เครื่องขยายเสียงไฮบริดพร้อม DAC
Hybrid Amplifier with DAC

สมประสงค์ สามารถ
Somprasong Samart
สิรธีร์ พงษ์วัชรารักษ์
Siratee Pongvacharark

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องขยายเสียงไฮบริดพร้อม DAC

Hybrid Amplifier with DAC

T143923

โดย

สมประสงค์ สามารถ

Somprasong Samart

สิรธีร์ พงษ์วัชรารักษ์

Siratee Pongvacharark

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์

b.12810770

i.

หมู่.....
เลขทะเบียน 143923
วัน.เดือน.ปี 04 ต.ค. 2559

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องขยายเสียงไฮบริดพร้อม DAC

Hybrid Amplifier with DAC

ผู้จัดทำ สมประสงค์ สามารถ รหัส 55011264

สิรธีร์ พงษ์วัชรารักษ์ รหัส 55011309

ปริญญานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(รศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องขยายเสียงไฮบริดพร้อม DAC
นักศึกษา	สมประสงค์ สามารถ รหัส 55011264
	สิรธีร์ พงษ์วัชรารักษ์ รหัส 55011309
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	รศ.ดร. สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์

บทคัดย่อ

เครื่องขยายเสียงไฮบริดนั้นเป็นการผสมระหว่างหลอดสุญญากาศกับtransistor โดยในวงจรนั้นจะใช้หลอดสุญญากาศเป็นภาค Pre-stage โดยหลอดที่ใช้นั้นจะเป็นเบอร์12AU7หลังการนั้นสัญญาณจะถูกขยายใน power amplifier โดยในภาคขยายหลักจะใช้ MJ15024 คู่กับ MJ15025โดยจะเป็นการขยายแบบ Push-pull ในภาคจ่ายไฟนั้นได้ใช้แบบswitchingซึ่งมีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็ก โดยได้เพิ่มวงจรป้องกันลำโพงเข้าไปเพื่อป้องกันกรณีที่เครื่องขยายเสียงมีปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Hybrid Amplifier with DAC
Student	Somprasong Samart
	Siratee Pongvachararak
Degree	Bachelor of Engineering
Department	Electronic Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Surapan Aurpaibunn

ABSTRACT

Hybrid Amplifier is amplifier that consists of vacuum tube and transistor. This amplifier has three stages. 1.Buffer stage, 2.Voltage amplifier stage, 3.Power stage. The Vacuum tube is in buffer stage. Voltage amplifier stage use to amplify voltage and prepare signal for power stage. This stage we use IC Op-amp. Power stage is stage that amplifying current. Because non-linear amplify of vacuum tube. The sound of this amplifier has a unique characteristic. This amplifier also consists of LCD to display input source and Bluetooth to connect wirelessly. This amplifier is supply by switching power supply for avoiding big and heavy transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์ สำหรับการให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงการดูแลเป็นอย่างดี พร้อมทั้งสนับสนุนอุปกรณ์ซึ่งมีความจำเป็นในการปฏิบัติงาน

ขอขอบพระขอบคุณ อ.พลศาสตร์ เลิศประเสริฐ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงาน ตลอดเวลาที่คณะผู้วิจัยปฏิบัติงาน

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ นักศึกษาภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยกันคิดค้นแก้ไขปัญหาที่เกิดในขณะปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกให้คณะผู้วิจัยสามารถปฏิบัติงานได้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สมประสงค์ สามารถ

สิรธีร์ พงษ์วัชรารักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูป VII

บทที่ 1 X

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 2

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 4

2.1 หลอดสุญญากาศ 4

2.2 Cathode Follower 8

2.3 Switching power supply 10

2.3.1 สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายกับแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น 10

2.3.2 หลักการทำงานของสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย 11

2.3.3 Half bridge inverter 12

2.4 Power Amplifier 14

2.5 Protection 16

2.6 Digital to analog converter 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6.1 Audio Serial Data 19

2.6.2 Audio Serial Data Format 19

2.7 การใช้งาน Character LCD กับ Arduino 22

2.7.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ LCD Display 22

2.7.2 การควบคุมการแสดงผลของ LCD 26

2.7.3 การเชื่อมต่อสัญญาณขาข้อมูลระหว่าง Microcontroller กับ LCD Controller 28

2.7.4 รายละเอียดคำสั่งในการสั่งงานระหว่าง Arduino กับ จอ LCD 29

2.8 Bluetooth 30

2.8.1 ประวัติของBluetooth 31

2.8.2 หลักการพื้นฐานของBluetooth 31

2.8.3 ความถี่คลื่นวิทยุ 32

2.8.4 ระยะเชื่อมต่อของบลูทูธ 32

2.8.5 ส่วนประกอบของชุดข้อมูล 32

2.8.6 เครือข่ายขนาดย่อม (Piconet) 33

2.8.7 อัตราเร็วในการแลกเปลี่ยนข้อมูล 34

2.8.8 พื้นฐานเทคโนโลยีที่ใช้ในบลูทูท 35

2.8.9 รูปแบบการสื่อสาร (Application protocol) 36

2.8.10 มาตรฐานของbluetooth 37

บทที่ 3 38

3.1 วิธีที่ใช้ศึกษาค้นคว้าและการทดลอง 38

3.1.1 ก่อนทำแผ่นPCB 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1.2 หลังทำแผ่นPCB 38

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 39

3.3 ขั้นตอนออกแบบ 39

3.3.1 ภาคขยายเสียง 39

3.3.2 ภาค Protection 40

3.3.3 ภาค Switching power supply 40

3.3.4 Digital to analog converter 42

3.3.5 Arduino 42

3.4 ปัญหาที่พบ 44

บทที่ 4 45

4.1.1 Noise เมื่อไม่ใส่อินพุต 45

4.1.2 Amplifier Noise เพิ่ม volume สุด 45

4.1.3 Low cut 46

4.1.4 ความถี่ 20Hz 46

4.1.6 ความถี่ 1kHz 47

4.1.7 ความถี่ 20kHz 47

4.1.8 High cut 48

4.1.9 Phase 48

4.1.10 Signal-to-noise ratio (SNR) 49

บทที่ 5 สรุป 50

Reference 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 หลอดสุญญากาศ 4

2.2 การวิ่งของอิเล็กตรอนในหลอดสุญญากาศ 5

2.3 โครงสร้างภายในหลอดสุญญากาศ 5

2.4 ตัวอย่างการจ่ายไฟ 6

2.5 กราฟการนำกระแสของหลอดสุญญากาศ 7

2.6 แบบจำลองความต้านทานภายใน 8

2.7 Ideal Buffer 8

2.8 วงจร buffer ที่ใช้ 9

2.9 flow chart switching power supply 11

2.10 วงจร switching power supply 12

2.11 Half bridge inverter 13

2.12 Half bridge inverter waveform 13

2.13 วงจร power amp 14

2.14 Flow Chart Amplifier 15

2.15 วงจร Protection 16

2.16 รูปวงจรจริง 17

2.17 บล๊อคไดอะแกรมของเครื่องดีทูเอ 18

2.18 การต่อสัญญาณ Audio Serial Data กับ ดีทูเอ 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.19 แสดงสัญญาณ Audio Serial Data Format....20

2.20 วงจร USB Receiver....20

2.21 วงจร DAC....21

2.22 วงจรภาค i/v....21

2.23 LCD 16x2....22

2.24 จอ LCD 16x2 Character (Parallel)....23

2.25 จอ LCD 16x2 Character (I2C)....24

2.26 ด้านหน้าจอ LCD 16x2 (Parallel)....24

2.27 ด้านหลังจอ LCD 16x2 (I2C) 1....25

2.28 ด้านหลังจอ LCD 16x2 (I2C) 2....26

2.29 ขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ Arduino UNO R3....28

2.30 พื้นฐานอุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล....30

2.31 รูปแบบการแลกเปลี่ยนข้อมูล....34

2.32 การส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุโดยเปลี่ยนความถี่ไปมา....35

2.33 รูปแบบการส่งสัญญาณค้นหาอุปกรณ์....35

2.34 รูปแบบการสื่อสาร....36

4.1 Noise เมื่อไม่ใส่อินพุต....45

4.2 Amplifier Noise เพิ่ม volume สุด....45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.3 Low cut frequency....46

4.4 กราฟความถี่ 20Hz....46

4.5กราฟความถี่ 1kHz....47

4.6 กราฟความถี่ 20kHz....47

4.7 High cut frequency....48

4.8 กราฟ phase input เทียบ output....48

4.9 signal to noise ratio....49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1 ตารางขาของจอ LCD 16x2 แบบ Parallel....26

2 ตารางขาของจอ LCD 16x2 แบบ I2C....27

3 ตารางขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ Arduino UNO R3....30

4 แรงดันและกระแสของ Power Supply....50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

Hybrid amplifier นั้นเป็นวงจรที่มีหลอดสุญญากาศผสมกับ solid state ในวงจร โดยในวงจรเครื่องขยายเสียงของเรานั้นจะใช้หลอดสุญญากาศเป็น Buffer ของวงจรขยายเพื่อให้เสียงที่ออกมานั้นมีความเป็นเอกลักษณ์ของหลอดสุญญากาศ โดยการใส่หลอดสุญญากาศนั้นสามารถเพิ่มมูลค่าของเครื่องขยายเสียงให้มีราคาที่สูงขึ้น

หลอดสุญญากาศนั้นเดิมทีถูกสร้างขึ้นมาใช้งานในคอมพิวเตอร์ยุคแรกๆ ยุคนี้อยู่ระหว่าง พ.ศ. 2488 – 2501 เครื่องคอมพิวเตอร์ยุคนี้ใช้หลอดสุญญากาศ (vacuum tube) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดท่าหลอดไฟฟ้าตามบ้านเป็นองค์ประกอบหลักของวงจรไฟฟ้า และใช้บัตรเจาะรูในการเก็บข้อมูลและคำสั่งที่ให้คอมพิวเตอร์ทำงาน และใช้ดรัมแม่เหล็ก (magnetic drum) เป็นหน่วยความจำหลัก ดรัมแม่เหล็กทำด้วยวงแหวนแม่เหล็กขนาดเล็ก ๆ เท่าหัวเข็มหมุดจำนวนมากมาย วงแหวนเหล่านี้ถูกร้อยด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ เหมือนการร้อยลูกปัด หรือหน้าต่างมุ้งลวดที่มีวงแหวนคล้องอยู่ที่จุดตัดของเส้นลวด หน่วยความจำหลักนี้จะเก็บข้อมูลเฉพาะในขณะที่มีการประมวลผลเท่านั้น คอมพิวเตอร์ในยุคนี้มีความเร็วในการทำงานอยู่ในหน่วยหนึ่งในพันวินาที (millisecond)

ปัญหาของเครื่องขยายเสียงหลอดสุญญากาศคือ นอกจากขนาดและน้ำหนักที่มากแล้ว ยังมีปัญหาเรื่องความร้อน เนื่องจากหลอดดังกล่าวต้องใช้พลังงานสูงทำให้เกิดความร้อนจากการใช้งานสูง และมีกำลังขับต่ำ ทำให้มีการพัฒนา transistor ขึ้นมาแทนที่

ทรานซิสเตอร์นั้นถูกนำมาใช้ในปี พ.ศ. 2502 โดยถูกนำมาใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องขยายเสียงเป็นองค์ประกอบหลักของวงจรไฟฟ้าแทนหลอดสุญญากาศ โดยผู้ที่คิดค้นทรานซิสเตอร์คือนักวิทยาศาสตร์สามคนของห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell Laboratories) แห่งสหรัฐอเมริกา ได้แก่ บาร์ดีน (J.Bardeen) แบรทเทน (H.W.Brattain) และซอคเลย์ (W.Shockley) การใช้ทรานซิสเตอร์ในการผลิตตัวเครื่องแทนหลอดสุญญากาศ ทำให้ตัวขนาดของเครื่องมีขนาดเล็กลงกว่าเดิมมาก โดยทรานซิสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกมีขนาด 1 ใน 100 ของหลอดสุญญากาศเท่านั้น นอกจากขนาดเล็กแล้วยังมีคุณสมบัติที่ดีอีกหลายประการคือ ไม่เปลืองกระแสไฟฟ้า ไม่ต้องใช้เวลาอุ่นเครื่องเมื่อแรกเปิดเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเปนมาและความสำคัญของปญหา

ความเป็นมาของโครงงานนี้คือต้องการทำเครื่องขยายเสียงแบบไฮบริทโดยเป็นการทำงานผสมระหว่างหลอดสูญญากาศกับทรานซิสเตอร์ โดยจะนำการขยายแบบ non-linear ของหลอดสูญญากาศมาใช้ทำให้เกิดเอกลักษณ์เฉพาะของเสียงขึ้นและได้เพิ่มส่วนเสริมเพิ่มเติมต่างๆ เช่น DAC, Bluetooth, Protection, Selector

1.2 ความมุงหมายและวัตถุประสงคของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของโครงงานครั้งนี้คือการสร้างเครื่องขยายเสียงที่ให้เสียงที่ดีและใช้งานง่าย โดยได้เพิ่มส่วนเสริมต่างๆเพื่อความสะดวกสบายในการใช้งานเช่น Bluetooth, LCD, DAC และเพื่อศึกษาการนำหลอดสูญญากาศไปใช้ในส่วนต่างๆ, การจัดวงจร Bias แบบต่างๆ, การจัด Constant Current Source แบบต่างๆ การเขียนโปรแกรม Arduino เพื่อไปควบคุม Selector และการรับค่าจาก switch

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

โครงงานนี้ได้นำหลอดสูญญากาศมาใช้เพื่อนำการขยายแบบ non-linear มาใช้เพื่อให้เกิดเอกลักษณ์เฉพาะของเสียง ในภาค Power นั้นได้เพิ่มกระแสสงบเป็น 100mA เพื่อลด Crossover Distortion ส่วนในภาค DAC นั้นได้ใช้ ชิป DAC แยกกับ ชิป Receiver คนละตัว

1.4 ขอบเขตการวิจัย

โครงงานนี้ได้ทดลองนำหลอดสูญญากาศมาเป็นภาคต่างๆในวงจรดังนี้ ภาค Differential, ภาค VAS, ภาค Buffer ในภาค Power นั้นได้ทดลองเพิ่มและลดกระแสสงบ ในวงจร DAC ได้ทดลองนำชิป receiver และ DAC เป็นชิปตัวเดียวกัน การเขียน Arduino ควบคุม LCD และรับค่าจาก Switch ได้ทดลองใช้ If, While, If else

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชนที่คาดวาจะไดรับ

ศึกษาวิธีการจัดวงจรหลอดสูญญากาศรูปแบบต่างๆ ศึกษาการควบคุม Voltage Output ของหลอดสูญญากาศ ศึกษาการ Bias Transistor ในภาค Power แบบต่างๆ ศึกษาการทำงานและการส่งข้อมูลของ DAC ศึกษาการเขียนภาษาC ใน Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

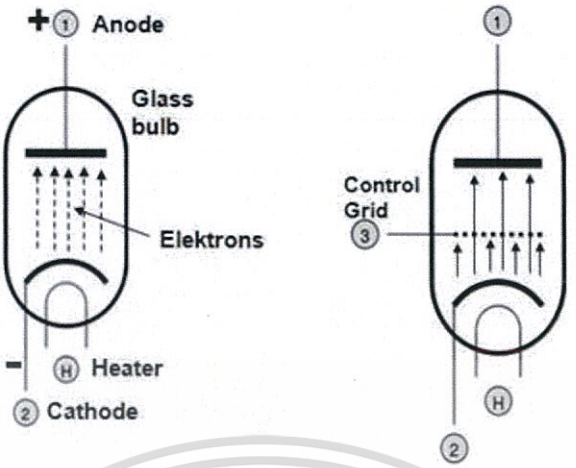
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 หลอดสุญญากาศ

หลอดสุญญากาศนั้นหมายถึงอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณหรือทำหน้าที่เป็นสวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณทางไฟฟ้าขึ้นจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านบริเวณที่มีอากาศหรือก๊าซเบาบาง ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่ใช้อธิบายการนำไฟฟ้าก็คือ ปรากฏการณ์เทอร์มิออนิคอิมิตชัน (thermionic emission) ซึ่งอธิบายว่าเมื่อโลหะถูกทำให้ร้อนจนถึงระดับหนึ่งด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาที่ผิวของโลหะ เมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเพื่อดึงดูดอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาอยู่ที่ผิวด้วยขั้วโลหะอีกขั้วหนึ่งที่อยู่ข้างๆ จะทำให้เกิดการไหลของกระแสได้ เราเรียกหลอดสุญญากาศที่มีขั้วโลหะเพียงสองขั้วนี้ว่า หลอดไดโอด (Diode) โดยขั้วที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่า คาโธด (Cathode) และขั้วที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่า อาโนด (Anode) การไหลของกระแสไฟฟ้าของหลอดไดโอดเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear current) กล่าวคือ เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วอาโนดและศักย์ไฟฟ้าลบให้กับขั้วคาโธดจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลดังที่ได้อธิบายผ่านมา แต่เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้ากลับทางคือ ป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับคาโธดและป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้กับอาโนดจะทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลได้ ซึ่งเป็นผลมาจากอิเล็กตรอนถูกผลักด้วยผลของสนามไฟฟ้านั้นเอง ซึ่งคุณสมบัติข้อนี้จึงทำให้สามารถนำหลอดไดโอดไปใช้เป็นอุปกรณ์เรียงกระแส (rectifier) ได้

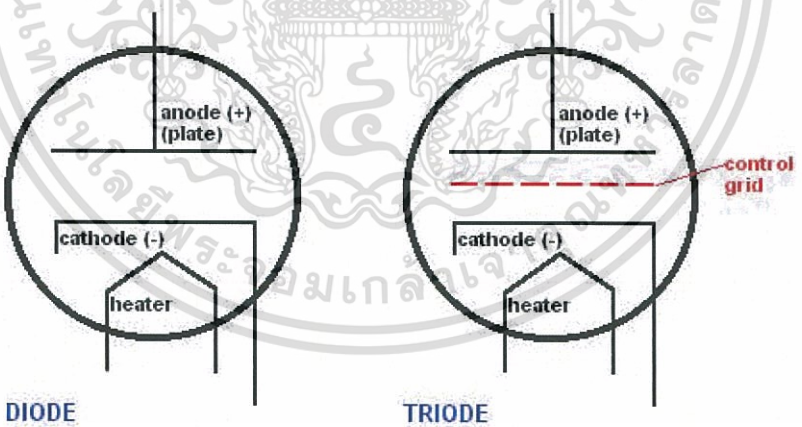
รูปที่ 2.1 หลอดสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



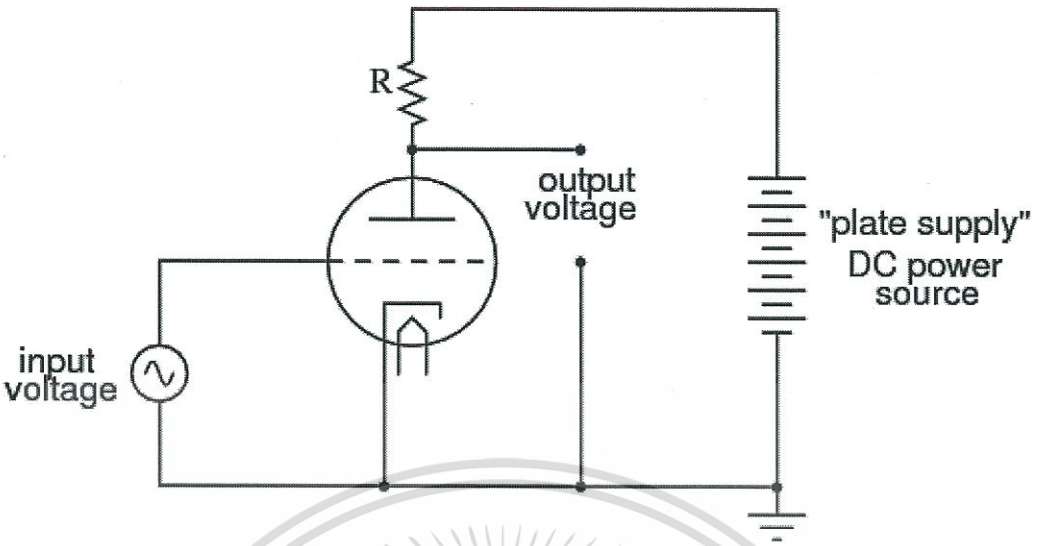
รูปที่ 2.2 การวิ่งของอิเล็กตรอนในหลอดสุญญากาศ

ต่อมาได้มีการพัฒนาหลอดไดโอดโดยใส่ขั้วโลหะตาข่ายระหว่างขั้วอาโนดและขั้วคาโธด เรียกว่า กริด (Grid) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมปริมาณกระแสให้ไหลมากน้อยได้ตามศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วกริด อุปกรณ์ที่มีขั้วโลหะ 3 ขั้วนี้เรียกว่า หลอดไตรโอด (Triode) ซึ่งสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ขยายสัญญาณได้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในหลอดสุญญากาศ

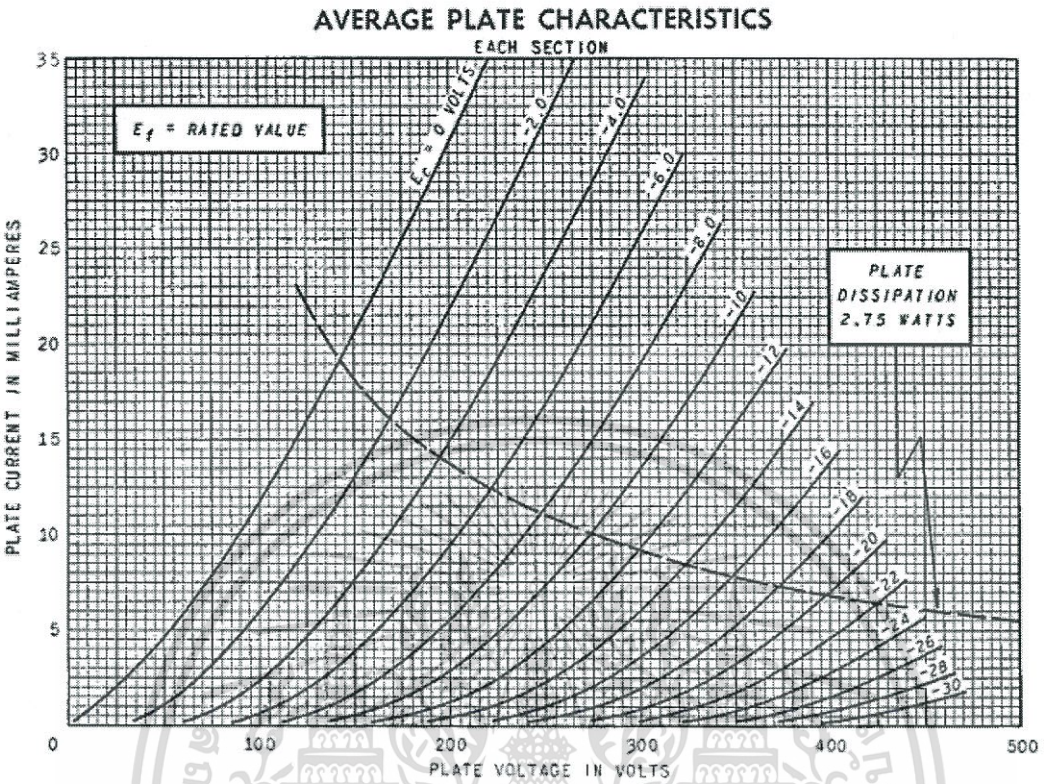
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการจ่ายไฟ

เมื่อเราใส่สัญญาณ Input ที่เป็น - เข้าไปความต่างศักย์ไฟฟ้า ของ Grid เทียบกับ Cathode เป็นบวกมากขึ้น ทำให้กระแสไฟไหลจาก Anode ไปยัง Cathode มากขึ้น ทำให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง Anode และ Cathode ลดลง เกิดเป็นสัญญาณซีกลบเกิดขึ้นที่ Output และเมื่อถึงสัญญาณ Input ซีก + ความต่างศักย์ไฟฟ้า ของ Grid เทียบกับ Cathode เป็นลบมากขึ้นทำให้กระแสไฟไหลจาก Anode ไปยัง Cathode ลดลง ทำให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง Anode และ Cathode เพิ่มขึ้น เกิดเป็นสัญญาณซีกบวกเกิดขึ้นที่ Output จะเห็นได้กว่าเกิดการกลับเฟสของสัญญาณระหว่าง Output ปรากฏการณ์ดังกล่าว เราสามารถนำมา Plot เป็นกราฟการทำงานของหลอดสุญญากาศได้ตามด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



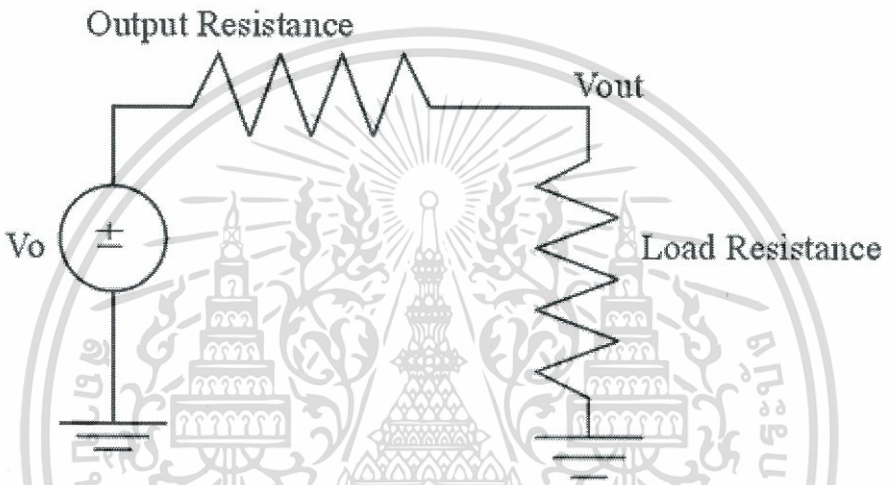
รูปที่ 2.5 กราฟการนำกระแสของหลอดสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Cathode Follower

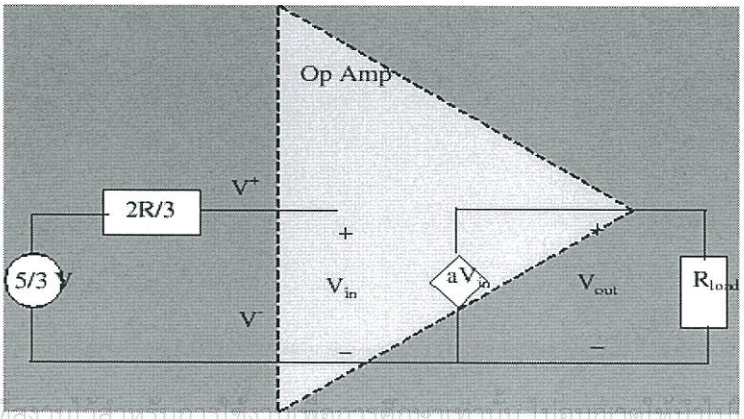
วงจรbufferนั้นเป็นวงจรที่ช่วยปรับค่าimpedanceของวงจรที่ต่อกับมัน โดยจะนำbufferนั้นมาใส่คั่นวงจรต่างๆ2วงจร วงจรbufferนั้นค่า input impedanceจะสูงมากและค่า output impedance จะน้อยมาก

โดยปกตินั้นค่า Vout ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าที่ต้องการเพราะความต่างศักย์นั้นจะแบ่งไปตกคร่อมความต้านทานภายใน



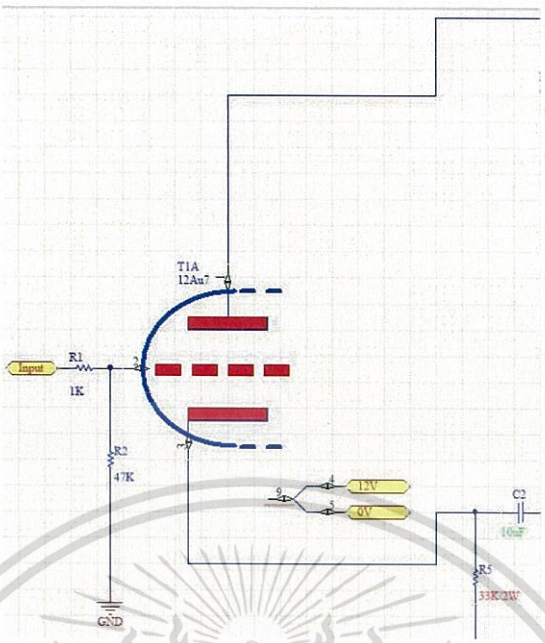
รูปที่ 2.6 แบบจำลองความต้านทานภายใน

เมื่อเราใส่bufferคั่นนั้นจะช่วยให้สัญญาณที่ต้องการออกมากขึ้น โดยในideal-bufferนั้น input impedanceจะมีค่าเป็นอนันต์และoutput impedanceจะมีค่าเป็น0 ทำให้สัญญาณที่เข้านั้นตกคร่อมที่bufferทั้งหมดและสัญญาณขาออกนั้นตกคร่อมที่โหลดทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 Ideal Buffer



รูปที่ 2.8 วงจร buffer ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Switching power supply

สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย (Switching Power Supply) เป็นแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดันแบบหนึ่ง และสามารถเปลี่ยนแรงดันไฟจากไปสลับโวลต์สูง ให้เป็นแรงดันไฟตรงค่าต่ำ เพื่อใช้ในงานอิเลคทรอนิกส์ได้เช่นเดียวกันแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น (Linear Power Supply) ถึงแม้เพาเวอร์ซัพพลายทั้งสองแบบจะต้องมีการใช้หม้อแปลงในการลดทอนแรงดันสูงให้เป็นแรงดันต่ำเช่นเดียวกัน แต่สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะต้องการใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเล็ก และน้ำหนักน้อย เมื่อเทียบกับแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น อีกทั้งสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าอีกด้วย

ในปัจจุบันสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายได้เข้ามามีบทบาทกับชีวิตเราอย่างมาก เครื่องใช้อิเลคทรอนิกส์ขนาดเล็กซึ่งต้องการแหล่งจ่ายไฟที่มีกำลังสูงแต่มีขนาดเล็ก เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องโทรสาร และ โทรทัศน์ จำเป็นจะต้องใช้สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย แนวโน้มการนำสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายมาใช้ในเครื่องใช้อิเลคทรอนิกส์ทุกประเภทจึงเป็นไปได้สูง การศึกษาหลักการทำงานและการออกแบบสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานอิเล็กทรอนิกส์

2.3.1 สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายกับแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น

ข้อได้เปรียบของสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น คือ ประสิทธิภาพที่สูง ขนาดเล็ก และน้ำหนักเบากว่าแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้นใช้หม้อแปลงความถี่ต่ำจึงมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักมาก ขณะใช้งานจะมีแรงดันและกระแสผ่านตัวหม้อแปลงตลอดเวลา กำลังงานสูญเสียที่เกิดจากหม้อแปลงจึงมีค่าสูง การคงค่าแรงดันแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้นส่วนมากจะใช้เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ต่ออนุกรมที่เอาต์พุตเพื่อจ่ายกระแสและคงค่าแรงดัน กำลังงานสูญเสียในรูปความร้อนจะมีค่าสูงและต้องใช้แผ่นระบายความร้อนขนาดใหญ่ซึ่งกินเนื้อที่ เมื่อเพาเวอร์ซัพพลายต้องจ่ายกำลังงานสูงๆ จะทำให้มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ปกติแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้นจะมีประสิทธิภาพประมาณ 30% หรืออาจทำได้สูงถึง 50% ในบางกรณี ซึ่งนับได้ว่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายซึ่งมีประสิทธิภาพในช่วง 65%-80%

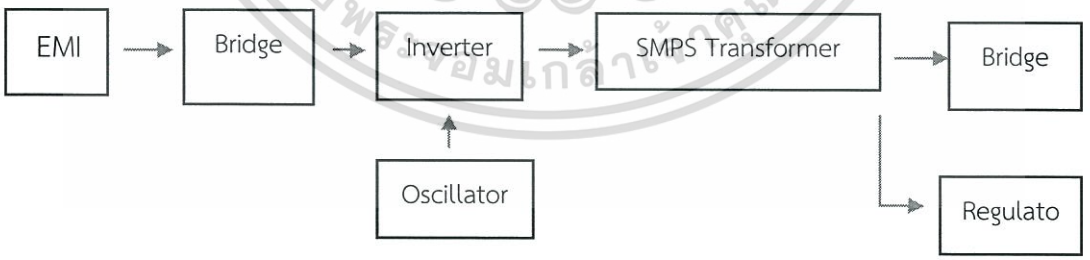
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายมีช่วงเวลาโคสต์อัพประมาณ $20x10^{-3}$ ถึง $50x10^{-3}$ วินาที ในขณะที่แหล่งจ่ายไฟเชิงเส้นจะทำได้เพียงประมาณ $2x10^{-3}$ วินาที ซึ่งมีผลต่อการจัดหาแหล่งจ่ายไฟสำรองเพื่อป้องกันการหยุดทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้กับเพาเวอร์ซัพพลายเมื่อเกิดการหยุดจ่ายแรงดันไฟสลับ รวมทั้งสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันอินพุตค่อนข้างกว้างจึงยังคงสามารถทำงานได้เมื่อเกิดกรณีแรงดันไฟตกอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะมีเสถียรภาพในการทำงานที่ต่ำกว่า และก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟเชิงเส้น รวมทั้งสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายยังมีความซับซ้อนของวงจรมากกว่าและมีราคาสูง ที่กำลังงานต่ำๆ แหล่งจ่ายไฟเชิงเส้นจะประหยัดกว่าและให้ผลดีเท่าเทียมกัน ดังนั้นสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจึงมักนิยมใช้กันในงานที่ต้องการกำลังงานตั้งแต่ 20 วัตต์ขึ้นไปเท่านั้น

2.3.2 หลักการทำงานของสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย

สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายโดยทั่วไปมีองค์ประกอบพื้นฐานที่คล้ายคลึงกัน และไม่ซับซ้อนมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หัวใจสำคัญของสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายจะอยู่ที่คอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากทำหน้าที่ทั้งลดทอนแรงดันและคงค่าแรงดันเอาต์พุตด้วย องค์ประกอบต่างๆ ทำงานตามลำดับดังนี้

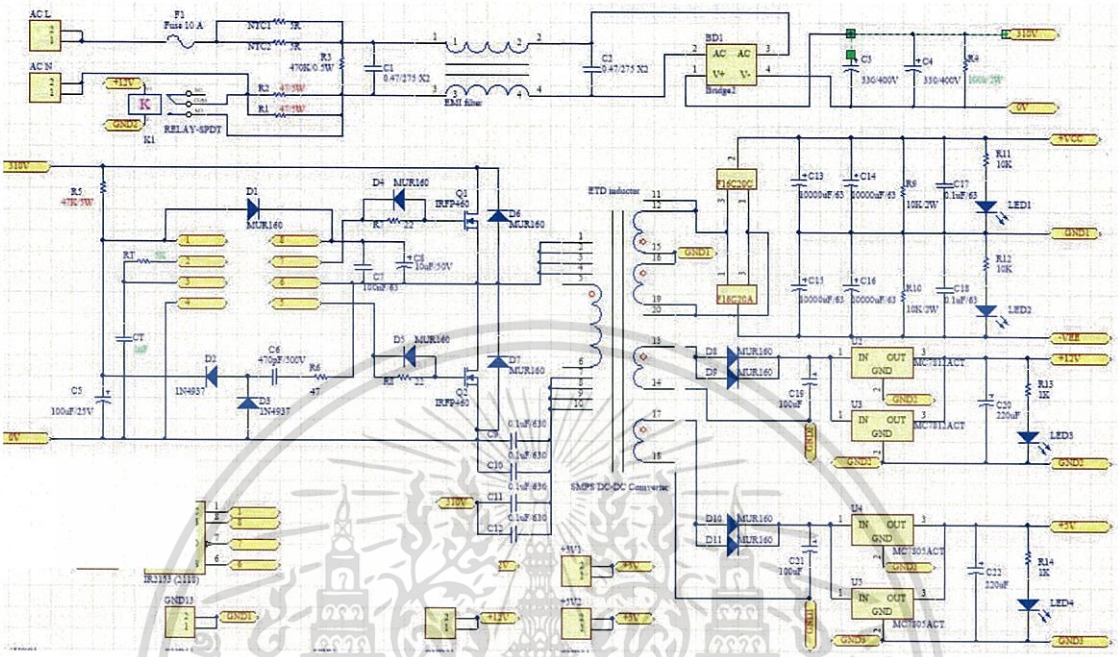


รูปที่ 2.9 flow chart

แรงดันไฟสลับค่าสูงจะผ่านเข้ามาทางวงจร RFI ฟิลเตอร์ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนและแปลงเป็นไฟตรงค่าสูงด้วยวงจรเร็กติไฟเออร์ เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จะทำงานเป็นเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์โดยการตัดต่อแรงดันเป็นช่วงๆ ที่ความถี่ประมาณ 20-200 KHz จากนั้นจะผ่านไปยังหม้อแปลงสวิตชิ่งเพื่อลดแรงดันลง เอาต์พุตของหม้อแปลงจะต่อกับวงจรเรียงกระแส และกรองแรงดันให้เรียบ การคงค่าแรงดันจะทำได้โดยการป้อนกลับค่าแรงดันที่เอาต์พุตกลับมายังวงจรควบคุม เพื่อควบคุมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์นำกระแสมากขึ้นหรือน้อยลงตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เอาต์พุต ซึ่งจะมีผลทำให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ได้



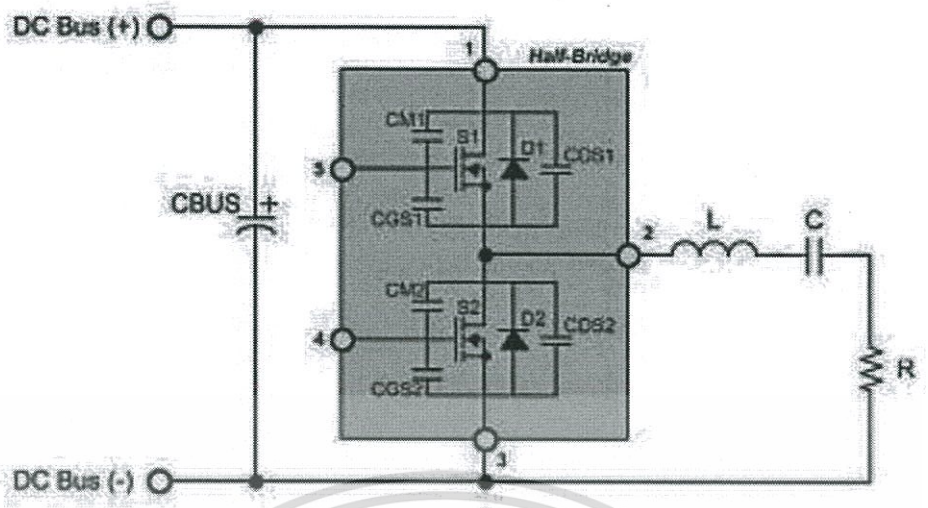
รูปที่ 2.10 วงจร switching power supply

วงจร Power supply ที่ใช้นั้นเป็น off-line half bridge power supply โดยเราได้ใช้แกน ETD49 ซึ่งเป็น E core และแกนในใช้วัสดุเป็น ferrite มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35.9mm ในภาคหลังนั้นจะใช้ half bridge converter

2.3.3 Half bridge inverter

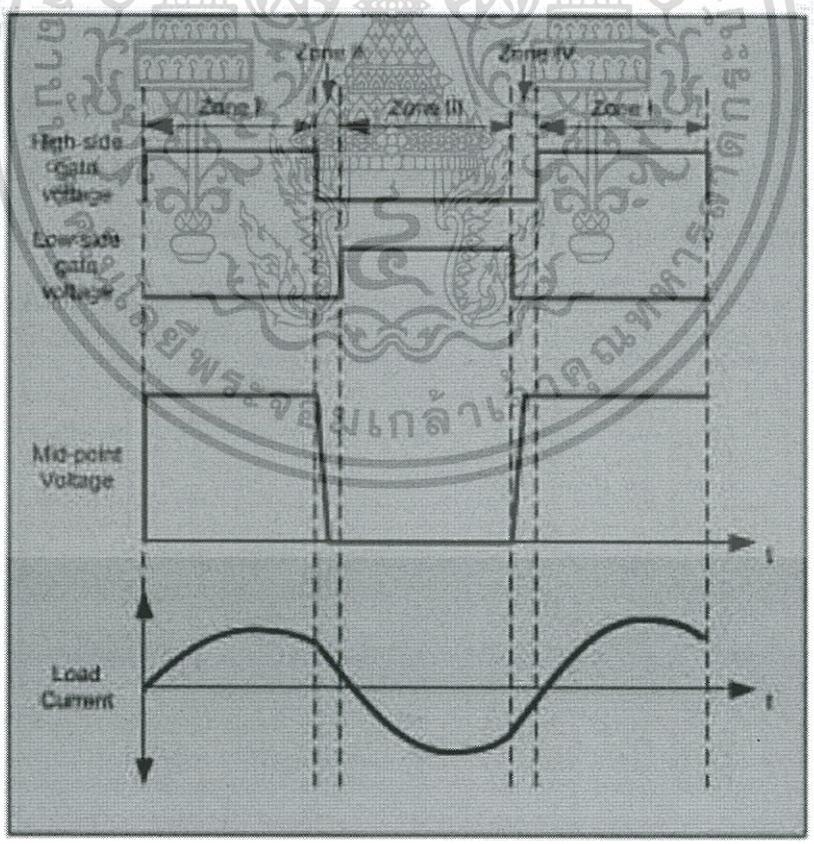
วงจร half bridge นั้นประกอบด้วยสวิทช์ส่วนบนและส่วนล่างที่ต่อกันแบบ cascade (ดังรูปที่ 2.11) ประกอบด้วย 5 จุด 1. DC bus voltage input 2. ตรงกลางระหว่างสองสวิทช์ 3. กราวด์ 4. low-side gate drive input 5. high-side gate drive input

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 Half bridge inverter

สวิทช์ทั้งสองตัวนั้นจะทำงานเปิด-ปิดสลับกันไป ผลที่ได้คือคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยมตรงโหนดที่สอง โดยคลื่นที่ได้นั้นสามารถแบ่งเป็นสี่ช่วงเวลา zone I, zone II, zone III, zone IV



รูปที่ 2.12 Half bridge inverter waveform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

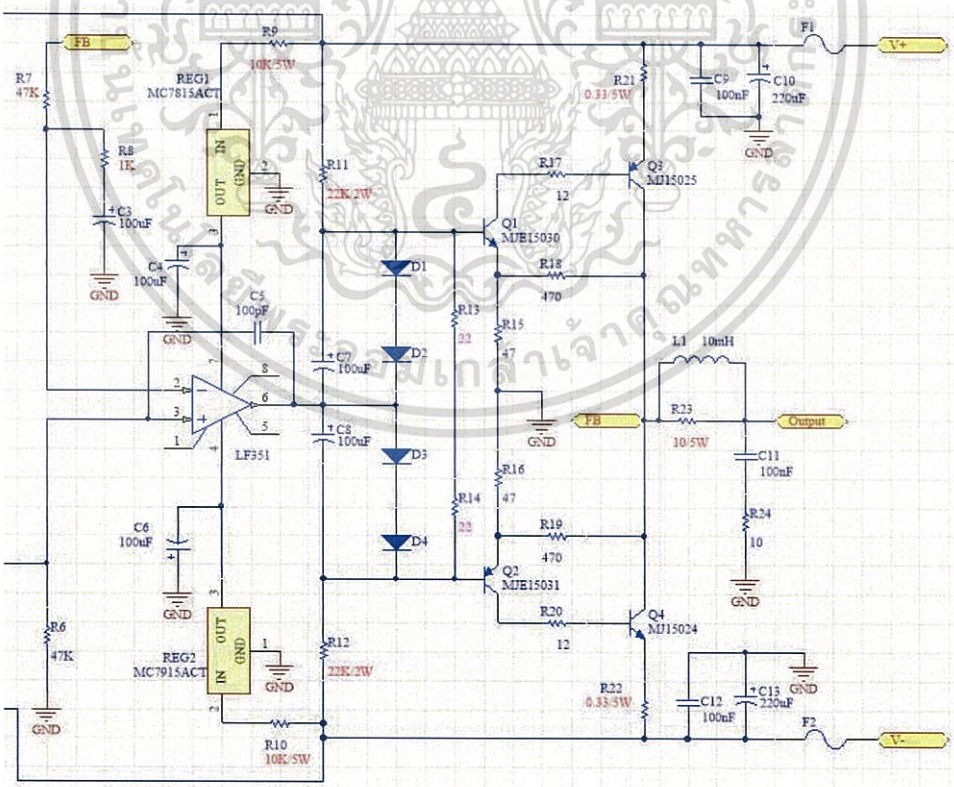
Zone I – สวิตช์ตัวบนทำงานส่งผลให้เอ้าพุทต์ต่อกับไฟกระแสตรง กระแสจะไหลจากไฟตรงไปยังโหลดของเอ้าพุตและลงกราวด์ กระแส จะขึ้นจุดสูงสุดในช่วงเวลานี้

Zone II – สวิตช์ตัวบนจะหยุดทำงานและสวิตช์ตัวล่างยังไม่เริ่มทำงาน ส่งผลให้ C ที่โหลดนั้นคายประจุออกอย่างต่อเนื่องทำให้ความต่างศักย์ และกระแสที่โหลดลดลงอย่างต่อเนื่อง

Zone III – สวิตช์ส่วนล่างเริ่มทำงานทำให้โหนดเอ้าพุตนั้นเชื่อมต่อกับกราวด์ ส่งผลให้ความต่างศักย์ที่โหลดนั้นเป็นศูนย์และกระแสนั้นจะไหลย้อนกลับจากโหลดลงกราวด์ กระแสจะลงต่ำสุดในช่วงเวลานี้

Zone IV – สวิทช์ตัวล่างหยุดทำงานและตัวบนยังไม่เริ่มทำงานส่งผลให้ C คายประจุออกอย่างต่อเนื่องทำให้ความต่างศักย์และกระแสที่เป็นลบนั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

2.4 Power Amplifier



รูปที่ 2.13 วงจร power amp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 Flow

วงจรนี้ได้ใช้ op-amp เป็นภาค differential และ VAS และใช้ BJT Transistor เป็นภาคขยาย ในวงจรamplifierนั้นจะแบบเป็น3 stage 1.Pre stage 2.Power stage

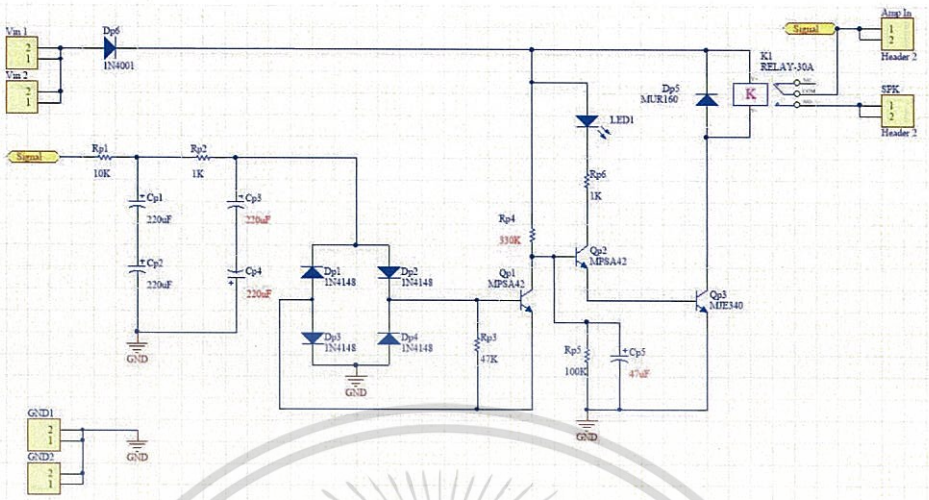
Op - amp จะรับสัญญาณเข้ามาทางอินพุทและขยายสัญญาณ ประกอบกับ negative feedback ทำให้สามารถรักษารูปร่างของสัญญาณไม่ให้มีรูปร่างผิดเพี้ยนไป แล้วจึงส่งไปยังวงจรไดรเว่อร์และส่งต่อไปยังวงจรขยาย ซึ่ง diode นั้นทำหน้าที่เป็น Bias ให้แก่ภาค Output.

หน้าที่การทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว

1. Pre stage – นั้นจะใช้หลอดสูญญากาศเบอร์ 12AU7 เป็น Buffer
2. Voltage amplifier stage – จะมี IC Op-amp ทำหน้าที่เป็น differential และ ขยายแรงดันให้ภาค Power
3. Power stage – จะใช้ BJT Transistor เบอร์ MJ15024 เป็นภาคขยายหลัก และได้ใส่ zobel network ร่วมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Protection



รูปที่ 2.15 วงจร Protection

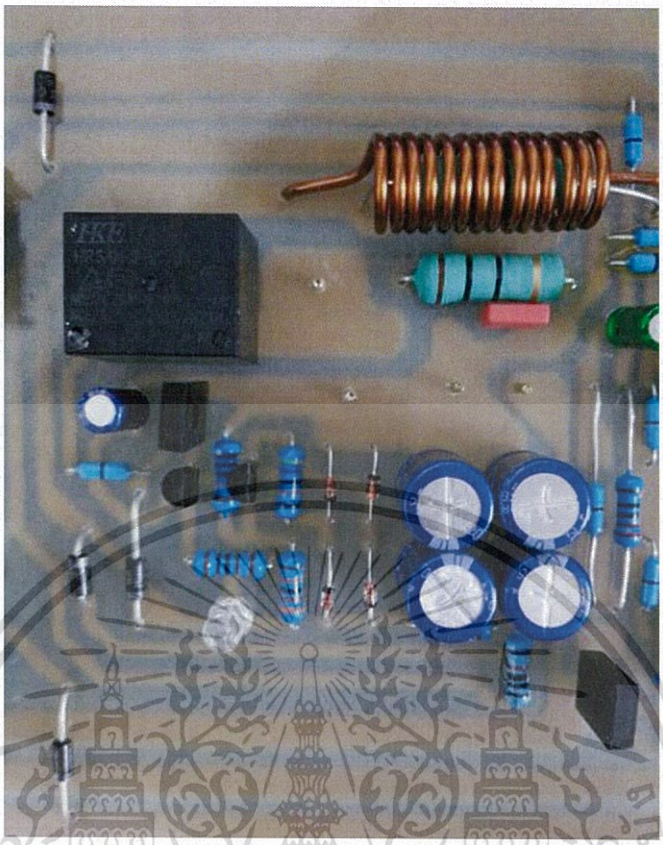
สำหรับวงจรเครื่องขยายเสียงรุ่นใหม่ๆมักนิยมต่อวงจรแบบ direct coupling จากวงจรขยายไปยังลำโพงโดยตรงแบบวงจรที่เรียกกันทั่วไป ได้แก่วงจรขยายแบบ OCL ซึ่งวงจรแบบนี้จะจ่ายไฟให้วงจรทั้งไฟบวกและไฟลบหรือ เรียกว่า แบบไฟสามสาย คุณสมบัติของวงจรแบบนี้จะมีข้อดีที่สามารถให้ผลตอบสนองทางความถี่ได้ดีกว่าวงจรแบบอื่นๆแต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสีย ตรงที่เมื่อวงจรเกิดชำรุดเสียหายขึ้นมา ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม จะทำให้เกิดแรงดันไฟตรงเป็นบวก หรือ ลบสูงเท่ากับไฟเลี้ยงออกไฟยังลำโพงทันที

แรงดันไฟดังกล่าวนี้จะมีผลทำให้ขดลวดที่พันลำโพงไหม้และขาดไปในที่สุดดังนั้น หากเราไม่ต้องการให้ลำโพงซึ่งโดยปกติจะเป็นส่วนที่มีราคาแพงที่สุดของเครื่องเสียงต้องเกิดความเสียหายเราจึงจำเป็นต้อนมีวงจรที่ทำหน้าที่ตัดแรงดันไฟดังกล่าวไม่ให้ออกไปยังลำโพงเราจึงเรียกวงจรนี้ว่า วงจรป้องลำโพง

วงจร protection ที่เราใช้นั้นเป็นแบบป้องกันกระแส DC รั่วออกลำโพงในกรณีที่เครื่องขยายเสียงมีปัญหา โดยในส่วนแรกจะมี low pass filter โดยความถี่ที่มากกว่า 20Hz จะถูกช็อตลงกราว จากนั้นจะผ่าน diode bride โดยกระแสตรงที่เข้ามาจะไปตกคร่อม R 18k ohm ซึ่งไปไบอัส transistor BC546 ทำให้กระแสสงบของ transistor ภาคหลังไหลลงกราวด์จึงไม่มีกระแสไหลผ่านตัว Relay ทำให้ relay เป็น normally close

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.16 รูปวงจรจริง

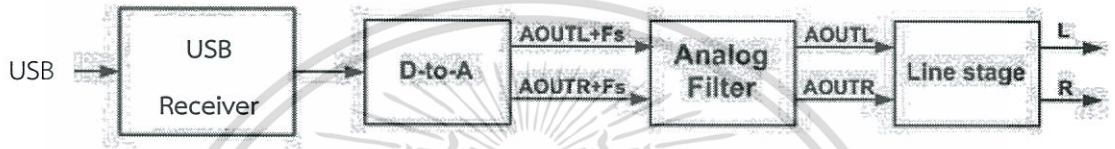
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

143923

2.6 Digital to analog converter

หลักการทำงานของ ดีทูเอ(DAC)คือ จะทำการรับสัญญาณดิจิตอลที่อยู่ในรูปแบบของ USB จากคอมพิวเตอร์ที่มีความถี่สุ่ม ตั้งแต่ 44.1 kHz ถึง 192kHz. เข้ามาถอดรหัสโดยใช้ไอซีเบอร์ PCM2796 ทำการถอดรหัสแล้วส่งสัญญาณไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (Digital to Analog Converter , DAC) เบอร์ PCM1794 ขนาด 24 บิต แล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Analog Low Pass Filter)จากนั้นส่งไปยังวงจรลายสเตจ (Line Stage) แล้วทำการส่งออกภาคเอาท์พุตเพื่อทำการขยายต่อไป

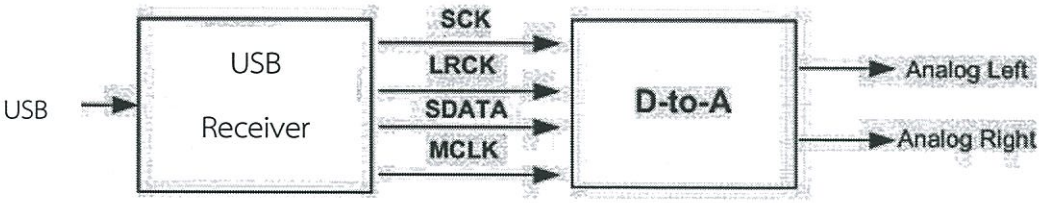


รูปที่ 2.17 บล็อคไดอะแกรมของเครื่องดีทูเอ

จากบล็อคไดอะแกรมของเครื่องดีทูเอ โดยรับสัญญาณ USB ซึ่งเป็นข้อมูล Digital Audio เป็นข้อมูลเสียงดิจิตอล, การเข้ารหัสสัญญาณซ้ายขวา, สัญญาณนาฬิกา, บิตควบคุม, บิตการแก้ไขข้อผิดพลาด, โครงสร้างข้อมูลนี้ถูกรวมกันมาในสายเส้นเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ไอซีทำการถอดรหัสข้อมูลหรือทำการแยกข้อมูลทางเสียงออกมาเสียก่อนซึ่งไอซีที่ใช้เรียกว่า USB Receiver ไอซีสามารถถอดรหัสออกมาเป็นสัญญาณการเชื่อมต่อ 4 สัญญาณด้วยกันเรียกรูปแบบสัญญาณแบบนี้ว่า การเชื่อมต่อสัญญาณเสียงดิจิตอลแบบอนุกรม (Audio Serial Data Interface) เพื่อส่งให้ ดีทูเอ ทำการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกแล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Active Analog Filter Low Pass) เพื่อกำจัด ความถี่แซมปริงเรท(Fs)และความถี่ที่สูงกว่าความถี่ออดิโอที่ไม่ต้องการออกไป จากนั้นส่งไปยังวงจรลายสเตรจ (Line Stage) เพื่อปรับปรุงคุณภาพหรือบัฟเฟอร์สัญญาณก่อน แล้วจึงทำการส่งออกทางเอาท์พุตเพื่อทำการขยายต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 Audio Serial Data



รูปที่ 2.18 การต่อสัญญาณ Audio Serial Data กับ ดีทูเอ

สัญญาณ Audio Serial Data ที่ถอดจากไอซี USB Receiver จะเป็นสัญญาณสี่เส้นดังนี้

SCLK (Serial Audio Output Bit Clock) คือสัญญาณนาฬิกา ของข้อมูลเสียงดิจิตอลโดยจะมีความถี่ของสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 64 เท่าของความถี่สุ่ม

LRCK (Serial Audio Output Left/Right Clock) คือสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ระบุ ข้อมูลเสียงดิจิตอลว่าเป็น frame ซ้าย หรือ ขวา โดยจะมีความถี่ของสัญญาณนาฬิกาเท่ากับความถี่สุ่ม

SDOUT (Serial Audio Output Data) คือเป็นข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิตอลแบบอนุกรม

MCLK (Recovered Master Clock) 8nvสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการทำตัวกรองดิจิตอลอินเตอร์โพเลเตอร์และซิกม่า-เดลต้ามอดูเลเตอร์ ซึ่งจะเป็นสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ เท่ากับ 128 เท่าของความถี่สุ่ม หรือ 256 เท่าของความถี่สุ่ม

2.6.2 Audio Serial Data Format

รูปแบบ ข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิตอลแบบอนุกรมมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบแต่สามารถแบบได้ตามลักษณะในการส่งข้อมูลได้ 4 แบบใหญ่ๆด้วยกันคือ

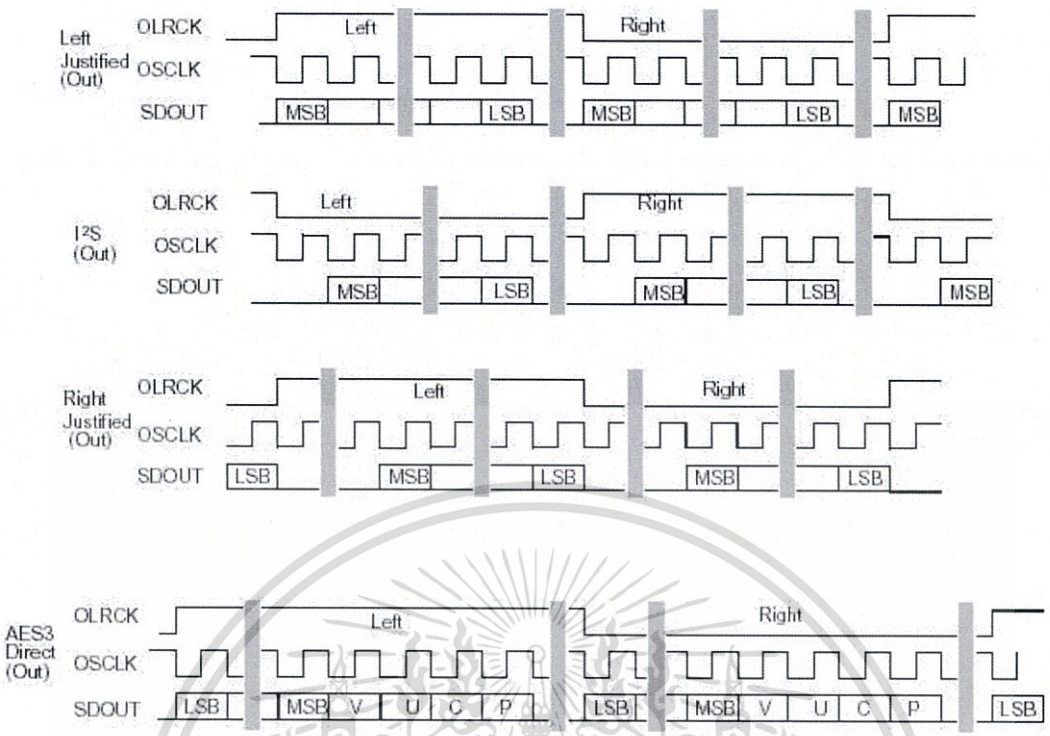
Left Justified,up to 24-bit data (MSB ชิดซ้าย)

I2S ,up to 24-bit data

Right Justified, 24-bit data (MSB ชิดขวา)

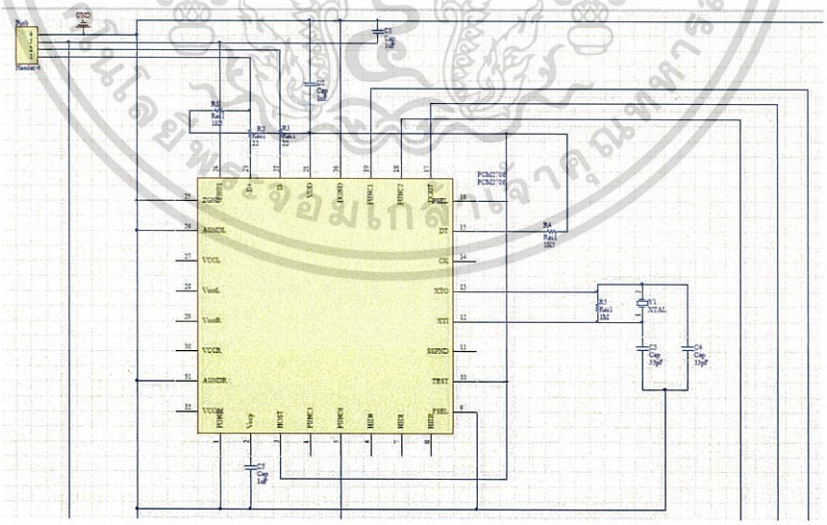
AES3 Direct (เพิ่มข้อมูลบิท V,U,C,P)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



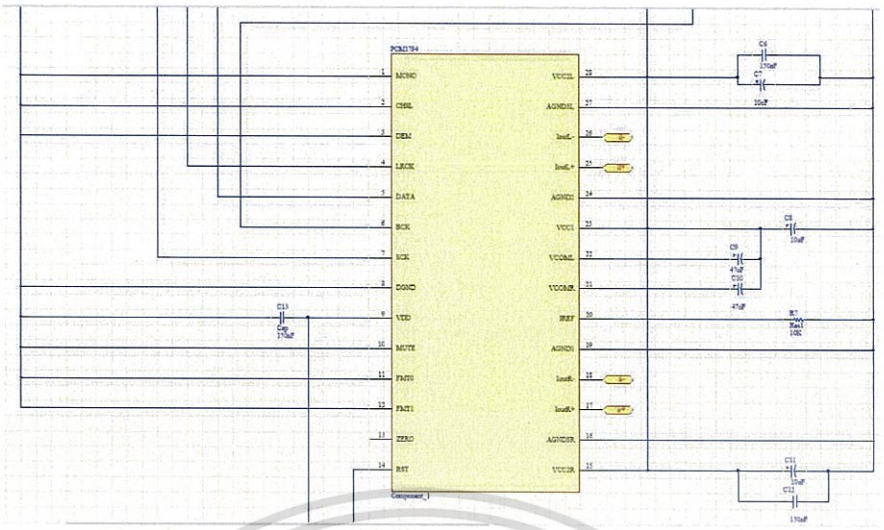
รูปที่ 2.19 แสดงสัญญาณ Audio Serial Data Format

สำหรับการเลือกใช้รูปแบบข้อมูลสัญญาณเสียงดิจิตอลแบบอนุกรมนี้จะขึ้นอยู่กับชิบ DAC ของแต่ละบริษัทว่ารองรับรูปแบบไหน

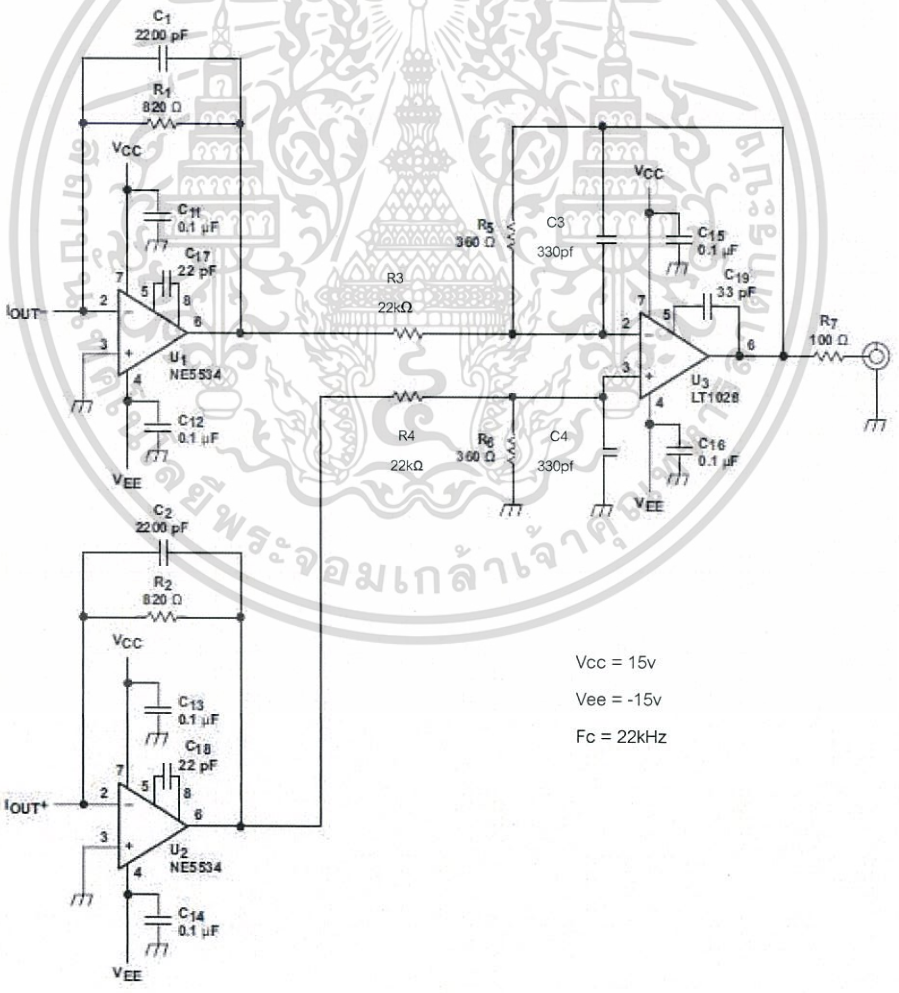


รูปที่ 2.20 วงจร USB Receiver

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 วงจร DAC



รูปที่ 2.22 วงจรภาค i/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การใช้งาน Character LCD กับ Arduino

2.7.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ LCD Display

รูปที่ 2.23 LCD 16x2

จอ Liquid Crystal Display (LCD) เป็นจอแสดงผลรูปแบบหนึ่งที่นิยมนำมาใช้งานกันกับระบบสมองกลฝังตัวอย่างแพร่หลาย จอ LCD มีทั้งแบบแสดงผลเป็นตัวอักขระเรียกว่า Character LCD ซึ่งมีการกำหนดตัวอักษรหรืออักขระที่สามารถแสดงผลไว้ได้อยู่แล้ว และแบบที่สามารถแสดงผลเป็นรูปภาพหรือสัญลักษณ์ได้ตามความต้องการของผู้ใช้งานเรียกว่า Graphic LCD นอกจากนี้บางชนิดเป็นจอที่มีการผลิตขึ้นมาใช้เฉพาะงาน ทำให้มีรูปแบบและรูปร่างเฉพาะเจาะจงในการแสดงผล เช่น นาฬิกาดิจิตอล เครื่องคิดเลข หรือ หน้าปัดวิทยุ เป็นต้น

โครงสร้างโดยทั่วไปของ LCD

โครงสร้างของ LCD ทั่วไปจะประกอบขึ้นด้วยแผ่นแก้ว 2 แผ่นประกบกันอยู่ โดยเว้นช่องว่างตรงกลางไว้ 6-10 ไมโครเมตร ผิวด้านในของแผ่นแก้วจะเคลือบด้วยตัวนำไฟฟ้าแบบใสเพื่อใช้แสดงตัวอักษร ตรงกลางระหว่างตัวนำไฟฟ้าแบบใสกับผลึกเหลวจะมีชั้นของสารที่ทำให้โมเลกุลของผลึกรวมตัวกันในทิศทางที่แสงส่องมากระทบเรียกว่า Alignment Layer และผลึกเหลวที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นแบบ Magnetic โดย LCD สามารถแสดงผลให้เรามองเห็นได้ทั้งหมด 3 แบบด้วยกันคือ

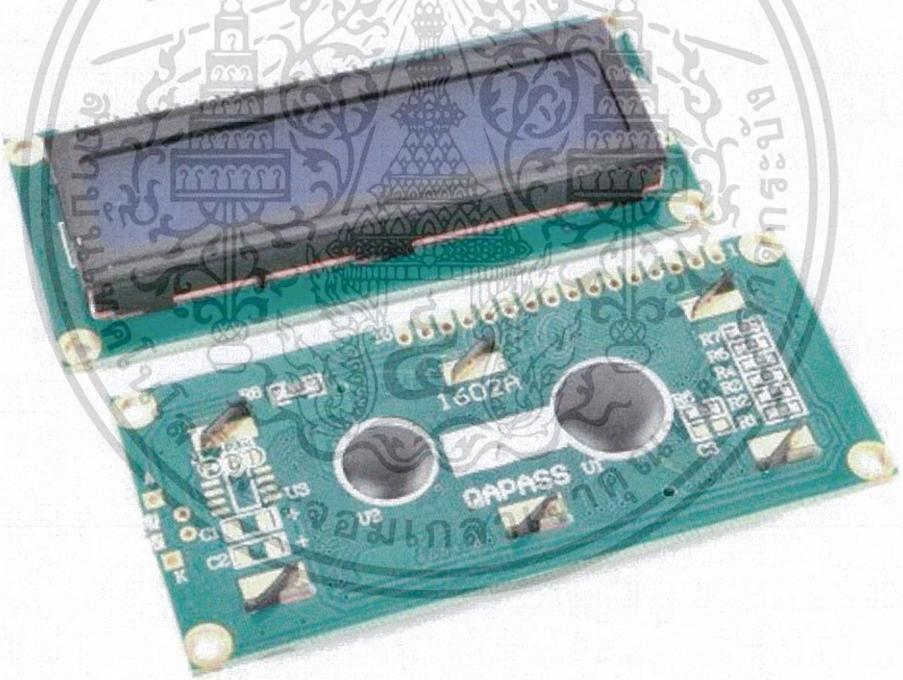
- แบบใช้การสะท้อนแสง (Reflective Mode) LCD แบบนี้ใช้สารประเภทโลหะเคลือบอยู่ที่แผ่นหลังของ LCD ซึ่ง LCD ประเภทนี้เหมาะกับการนำมาใช้งานในที่ที่มีแสงสว่างเพียงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบใช้การส่งผ่าน (Transitive Mode) LCD แบบนี้วางหลอดไฟไว้ด้านหลังจอ เพื่อทำให้การอ่านค่าที่แสดงผลทำได้ชัดเจน

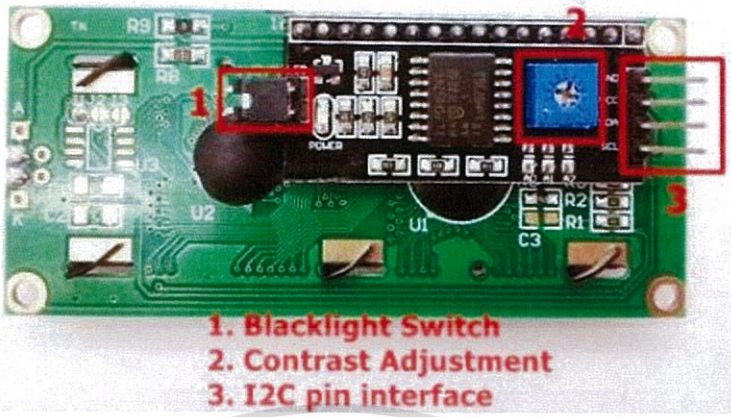
- แบบส่งผ่านและสะท้อน (Transflective Mode) LCD แบบนี้เป็นการนำเอาข้อดีของจอแสดงผล LCD ทั้ง 2 แบบมารวมกัน

จอ LCD 16x2 Character ที่นิยมวางจำหน่ายจะมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ LCD แบบปกติที่เชื่อมต่อแบบขนาน (Parallel) และ LCD แบบที่เชื่อมต่ออนุกรม (Serial) แบบ I2C โดยทั้ง 2 แบบตัวจอมีลักษณะเดียวกันเพียงแต่แบบ I2C จะมีบอร์ดเสริมทำให้สื่อสารแบบ I2C ได้เชื่อมต่อได้สะดวกขึ้น



รูปที่ 2.24 จอ LCD 16x2 Character (Parallel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 จอ LCD 16x2 Character (I2C)

ต่อมาเราจะมาดูกันว่าทั้ง 2 แบบมีขาหรือ Pin ในการเชื่อมต่อแตกต่างกันอย่างไร โดยแบบแรกเป็นแบบ Parallel มีทั้งหมด 16 ขาด้วยกัน ส่วนแบบที่สองเป็นแบบ I2C มีเพียง 4 ขา สามารถแยกออกตามตารางด้านล่างครับ

2.7.1.1 แบบ Parallel มี 16 ขา

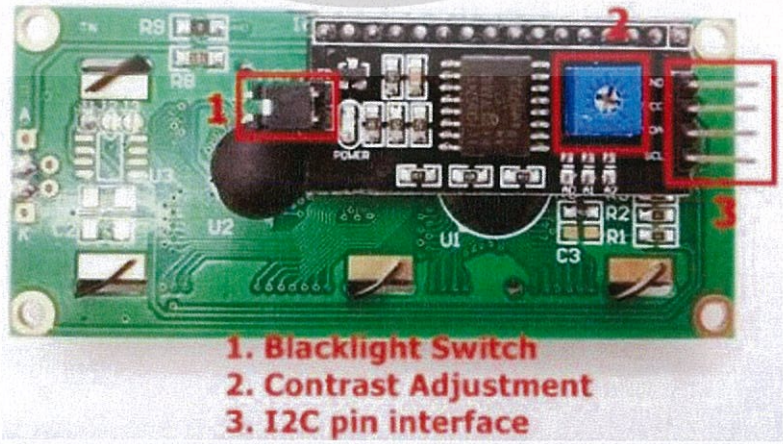
รูปที่ 2.26 ด้านหน้าจอ LCD 16x2 (Parallel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 ตารางขาของจอ LCD 16x2 แบบ Parallel

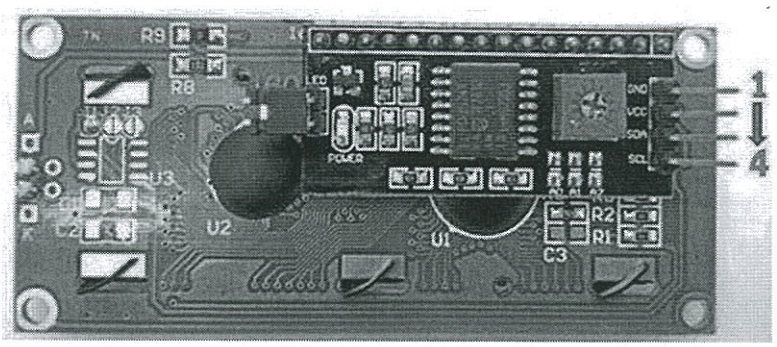
Pin No	Symbol	Description
1	VSS/GND	Ground
2	VDD	+5VDC
3	VO/VEE	LCD Control สำหรับปรับความเข้มของตัวอักษร
4	RS	Register Select เป็นขาอินพุตสำหรับเลือกเขียนอ่านข้อมูลในรีจิสเตอร์
5	RW	Read/Write เป็นขาอินพุตสำหรับเลือกโหมดเขียนหรืออ่านข้อมูล
6	E/EN	Enable เป็นขาอินพุตสำหรับสัญญาณ Pulse เมื่อต้องการเขียนหรืออ่านข้อมูล
7	DB0	Data Pins 8-Bit
8	DB1	
9	DB2	
10	DB3	
11	DB4	
12	DB5	
13	DB6	
14	DB7	
15	A	(LED+) เป็นขา Vcc สำหรับ LED backlight (5V)
16	K	(LED-) เป็นขา Gnd สำหรับ LED backlight (Gnd)

2.7.1.2 แบบ I2C มี 4 ขา



รูปที่ 2.27 ด้านหลังจอ LCD 16x2 (I2C) 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ด้านหลังจอ LCD 16x2 (I2C) 2

ตารางที่ 6 ตารางขาของจอ LCD 16x2 แบบ I2C

Pin No	Symbol	Description
1	GND	Ground
2	VCC	+5VDC
3	SDA	Serial Data
4	SCL	Serial Clock

2.7.2 การควบคุมการแสดงผลของ LCD

ในการควบคุมหรือสั่งงาน ตัวจอ LCD นั้นมีส่วนควบคุม (Controller) รวมไว้ในตัวแล้ว ผู้ใช้สามารถส่งรหัสคำสั่งควบคุมการทำงานของจอ LCD ผ่าน Controller ว่าต้องการใช้แสดงผลอย่างไร โดย LCD Controller ของจอตัวนี้เป็น Hitachi เบอร์ HD44780 และขาในการเชื่อมต่อระหว่าง LCD กับ Microcontroller มีดังนี้

1. GND เป็นกราวด์ใช้ต่อระหว่าง Ground ของระบบ Microcontroller กับ LCD

2. VCC เป็นไฟเลี้ยงวงจรที่ป้อนให้กับ LCD ขนาด +5VDC

3. VO ใช้ปรับความสว่างของหน้าจอ LCD

4. RS ใช้บอกให้ LCD Controller ทราบว่า Code ที่ส่งมาทางขา Data เป็นคำสั่งหรือข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. R/W ใช้กำหนดว่าจะอ่านหรือเขียนข้อมูลกับ LCD Controller

6. E เป็นขา Enable หรือ Chips Select เพื่อกำหนดการทำงานให้กับ LCD Controller

7-14. DB0-DB7 เป็นขาสัญญาณ Data ใช้สำหรับเขียนหรืออ่านข้อมูล/คำสั่ง กับ LCD Controller

วิธีการสั่งงานจะแตกต่างกันไป โดย LCD Controller สามารถรับรหัสคำสั่งจาก Microcontroller ได้จากสัญญาณ RS R/W และ DB0-DB7 ในขณะที่สัญญาณ E มีค่า Logic เป็น “1” ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะใช้ร่วมกันเพื่อกำหนดเป็นรหัสคำสั่งสำหรับสั่งงาน LCD โดยหน้าที่ของแต่ละสัญญาณพอสรุปได้ดังนี้

- E เป็นสัญญาณ Enable เมื่อมีค่าเป็น “1” เป็นการบอกให้ LCD ทราบว่าอุปกรณ์ภายนอกต้องการติดต่ออ่านหรือเขียนข้อมูล “0” ให้ LCD ไม่สนใจสัญญาณ RS R/W และ DB7-DB0

- RS เป็นสัญญาณสำหรับกำหนดให้ LCD ทราบว่าอุปกรณ์ภายนอกต้องการติดต่อกับ LCD ในขณะนั้นเป็นรหัสคำสั่งหรือข้อมูล โดยถ้า

RS = “0” หมายถึง คำสั่ง

RS = “1” หมายถึง ข้อมูล

- R/W เป็นสัญญาณสำหรับบอกให้ LCD ทราบว่าอุปกรณ์ภายนอกต้องการอ่านหรือเขียนกับ LCD โดยถ้า

R/W = “0” หมายถึง เขียน

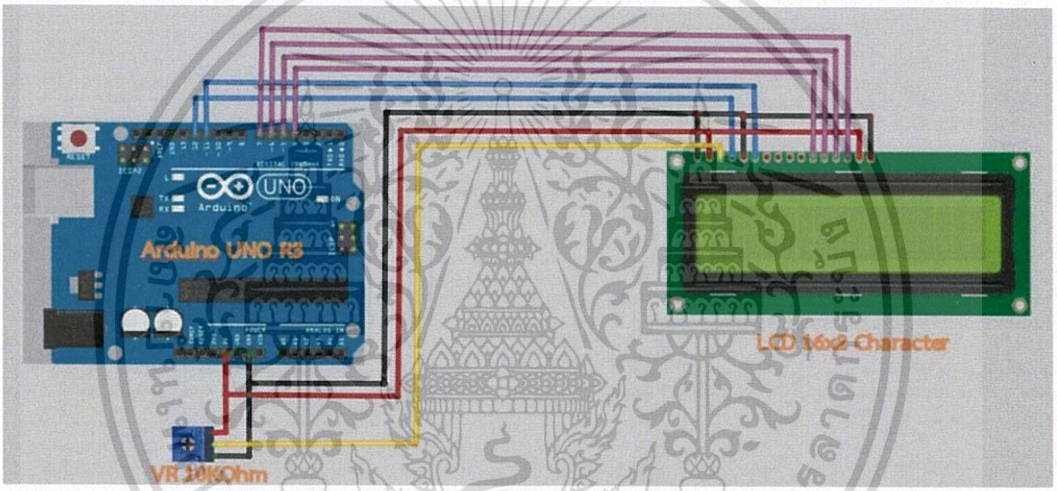
R/W = “1” หมายถึง อ่าน

- DB0-DB7 เป็นสัญญาณแบบ 2 ทิศทาง โดยจะสัมพันธ์กับสัญญาณ R/W ใช้สำหรับรับสั่งคำสั่งและข้อมูลระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอก โดยถ้า R/W =“0” สัญญาณ DB7-DB0 จะส่งจากอุปกรณ์ภายนอกมาที่ LCD แต่ถ้า R/W = “1” สัญญาณ DB7-DB0 จะส่งจาก LCD ไปยังอุปกรณ์ภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 การเชื่อมต่อสัญญาณขาข้อมูลระหว่าง Microcontroller กับ LCD Controller

การเชื่อมต่อสัญญาณขาข้อมูลระหว่าง Microcontroller กับ LCD Controller สามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ การเชื่อมต่อแบบ 8 บิต (DB0-DB7) และการเชื่อมต่อแบบ 4 บิต (DB4-DB7) ทั้งสองแบบแตกต่างกันเพียงจำนวนขาที่ใช้คือ 8 หรือ 4 ขา และยังสามารถทำงานได้เหมือนกัน อย่างที่แน่นอนในการส่งข้อมูลแบบ 4 ขา ย่อมทำได้ช้ากว่า 8 ขา แต่ไม่ได้ช้ามากจนสังเกตุได้ด้วยสายตา ในการต่อกับ Arduino นั้นจึงนิยมต่อเพียง 4 ขา หรือ 4 บิตเท่านั้น เพื่อเป็นการประหยัดขาในการต่อใช้งานไปไว้ต่อกับอุปกรณ์อื่น ตัวอย่างเช่น Arduino UNO R3 นั้นมีขาให้ใช้งานค่อนข้างน้อย



รูปที่ 2.29 ขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ Arduino UNO R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ตารางขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับ Arduino UNO R3

VR 10 KOhm	LCD	Arduino
GND	VSS/GND	Ground
VCC	VDD	+5VDC
Signal	VO/VEE	-
-	RS	Digital Pin 12
-	RW	Ground (เพราะเราต้องการเขียน)
-	E/EN	Digital Pin 11
-	DB4	Digital Pin 4
-	DB5	Digital Pin 5
-	DB6	Digital Pin 6
-	DB7	Digital Pin 7
-	A	+5VDC
-	K	Ground

2.7.4 รายละเอียดคำสั่งในการสั่งงานระหว่าง Arduino กับ จอ LCD

คำสั่งในการควบคุมจอ LCD ของ Arduino นั้น ทาง Arduino.cc เขียนเป็น Library มาให้เพื่อสะดวกในการนำไปใช้งาน หลังจากต่อสายเสร็จเรียบร้อย ขั้นตอนแรกในการเริ่มเขียนโปรแกรมคือการเรียกใช้ Library ของ LCD จากไฟล์ชื่อ LiquidCrystal.h หลังจากนั้นมาดูกันว่ามีฟังก์ชั่นที่สำคัญอะไรบ้างที่ใช้สั่งงานให้จอ LCD

ฟังก์ชั่น LiquidCrystal(); ใช้ประกาศขาที่ต้องการส่งข้อมูลไปยังจอ LCD รูปแบบในการสั่งงานคือ

LiquidCrystal lcd(rs, enable, d4, d5, d6, d7) <<<<<<< ในกรณีใช้งานแบบ 4 บิต

LiquidCrystal lcd(rs, enable, d0, d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7) <<<<<<< ในกรณีใช้งานแบบ 8 บิต

ในบทความนี้ใช้แบบ 4 บิต คือ LiquidCrystal lcd(12, 11, 4, 5, 6, 7); ก็หมายถึงการเชื่อมต่อ rs ที่ขา 12 , Enable ที่ขา 11 , และ DB4-DB7 ที่ขา 4-7 ของ Arduino ตามลำดับ

ฟังก์ชั่น begin(); ใช้กำหนดขนาดของจอ ในบทความนี้เราใช้ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด จึงประกาศเป็น lcd.begin(16, 2);

ฟังก์ชั่น setCursor(); ใช้กำหนดตำแหน่งและบรรทัดของ Cursor เช่น lcd.setCursor(0, 1); คือ ให้เคอร์เซอร์ไปที่ตำแหน่งที่ 0 บรรทัดที่ 1 การนับตำแหน่งเริ่มจาก 0 ดังนั้น LCD 16x2 มีตำแหน่ง 0 – 15 บรรทัด คือ 0 กับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชั่น print(); ใช้กำหนดข้อความที่ต้องการแสดง เช่น lcd.print("ThaiEasyElec"); คือ ให้แสดงข้อความ “ThaiEasyElec” ออกทางหน้าจอ LCD

2.8 Bluetooth

บลูทูธ คือ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะใกล้แบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล(wireless personal area networks: WPAN) เป็นมาตรฐานที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายขนาดเล็ก เช่น เครื่องพีดีเอ (personal digital assistant:PDA) อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาหรือเคลื่อนที่รวมไปถึงการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านอุปกรณ์ปลายทางที่ให้บริการ

รูปที่ 2.30 พื้นฐานอุปกรณ์เชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 ประวัติของBluetooth

บลูทูธถูกระบุว่ามาจากชื่อของกษัตริย์ชาวเดนมาร์กที่พระนามว่า ฮาราล์ด บลาทานด์ (Herald Blatand) หรือ ฮาราล์ด บลูทูธ (Harald Bluetooth) ซึ่งครองราชย์ในปี ค.ศ. ๙๔๐ – ค.ศ. ๙๘๕ (พ.ศ. ๑๔๘๓ – พ.ศ.๑๕๒๘) โดยพระองค์ทรงเป็นผู้ที่รวบรวมอาณาจักรเดนมาร์กและนอร์เวย์เข้าด้วยกันให้เป็นปึกแผ่น ซึ่งมีลักษณะคล้ายจุดประสงค์ของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายชนิดนี้ ที่ต้องการรวบรวมการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์การสื่อสารชนิดต่างๆ ให้เป็นเครือข่ายหนึ่งเดียว ดังนั้นเทคโนโลยีการสื่อสารชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า บลูทูธ

2.8.2 หลักการพื้นฐานของBluetooth

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบลูทูท ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากไม่จำกัดพื้นที่ มิต้องใช้อุปกรณ์ที่เป็นสายสัญญาณ สามารถเชื่อมต่อได้ไกล เช่น การส่งข้อมูลจากโทรศัพท์เคลื่อนที่เครื่องหนึ่งไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่อีกเครื่องหนึ่ง หากส่งผ่านสายสัญญาณ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อทำให้อุปกรณ์ทั้งสองเชื่อมต่อกันได้ แต่เทคโนโลยีบลูทูธ ช่วยให้การส่งข้อมูลของอุปกรณ์ทั้งสองสะดวกขึ้นโดยการส่งผ่านคลื่นวิทยุ

ระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลที่ใช้เชื่อมต่อ โดยตรงระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้กันชนิดนี้ ในแต่ละเครือข่าย จะมีอุปกรณ์ตัวหนึ่ง เรียกว่า มาสเตอร์ (Master) หรือตัวแม่ข่าย ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและประสานงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นๆในเครือข่ายเดียวกัน ส่วนอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อตัวอื่นๆ เรียกว่า สลาฟ(Slave) หรือตัวลูกข่าย ซึ่งโครงสร้างการทำงานของบลูทูธนี้คล้ายกับระบบบัสอนุกรมแบบใช้ร่วมร่วม (universal serial bus : USB) ที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วๆไป แต่ต่างกันในส่วนของการเชื่อมต่อ โดยอุปกรณ์บลูทูธส่วนใหญ่สามารถทำหน้าที่ได้ทั้งมาสเตอร์หรือสลาฟ
ตามความเหมาะสม ซึ่งภายในเครือข่ายจะมีการจัดการกันเองโดยอัตโนมัติด้วย โพรโทคอลมาตรฐาน

อุปกรณ์บลูทูธแต่ละตัวจะมีแอดเดรส (Address) หรือการระบุตำแหน่ง ซึ่งเป็นรหัสประจำตัวที่ไม่ซ้ำกับอุปกรณ์ตัวอื่น มีความยาวขนาด ๔๘ บิต เรียกว่า บีดี แอดเดอ (BD_ADDR) ใช้ในการจำแนกอุปกรณ์แต่ละตัวและใช้ในการระบุความถี่ที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ตัวนั้นๆ ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 ความถี่คลื่นวิทยุ

ความถี่มาตรฐานสำหรับเทคโนโลยีบลูทูทประมาณ ๒.๔ – ๒.๔๘๓ กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ซึ่งช่วงความถี่ที่ใช้งานอาจแตกต่างกันบ้างในบางประเทศ เนื่องจากความถี่ที่ใช้สำหรับบลูทูท เป็นความถี่สาธารณะ (Unlicensed frequency) ไม่ต้องขออนุญาตการใช้งานความถี่ดังกล่าวจากหน่วยงานกำหนดหรือจัดสรรความถี่ของประเทศนั้นๆ ทำให้การใช้งานความถี่นี้แออัด อาจถูกรบกวนจากสิ่งต่าง ๆ เช่น คลื่นสัญญาณรบกวนจากเครือข่าย ที่อยู่ใกล้กันได้ง่าย ดังนั้นประสิทธิภาพของการใช้งานบลูทูธจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของอุปกรณ์ จำนวนหรือความหนาแน่นของการใช้งานด้วย

2.8.4 ระยะเชื่อมต่อของบลูทูธ

อุปกรณ์บลูทูธถูกแบ่งออกเป็นสามระดับ ตามความสามารถในการส่งข้อมูล ดังนี้

ระดับหนึ่ง (Class 1) สามารถรับส่งข้อมูลในรัศมี ๑๐๐ เมตร ใช้พลังงานประมาณ ๑๐๐ มิลลิวัตต์

ระดับสอง (Class 2) สามารถรับส่งข้อมูลในรัศมี ๑๐ เมตร ใช้พลังงานประมาณ ๒.๕ มิลลิวัตต์

ระดับสาม (Class 3) สามารถรับส่งข้อมูลในรัศมี ๑ เมตร ใช้พลังงานประมาณ ๑ มิลลิวัตต์

2.8.5 ส่วนประกอบของชุดข้อมูล

ข้อมูลที่รับส่งอยู่ในเครือข่ายบลูทูท ถูกแบ่งออกเป็นหน่วยย่อยๆ เรียกว่า พีดียู (packet data unit: PDU) ซึ่งประกอบไปด้วย

ก) รหัสการเข้าถึง (Access Code) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลหมายเลขเครือข่ายและแอดเดรสหรือตำแหน่งของอุปกรณ์ต้นและปลายทาง มีขนาดยาว ๗๒ บิต

ข) ส่วนหัว (Header) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูล มีขนาดยาว ๕๔ บิต

ค) ข้อมูล (Payload) คือข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังปลายทาง มีขนาดระหว่าง ๐ – ๒,๗๔๕ บิต ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.6 เครือข่ายขนาดย่อม (Piconet)

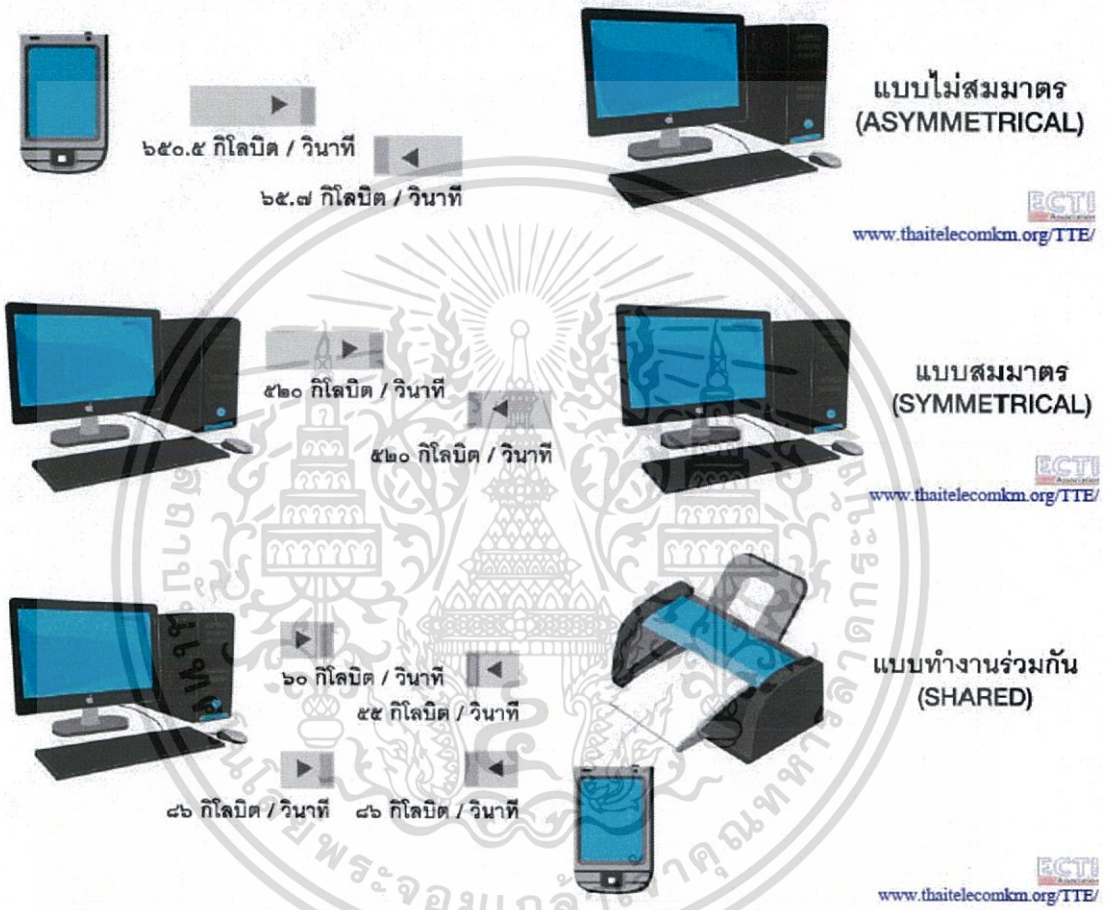
เครือข่ายขนาดย่อมหรือเรียกว่า พิโคเน็ต (Piconet) เป็นเครือข่ายที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมต่อกันของอุปกรณ์บลูทูท ตั้งแต่ ๒ ตัวขึ้นไป แต่ไม่เกิน ๘ ตัว ซึ่งจะแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น ๗๙ ช่องสัญญาณ และส่งข้อมูลสลับช่องไปมา ๑,๖๐๐ ครั้งต่อวินาที ทำให้แต่ละพิโคเน็ตสามารถทำงานในพื้นที่เดียวกันได้ โดยโอกาสในการถูกรบกวนจากเครือข่ายอื่นที่อยู่ใกล้มีเพียงร้อยละ ๑.๕ ทั้งนี้เครือข่ายบลูทูธได้ออกแบบให้เครื่องที่เป็นตัวแม่ข่ายมีหน้าที่ในการจัดการควบคุมลำดับการส่งข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัว เพื่อป้องกันการเกิดการชนกันของข้อมูลอันเนื่องมาจากการส่งข้อมูลพร้อมกันบนช่องสัญญาณเดียวกัน

นอกจากนี้ในแต่ละพิโคเน็ตสามารถเชื่อมต่อข้ามเครือข่ายกัน เกิดเป็นเครือข่ายที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า สแคทเทอร์เน็ต (Scatternet) แต่การเชื่อมต่อแบบนี้จะต้องมีการจัดลำดับการทำงานบนเครือข่ายที่ยุ่งยากขึ้นและต้องแบ่งความสามารถในการส่งข้อมูลกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.7 อัตราเร็วในการแลกเปลี่ยนข้อมูล

ความเร็วสูงสุดพื้นฐานในการส่งข้อมูลของแต่ละช่องสัญญาณประมาณ ๑ เมกกะบิตต่อวินาที (Mbps) ทั้งนี้ความเร็วที่ส่งได้จริงอาจน้อยกว่า เนื่องจากความเร็วบางส่วนจะเสียไปจากการควบคุมและจัดการการส่งข้อมูล นอกจากนี้ผู้ใช้ในแต่ละพิโคเน็ต คงต้องแบ่งความสามารถในการส่งข้อมูลกันด้วย ทำให้ความสามารถในการส่งข้อมูลลดลง



รูปที่ 2.31 รูปแบบการแลกเปลี่ยนข้อมูล

ความแตกต่างในการส่งข้อมูล ซึ่งความสามารถในการส่งข้อมูลจะต่างกันไปตามรูปแบบของการส่ง การส่งข้อมูลแบบไม่สมมาตร ความสามารถในการส่งข้อมูลไปและกลับจะไม่เท่ากัน เหมาะกับการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ การส่งข้อมูลแบบสมมาตร ความสามารถในการส่งข้อมูลไปและกลับเท่ากัน และการส่งข้อมูลแบบทำงานร่วมกันหลายอุปกรณ์ แต่ละอุปกรณ์จะแบ่งความสามารถในการส่งข้อมูลกัน ทำให้ความสามารถในการส่งข้อมูลลดลง

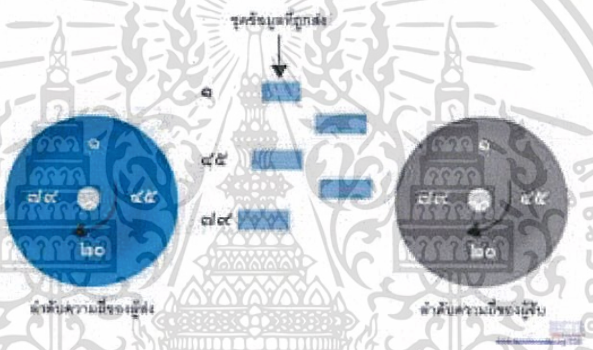
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.8 พื้นฐานเทคโนโลยีที่ใช้ในบลูทูธ

เทคโนโลยีที่สำคัญ ซึ่งใช้ในระบบบลูทูธประกอบไปด้วยสามส่วน คือ

2.8.8.1 การส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุด้วยการแผ่สเปกตรัม (Frequency Hopping Spread Spectrum: FHSS)

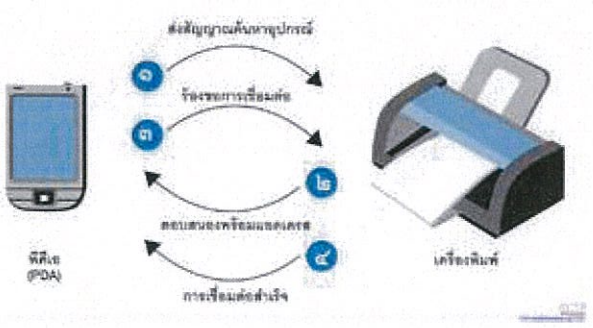
กระบวนการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ผู้ส่งจะส่งข้อมูลบนความถี่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น ๗๙ ช่องสัญญาณ โดยส่งข้อมูลไปบนช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไปมาอย่างต่อเนื่องตามลำดับที่ได้กำหนดไว้ ผู้รับก็ต้องรับข้อมูลด้วยลำดับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของช่องสัญญาณที่ผู้ส่งส่งมาในเวลาเดียวกัน ดังรูป ๕.๑ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการดักจับข้อมูลจากผู้ใช้อื่น เนื่องจากลำดับความถี่ที่ส่งจะเข้าใจกันระหว่างผู้รับและผู้ส่งเท่านั้น



รูปที่ 2.32 การส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุโดยเปลี่ยนความถี่ไปมา

2.8.8.2 รูปแบบสัญญาณค้นหาอุปกรณ์ (Service discovery protocol)

รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการค้นหาอุปกรณ์ บลูทูธที่อยู่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกระบวนการนี้ เริ่มจากอุปกรณ์บลูทูทส่งสัญญาณซึ่งมีรูปแบบที่เข้ากันใจระหว่างอุปกรณ์บลูทูท เมื่ออุปกรณ์บลูทูธอื่นพบคลื่นสัญญาณนี้ ก็จะตอบสนองกลับมา โดยส่งแอดเดรสประจำเครื่อง กลับมาด้วยทำให้อุปกรณ์ทั้งสองสามารถเชื่อมต่อกันได้ในขั้นตอนต่อไป



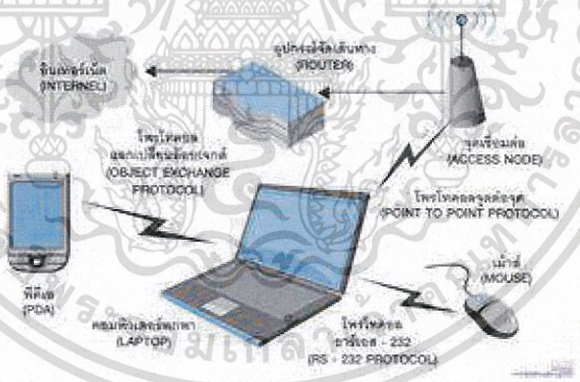
รูปที่ 2.33 รูปแบบการส่งสัญญาณค้นหาอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตัวอย่างกระบวนการในการค้นหาอุปกรณ์ของเครื่องพีดีเอ เริ่มจากเครื่องพีดีเอส่งสัญญาณเพื่อตรวจหาอุปกรณ์ใกล้เคียง เมื่อเครื่องพิมพ์ตรวจพบก็จะตอบสนองการทำงานโดยระบุเลขแอดเดรสของตัวเองกลับมายังเครื่องพีดีเอ หลังจากนั้นเครื่องพีดีเอร้องขอการเชื่อมต่อไปยังเครื่องพิมพ์ เมื่อเครื่องพิมพ์ตอบรับการเชื่อมต่อ เครื่องพีดีเอก็จะสามารถใช้งานเครื่องพิมพ์ผ่านเครือข่ายบลูทูธได้ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์และเงื่อนไขเฉพาะอื่นๆ ของอุปกรณ์ทั้งสองด้วย

2.8.9 รูปแบบการสื่อสาร (Application protocol)

คำสั่งหรือกระบวนการที่ถูกใช้โดยโปรแกรมประยุกต์ เพื่อกำหนดขั้นตอน กระบวนการในการรับและส่งข้อมูล ถูกพัฒนาขึ้นมาให้มีความเป็นอิสระ โดยเทคโนโลยีหรือโปรแกรมประยุกต์ทั่วไปสามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งระบบบลูทูธได้นำเอาโพรโทคอลเหล่านี้มาใช้งานในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์การสื่อสารชนิดต่างๆ เนื่องจากรูปแบบการสื่อสารจะแตกต่างกันเช่น การเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายบลูทูธระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาและเมาส์ (mouse) ใช้โพรโทคอลอาร์เอส - 232 (RS-232) การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาและเครื่องพีดีเอใช้โพรโทคอลแลกเปลี่ยนอ็อบเจกต์ (Object exchange : OBEX) และการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาผ่านจุดเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) ใช้โพรโทคอลจุดต่อจุด (Point to Point protocol : PPP)



รูปที่ 2.34 รูปแบบการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.10 มาตรฐานของ bluetooth

เทคโนโลยีบลูทูธได้กำหนดมาตรฐานหรือรุ่นของระบบการทำงานโดยได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพขึ้นเรื่อยๆ ดังนี้

1 บลูทูท 1.0 และบลูทูท 1.0B

เป็นบลูทูธรุ่นแรกซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. ๒๕๔๒ (ค.ศ. 1999) แต่ยังคงมีปัญหาอยู่มาก

2 บลูทูท 1.1

ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. ๒๕๔๔ (ค.ศ. 2001) โดยได้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากบลูทูธรุ่นก่อนทำให้บลูทูทรุ่นนี้ทำงานได้ดีขึ้น ใช้มาตรฐาน IEEE Standard 802.15.1 รองรับช่องสัญญาณที่ไม่มีการเข้ารหัสและมีเครื่องมือบอกระดับความแรงของสัญญาณด้วย

3 บลูทูท 1.2

ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. ๒๕๔๖ (ค.ศ. 2003) สามารถทำงานร่วมกับบลูทูท 1.1 ได้ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของบลูทูธรุ่นนี้ได้แก่ การค้นหาสัญญาณและการเชื่อมต่อที่เร็วขึ้น ปรับปรุงความสามารถในการส่งข้อมูลโดยลดสัญญาณรบกวน นอกจากนี้เมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการส่งข้อมูลระบบก็จะส่งข้อมูลนั้นใหม่อีกครั้ง

4 บลูทูท 2.0 + EDR

บลูทูทรุ่นนี้สามารถทำงานร่วมกับบลูทูท 1.1 ได้เช่นกัน ถูกพัฒนาขึ้นในปี พ.ศ. ๒๕๔๗ (ค.ศ. 2004) คุณสมบัติสำคัญเน้นในเรื่องของความเร็วในการรับ – ส่งข้อมูล ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้เร็วถึง ๒.๑ เมกกะบิตต่อวินาที ด้วยความเร็วสูงสุดของช่องสัญญาณ ๓.๐ เมกกะบิตต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีที่ใช้ศึกษาค้นคว้าและการทดลอง

วิธีการที่ใช้ทดลองนั้นจะแบ่งเป็นก่อนทำแผ่นPCBและหลังทำแผ่นPCB

3.1.1 ก่อนทำแผ่นPCB

- วงจรเครื่องขยายเสียง นั้นได้ใช้ค่ากระแสสงบที่ต้องการเพื่อคำนวณค่าความต้านทานที่จะใช้

วงจร Pre-Stage นั้นจะใช้การต่อบนโพโตบอร์ดแล้วทดลองจุดใส้หลอด หลอดสุญญากาศแล้ววัด Input กับ output

- วงจร protection ต่อวงจรจำลองบนโพโต้บอร์ดแล้วทดลองจ่ายกระแสตรงเข้าInput เพื่อดูระยะเวลาในการตัดของRelay แล้วทำการปรับค่าRและค่าCเพื่อให้ได้ระยะเวลาในการตัดและคืนตัวของRelayให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

- วงจร DAC ดูการต่อ Capacitor และ Resistor ของแต่ละ pin ในวงจร DAC และ Receiver คำนวณ Low pass filter ที่จะใช้และภาค I/V

- ทดลองต่อ Bluetooth และลองเชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถือ

- ออกแบบวงจร Selector โดยใช้ 2 forms signal relay โดยดูการใช้งานจาก datasheet

- เขียนภาษาC ใน Arduino และลองต่อจอ LCD เพื่อทดลองแบบคร่าวๆ

3.1.2 หลังทำแผ่นPCB

- วงจรขยายเสียงนั้นได้ทำการจ่ายความถี่ Input ต่างๆ และวัด output ด้วย oscilloscope โดยได้ทำการทดลองจ่ายความถี่ 20Hz 1kHz 20kHz แล้ววัดกราฟที่ outputและวัดnoiseในกรณีที่ไม่ใส่ input signal วัด low cut และ high cut ของวงจรและได้วัด SNR

- นำ Arduino มาต่อกับ switch และทดลอง ปิด-เปิด เพื่อดูการทำงานว่า LCD ทำงานเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. โฟโต้บอร์ด 3 บอร์ด

2. Oscilloscope 1 เครื่อง

3. Digital Multimeter 1 เครื่อง

4. Analog Multimeter 1 เครื่อง

5. DC Power Supply 2 เครื่อง

3.3 ขั้นตอนออกแบบ

3.3.1 ภาคขยายเสียง – แยกเป็น 2 ส่วนได้แก่ Pre-stage, Amplifier

1) Pre-stage - ใช้หลอดสูญญากาศเบอร์ 12AU7

- จุดใส้หลอด แบบ series = 12.6V 0.15A
- จัดวงจรแบบ Cathode Follower กำลังขยาย 0.5-1 เท่า
- fix bias โดยใช้ R load = 22k
- กระแสผ่านได้ = $\frac{V_B - V_{out}}{R_{load}} = \frac{120-60}{22k} = 2.73mA$
- ขยายแบบไม่กลับเฟส

2) Amplifier - ใช้ Op-amp เบอร์ LF351 ซึ่งเป็น Input แบบ JFET เป็น input stage และ VAS ใช้ไฟเลี้ยง +/-15V จัดวงจรแบบ non-inverting. Slew rate 13v/us ใช้ Zener diode 1N4744 15V R

- Diode Bias 2 ตัว = 0.6×2 = 1.2V มี R_B แบ่งกระแสเพื่อกำหนดกระแสของ output stage
- Output Stage เป็นแบบ complementary darlington จัดวงจรแบบ common emitter มี local feedback = 10 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสสงบจัดโดยใช้ R_{11} ค่า 22k กำหนดกระแสมา = $\left(\frac{120-1.2}{2}\right)/22k = 2.7mA$
- R_B 500 ohm กระแสไหล = $\frac{1.2}{500} = 2.4mA$
- มีกระแสไหลผ่าน Q1, Q2 ประมาณ 2.7 – 2.4 = 0.3mA
- hfe ของคู่ Darlington = 30(MJE340)×15(MJ15025)=450
  จาก IC = βI_B = 450×0.3 = 135mA
  ดังนั้นกระแสสงบใน Output Stage = 135mA
- Global feedback ของวงจรคือ $\frac{R_7}{R_8} = \frac{47k}{1.5k} = 31.3$ เท่า
- Zobel network ประกอบด้วย L ค่า 10mH ใช้ลวดทองแดง 14SWG กระแสเพิ่มได้สูงสุด 10.8A และ R ค่า 10ohm

3.3.2 ภาค Protection เป็นการนำวงจร low pass filter มารวมกับวงจรขับสวิทช์ ที่เป็น relay เพื่อทำหน้าที่ตัดต่อวงจรขยายกับลำโพง พร้อมเพิ่มหลอด LED เพื่อแสดงการทำงาน และออกแบบค่า C, R ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้หน่วงเวลา start ประมาณ 5 วินาทีและมี DC protection ตัดการทำงานของวงจร เมื่อพบว่ามีแรงดัน DC ไหลออกไปยังลำโพงตั้งแต่ 1.5 V ขึ้นไป

3.3.3 ภาค Switching power supply ใช้การออกแบบเป็น Self-oscillator half bridge buck converter เนื่องด้วยวงจรไม่มีความซับซ้อนมากในการออกแบบและลงมือทำชิ้นงาน ภาคจ่ายไฟอันนี้จะต้องใช้เป็นภาคจ่ายพลังงานให้กับวงจรส่วนใหญ่ จึงออกแบบให้มีการจ่ายกำลังเอาต์พุตประมาณ 1200 watts และมีแหล่งจ่ายไฟชุดเล็กเพื่อจ่ายให้กับวงจรเพิ่มเติมต่างๆ การออกแบบวงจรขับสัญญาณเปิดปิดสวิทซึ่งเป็น mosfet เบอร์ irfp460 และใช้ IC self-oscillator half-bridge driver เบอร์IR2153 พัน inductor โดยใช้แกน ETD49 และลวดทองแดงอาบน้ำยา เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตฝั่งทุติยภูมิตามต้องการ

Power Supply – 75 kHz, 1000W, Off-line, Half bridge switching.

IR2153 = Self – Oscillating half–bridge driver

Voffset = 600Vmax

Duty Cycle = 50%

Tr/Tp = 80/40ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Vclamp = 15.6v

Deadtime = 1.2us

เลือกค่า RT, CT เพื่อทำงานที่ 75kHz = RT = 10k

CT = 1nF

1) Vin = 170 – 250 Vac

Vout = (+/-60Vdc, 10A), (+12V, 4A), (+5V, 2A)

2) Pout = (+60×7) + (-60×7) + (12×4) + (5×2) =912W

Estimate Pin = Pout/eff = 910/0.75 = 1213.33W

Input Ac current = 1213.33/220 = 5.5A, Typical

= 1213.33/170 = 7.13A, Low

= 1213.33/250 = 4.85A, High

SMPS Transformer – ETD49

Ae = 211mm^2 (effective area) – Ac = 2.11cm^2

Ue = 1550 (Bmax)

3) กระแสในขดลวดวิ่งสูงสุดประมาณ 8A ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 14 SWG ทนกระแสได้สูงสุด 10.8A และ 17 SWG ทนกระแสได้ 5.29A

4) คำนวณรอบลวดจาก Nprimary = $\frac{Vin \times 10^8}{4 \times f \times \beta \max \times Ac}$

$= \frac{155 \times 10^8}{4 \times 75 \times 10^3 \times 1550 \times 2.11}$

= 15.76 หรือ 16 รอบ

5) คำนวณรอบ Nsecondary = $\frac{155V}{16}$ = 9.6875 V/รอบ

ต้องการ 60V = $\frac{60}{9.6875}$ = 6.19 หรือ 7 รอบ

ต้องการ 12V = $\frac{12}{9.6875}$ = 1.24 หรือ 2 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการ 5V = $\frac{5}{9.6875}$ = 0.516 หรือ 1 รอบ

6) Output filter capacitor

$$Co = \frac{I_{out}(Max) \times T_{off}(Max)}{V_{ripple}(Max)}$$

$$= \frac{10 \times (7.5 \times 10^{-5}\,\text{sec})}{37.5mV}$$

= 20000uf

7) Output Regulator

LM7812 จำนวน 4 ตัว = 4×1 = 4A; +12V

LM7805 จำนวน 2 ตัว = 2×1 = 2A; +5V

3.3.4 Digital to analog converter

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(22k)(330pf)} = 22kHz$$

3.3.5 Arduino

Code ที่เขียนเพื่อควบคุม LCD และ Selector

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(3, 2, 4, 5, 6, 7);
unsigned int DAC = 0;
unsigned int BLUETOOTH = 0;
unsigned int RCA = 0;
void setup() {
 lcd.begin(16, 2);
 pinMode(8,OUTPUT);
 pinMode(9,OUTPUT);
 pinMode(10,OUTPUT);
}
void loop() {
 //DAC = digitalRead(13);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//BLUETOOTH = digitalRead(11);
//RCA = digitalRead(12);
while(digitalRead(11) == HIGH)
{ lcd.setCursor(7, 1);
 lcd.print("DAC");
 digitalWrite( 8,HIGH);
 digitalWrite (9,LOW);
 digitalWrite (10,LOW);
 }
while(digitalRead(12) == HIGH)
 { lcd.setCursor(4, 1);
   lcd.print("BLUETOOTH");
 digitalWrite( 9,HIGH);
 digitalWrite (8,LOW);
 digitalWrite (10,LOW);}
while(digitalRead(13) == HIGH)
 { lcd.setCursor(7, 1);
   lcd.print("RCA");
 digitalWrite( 10,HIGH);
 digitalWrite (9,LOW);
 digitalWrite (8,LOW);
}
 digitalWrite (8,LOW);
 digitalWrite (9,LOW);
 digitalWrite (10,LOW);
 lcd.clear();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ปัญหาที่พบ

1. วงจรแรกที่ออกแบบนั้นใช้หลอดสูญญากาศเป็นภาค differential มี VAS เป็นทรานซิสเตอร์แบบ Darlington และใช้ CCS เชื่อมจ่ายไฟทั้งสองภาค ใช้ Vbe multiply เป็น bias ให้ภาค Power ผลปรากฏว่ามีไฟเลี้ยง DC ออกลำโพง

2. วงจรที่สองที่ออกแบบนั้นได้ใช้หลอดสูญญากาศเป็นภาค Pre โดยจัดวงจรเป็นแบบ common cathode ผลปรากฏว่าต้องเพิ่ม gain ของหลอดสูญญากาศถึงสิบเท่าจึงจะขยายได้โดยไม่มี Noise เกิดขึ้น ซึ่งภาค Differential นั้นไม่สามารถรับ input ขนาดนั้นได้

3. เมื่อ switch แล้ว LCD ขึ้น input source ตามแต่เมื่อ switch กลับแล้วกลับไม่เป็นเหมือนเดิมยังคงแสดงข้อความนั้นอยู่แล้ว Selector ยังคงทำงานต่อเนื่อง

4. ความดัง L/R ของ DAC ไม่เท่ากัน จากการทดสอบนั้นเป็นที่ภาค i/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

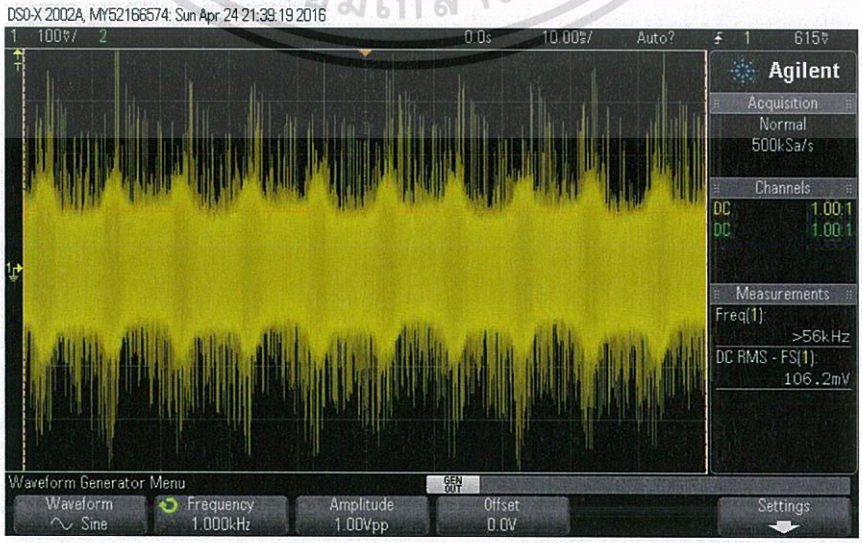
4.1 Amplifier

4.1.1 Noise เมื่อไม่ใส่อินพุต

รูปที่ 4.1 Noise เมื่อไม่ใส่อินพุต

แสดงระดับของสัญญาณรบกวน ที่สามารถวัดได้ ในขณะที่ไม่จ่าย input ให้วงจรขยาย มีค่าเท่ากับ 39 mV.

4.1.2 Amplifier Noise เพิ่ม volume สุด

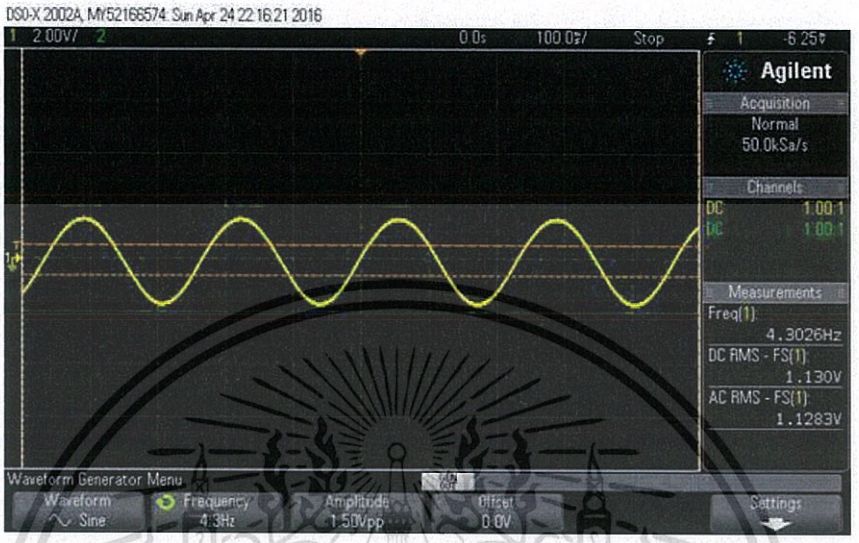


รูปที่ 4.2 Amplifier Noise เพิ่ม volume สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงระดับของสัญญาณรบกวน ที่สามารถวัดได้ ในขณะที่ไม่จ่าย input ให้วงจรขยาย และเปิด volume จนสุด มีค่าเท่ากับ 106.2 mV.

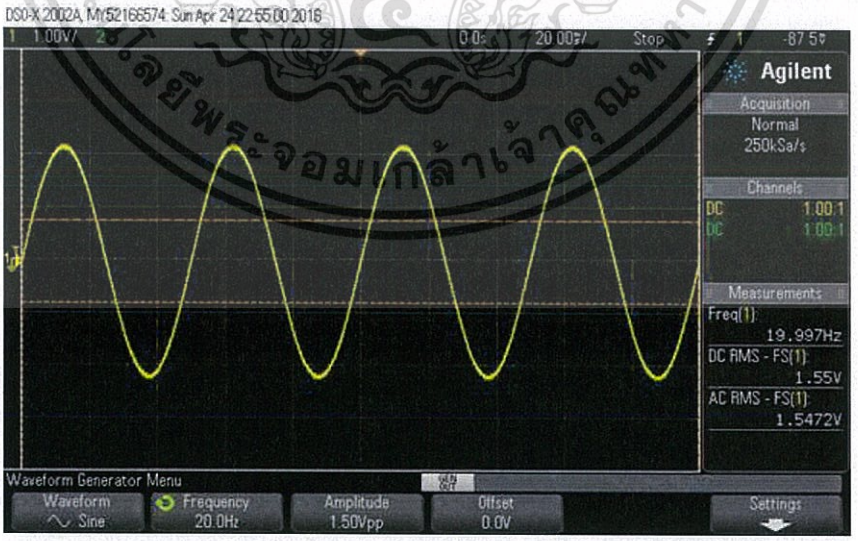
4.1.3 Low cut



รูปที่ 4.3 Low cut frequency

แสดงความถี่ต่ำสุดที่วงจรสามารถขยายได้ หรือมีกำลังลดครึ่งหนึ่งของความถี่กลาง คือ ความถี่ 4.3 Hz โดยมีกำลังลดลงเหลือ 18.17 Wrms หรือ Vout 11.283 Volts ที่ Vin 1.5 Vrms

4.1.4 ความถี่ 20Hz

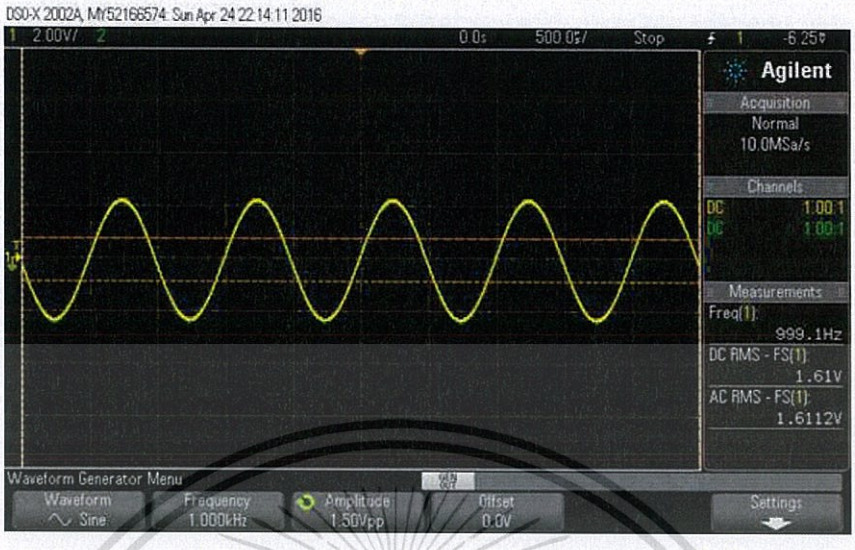


รูปที่ 4.4 กราฟความถี่ 20Hz

แสดงรูปลักษณะสัญญาณที่วงจรขยายได้ ที่ความถี่ต่ำสุดที่มนุษย์จะสามารถรับฟังด้ามทฤษฎี คือ 20 Hz โดยมีกำลัง เท่ากับ 34.188 Wrms หรือ Vout 15.47 Vrms ที่ Vin 1.5 Vrms

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

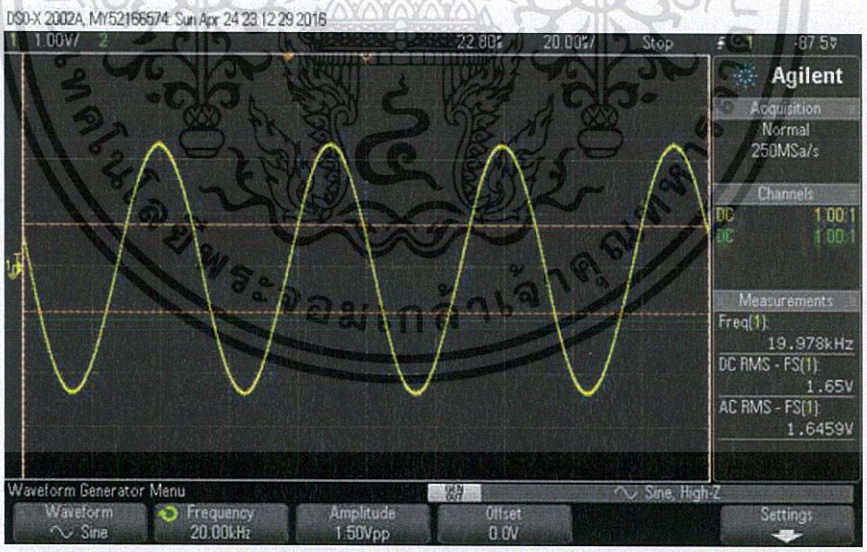
4.1.6 ความถี่ 1kHz



รูปที่ 27 กราฟความถี่ 1kHz

แสดงรูปลักษณะสัญญาณที่วงจรขยายได้ ที่ความถี่กลางที่มนุษย์จะสามารถรับฟังด้ามทฤษฎี คือ 1 kHz โดยมีกำลัง เท่ากับ 37.07 Wrms หรือ Vout 16.11 Vrms ที่ Vin 1.5 Vrms

4.1.7 ความถี่ 20kHz

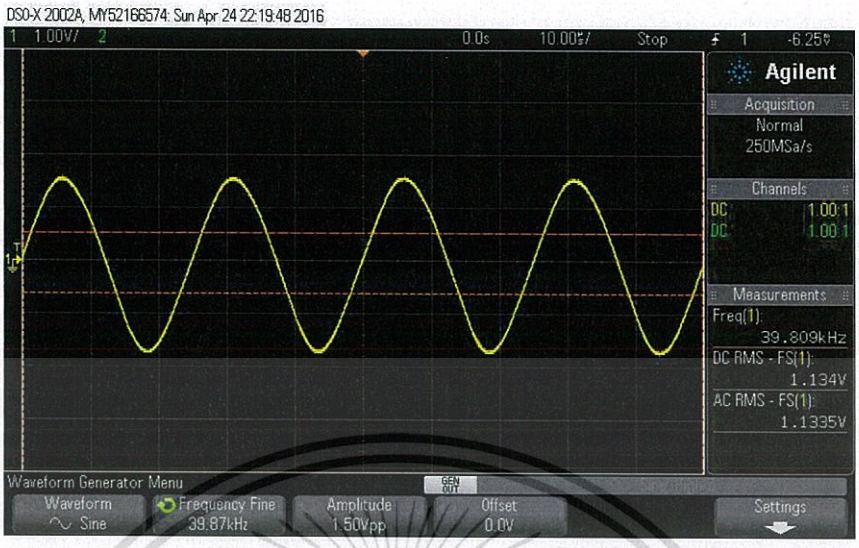


รูปที่ 28 กราฟความถี่ 20kHz

แสดงรูปลักษณะสัญญาณที่วงจรขยายได้ ที่ความถี่สูงสุดที่มนุษย์จะสามารถรับฟังด้ามทฤษฎี คือ 20 kHz โดยมีกำลัง เท่ากับ 38.70 Wrms หรือ Vout 16.459 Vrms ที่ Vin 1.5 Vrms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

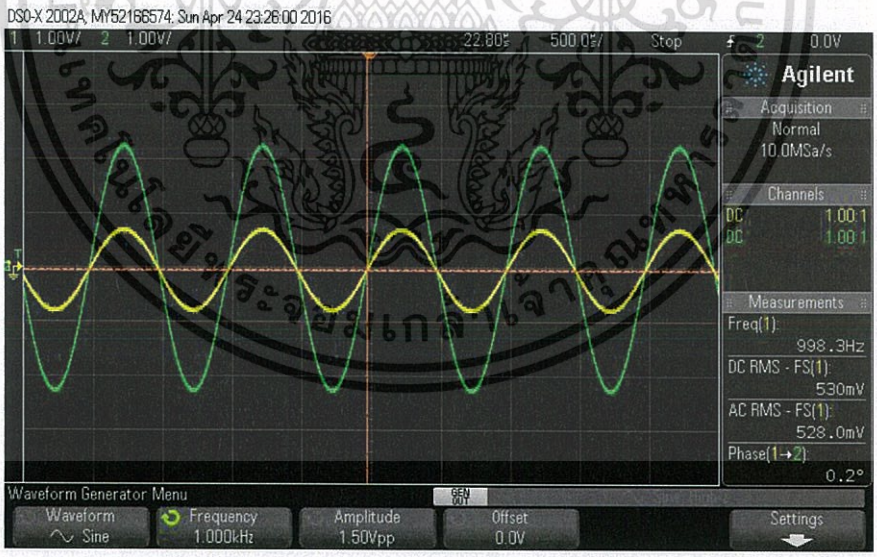
4.1.8 High cut



รูปที่ 29 High cut frequency

แสดงความถี่สูงสุดที่วงจรสามารถขยายได้ หรือมีกำลังลดครึ่งหนึ่งของความถี่กลาง คือ ความถี่ 39.809 kHz โดยมีกำลังลดลงเหลือ 18.358 Wrms หรือ Vout 11.336 Volts ที่ Vin 1.5 Vrms

4.1.9 Phase

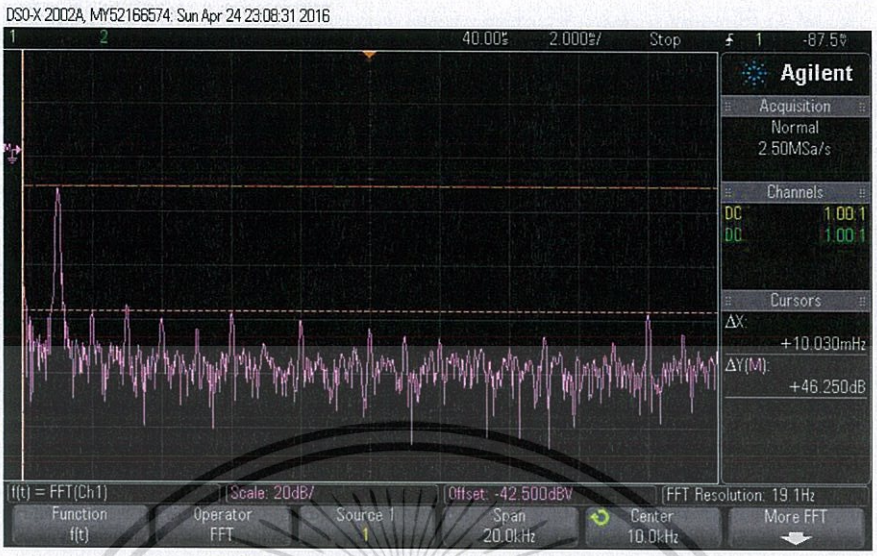


รูปที่ 4.8 กราฟ phase input เทียบ output

แสดงความต่างเฟสของสัญญาณ input และ output จากวงจรขยาย ที่ความถี่กลางในการรับฟัง หรือประมาณ 1 kHz สัญญาณทั้งสอง มีความต่างเฟสกัน 0.2 °

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.10 Signal-to-noise ratio (SNR)



รูปที่ 4.9 signal to noise ratio

แสดงอัตราส่วนของสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณรบกวน มีหน่วยวัดเป็น dB จากรูปวัดค่า SNR ที่ 1 kHZ และ Vout 2 Volts วงจรขยายมีค่า SNR = 46.25 Db

4.2 Switching Power Supply

ตารางที่ 8 แรงดันและกระแสของ Power Supply

Vin	50 – 250 Vac	Iout
Vout ไฟชุดหลัก	+/- 61.4Vdc	10 Amp
Vout ไฟชุดย่อย	+12V	4 Amp
Vout ไฟชุดย่อย	+5V	2 Amp
Ground	ระบบแยกแต่ละชุดไฟ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป

จากการทดลองแสดงให้เห็นคุณสมบัติหลายอย่างของชิ้นงานดังต่อไปนี้ ในภาคจ่ายไฟจัดวงจรแบบ half bridge switching mode ทำงานที่ความถี่ 75kHz แรงดันอินพุท 50Vac – 250Vac มีแรงดันเอ้าพุท +/- 61.4Vdc กระแส 10A มี capacitor output 20,000uf ไฟเลี้ยงย่อย +12V 4A, +5V 2A ผ่านการ regulate เพื่อรักษาความเรียบสม่ำเสมอของแรงดัน วงจรขยายเป็นแบบ stereo มีกำลังประมาณ 50Wrms ต่อข้างภาคPre-Ampเป็นหลอดสูญญากาศเบอร์ 12AU7 จัดวงจรแบบ Cathode follower ภาคขยายหลักเป็น IC แบบ single Op-amp มีOutputเป็นTransistor BJT จัดวงจรแบบคลาส AB กระแส bias ประมาณ 100mA ภาคป้องกันลำโพงมี Soft start หน่วงเวลาประมาณ 5 นาทีเพื่อจุดใส้หลอดและป้องกันDCออกสู่Output วงจร Selector ใช้แบบ relay เชื่อมต่อกับ Arduino แสดงผลไปที่ LCD โดยสัญญาณ Input มีให้เลือกได้ 3 แบบคือ 1. DAC PCM1794 2. Audio Bluetooth 3.RCA unbalance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reference

[1] Douglas self, "Audio Power Amplifier Handbook", Published by Focal Press, Jul 2009

[2] Malestrom, "Audio Power Amplifier Design" Jul 2013

[3] Marty Brown, "Practical Switching Power Supply Design" 1989

[4] Morgan Jones "Valve Amplifier", 3rd ed, Oct 2003

[5] JEDAC, "DIY high-end USB Audio DAC"

[6] www.pavouk.org, "PCM1794A audio DAC"

[7] Bob Cordell, "Designing Audio Power Amplifiers", 2011

[8] IR2153, ค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2559, จาก http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2153.pdf

[9] IRFP460, ค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2559, จาก http://www.es.co.th/Schemetic/PDF/IRFP460PBF-VISHAY.PDF

[10] ETD49, ค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2559, จาก http://www.farnell.com/datasheets/48548.pdf

[11] f16c20, ค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2559, จาก http://www.es.co.th/Schemetic/PDF/F16C05-F16C20.PDF

[12] 12AU7, ค้นเมื่อ 3 มีนาคม 2559, จาก http://www.sophiaelectric.com/pages/se/12au7.pdf

[13] 1N4744, ค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2559, จาก http://www.futurlec.com/Diodes/1N4744.shtml

[14] LF35N, ค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2559, จาก http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf351-n.pdf

[15] MJE340, ค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2559, จาก http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MJE340-D.PDF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] MJE350, ค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2559, จาก
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MJE350-D.PDF

[17] MJ15024, ค้นเมื่อ 7 มีนาคม 2559, จาก
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MJ15022-D.PDF

[18] MJ15025, ค้นเมื่อ 7 มีนาคม 2559, จาก
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MJ15023-D.PDF

[19] CMP7 relay 12Vdc 30Amp, ค้นเมื่อ 7 มีนาคม 2559, จาก
http://www.es.co.th/Schemetic/PDF/CMP7.PDF

[20] PCM1794, ค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2559, จาก
http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm1794a.pdf

[21] PCM2706, ค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2559, จาก
http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcm2706.pdf

[22] TL072, ค้นเมื่อ 13 มีนาคม 2559, จาก
http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้