก GA AMP V1.1 ขึ้นมาและเพื่อเป็นการเทียบความสามารถของโปรแกรมว่าสามารถขยายสัญญาณได้จริงจึงได้มีการทดลองนำผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม GA AMP V1.1 นี้มาทดลองต่อวงจรและวัดแรงดันไฟ กระแส และรูปคลื่นสัญญาณ โดยการใช้โปรแกรม Simulate ทางอิเล็กทรอนิกส์ Electronics Workbench V.10 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้ว่าเป็นที่ยอมรับได้หรือไม่

4.1 รูปร่างหน้าตาของโปรแกรม GA AMP V.1.1

รูปที่ 4.1 เป็นรูปของโปรแกรมขณะยังไม่ได้ทำงาน โดยจะมีช่องสำหรับเลือกวงจรขยายช่องใส่แรงดันไฟให้กับวงจร ช่องสำหรับใส่อัตราการขยาย AV ช่องใส่เปอร์เซ็นต์ Crossover และช่องใส่อัตรา เมื่อทำการป้อนค่าที่ต้องการเข้าไปแล้วก็กดปุ่ม Start GA โปรแกรมก็จะเริ่มทำงานตาม Flowchart การทำงาน ของ GA AMP จากข้อ 1 ไปจนถึงข้อ 3 จากนั้นจะรอรับคำสั่งอีกครั้งหนึ่งหากกดปุ่ม Next Generations โปรแกรมก็จะทำจากข้อ 3 ไปหยุดที่ข้อ 8 เพื่อรอรับคำสั่งอีกครั้งว่าจะให้หา GA AMP ในรุ่นต่อไปหรือไม่ หากกดปุ่ม Next Generations อีกครั้งก็จะเป็นการหา รุ่นต่อไปของ GA AMP จนกว่าจะได้ค่าที่ต้องการแล้วหรือได้ค่าที่ผู้ใช้คิดว่าดีที่สุดแล้ว



รูปที่ 4.1 รูปร่างหน้าตาของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Tab ใช้สำหรับเลือกวงจรขยาย
2. VCC INPUT ช่องสำหรับรับค่าแรงดันที่ต้องการจ่ายให้กับวงจร
3. AV INPUT ช่องสำหรับรับค่าอัตราขยายที่ต้องการได้จากวงจร
4. Crossover INPUT ช่องสำหรับรับค่าอัตราการ Crossover ให้กับโครโมโซม
5. Mutation INPUT ช่องสำหรับรับค่าอัตราการ Mutation ให้กับโครโมโซม
6. ช่องสำหรับแสดงค่าแรงดันและกระแสตามจุดต่างๆของวงจรที่ดีที่สุดที่ได้จากการกระทำของ GA AMP
7. Clear ปุ่มกดเมื่อต้องการ clear การคำนวณทั้งหมดของโปรแกรมเมื่อต้องการป้อนค่าใหม่
8. Auto GA ปุ่มกดเพื่อให้ GA AMP ทำงานแบบอัตโนมัติ เป็นจำนวน 100 รอบการทำงาน
9. Start ปุ่มกดเมื่อต้องการให้ GA AMP เริ่มการทำงาน หรือเมื่อต้องการหา Generations ต่อไป
10. AV 1-30 ช่องสำหรับการแสดงผลการคำนวณค่าอัตราการขยายของ AV ของโครโมโซมทั้ง 30 ตัว
11. รูปวงจร เป็นตัวที่จะแสดงรูปครต่อวงจรและการวางค่าของอุปกรณ์ โดยจะเลือกเอาตัวที่มีอัตราการขยายที่มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้ป้อนเข้าไปก่อนการ RUN โปรแกรม
12. Monitor GA AMP หน้าต่างแสดงผลของ โครโมโซมร ที่ดีที่สุด 4 ตัวจาก โครโมโซมทั้งหมด 30 ตัว

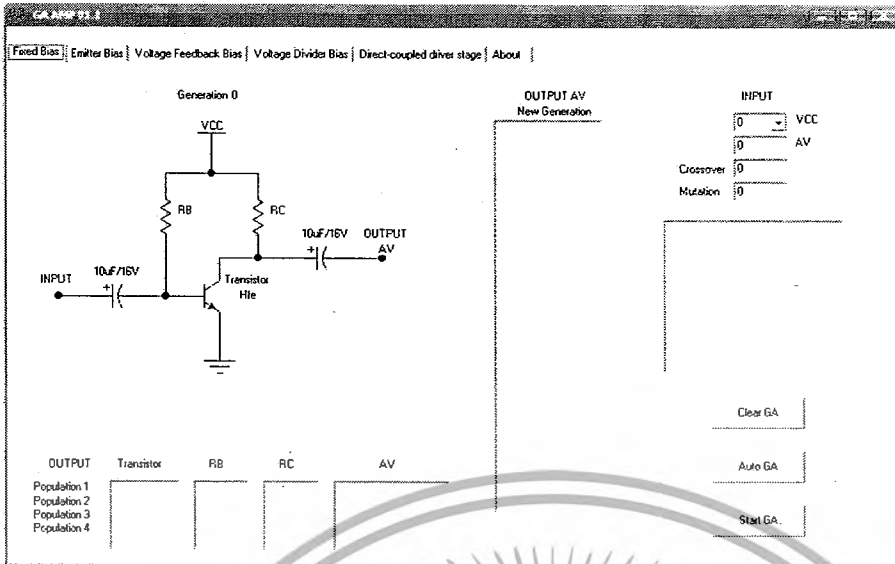
4.2 การทดลอง

จากการออกแบบและเขียน โปรแกรมออกแบบเครื่องขยายเสียงขนาดเล็ก ในการทดลองของวงจร Fixed Bias, Emitter Stabilized Bias, Voltage Feedback Bias และ Voltage Divider Bias นั้นจะใช้แรงดัน 9V และ 15V เนื่องจากเป็นแรงดันค่าที่เป็นกลางและนิยมใช้กันมากที่สุด ในวงจรขยายเสียงขนาดเล็ก โดยจะทำการทดลองที่อัตราขยาย AV ที่ 10 เท่าและ 50 เท่า ส่วนวงจร Direct-coupled นั้นเนื่องจากเป็นวงจรที่ให้อัตราขยายที่มากดังนั้นจึงจะใช้แรงดัน 12V และ 24V ในการทดลอง ส่วนอัตราขยายนั้นจะอยู่ที่ AV 50 เท่า และ 100 เท่า

4.2.1 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias

จากการออกแบบและเขียน โปรแกรมออกแบบเครื่องขยายเสียงขนาดเล็ก จะมีรูปร่างหน้าตาของโปรแกรมและรูปของโปรแกรมหาดังรูปที่ 4.2

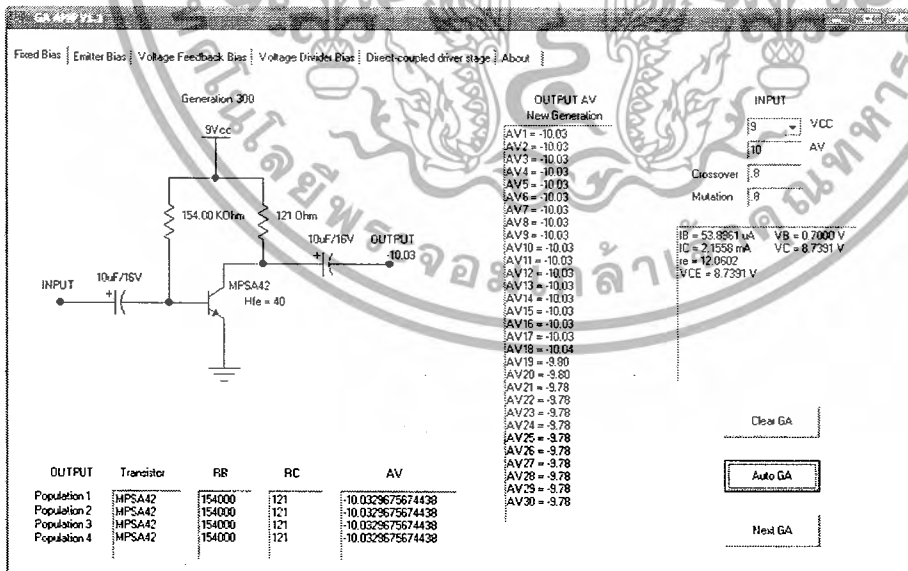
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Fixed Bias

4.2.1.1 การทดลอง GA AMP หักวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 1

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมาคือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA42 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -10.03 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 154K\Omega$, $R_C = 121\Omega$ ดังรูปที่ 4.3

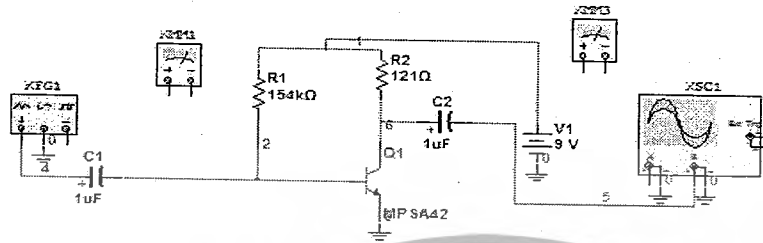


รูปที่ 4.3 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.4 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 รูปการต่อวงจร Fixed Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

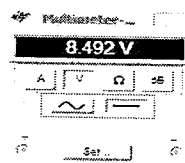
รูปที่ 4.5 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 662.412 mV DC ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

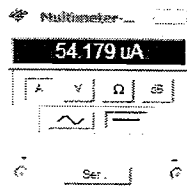
จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 8.492 V DC ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

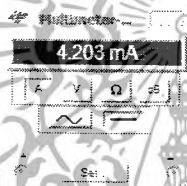
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดแรงดัน I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 54.179 μA ดังรูปที่ 4.8



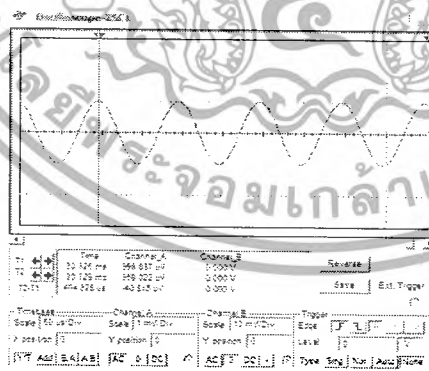
รูปที่ 4.8 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน I_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 4.203 mA ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

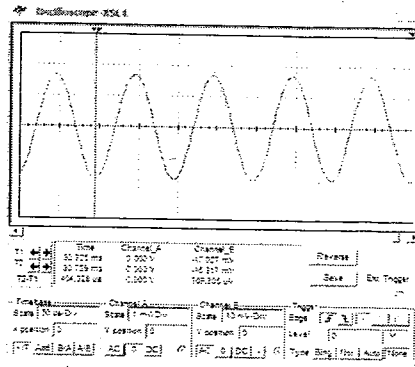
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 998.837 $\mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

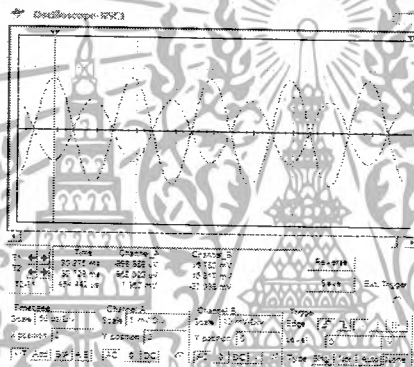
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -17.027 mV P ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็ จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.12

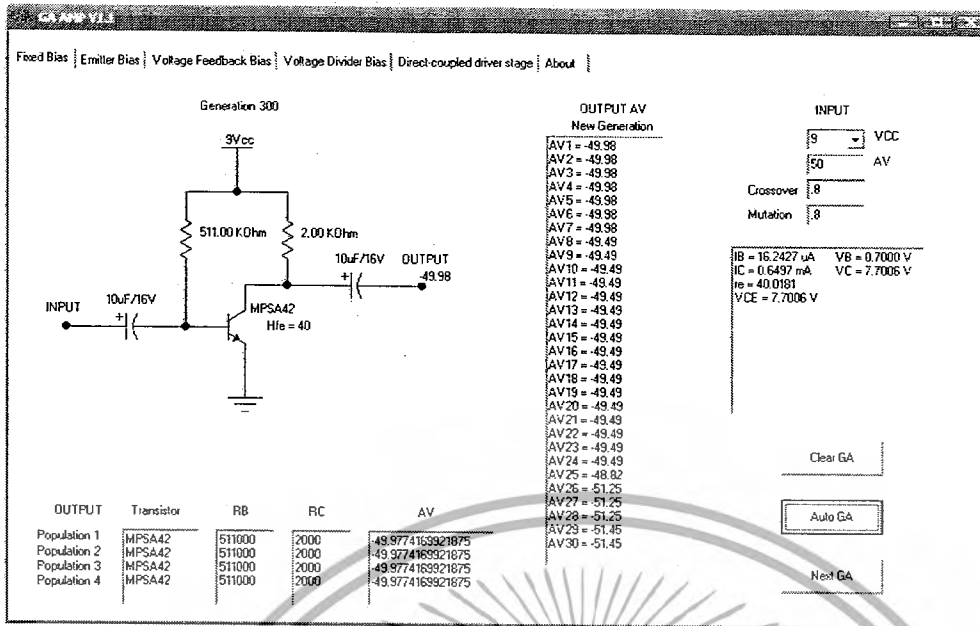


รูปที่ 4.12 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.1.2 การทดลอง GA AMP หากำวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 2

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA42 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -49.98 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 511K\Omega$, $R_C = 2K\Omega$ ดังรูปที่ 4.13

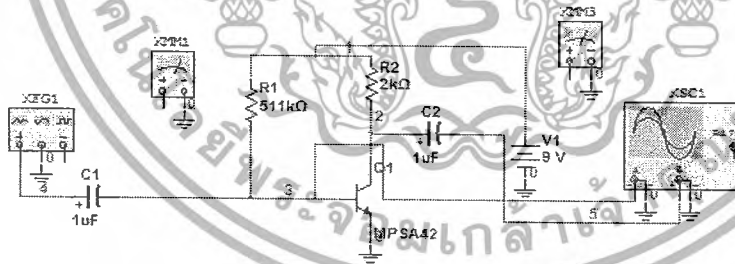
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



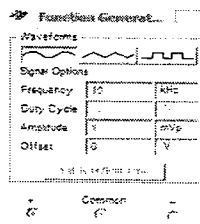
รูปที่ 4.13 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.14 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลอ่ยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mv (เนื่องจากเสียงที่มนุษย์ได้ยิน คือช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 Hz – 20 KHz) ดังรูปที่ 4.15



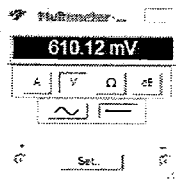
รูปที่ 4.14 รูปการต่อวงจร Fixed Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10



รูปที่ 4.15 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 610.12 mV DC ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.16 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 7.727 V DC ดังรูปที่ 4.17



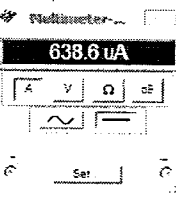
รูปที่ 4.17 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 16.542 μ A ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน I_B ของวงจร

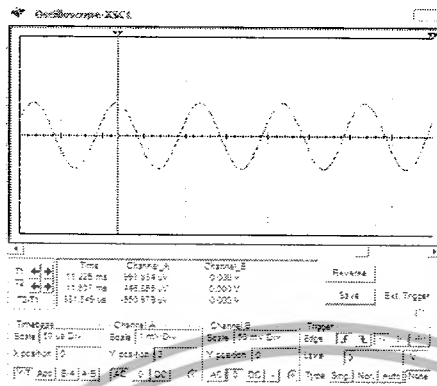
จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 6.386 μ A ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

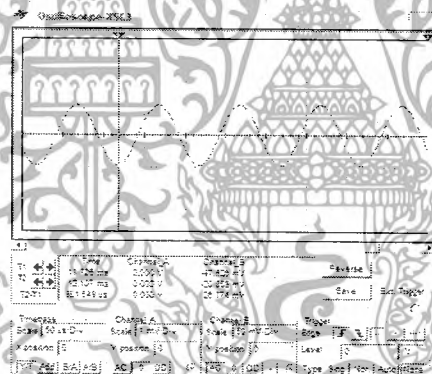
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ $997.834 \mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

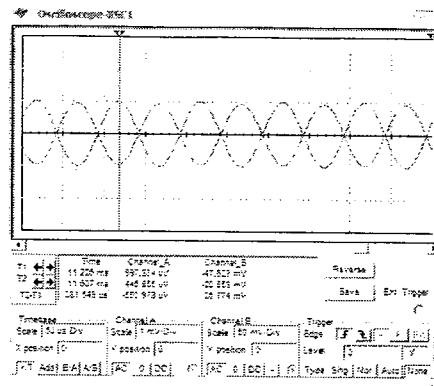
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ออสซิลโลสโคป วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -47.626 mV P ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็ จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.22

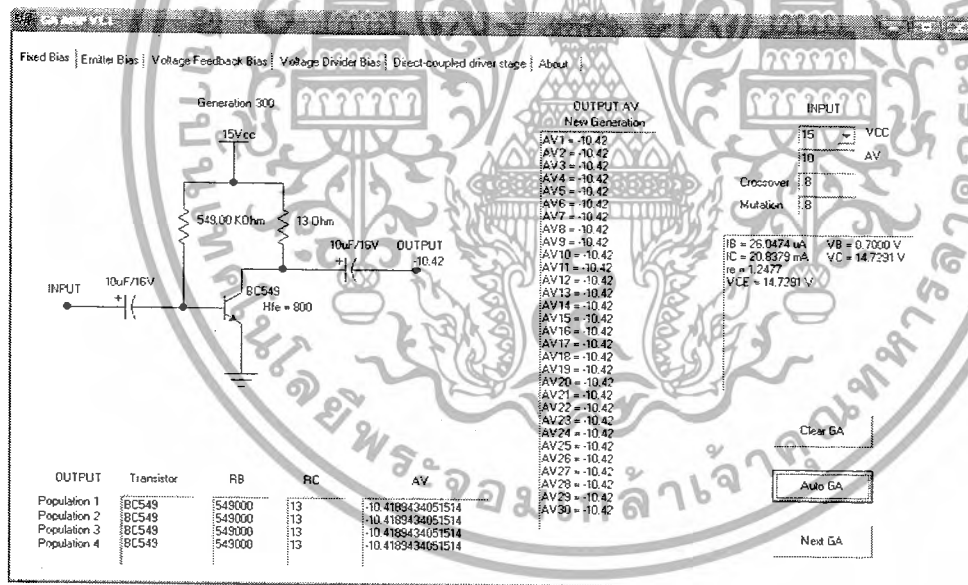
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.1.3 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 3

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15 V และอัตราขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมาคือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC549 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -10.42 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 549K\Omega$, $R_C = 13\Omega$ ดังรูปที่ 4.23

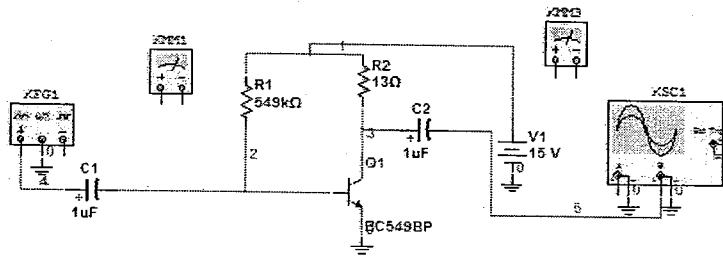


รูปที่ 4.23 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.24 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลั๊กสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.25

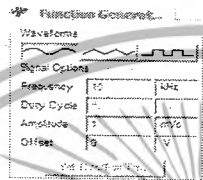
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 รูปการต่อวงจร Fixed Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

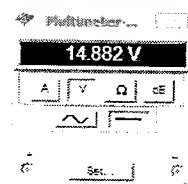
รูปที่ 4.25 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 697.864 mV DC ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

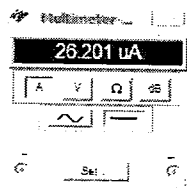
จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 14.882 V DC ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 26.201 μA ดังรูปที่ 4.28



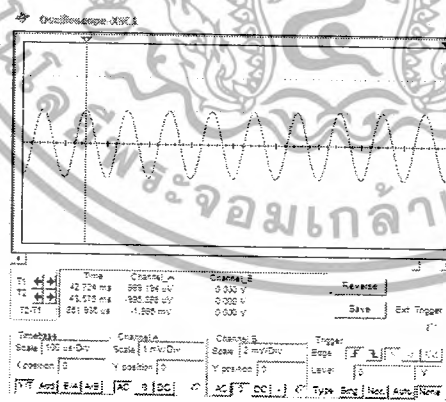
รูปที่ 4.28 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 9.145 mA ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

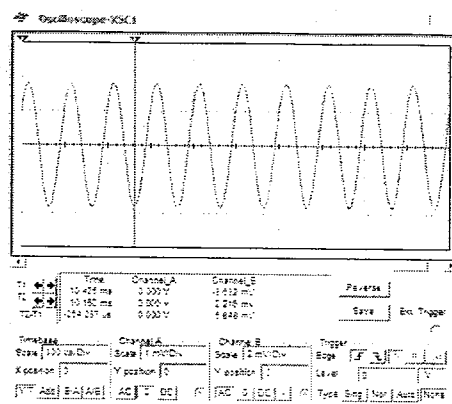
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 999.194 $\mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

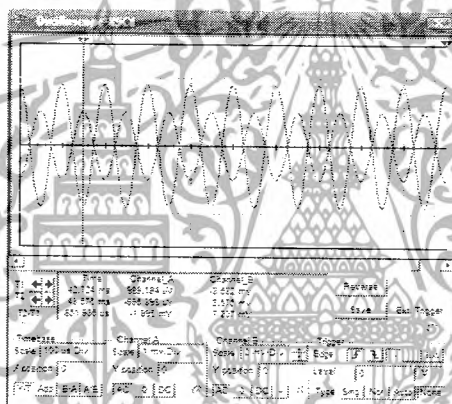
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -3.632 mV P ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.32

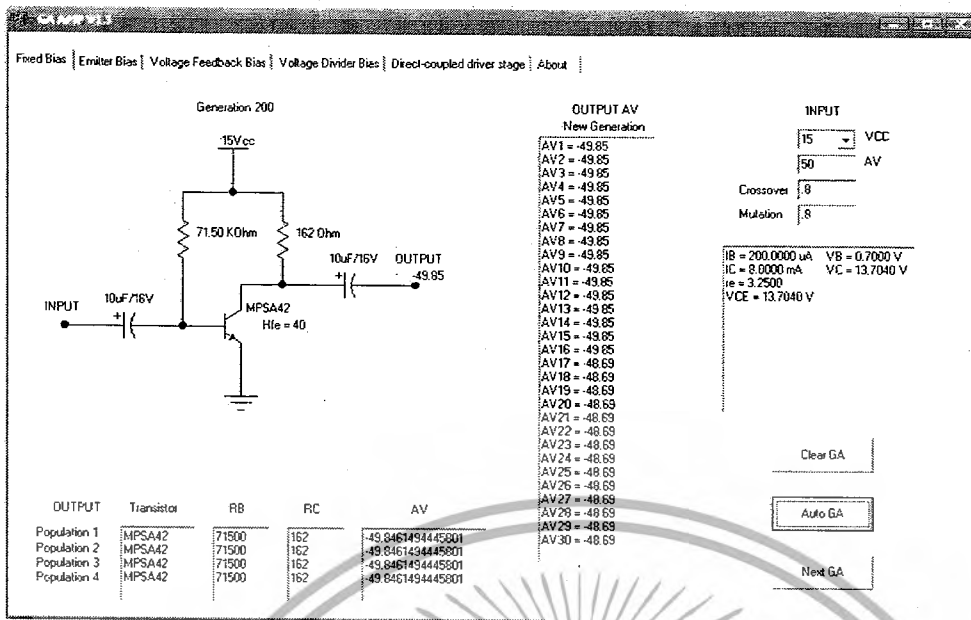


รูปที่ 4.32 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.1.4 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Fixed Bias ครั้งที่ 4

ในการทดลองนี้เราได้ทำการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA42 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -49.85 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 71.50K\Omega$, $R_C = 162K\Omega$ ดังรูปที่ 4.33

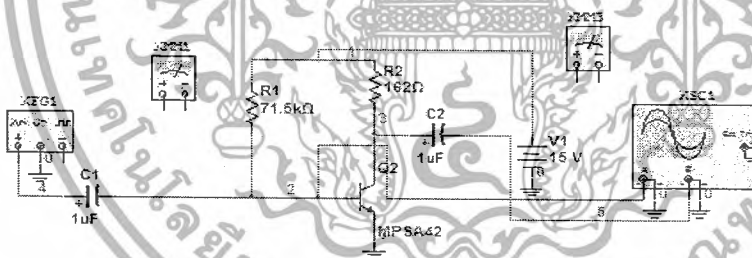
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



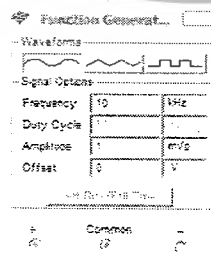
รูปที่ 4.33 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้น ได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.34 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลั๊กสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.35



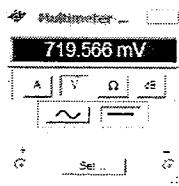
รูปที่ 4.34 รูปการต่อวงจร Fixed Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10



รูปที่ 4.35 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 719.566 mV DC ดังรูปที่ 4.36



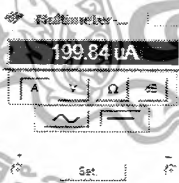
รูปที่ 4.36 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 11.275 V DC ดังรูปที่ 4.37



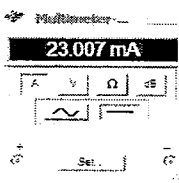
รูปที่ 4.37 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 199.84 μ A ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

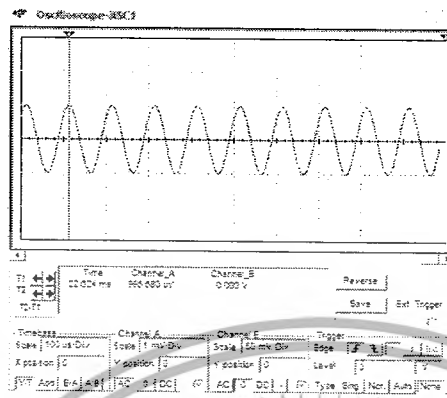
จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 23.007 mA ดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

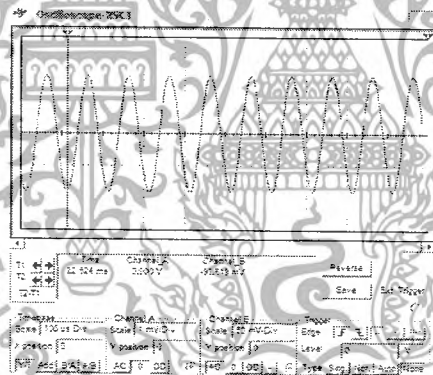
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ $995.680 \mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

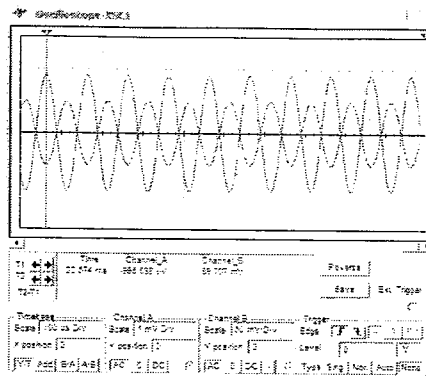
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ออสซิลโลสโคป วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -90.519 mV P ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.42

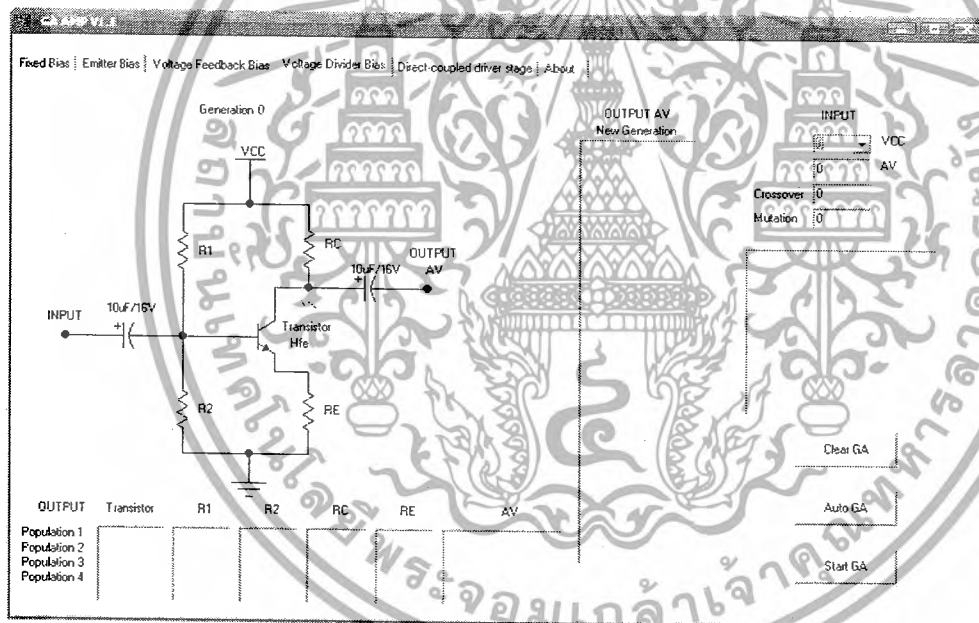
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.2 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Voltage Divider Bias

จากการออกแบบและเขียนโปรแกรมออกแบบเครื่องขยายเสียงขนาดเล็ก จะมีรูปร่างหน้าตาของโปรแกรมและรูปของโปรแกรมดังรูปที่ 4.43

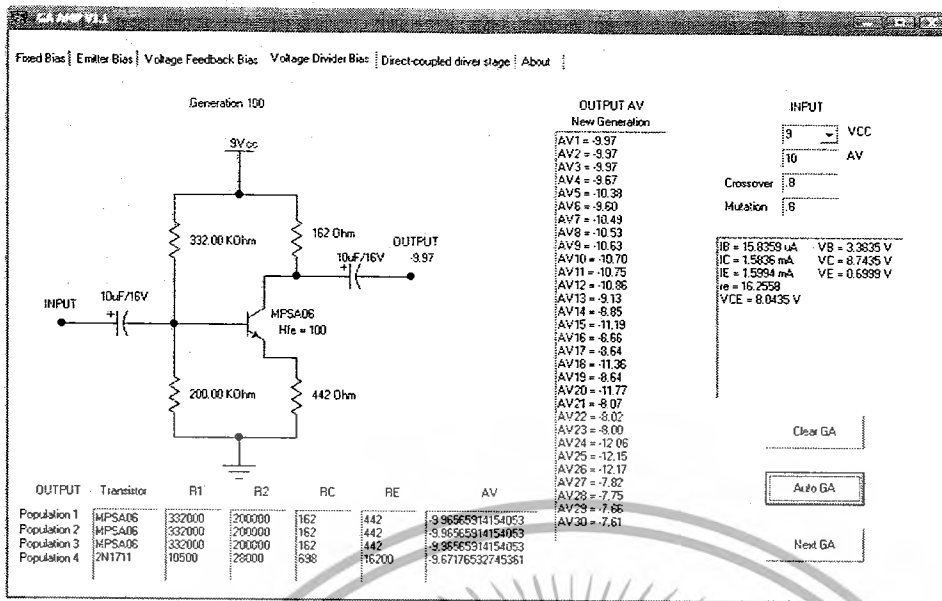


รูปที่ 4.43 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Voltage Divider Bias

4.2.2.1 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Voltage Divider Bias ครั้งที่ 1

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA06 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -9.97 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_1 = 332K\Omega$, $R_2 = 200K\Omega$, $R_C = 162\Omega$, $R_E = 442K\Omega$ ดังรูปที่ 4.44

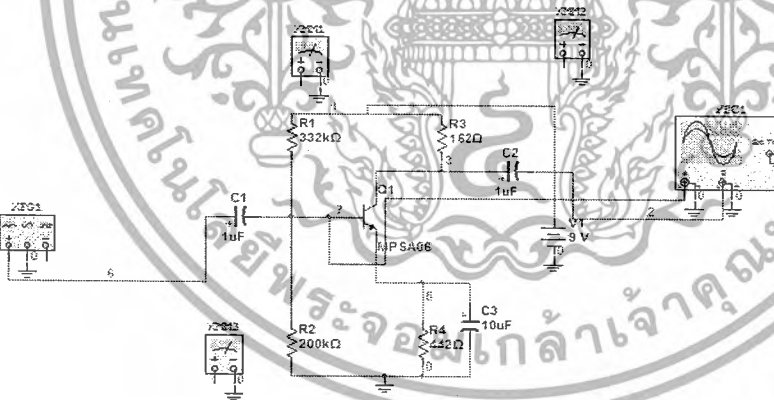
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



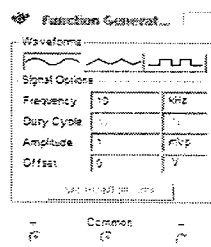
รูปที่ 4.44 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้วงจรดังรูปที่ 4.45 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.46



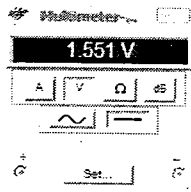
รูปที่ 4.45 รูปการต่อวงจร Voltage Divider Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10



รูปที่ 4.46 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

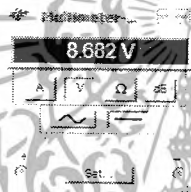
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 1.551 V DC ดังรูปที่ 4.47



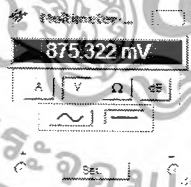
รูปที่ 4.47 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 8.682 V DC ดังรูปที่ 4.48



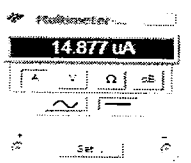
รูปที่ 4.48 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 875.322 mV DC ดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

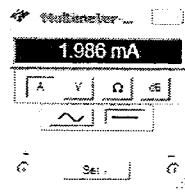
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 14.877 μ A ดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

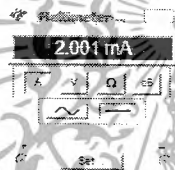
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.986 mA ดังรูปที่ 4.51



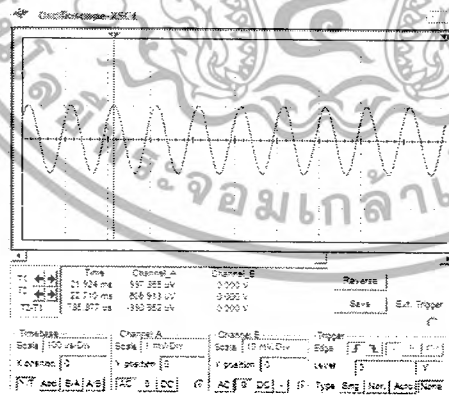
รูปที่ 4.51 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 2.001 mA ดังรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

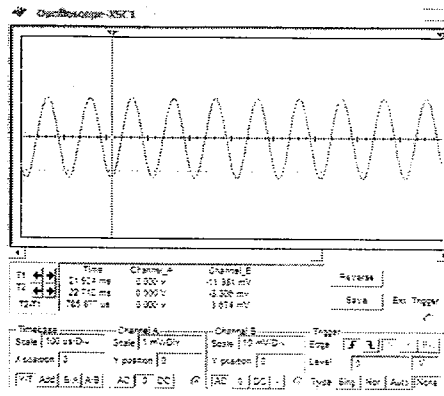
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 997.865 μ V P ดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

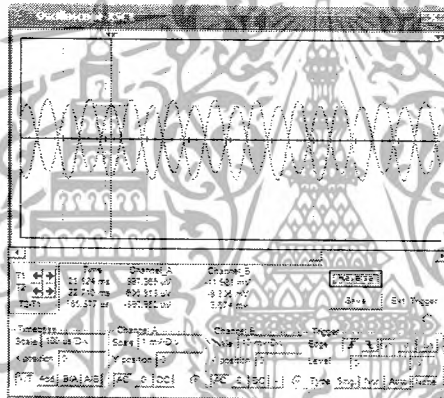
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -11.981 mV P ดังรูปที่ 4.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.54 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะทำให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.55

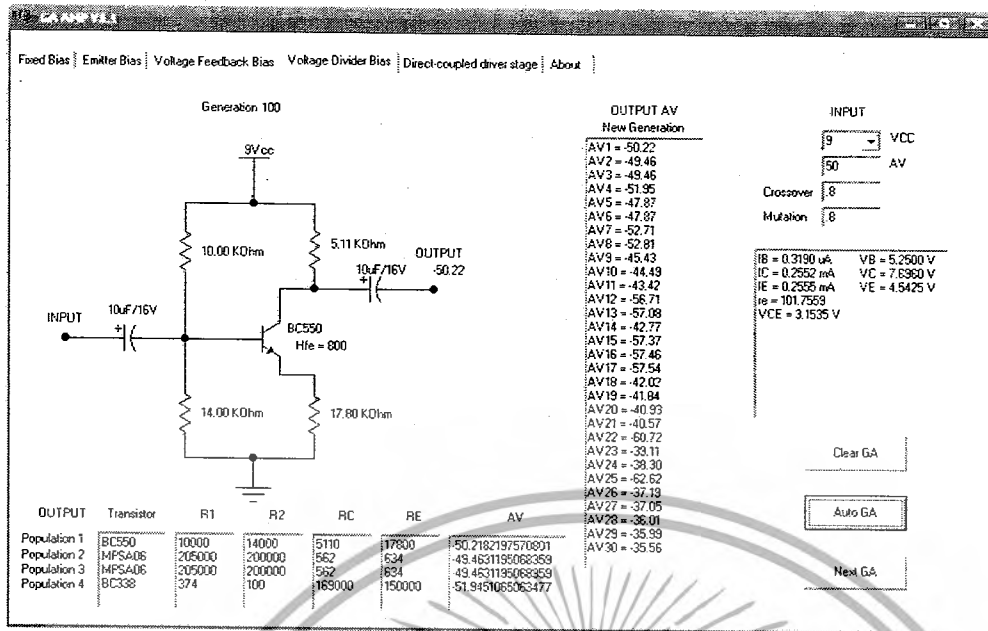


รูปที่ 4.55 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.2.2 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Voltage Divider Bias ครั้งที่ 2

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมาคือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC550 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -10.03 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_1 = 10K\Omega$, $R_2 = 14K\Omega$, $R_C = 5.11K\Omega$, $R_E = 17.8K\Omega$ ดังรูปที่ 4.56

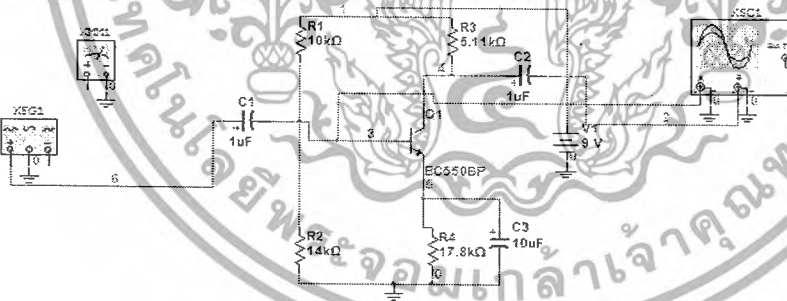
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



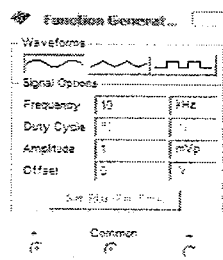
รูปที่ 4.56 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.57 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV รูปที่ 4.58



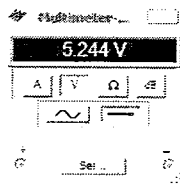
รูปที่ 4.57 รูปการต่อวงจร Voltage Divider Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10



รูปที่ 4.58 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 5.244 mV DC ดังรูปที่ 4.59



รูปที่ 4.59 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 7.673 V DC ดังรูปที่ 4.60



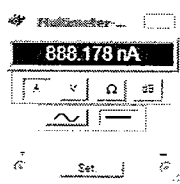
รูปที่ 4.60 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 4.641 V DC ดังรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.61 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

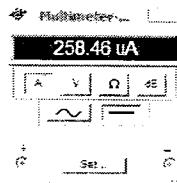
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 888.178 nA ดังรูปที่ 4.62



รูปที่ 4.62 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

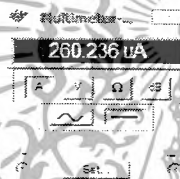
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 258.46 μA ดังรูปที่ 4.63



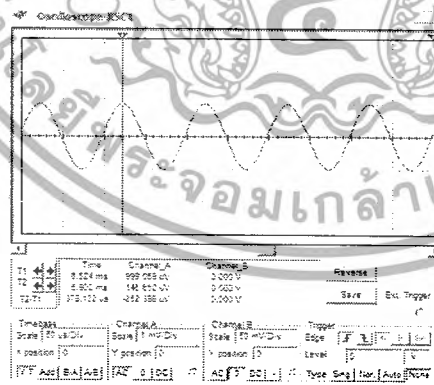
รูปที่ 4.63 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 260.236 μA ดังรูปที่ 4.64



รูปที่ 4.64 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

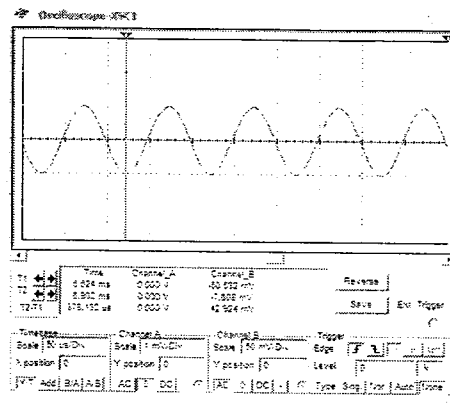
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 999.059 $\mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.65



รูปที่ 4.65 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

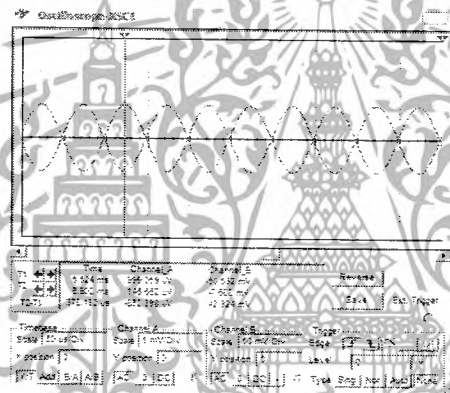
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -50.532 mV P ดังรูปที่ 4.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.66 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็ให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.67

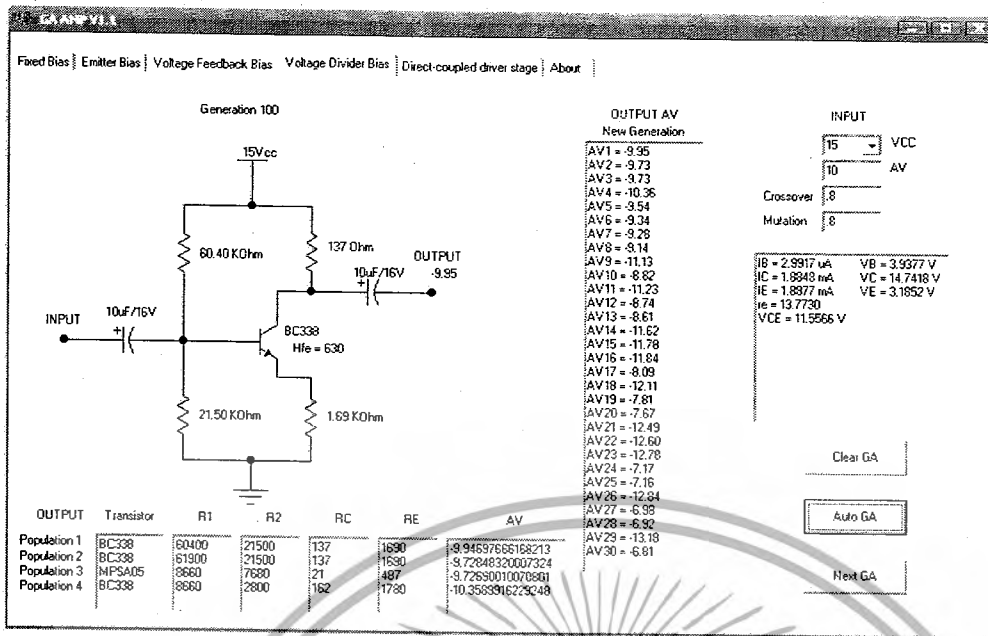


รูปที่ 4.67 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.2.3 การทดลอง GA AMP ทดลองวงจร Voltage Divider Bias ครั้งที่ 3

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15 V และอัตราขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมาคือใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC338 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -9.95 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_1 = 60.4K\Omega$, $R_2 = 21.5K\Omega$, $R_C = 137\Omega$, $R_E = 1.69K\Omega$ ดังรูปที่ 4.68

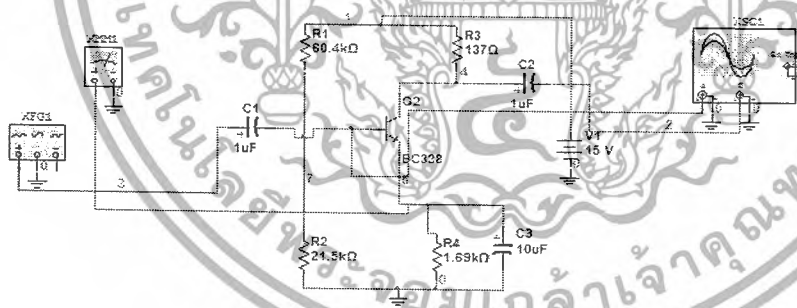
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



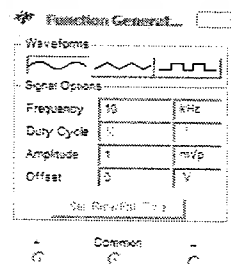
รูปที่ 4.68 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้น ได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.69 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.70



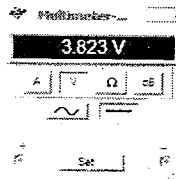
รูปที่ 4.69 รูปการต่อวงจร Voltage Divider Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10



รูปที่ 4.70 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 3.823 V DC ดังรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 14.741 V DC ดังรูปที่ 4.72



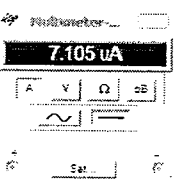
รูปที่ 4.72 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 3.211 mV DC ดังรูปที่ 4.73



รูปที่ 4.73 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

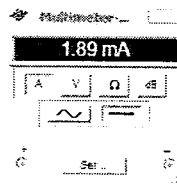
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 7.105 μ A ดังรูปที่ 4.74



รูปที่ 4.74 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

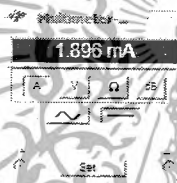
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.89 mA ดังรูปที่ 4.75



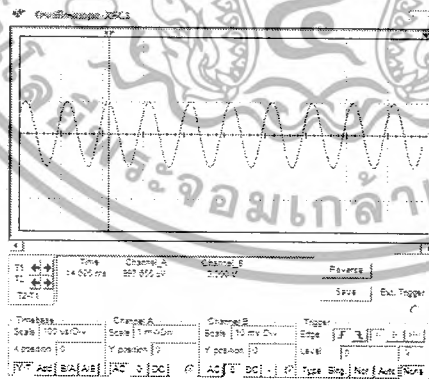
รูปที่ 4.75 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.896 mA ดังรูปที่ 4.76



รูปที่ 4.76 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

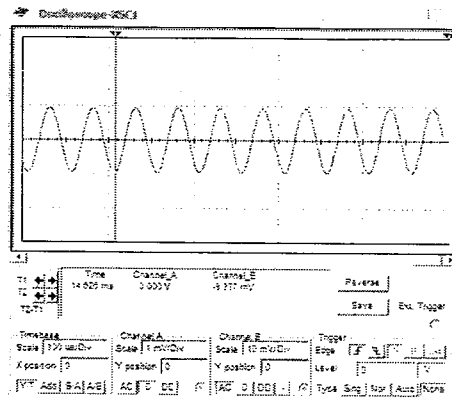
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 997.655 μV P ดังรูปที่ 4.77



รูปที่ 4.77 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

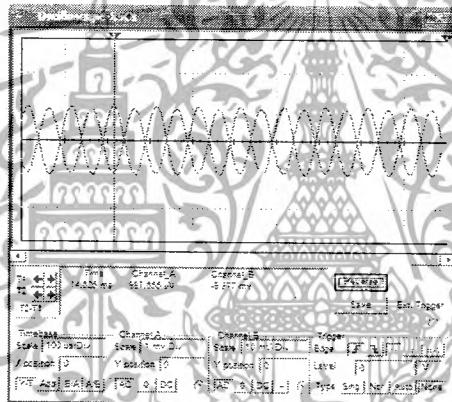
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -9.377 mV P ดังรูปที่ 4.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.78 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็ จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.79

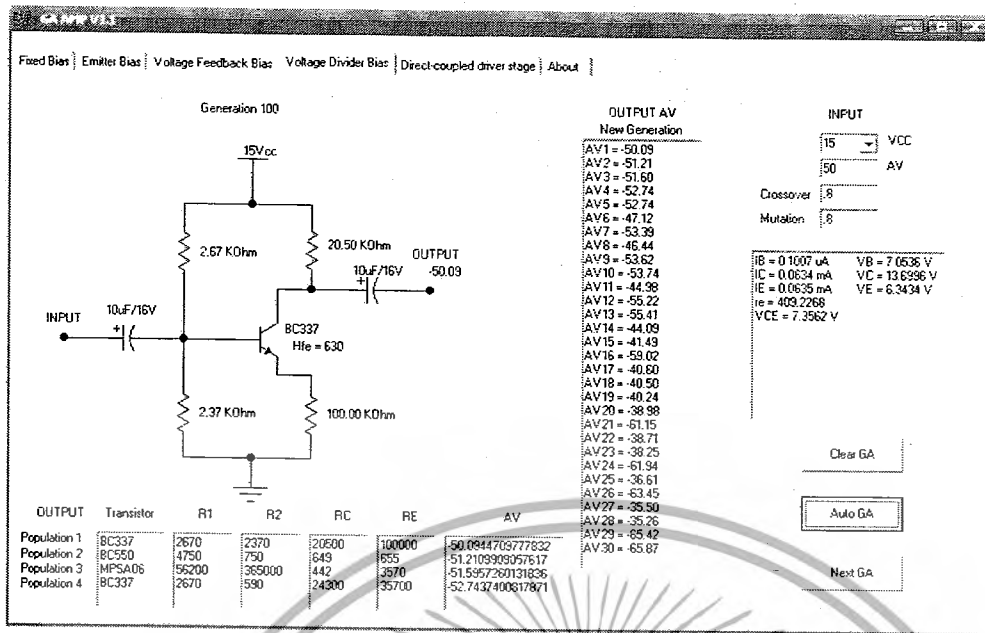


รูปที่ 4.79 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.2.4 การทดลอง GA AMP ทาค้าวจร Voltage Divider Bias ครงที่ 4

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC337 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -50.09 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_1 = 2.67K\Omega$, $R_2 = 2.37K\Omega$, $R_C = 20.5K\Omega$, $R_E = 100K\Omega$ ดังรูปที่ 4.80

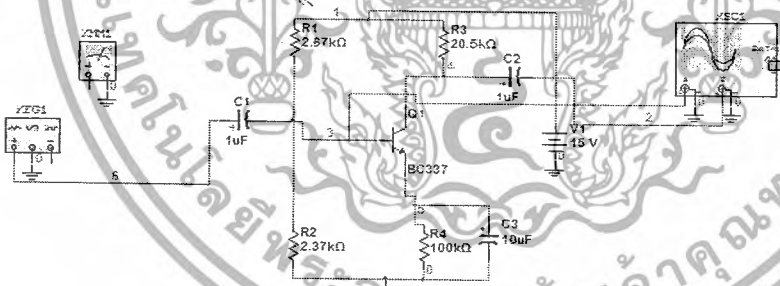
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



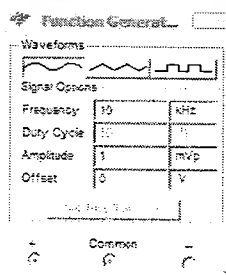
รูปที่ 4.80 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้น ได้อัจฉกร์รูปที่ 4.81 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลต๋อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงแต้น Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.82



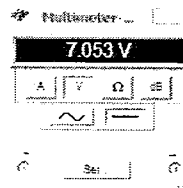
รูปที่ 4.81 รูปการต่อวงจร Voltage Divider Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10



รูปที่ 4.82 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 7.053 V DC ดังรูปที่ 4.83



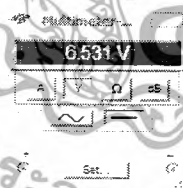
รูปที่ 4.83 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 13.667 V DC ดังรูปที่ 4.84



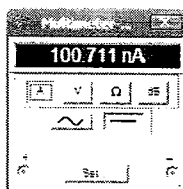
รูปที่ 4.84 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 6.531 V DC ดังรูปที่ 4.85



รูปที่ 4.85 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

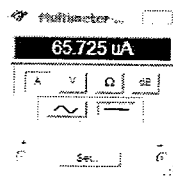
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 100.711 nA ดังรูปที่ 4.86



รูปที่ 4.86 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

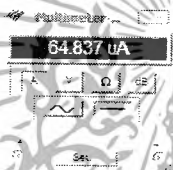
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 65.725 μA ดังรูปที่ 4.87



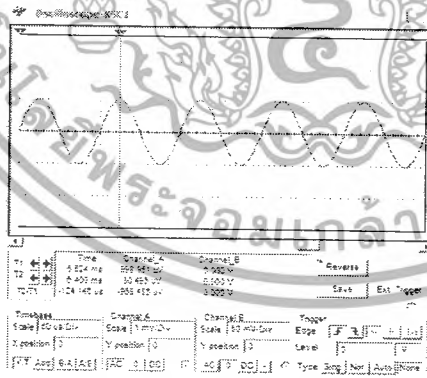
รูปที่ 4.87 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 64.837 μA ดังรูปที่ 4.88



รูปที่ 4.88 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

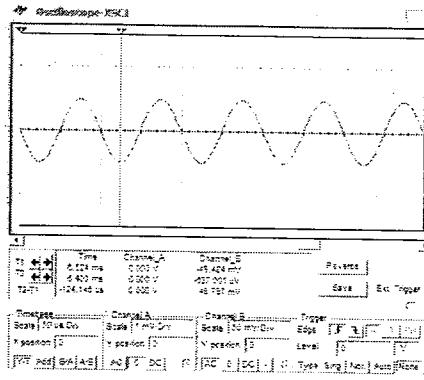
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 998.951 $\mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.89



รูปที่ 4.89 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

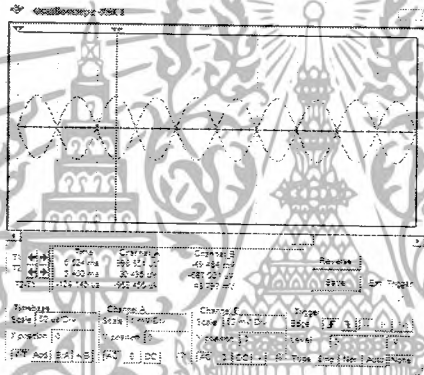
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -49.484 mV P ดังรูปที่ 4.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.90 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะทำให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.91

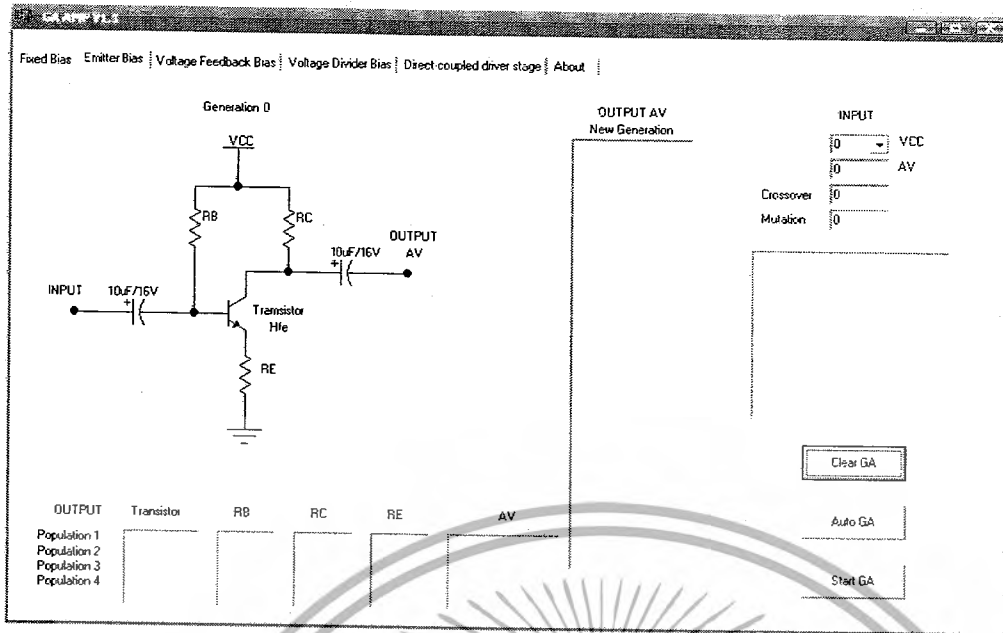


รูปที่ 4.91 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.3 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Emitter Bias

จากการออกแบบและเขียนโปรแกรมออกแบบเครื่องขยายเสียงขนาดเล็ก จะมีรูปร่างหน้าตาของโปรแกรมและรูปของโปรแกรมดังรูปที่ 4.92

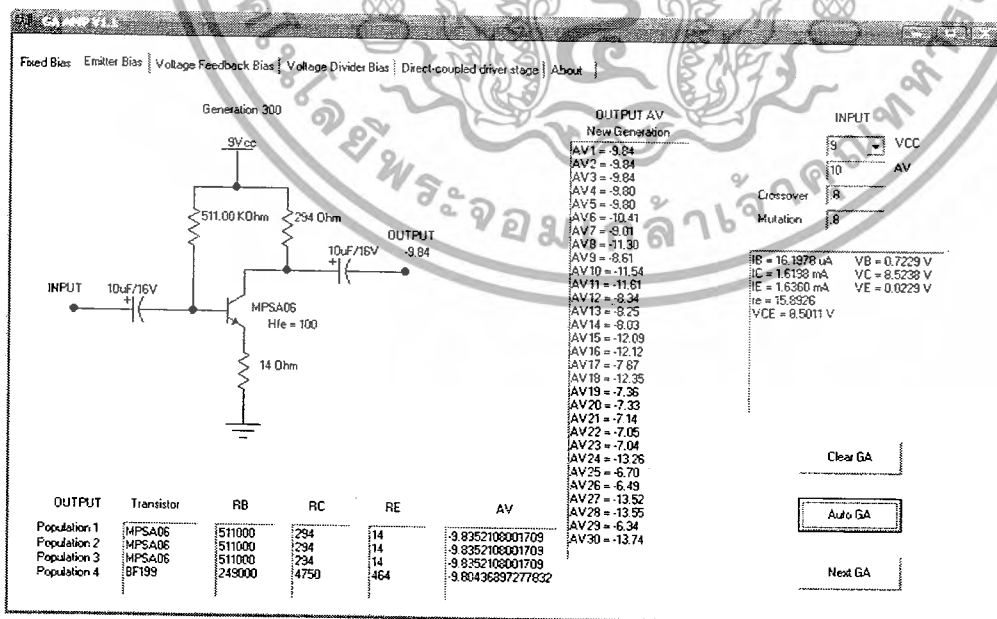
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.92 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Emitter Bias

4.2.3.1 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Emitter Bias ครั้งที่ 1

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ให้ทราบหีสเตอร์เบอร์ MPSA06 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -9.84 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 511K\Omega$, $R_C = 294\Omega$, $R_E = 14K\Omega$ ดังรูปที่ 4.93

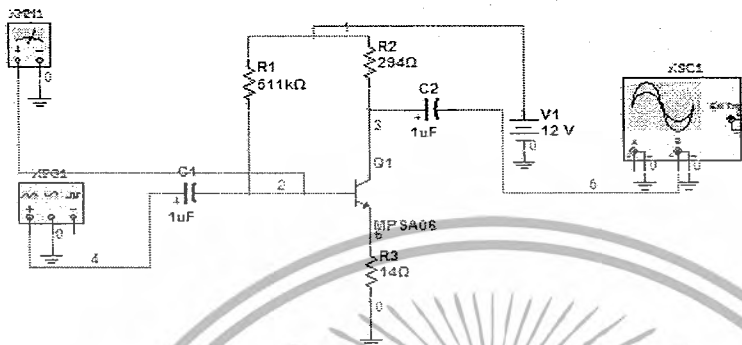


รูปที่ 4.93 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

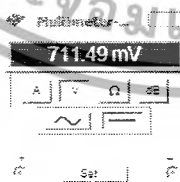
การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.94 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลั๊กสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.95



รูปที่ 4.94 รูปการต่อวงจร Emitter Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

รูปที่ 4.95 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

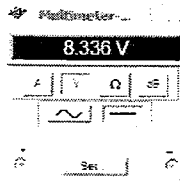
เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 711.49 mV DC ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.96 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

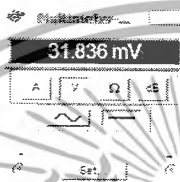
จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 8.336 V DC ดังรูปที่ 4.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



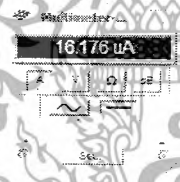
รูปที่ 4.97 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน VC ของวงจร

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 31.836 mV DC ดังรูปที่ 4.98



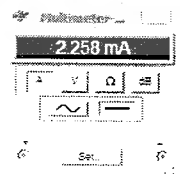
รูปที่ 4.98 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 16.176 μ A ดังรูปที่ 4.99



รูปที่ 4.99 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

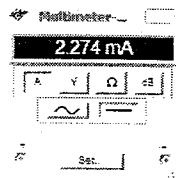
จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 2.258 mA ดังรูปที่ 4.100



รูปที่ 4.100 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

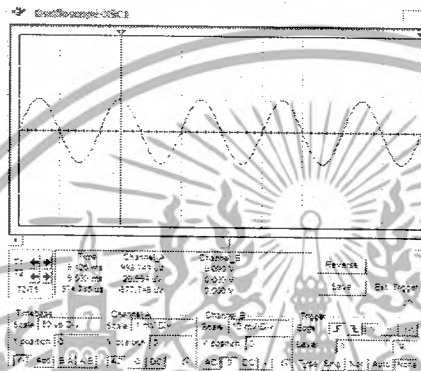
จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.113 mA ดังรูปที่ 4.101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



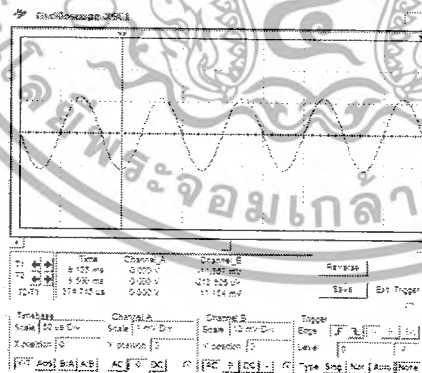
รูปที่ 4.101 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัดสามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 998.734 μV P ดังรูปที่ 4.102



รูปที่ 4.102 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

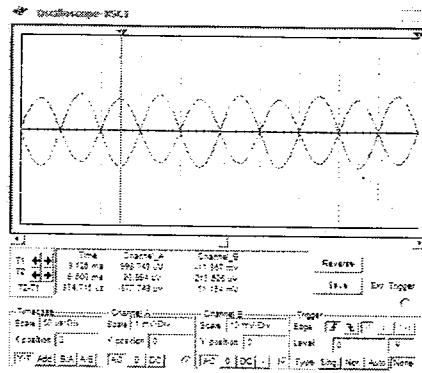
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัดสามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -11.367 mV P ดังรูปที่ 4.103



รูปที่ 4.103 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.104

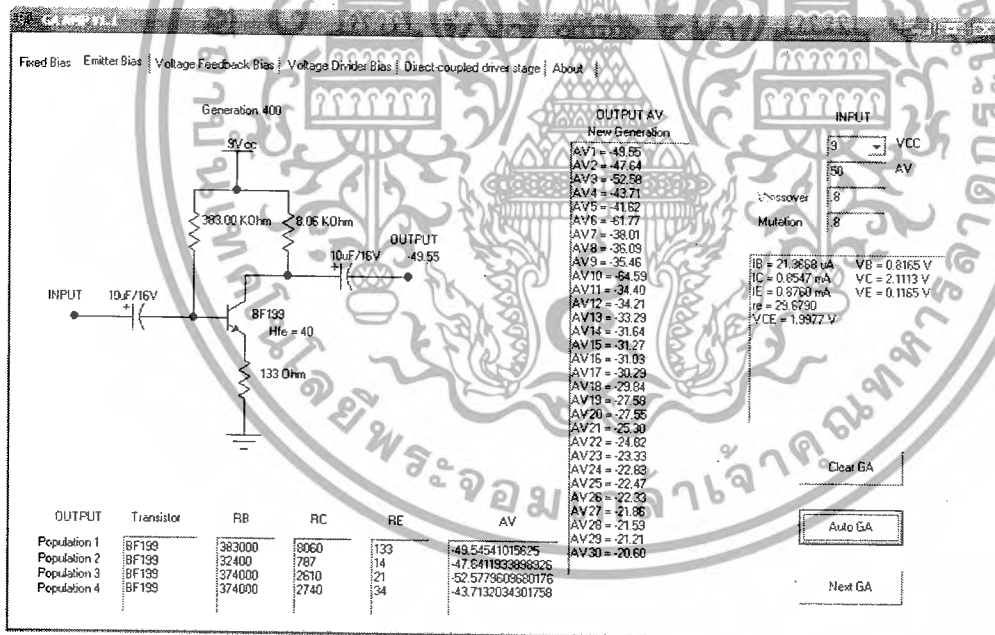
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.104 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.3.2 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Emitter Bias ครั้งที่ 2

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมาคือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA42 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -49.55 เท้า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 383K\Omega$, $R_C = 8.06K\Omega$, $R_E = 133\Omega$ ดังรูปที่ 4.105

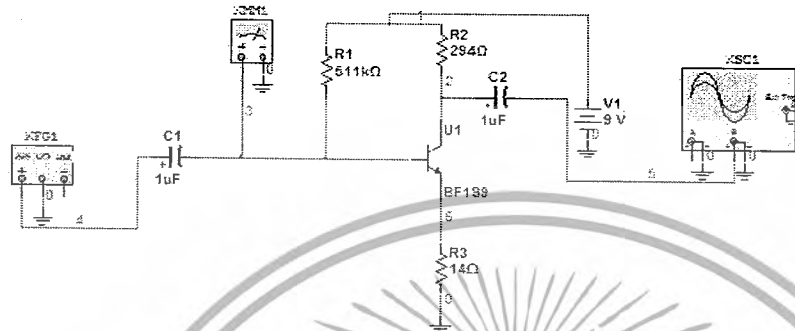


รูปที่ 4.105 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

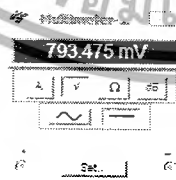
การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.106 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mv (เนื่องจากเสียงที่มนุษย์ได้ยิน คือช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 Hz – 20 KHz) ดังรูปที่ 4.107



รูปที่ 4.106 รูปการต่อวงจร Emitter Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

รูปที่ 4.107 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

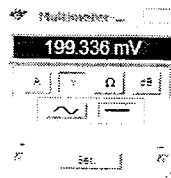
เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 793.475 mV DC ดังรูปที่ 4.108



รูปที่ 4.108 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

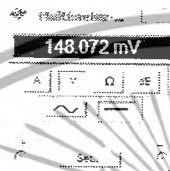
จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 199.336 V DC ดังรูปที่ 4.109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.109 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน VC ของวงจร

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 148.072 mV DC ดังรูปที่ 4.110



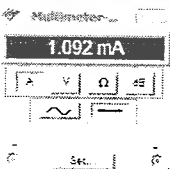
รูปที่ 4.110 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 21.538 μ A ดังรูปที่ 4.111



รูปที่ 4.111 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

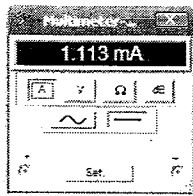
จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.092 mA ดังรูปที่ 4.112



รูปที่ 4.112 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

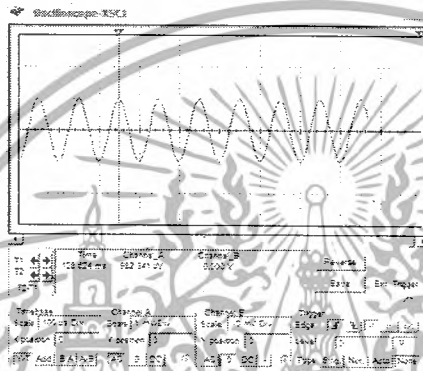
จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.113 mA ดังรูปที่ 4.113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



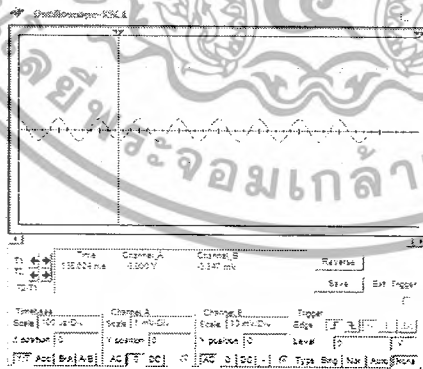
รูปที่ 4.113 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ $982.341 \mu V P$ ดังรูปที่ 4.114



รูปที่ 4.114 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

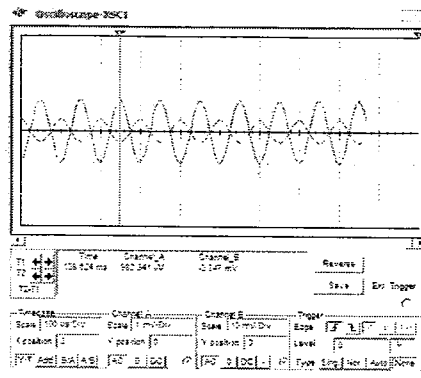
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ออสซิลโลสโคป วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ $-3.347 mV P$ ดังรูปที่ 4.115



รูปที่ 4.115 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะทำให้เห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.116

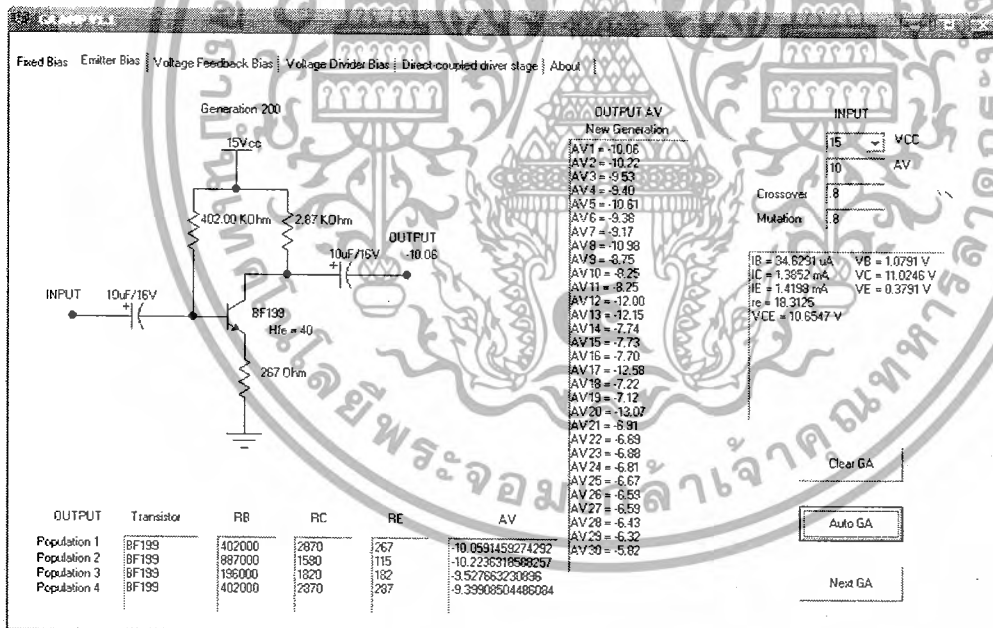
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.116 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.3.3 การทดลอง GA AMP ทดลองวงจร Emitter Bias ครั้งที่ 3

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15 V และอัตราการขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมาคือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BF119 อัตราการขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -10.06 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 402K\Omega$, $R_C = 2.87K\Omega$, $R_E = 267\Omega$ ดังรูปที่ 4.117

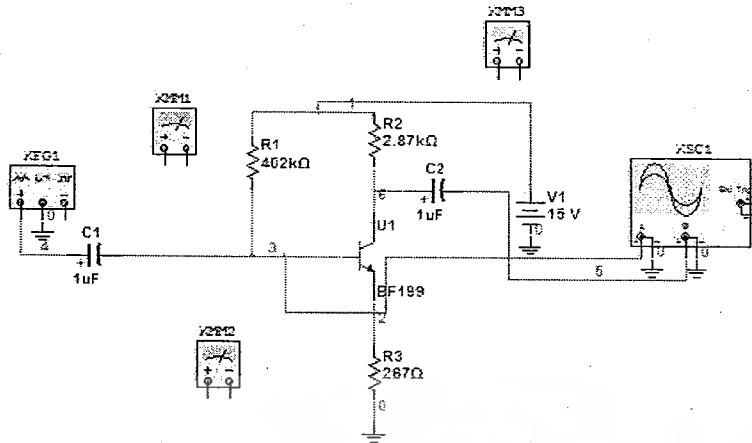


รูปที่ 4.117 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.118 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.119

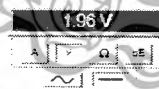
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.118 รูปการต่อวงจร Emitter Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

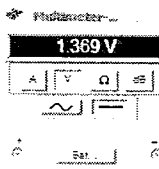
รูปที่ 4.119 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 1.96 V DC ดังรูปที่ 4.120



รูปที่ 4.120 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

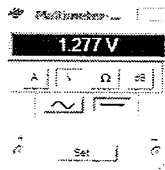
จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 1.369 V DC ดังรูปที่ 4.121



รูปที่ 4.121 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 1.277 V DC ดังรูปที่ 4.122



รูปที่ 4.122 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 32.196 μ A ดังรูปที่ 4.123



รูปที่ 4.123 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 4.749 ดังรูปที่ 4.124



รูปที่ 4.124 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

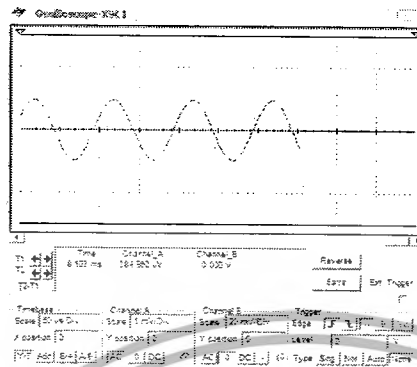
จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 4.782 mA ดังรูปที่ 4.125



รูปที่ 4.125 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

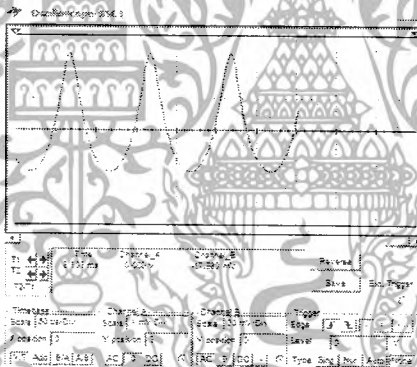
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ $384.962 \mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.126



รูปที่ 4.126 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

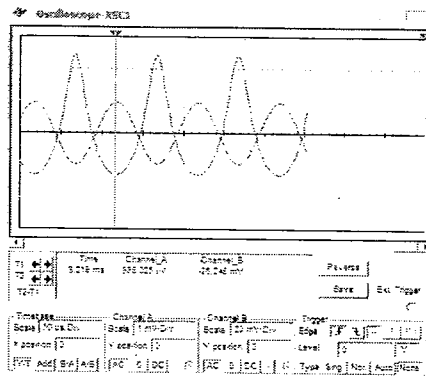
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -17.980 mV P ดังรูปที่ 4.127



รูปที่ 4.127 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.128

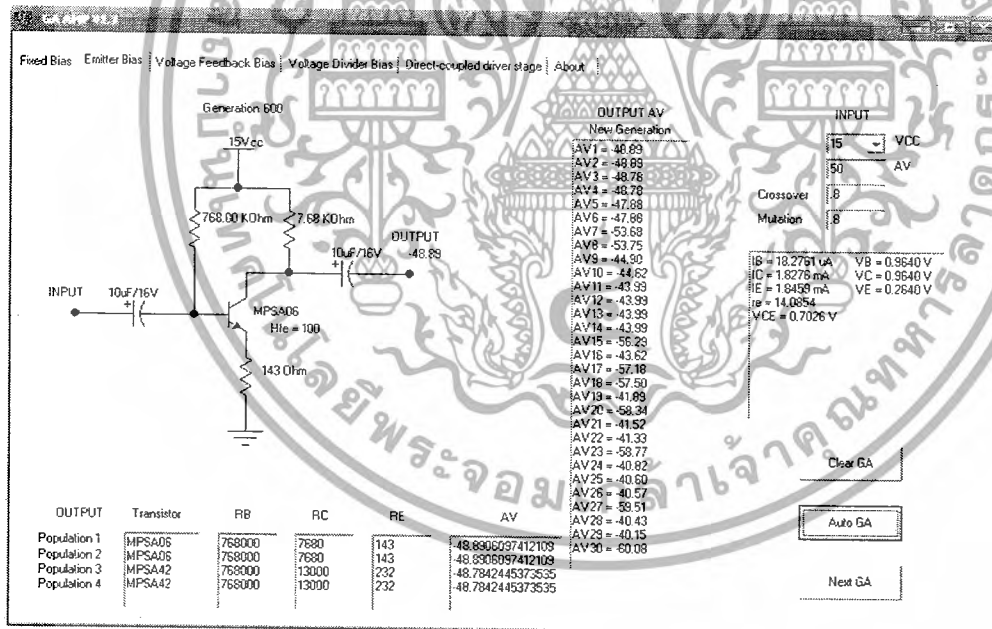
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.128 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.3.4 การทดลอง GA AMP ทดลองวงจร Emitter Bias ครึ่งที่ 4

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA06 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -48.89 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 768K\Omega$, $R_C = 7.68\Omega$, $R_E = 143\Omega$ ดังรูปที่ 4.129

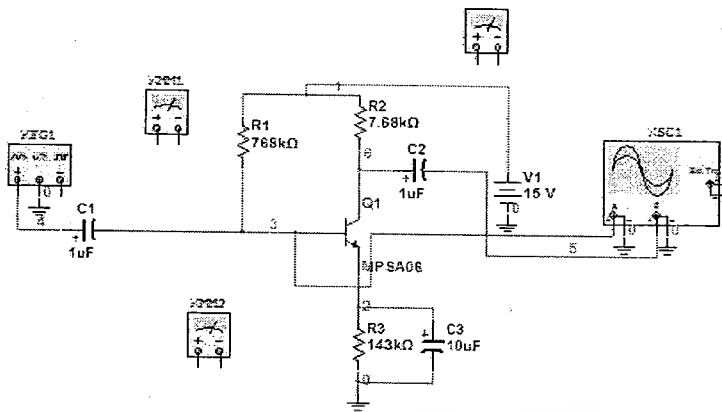


รูปที่ 4.129 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.130 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลอ่ยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV รูปที่ 4.131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



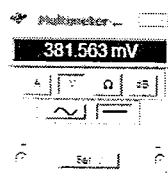
รูปที่ 4.130 รูปการต่อวงจร Emitter Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

รูปที่ 4.131 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 952.555 mV DC ดังรูปที่ 4.132

รูปที่ 4.132 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

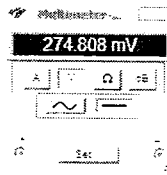
จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการ ใช้ Multimeter ได้แรงดัน 381.563 V DC ดังรูปที่ 4.133



รูปที่ 4.133 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

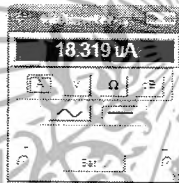
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 274.808 mV DC ดังรูปที่ 4.134



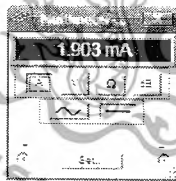
รูปที่ 4.134 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 18.319 μ A ดังรูปที่ 4.135



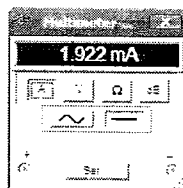
รูปที่ 4.135 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.903 mA ดังรูปที่ 4.136



รูปที่ 4.136 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

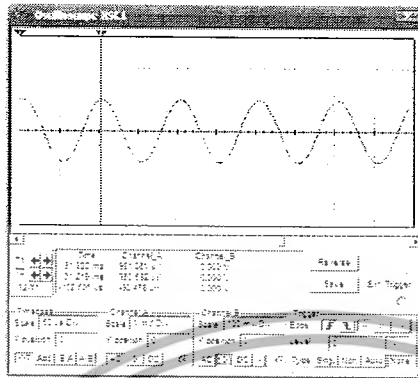
จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.922 mA ดังรูปที่ 4.137



รูปที่ 4.137 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

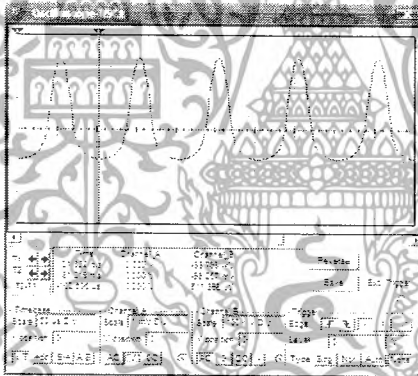
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 981.061 $\mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.138



รูปที่ 4.138 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

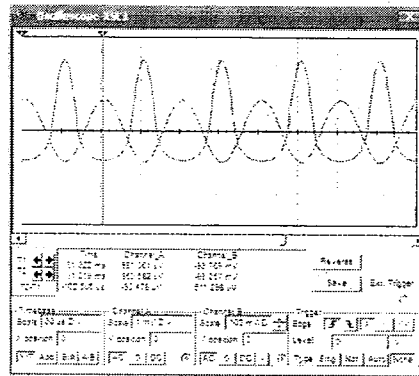
ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการ ใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -93.769 mV P ดังรูปที่ 4.139



รูปที่ 4.139 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.140

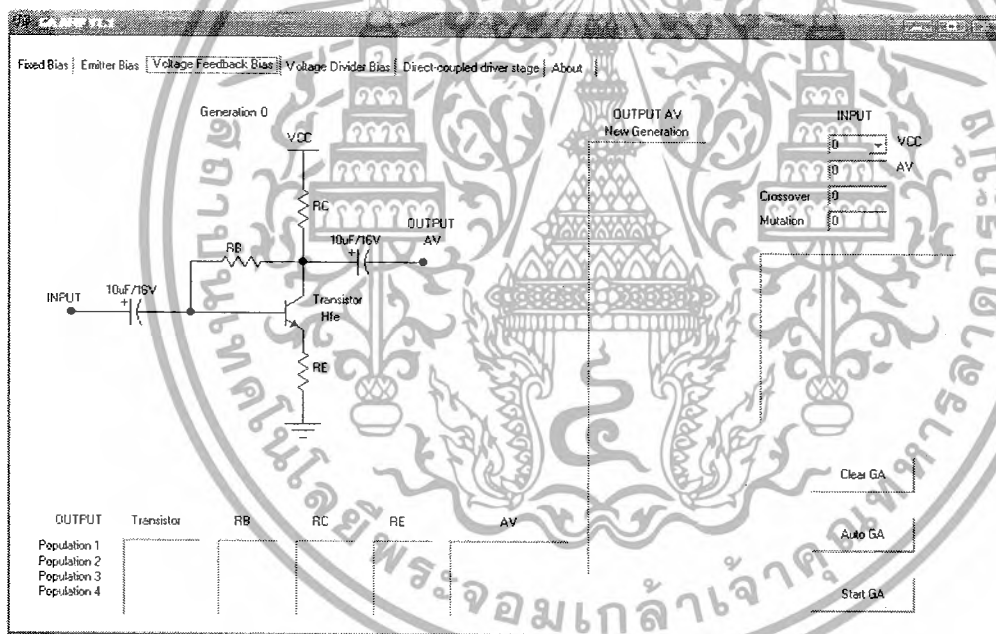
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.140 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.4 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Voltage Feedback Bias

จากการออกแบบและเขียนโปรแกรมออกแบบเครื่องขยายเสียงขนาดเล็ก จะมีรูปร่างหน้าตาของโปรแกรมและรูปของโปรแกรมดังรูปที่ 4.141

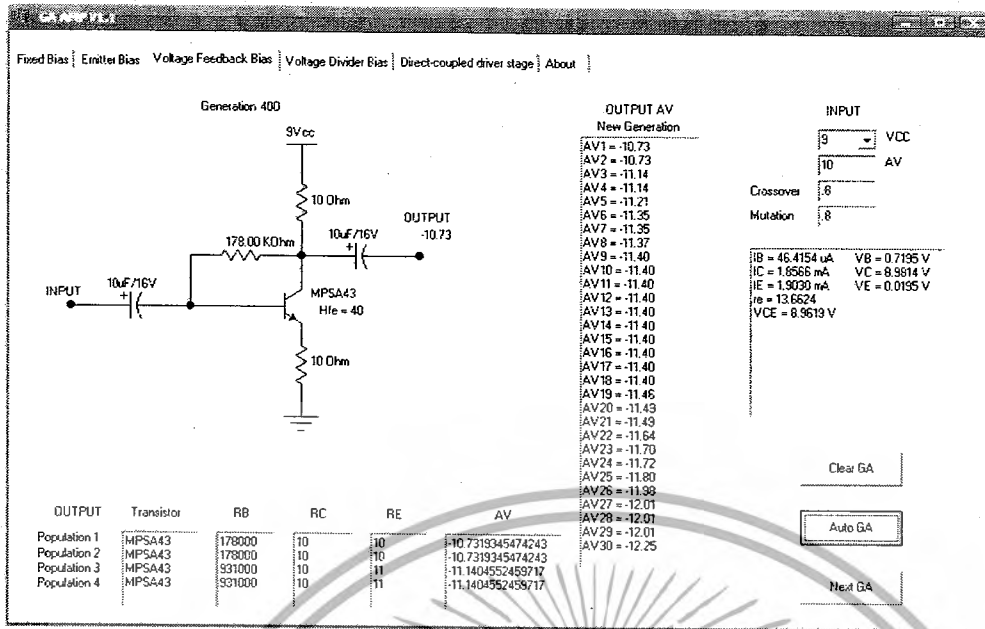


รูปที่ 4.141 รูปร่างหน้าตาของ GA AMP Voltage Feedback Bias

4.2.4.1 การทดลอง GA AMP หาค่าวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 1

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราการขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA43 อัตราการขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -10.03 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 178K\Omega$, $R_C = 10\Omega$, $R_E = 10\Omega$ ดังรูปที่ 4.142

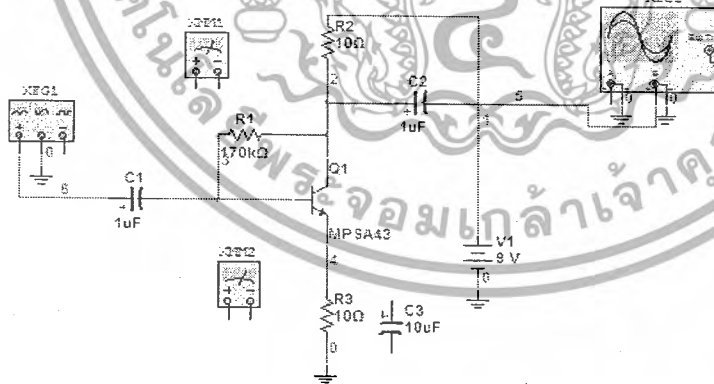
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.142 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

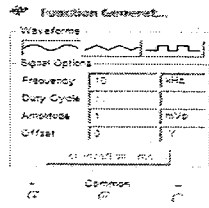
ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.143 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mv (เนื่องจากเสียงที่มนุษย์ได้ยิน คือช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 Hz – 20 KHz) ดังรูปที่ 4.144



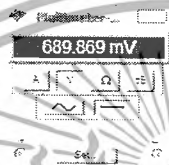
รูปที่ 4.143 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



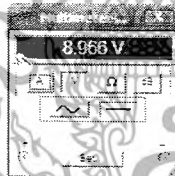
รูปที่ 4.144 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 689.869 mV DC ดังรูปที่ 4.145



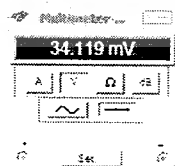
รูปที่ 4.145 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 8.966 V DC ดังรูปที่ 4.146



รูปที่ 4.146 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

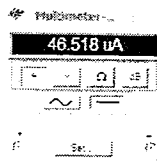
เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 34.119 mV DC ดังรูปที่ 4.147



รูปที่ 4.147 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

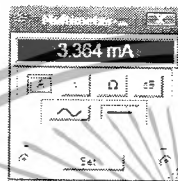
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 46.518 μ A ดังรูปที่ 4.148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.148 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 3.364 mA ดังรูปที่ 4.149



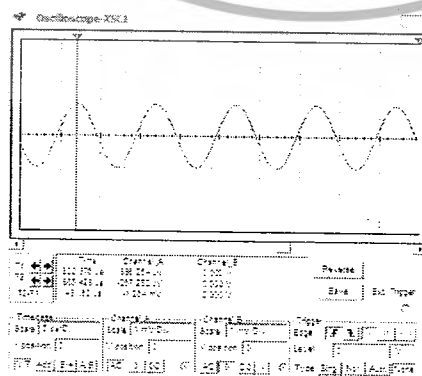
รูปที่ 4.149 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 3.411 mA ดังรูปที่ 4.150



รูปที่ 4.150 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

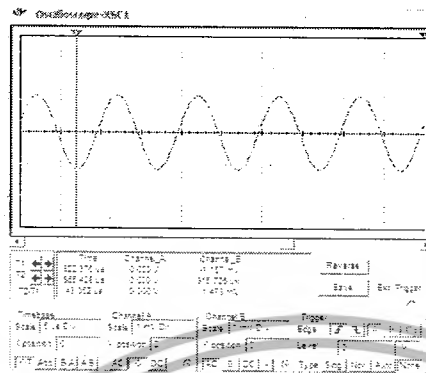
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 996.254 μ V P ดังรูปที่ 4.151



รูปที่ 4.151 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

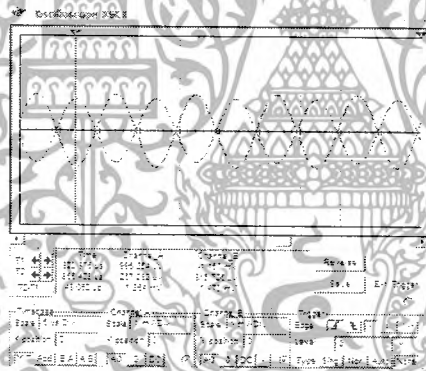
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -1.157 mV P ดังรูปที่ 4.152



รูปที่ 4.152 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็ จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.153

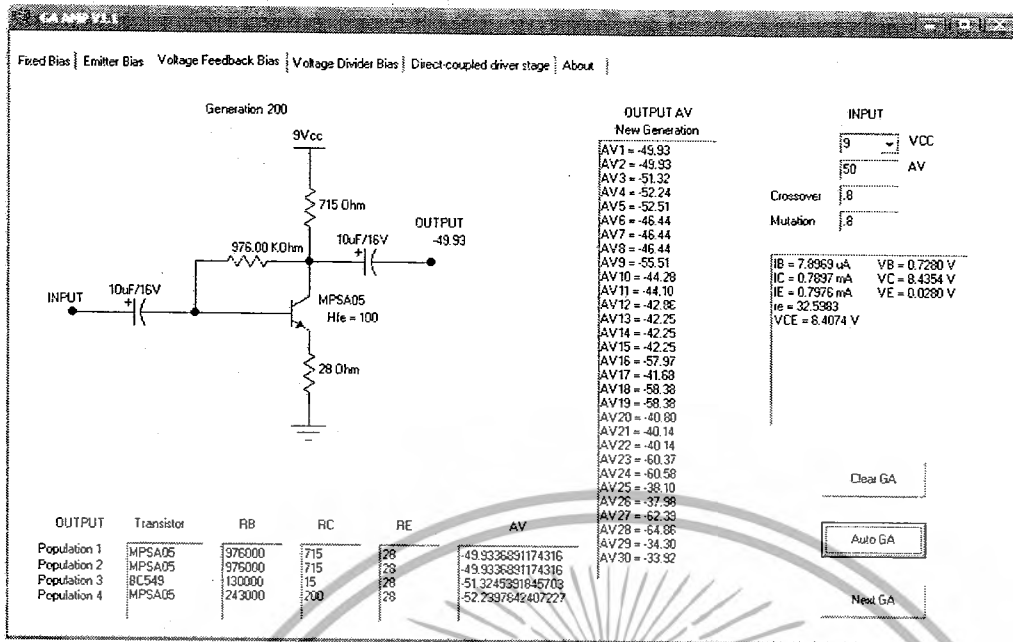


รูปที่ 4.153 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.4.2 การทดลอง GA AMP ทดลองวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 2

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 9 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA05 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -49.93 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 976 \text{ K}\Omega$, $R_C = 715 \Omega$, $R_E = 28 \Omega$ ดังรูปที่ 4.154

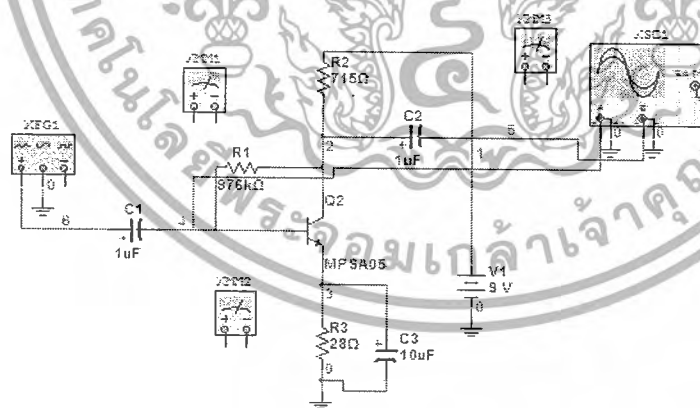
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.154 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

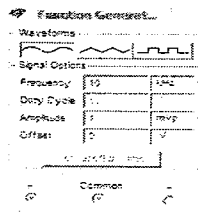
ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.155 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปล่อยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.156



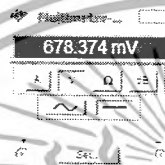
รูปที่ 4.155 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



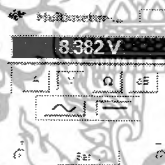
รูปที่ 4.156 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 678.374 mV DC ดังรูปที่ 4.157



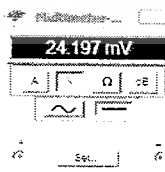
รูปที่ 4.157 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 8.382 V DC ดังรูปที่ 4.158



รูปที่ 4.158 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

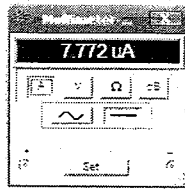
เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 24.197 mV DC ดังรูปที่ 4.159



รูปที่ 4.159 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

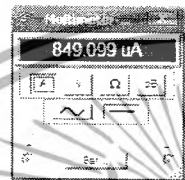
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 7.772 μ A ดังรูปที่ 4.160

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



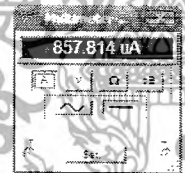
รูปที่ 4.160 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจรถ

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรถเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 849.099 μA ดังรูปที่ 4.161



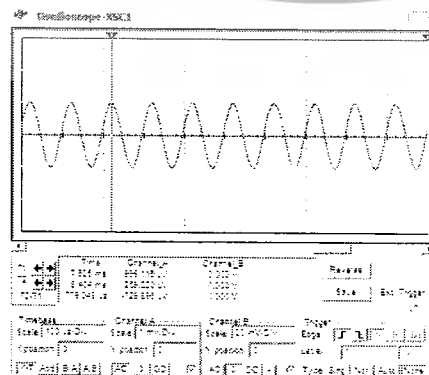
รูปที่ 4.161 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจรถ

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรถเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 857.814 μA ดังรูปที่ 4.162



รูปที่ 4.162 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจรถ

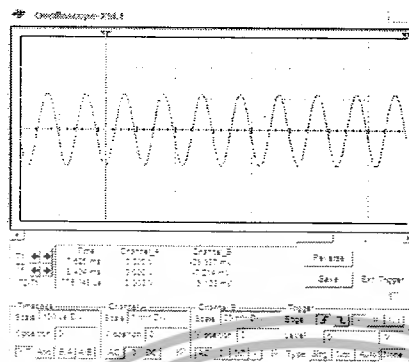
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 999.116 μV_P ดังรูปที่ 4.163



รูปที่ 4.163 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

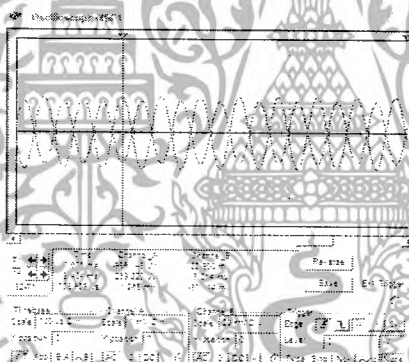
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ -23.337 mV P ดังรูปที่ 4.164



รูปที่ 4.164 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ออสซิลโลสโคป

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็ จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.165

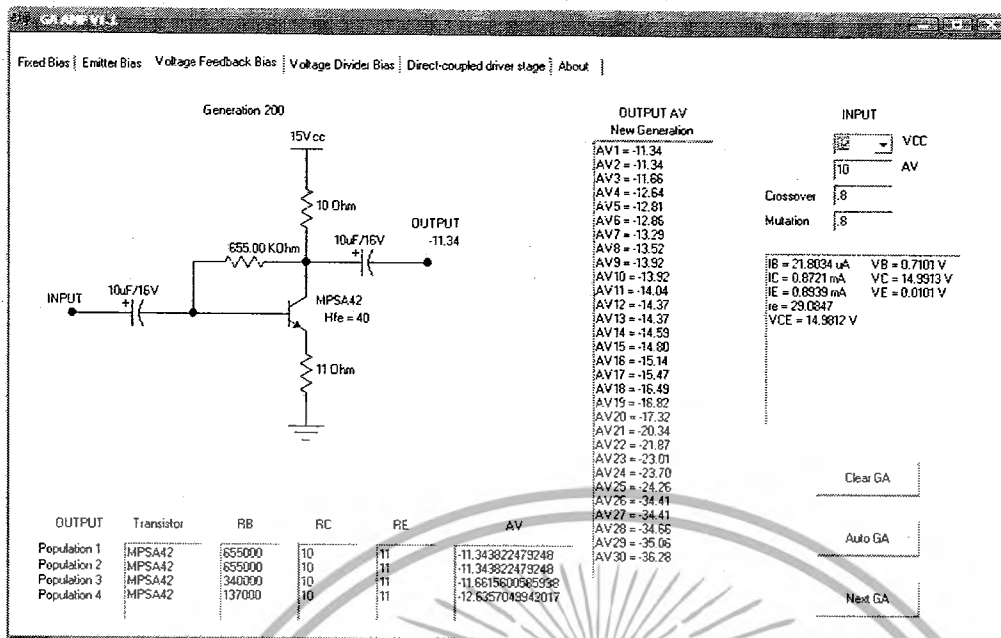


รูปที่ 4.165 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.4.3 การทดลอง GA AMP หักวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 3

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15V และอัตราขยาย AV ที่ 10 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมา คือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MPSA42 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -11.34 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 655K\Omega$, $R_C = 10\Omega$, $R_E = 11\Omega$ ดังรูปที่ 4.166

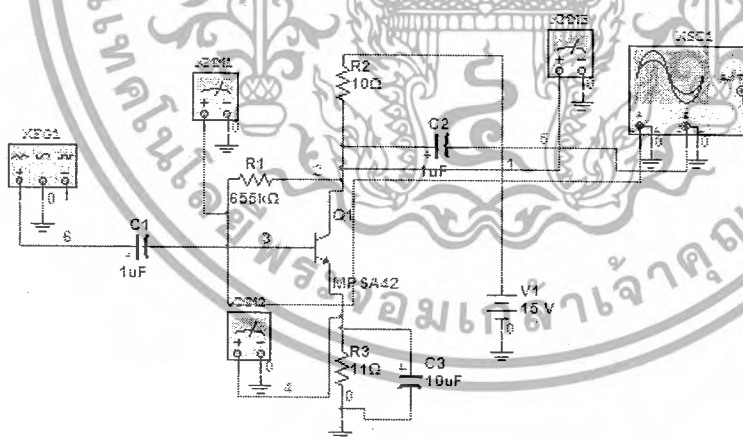
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.166 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

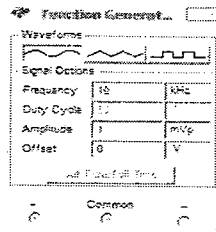
ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.167 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลอ่ยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV รูปที่ 4.168



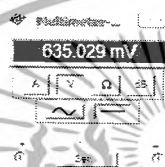
รูปที่ 4.167 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



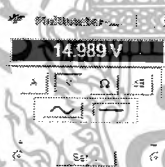
รูปที่ 4.168 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 635.029 mV DC ดังรูปที่ 4.169



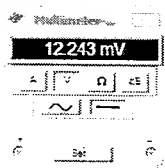
รูปที่ 4.169 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 14.989 V DC ดังรูปที่ 4.170



รูปที่ 4.170 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

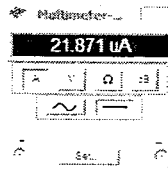
เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 12.243 mV DC ดังรูปที่ 4.171



รูปที่ 4.171 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

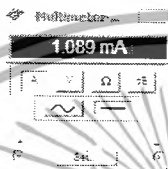
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 21.871 μ A ดังรูปที่ 4.172

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวทศสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.172 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.089 mA ดังรูปที่ 4.173



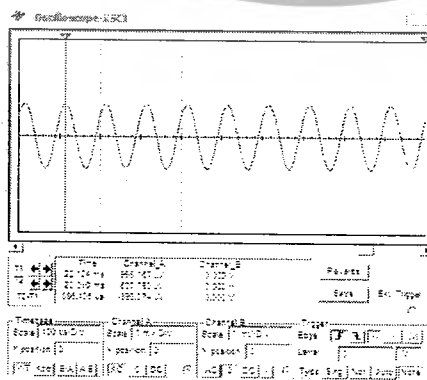
รูปที่ 4.173 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 1.11 mA ดังรูปที่ 4.174



รูปที่ 4.174 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

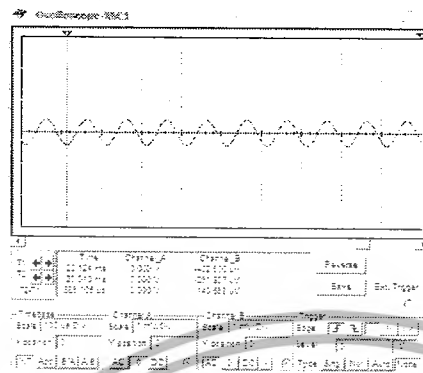
ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 998.167 μ V P ดังรูปที่ 4.175



รูปที่ 4.175 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope

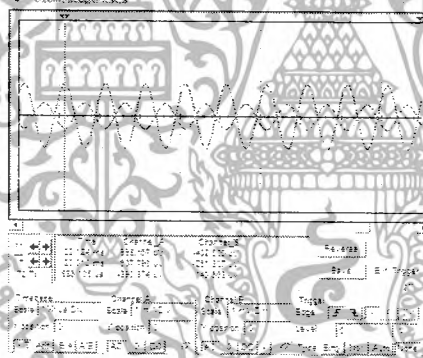
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ $-402.5 \mu\text{V P}$ ดังรูปที่ 4.176



รูปที่ 4.176 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ออสซิลโลสโคป

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.177

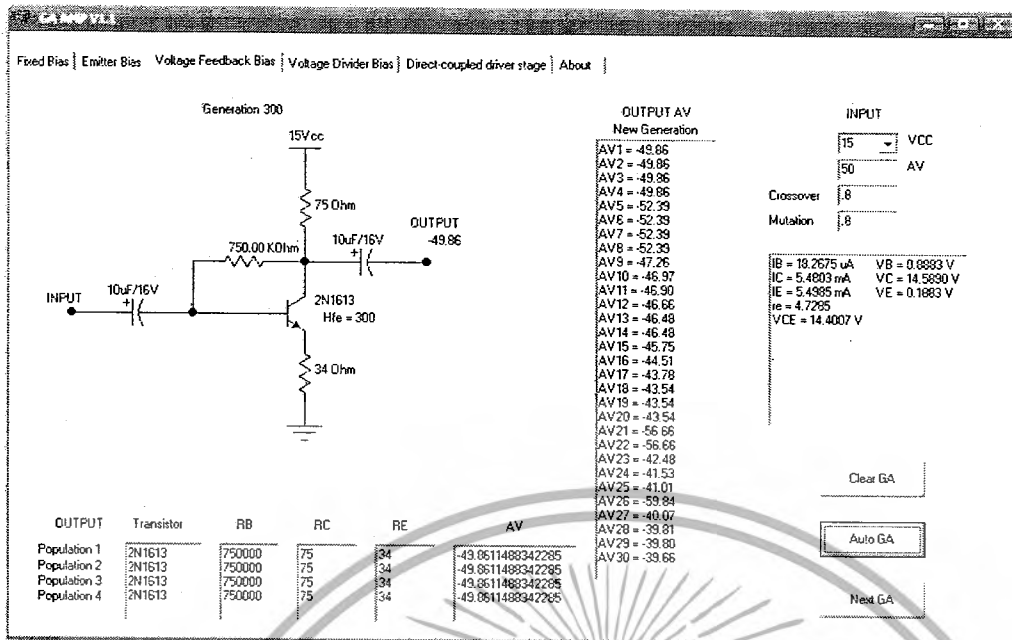


รูปที่ 4.177 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

4.2.4.4 การทดลอง GA AMP หากวงจร Voltage Feedback Bias ครั้งที่ 4

ในการทดลองนี้เราได้จากการ RUN โปรแกรม โดยการป้อนแรงดัน VCC ที่ 15 V และอัตราขยาย AV ที่ 50 เมื่อทำการ RUN โปรแกรมผลออกมาคือ ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N1613 อัตราขยาย AV ที่ดีที่สุดคือ -49.86 เท่า และค่าความต้านทานที่ใช้คือ $R_B = 750\text{K}\Omega$, $R_C = 75\Omega$, $R_E = 34\Omega$ ดังรูปที่ 4.178

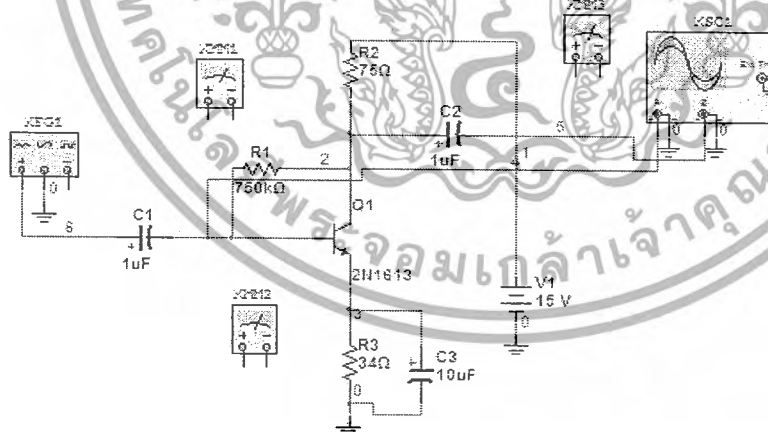
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.178 ผลที่ได้จากการ Run โปรแกรม GA AMP

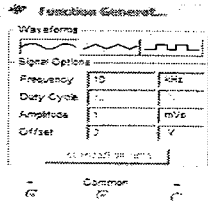
ผลการทดลองเมื่อใช้กับโปรแกรม Electronics Workbench 10

การทดลองนั้นได้ต่อวงจรดังรูปที่ 4.179 โดยมีแหล่งจ่ายสัญญาณเป็น Generator ปลอ่ยสัญญาณขนาดความถี่ 10 KHz มีแรงดัน Amplitude อยู่ที่ 1mV ดังรูปที่ 4.180



รูปที่ 4.179 รูปการต่อวงจร Voltage Feedback Bias ของโปรแกรม Electronics Workbench 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



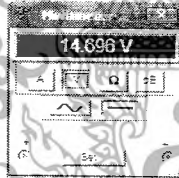
รูปที่ 4.180 แหล่งจ่ายสัญญาณ Function Generator

เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_B โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 897.053 mV DC ดังรูปที่ 4.181



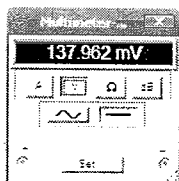
รูปที่ 4.181 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดแรงดัน V_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้แรงดัน 14.696 V DC ดังรูปที่ 4.182



รูปที่ 4.182 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_C ของวงจร

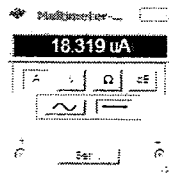
เมื่อทำการจ่ายสัญญาณเข้าไปในวงจรแล้วทำการวัดค่าแรงดัน V_E โดยใช้ Multimeter ได้แรงดัน 137.962 mV DC ดังรูปที่ 4.183



รูปที่ 4.183 ผลที่ได้จากการวัดแรงดัน V_E ของวงจร

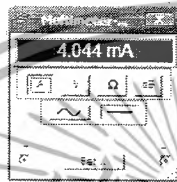
จากนั้นทำการวัดกระแส I_B ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 18.319 μA ดังรูปที่ 4.184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.184 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_B ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_C ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 4.044 mA ดังรูปที่ 4.185



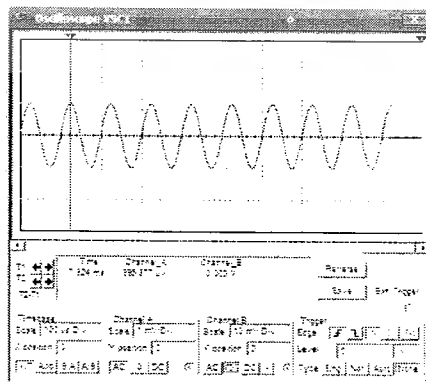
รูปที่ 4.185 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_C ของวงจร

จากนั้นทำการวัดกระแส I_E ของวงจรเพื่อนำมาเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ โดยการใช้ Multimeter ได้กระแส 4.062 mA ดังรูปที่ 4.186



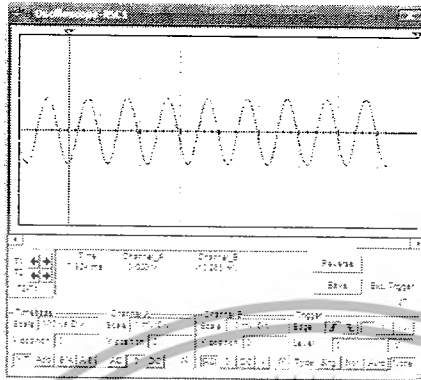
รูปที่ 4.186 ผลที่ได้จากการวัดกระแส I_E ของวงจร

ทำการวัดรูปสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณได้ 996.877 μ V P ดังรูปที่ 4.187



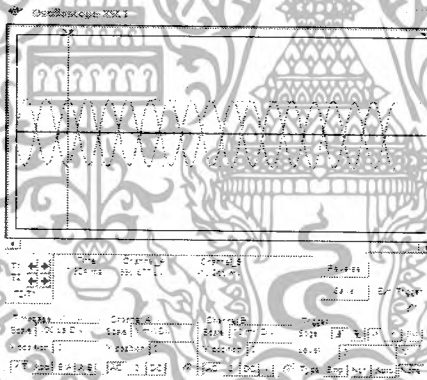
รูปที่ 4.187 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ INPUT โดยใช้ Oscilloscope เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยการใช้ Oscilloscope วัดรูปสัญญาณจากการวัด สามารถอ่านค่าแรงดันสัญญาณ ได้ -10.266 mV P ดังรูปที่ 4.188



รูปที่ 4.188 ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณ OUTPUT โดยใช้ Oscilloscope

เมื่อนำสัญญาณทางด้าน INPUT มาเทียบกับสัญญาณทางด้าน OUTPUT ก็ จะเห็นถึงความแตกต่างของรูปสัญญาณ ดังรูปที่ 4.189



รูปที่ 4.189 การเทียบสัญญาณ INPUT และ OUTPUT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อนำค่าที่ได้จากการทำงานของ GA AMP มาทำการ Simulate โดยการใส่โปรแกรม Electronics Workbench 10 ก็จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางเทียบอัตราการขยายที่ได้จากโปรแกรม GA AMP กับโปรแกรม Simulate

	9V,AV 10 OUT/IN	9V,AV 50 OUT/IN	15V,AV 10 OUT/IN	15V,AV 50 OUT/IN
Fixed Bias	16.799	47.73	3.635	90.055
Emitter Bias	11.381	3.407	27.982	95.579
Voltage Feedback Bias	1.161	22.92	10.298	0.403
Voltage Divider Bias	12	50.58	9.4	49.536

ตารางที่ 5.2 ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรม GA AMP

	9V,AV 10 AV	9V,AV 50 AV	15V,AV 10 AV	15V,AV 50 AV
Fixed Bias	10.03	49.98	10.42	49.85
Emitter Bias	9.84	49.55	10.06	48.89
Voltage Feedback Bias	10.73	49.93	10.51	49.86
Voltage Divider Bias	9.97	50.22	9.95	50.09

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในวงจรขยายแบบ Fixed Bias จะมีอัตราการขยายที่ใกล้เคียงกับโปรแกรม Simulate อยู่ที่ แรงดัน 9V และหลังจากนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนไปค่อนข้างจะมาก ส่วน Emitter Bias นั้น จะมีความใกล้เคียงที่ แรงดัน 9V อัตราการขยาย 10 เท่า Voltage Feedback Bias นั้นจะมีความใกล้เคียงอยู่ที่ แรงดัน 15 V อัตราการขยายที่ 50เท่า ซึ่งต่างจากวงจรขยายแบบ Voltage Divider Bias ที่มีความใกล้เคียงอยู่ในทุกช่วงแรงดันและทุกอัตราการขยายซึ่งนี่ก็เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่วงจรขยายเสียงในภาคแรกๆนั้นนิยมใช้วงจรนี้ในการขยายเนื่องจากกว่าเป็นวงจรที่มีเสถียรภาพในการทำงานดีที่สุดและมีการออกแบบที่ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนอัตราการขยายในวงจรอื่นที่มีความคลาดเคลื่อนไปนั้นเนื่องมาจากว่าในการคำนวณของ GA AMP นั้นเราได้ใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ของวงจขยายซึ่งเป็นสูตรที่ตายตัว ค่าอัตราเร่งดัน และอัตรากระแสในบางจุดที่เป็นค่าคงที่ ซึ่งต่างจากโปรแกรม Simulate ที่การคำนวณนั้นได้มาจากการบวก พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความถี่ อุณหภูมิห้องและอีกหลายๆอย่างเข้าไปซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนแต่เป็นผลทำให้การทดลองออกมาที่มีความคลาดเคลื่อนไปอีกด้วย

อีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไปเนื่องมาจากวงจร Fixed Bias, Emitter Bias, และ Voltage Feedback Bias เป็นวงจรที่อาจจะมีผลกระทบกับความถี่ในช่วงอื่น เพราะว่าการทดลองนี้เน้นไปทางการทดลองสัญญาณเสียงจึงใช้อุปกรณ์ประกอบเช่น Capacitor ที่มีค่าสอดคล้องกับความถี่เสียงที่มนุษย์ได้ยินซึ่งอยู่ในช่วง 20Hz – 20KHz จึงทำให้วงจขยายเหล่านี้ที่นิยมใช้ในวงจขยายแบบอื่นมีความผิดเพี้ยนไป

และจากการที่ใช้ เจเนติกอัลกอริทึม ในการค้นหาค่าตอบนั้นทำให้กลุ่มค่าตอบนั้นมีการกระจายตัวมากขึ้นกว่าการค้นหาแบบธรรมดาที่จะมีค่าตอบอยู่เพียงกลุ่มค่าตอบเดียวซึ่งอาจจะมีกลุ่มค่าตอบอื่นที่มีค่าตอบที่ดีกว่า ซึ่งการค้นหาแบบ เจเนติกอัลกอริทึม นี้ก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้หรือนำไปพัฒนา โปรแกรมการค้นหา GA AMP อีกต่อไปในอนาคต ซึ่งจากที่ได้ทำการทดลองหาค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นอาจจะเป็นจุดเริ่มต้นให้มีการนำไปพัฒนาจนกลายเป็นวงจขยายเสียงที่มีขนาดใหญ่ต่อไปได้อีก

ปัญหาและอุปสรรคในการทดลอง

ปัญหาในการทดลองนั้นมีจากการหาสูตรในการคำนวณวงจรเนื่องจากว่าตัวอุปกรณ์มีความหลากหลายกันออกไปเช่นทรานซิสเตอร์ก็มีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีค่ามาตรฐานที่ไม่เหมือนกันที่ออกมาจากโรงงานซึ่งในบางเบอร์ที่เหมือนกันแต่ออกมาจากคนละ โรงงานก็จะมีค่าที่ต่างกันออกไปจึงทำให้ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองของวงจร GA AMP นั้นออกมาไม่ค่อยตรงกับ โปรแกรม Simulate นักซึ่ง โปรแกรม Simulate ก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งของการทดลองเนื่องจากโปรแกรมนี้จะนำค่าความเป็นไปได้ อัตราการขยายความถี่ ค่าความถี่ในวงจรรวมไปถึงอุณหภูมิเข้าไปเกี่ยวข้องซึ่งต่างจากการคำนวณของ GA AMP ที่ให้หลักการคำนวณทางคณิตศาสตร์เท่านั้นจึงทำให้ผลการทดลองที่ออกมาไม่ค่อยสอดคล้องกันนัก

แนวทางในการพัฒนาต่อ

โปรแกรม GA AMP V1.1 นั้นเป็นโปรแกรมที่ใช้ค้นหาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยการใช้ เจเนติกอัลกอริทึม ค้นหากลุ่มค่าตอบจากข้อมูลที่เก็บเอาไว้ ซึ่งจำนวนอุปกรณ์และค่าต่างๆของอุปกรณ์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาดังนั้นจึงสามารถพัฒนาให้ตัวอุปกรณ์นั้นเข้าไปอยู่ในระบบอินเตอร์เน็ตที่สามารถมีการเปลี่ยนแปลงให้สอดคล้องกับความเป็นจริงได้ตลอดเวลา และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการค้นหาวิจัยขนาดเล็กก็อาจจะพัฒนาให้กลายเป็นการค้นหาวิจัยเสียงที่ใหญ่ขึ้นไปอีกได้ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Basic Genetic Algorithm. 2008. Genetic algorithm. [Online]. Available :

<http://www.numvarn.com/blog/node/133>

Electronics. 2008. ทรานซิสเตอร์ในวงจรรขยายสัญญาณ. [Online]. Available :

http://electronics.se-ed.com/contents/068s165/068s165_p05.asp

Gopal K. Dubey. 1989. Power Semiconductor controlled Drives. United States Of America.
Prentice-Hall International, Inc.

Richard G. Hofst. 1986. Semiconductor Power Electronics. New York. Van Nostrand Reinhold
company Inc.

Wikipedia. 2008. Genetic algorithm. [Online]. Available :

http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithm

ทรงวุฒิ วิมลพัชร. 2008. สารกึ่งตัวนำและการใช้งาน. [Online]. Available :

<http://www.utc.ac.th/~swm/content1.htm>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้