



STEREO ENCODER

นางสาวภาคินี นิลละออ รหัสประจำตัว B5209477
นางสาวอรุวรรณ วัฒนสกุลไทย รหัสประจำตัว B5214945
นายวรากร เสาหิน รหัสประจำตัว B5218523

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2555

STEREO ENCODER

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา)

กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(อ.ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์)

กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม รายวิชา 427499 โครงการวิศวกรรม โทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2555

| | |
|------------------|---|
| หัวข้อโครงการ | STEREO ENCODER |
| จัดทำโดย | นางสาวภาคินี นิลละออ รหัส B5209477 นางสาวอรรวรรณ วัฒนสกุลไทย รหัส B5214945 นายวรากร เส้าหิน รหัส B5218523 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโทรคมนาคม |
| ภาคการศึกษาที่ | 3/2555 |

บทคัดย่อ

(Abstract)

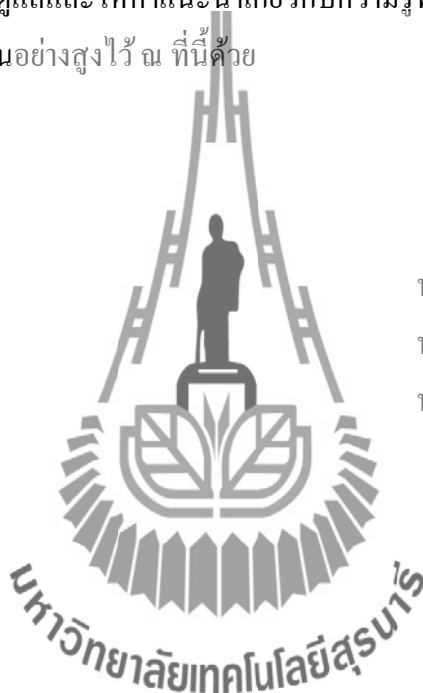
ในปัจจุบันมีการใช้งานระบบวิทยุกระจายเสียงในระบบ FM เป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วจะใช้อุปกรณ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน จึงทำให้เกิดปัญหาการใช้ Bandwidth เกินกว่าที่กำหนดเอาไว้ หรือการเกิดการแพร่ นอกแถบ (Out of band) ทำให้การใช้งานคลื่นความถี่ในระบบ FM มีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นโครงการนี้จึงศึกษาการทำงานและสร้างวงจร STEREO ENCODER เพื่อปรับปรุงแก้ไขไม่ให้เกิดการแพร่ นอกแถบ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการเรื่อง STEREO ENCODER นี้ได้ประสบความสำเร็จด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ ในระหว่างการดำเนินการจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการในครั้งนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการทำโครงการฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้คำแนะนำเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานในการใช้งานโปรแกรม ซึ่งข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย



| | |
|--------------|-------------|
| นางสาวภาคินี | นิลละอ |
| นางสาวอรรรณ | วัฒนสกุลไทย |
| นายวรากร | เสาทิน |

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| กิตติกรรมประกาศ | ข |
| สารบัญ | ค |
| สารบัญภาพ | ฉ |
| สารบัญตาราง | ณ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการงาน | 1 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน | 3 |
| 2.1 บทนำ | 3 |
| 2.2 วิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม (FM) | 3 |
| 2.2.1 การกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม (FM) | 4 |
| 2.3 ออฟแอมป์ (Op-Amp) | 6 |
| 2.3.1 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) | 7 |
| 2.3.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) | 8 |
| 2.4 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) | 8 |
| 2.4.1 ความถี่ตัด (Cut off frequency) | 10 |
| 2.4.2 ค่า Roll off | 10 |
| 2.4.3 การเกิดการกระเพื่อมในแถบความถี่ (Rippleband) | 11 |
| 2.4.4 การออกแบบวงจร Low Pass Filter | 11 |
| 2.5 การมอดูเลตแบบสมดุลย์ (Balance Modulator) | 15 |
| 2.6 การแพร่ นอกแถบ (Out-of-Band Emission) | 16 |
| บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน | 18 |
| 3.1 บทนำ | 18 |
| 3.2 องค์ประกอบและหลักการทำงานของ Stereo Encode | 18 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.3 วงจรขยายสัญญาณ Input | 19 |
| 3.4 วงจร Low pass filter 15 kHz | 20 |
| 3.5 วงจรBalanced Modulator | 27 |
| 3.6 วงจรรวมสัญญาณ 19kHz | 28 |
| 3.7 วงจร Low Pass Filter 55 kHz | 29 |
| 3.8 บอร์ด T89C51AC2 Application Board V.1 | 35 |
| 3.8.1 สร้างสัญญาณ sine 19 kHz | 36 |
| 3.8.2 สร้างสัญญาณพัลส์ 38 kHz | 38 |
| 3.9 การออกแบบลาย PCB | 39 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | 41 |
| 4.1 บทนำ | 41 |
| 4.2 ผลการทดสอบวงจร Low Pass Filter | 41 |
| 4.2.1 วิธีการทำ Low Pass Filter 15 kHz | 41 |
| 4.2.2 วิธีการคำนวณหา Cut Off Frequency ของ Low Pass Filter 15 kHz | 42 |
| 4.2.3 วิธีการทำ Low Pass Filter 55 kHz | 43 |
| 4.2.4 วิธีการคำนวณหา Cut Off Frequency ของ Low Pass Filter 55 kHz | 44 |
| 4.3 ผลการทดสอบความถี่ที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ | 46 |
| 4.3.1 ผลการทดสอบความถี่ที่ 38 kHz | 46 |
| 4.3.2 ผลการทดสอบความถี่ 19 kHz | 47 |
| 4.4 ผลการทดสอบสัญญาณ Output ของ Balanced Modulator | 48 |
| 4.4.1 ผลการทดสอบการป้อนสัญญาณด้านซ้ายเพียงด้านเดียว เมื่อเทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0 องศา | 48 |
| 4.4.2 ผลการทดสอบการป้อนสัญญาณด้านขวาเพียงด้านเดียว เมื่อเทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0 องศา | 49 |
| 4.4.3 ผลการทดสอบการป้อนสัญญาณด้านซ้ายและด้านขวา เมื่อเทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0 องศา | 50 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.5 ผลทดสอบสัญญาณ Output ที่ออกจาก Stereo Encoder เมื่อรวมกับสัญญาณ 19 kHz | 50 |
| 4.5.1 สัญญาณ Spectrum ที่ออกจาก Stereo Encoder | 51 |
| 4.6 ผลทดสอบวงจร Stereo Encoder โดยป้อนสัญญาณ Color Noise | 52 |
| 4.7 ผลการทดสอบสัญญาณ Stereo Encoder ที่ผ่านวงจร Low Pass Filter 55 kHz | 54 |
| 4.8 ผลการทดสอบ Out Of Band วงจร Stereo Encoder เมื่อใช้งานร่วมกับ VCO | 56 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 58 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 58 |
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรค | 58 |
| 5.3 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงการ | 59 |
| ประวัติผู้เขียน | 60 |
| ภาคผนวก | 61 |
| ภาคผนวก ก | 62 |
| ภาคผนวก ข | 92 |
| บรรณานุกรม | 95 |



สารบัญญภาพ

| รูป | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 FM Frequency Modulation | 4 |
| รูปที่ 2.2 Block Diagram of a Stereo Encoder | 5 |
| รูปที่ 2.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การผสมคลื่นของสัญญาณสเตอริโอ และสเปคตรัมความถี่ | 5 |
| รูปที่ 2.4 แสดงสัญลักษณ์ออปแอมป์ | 6 |
| รูปที่ 2.5 วงจรขยายออปแอมป์แบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) | 7 |
| รูปที่ 2.6 วงจรขยายออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) | 8 |
| รูปที่ 2.7 วงจร low pass filter แบบ T Type low pass filter | 8 |
| รูปที่ 2.8 วงจร low pass filter แบบ Pi Type low pass filter | 9 |
| รูปที่ 2.9 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆ และกราฟแสดงอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (dB) | 9 |
| รูปที่ 2.10 ลักษณะของ Cut off frequency | 10 |
| รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบการ Roll off ค่าต่างๆ | 10 |
| รูปที่ 2.12 ลักษณะการกระเพื่อมที่เกิดขึ้น | 11 |
| รูปที่ 2.13 ลักษณะการลดทอนสัญญาณแบบ Chebyshev filter ที่การกระเพื่อม 0.5 dB | 12 |
| รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของมัลติเพลกเซอร์ | 15 |
| รูปที่ 2.15 การแพร่รบกวนต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ | 16 |
| รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร Stereo Encoder | 18 |
| รูปที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณ Input | 19 |
| รูปที่ 3.3 วงจร Low Pass Filter 15 kHz | 20 |
| รูปที่ 3.4 Chebyshev Filter 0.5 dB Ripple | 21 |
| รูปที่ 3.5 วงจร Low Pass Filter 15 kHz ที่ 7 Element | 22 |
| รูปที่ 3.6 วงจร Low Pass Filter 15 kHz | 23 |
| รูปที่ 3.7 วงจร LPF 15kHz ที่ได้จากการคำนวณ | 25 |
| รูปที่ 3.8 วงจร LPF 15kHz ที่ใช้ค่ามาตรฐาน | 25 |
| รูปที่ 3.9 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 15 kHz ที่จากการคำนวณ | 26 |
| รูปที่ 3.10 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 15 kHz ที่จากค่ามาตรฐาน | 26 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

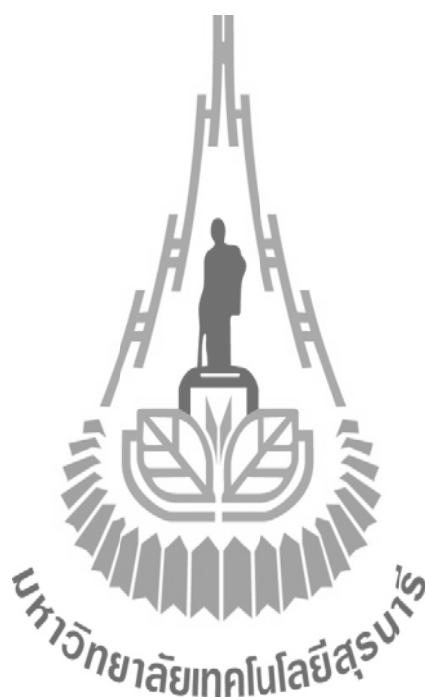
| รูป | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.11 วงจร Balanced Modulator | 27 |
| รูปที่ 3.12 กราฟสเปกตรัมความถี่ของวงจร Balanced Modulator | 27 |
| รูปที่ 3.13 วงจรรวมสัญญาณ 19 kHz | 28 |
| รูปที่ 3.14 กราฟสเปกตรัมความถี่ สัญญาณ Output จากวงจรรวมสัญญาณ | 28 |
| รูปที่ 3.15 วงจร Low Pass Filter 55 kHz | 29 |
| รูปที่ 3.16 Chebyshev Filter 0.01 dB Ripple | 30 |
| รูปที่ 3.17 วงจร Low Pass Filter 55 kHz | 31 |
| รูปที่ 3.18 วงจร Low Pass Filter 55kHz ที่ได้จากการคำนวณ | 33 |
| รูปที่ 3.19 วงจร Low Pass Filter 55kHz ที่ใช้ค่ามาตรฐาน | 33 |
| รูปที่ 3.20 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 55 kHz ที่จากการคำนวณ | 34 |
| รูปที่ 3.21 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 55 kHz ที่จากค่ามาตรฐาน | 34 |
| รูปที่ 3.22 บอร์ด T89C51AC2 Application Board V.1 | 35 |
| รูปที่ 3.23 แสดงการ on, off ของแต่ละ port | 36 |
| รูปที่ 3.24 วงจรการแบ่งแรงดัน | 37 |
| รูปที่ 3.25 วงจรแบ่งระดับสัญญาณ | 37 |
| รูปที่ 3.26 แสดงการ on, off duty cycle 50% | 38 |
| รูปที่ 3.27 วงจร Stereo Encoder | 39 |
| รูปที่ 3.28 ลายวงจร PCB ของวงจร STERRO ENCODER | 40 |
| รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการหา Low Pass Filter 15 kHz | 41 |
| รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter 15 kHz | 42 |
| รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter ที่ Cut off frequency 15 kHz | 43 |
| รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนการหา Low Pass Filter 55 kHz | 43 |
| รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter 55 kHz | 44 |
| รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter ที่ Cut off frequency 55 kHz | 45 |
| รูปที่ 4.7 สัญญาณ 38 kHz ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ | 46 |
| รูปที่ 4.8 แสดง Output ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ | 47 |
| รูปที่ 4.9 สัญญาณ 19kHz ที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณ | 47 |
| รูปที่ 4.10 เมื่อป้อนสัญญาณด้านซ้าย เทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0° | 48 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูป | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.11 เมื่อป้อนสัญญาณด้านขวาเทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0° | 49 |
| รูปที่ 4.12 เมื่อป้อนสัญญาณ L และ R เทียบสัญญาณพัลส์ | 50 |
| รูปที่ 4.13 สัญญาณ Output เมื่อป้อนสัญญาณ sine 1 kHz | 50 |
| รูปที่ 4.14 สัญญาณ Spectrum จาก Output Stereo Encoder เมื่อมี Center 38 kHz , Span 50 kHz | 51 |
| รูปที่ 4.15 ป้อนสัญญาณ Color Noise ที่วงจร Stereo Encoder โดยที่ Center ที่ 19 kHz | 52 |
| รูปที่ 4.16 ป้อนสัญญาณ Color Noise ที่วงจร Stereo Encoder โดยที่ Center ที่ 38 kHz | 53 |
| รูปที่ 4.17 สัญญาณ Output ของวงจร Stereo Encoder ก่อนเข้าวงจร Low Pass Filter 55 kHz โดยป้อนสัญญาณ Color Noise | 54 |
| รูปที่ 4.18 สัญญาณ Output ของวงจร Low Pass Filter 55 kHz โดยป้อนสัญญาณ Color Noise | 55 |
| รูปที่ 4.19 Spectrum ของสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่ 100MHz จาก VCO | 56 |
| รูปที่ 4.20 สัญญาณ Spectrum 100MHz จาก VCO ที่ถูก Modulate จาก Stereo Encoder | 56 |
| รูปที่ 4.21 ผล Out Of Band โดยป้อนสัญญาณ Color Noise | 57 |

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.5-dB Ripple | 13 |
| ตารางที่ 2.2 การแพร่รบกวนแถบต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ | 16 |
| ตารางที่ 3.1 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.5-dB Ripple | 22 |
| ตารางที่ 3.2 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.01-dB Ripple | 31 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันประเทศไทยโดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครมีการใช้ Bandwidth ของ FM ค่อนข้างเต็ม ถ้าจะให้เพิ่มสถานีเพิ่มขึ้นอีกให้ครบ 100 สถานี คงจะเป็นไปไม่ได้เพราะในทางปฏิบัติอาจมีการใช้ Bandwidth ที่สูงเกินไป เหตุผลที่มี Bandwidth สูงเกิน อาจเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน เช่น สถานีวิทยุชุมชนมักใช้เครื่องส่งราคาถูกที่ไม่มีคุณภาพ ทำให้มีการฟุ้งกระจายของคลื่น การใช้ Bandwidth ที่สูงเกินไป ทำให้มีความถี่บางส่วนถูกส่งไปย่านความถี่ของสถานีอื่น ส่งผลให้เกิดการรบกวนของสัญญาณในคลื่นหลักอื่นๆได้

ดังนั้น โครงการนี้จึงจัดทำขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการสร้าง STEREO ENCODER เพื่อลดการใช้ Bandwidth ให้น้อยลง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิธีการทำงานของ STEREO ENCODER
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ออกแบบวงจร Low Pass Filter
3. เพื่อศึกษาวิธีการทำ PCB และการวิเคราะห์ออกแบบ PCB
4. ทดสอบวงจรเพื่อให้ได้ผลตามทฤษฎี
5. เพื่อให้สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่ได้จากการศึกษานำมาปฏิบัติและประยุกต์ใช้ได้จริง

1.3 ขอบเขตการทำงาน

1. สามารถออกแบบวงจร STEREO ENCODER เพื่อให้ได้ผลเป็นไปตามทฤษฎี

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการการทำงานของ STEREO ENCODER
2. จำลองผลด้วยโปรแกรม OrCAD
3. สร้างวงจร STEREO ENCODER และทดสอบวงจร
4. วิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไขวงจร เพื่อให้ได้ Output เป็นไปตามทฤษฎี
5. รวบรวมข้อมูลและขั้นตอนการทำงานทั้งหมดเพื่อจัดทำเอกสารและนำเสนอ
โครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้กับวงจรอื่นๆ ได้
2. สามารถทำงานเป็นทีมได้
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับโปรแกรม OrCAD และ Protel 99 se เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้
กับเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับโครงการได้
4. สามารถวิเคราะห์และการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานได้



บทที่ 2

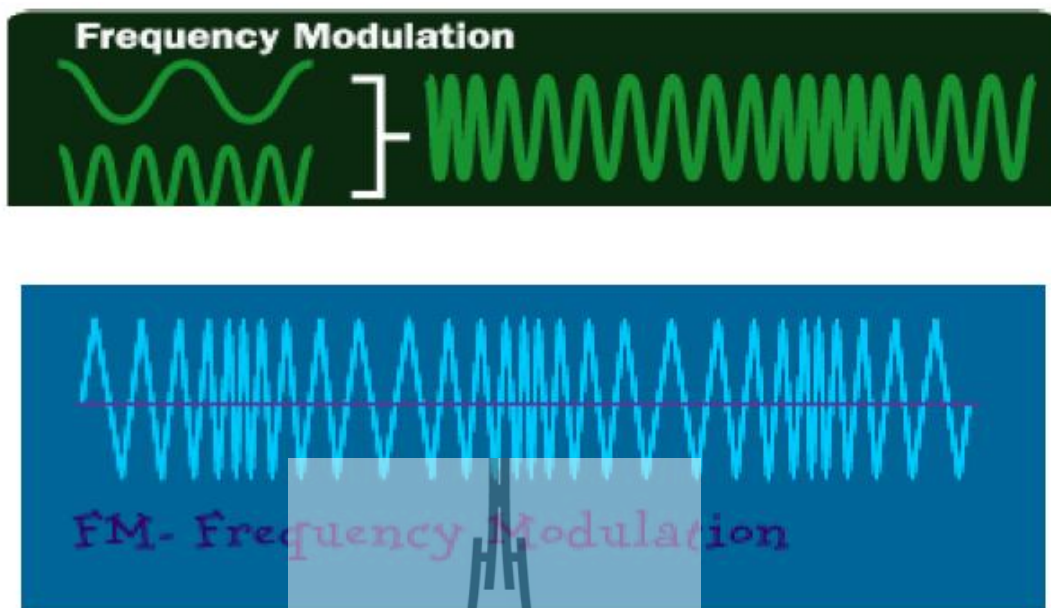
ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

2.1 บทนำ

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาจึงได้มีการศึกษาทฤษฎี เพื่อแก้ปัญหาคำการแพร่แถบนอก (out off band) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยุกระจายเสียงระบบ FM ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับหลักการทำงานของ Stereo Encoder และการออกแบบวงจร Low Pass Filter

2.2 วิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม (FM)

เป็นการผสมคลื่นทางความถี่ (Frequency Modulation) คือคลื่นวิทยุที่ผสมคลื่นเสียงแล้ว จะมีความถี่ไม่สม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปตามคลื่นเสียง แต่ความสูงของคลื่นยังคงเดิม วิทยุ FM ส่งด้วยความถี่ 88-108 MHz ในประเทศไทยมีจำนวนกว่า 100 สถานี กระจายอยู่ตามจังหวัดต่างๆทั่วประเทศ ให้คุณภาพเสียงดีเยี่ยม ไม่เกิดสัญญาณรบกวนจากสภาพอากาศแปรปรวน แต่ส่งได้ในระยะประมาณไม่เกินประมาณ 150 กิโลเมตร ปัจจุบันนิยมส่งในแบบสเตอริโอที่เรียกว่าระบบ FM Stereo Multiplex ซึ่งเครื่องรับวิทยุสามารถแยกสัญญาณออกเป็น 2 ข้างสัญญาณสำหรับลำโพงด้านซ้าย และสัญญาณสำหรับลำโพงขวา การส่งวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟ-เอ็มสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ (FM Stereo Multiplex) เป็นระบบที่คิดค้นหลังจากระบบกระจายเสียงอื่นๆ การส่งกระจายเสียงเกิดขึ้นหลังจากมีการส่งโทรทัศน์เสียอีก เมื่อประมาณ พ.ศ. 2460 เศษๆ ซึ่งเป็นเวลาที่ใกล้เคียงกับที่มีการส่งกระจายเสียงระบบ AM นายอาร์สตรองได้คิดค้นการกระจายเสียงระบบ FM ขึ้นเป็นผลสำเร็จ ต่อมาราว พ.ศ. 2490 เศษๆ ได้มีผู้พยายามส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ ในหลายประเทศมีการทดลองส่งกระจายเสียงแบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่ 2 ความถี่ในการส่งโดยใช้ความถี่หนึ่งส่งกระจายเสียงสัญญาณซีกขวาอีกความถี่หนึ่งมีการส่งหลายความถี่ ทางผู้ฟังก็ต้องใช้เครื่องรับหลายเครื่องตามไปด้วย



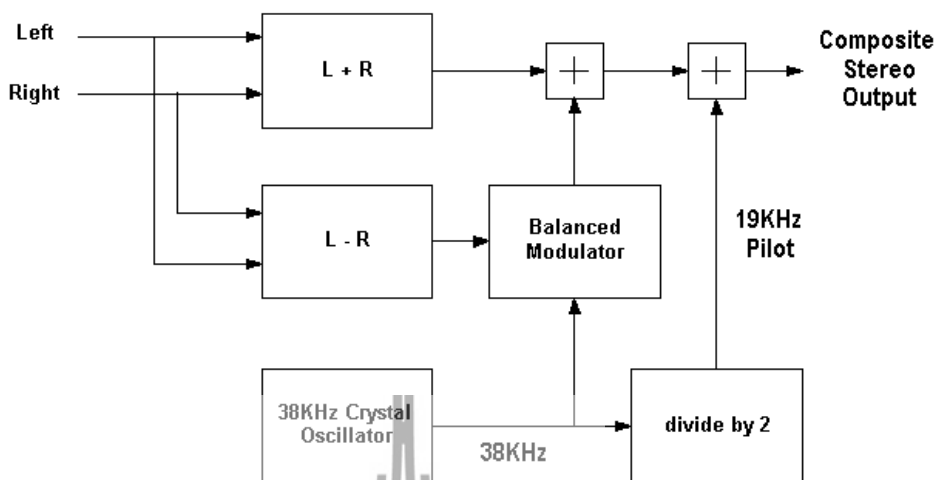
รูปที่ 2.1 FM Frequency Modulation [3]

ได้มีการคิดค้นการส่งกระจายเสียงระบบสเตอริโอ โดยใช้ความถี่เดียวในการส่งขึ้น โดยอาร์มสตรองและคณะอาจารย์ของมหาวิทยาลัยโคลัมเบียแห่งสหรัฐอเมริกาเป็นผู้เริ่มต้นที่สโมสรวิทยุสหรัฐอเมริกา (Radio Club of America) เรียกระบบนี้ว่าสเตอริโอ

2.2.1 การกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม FM

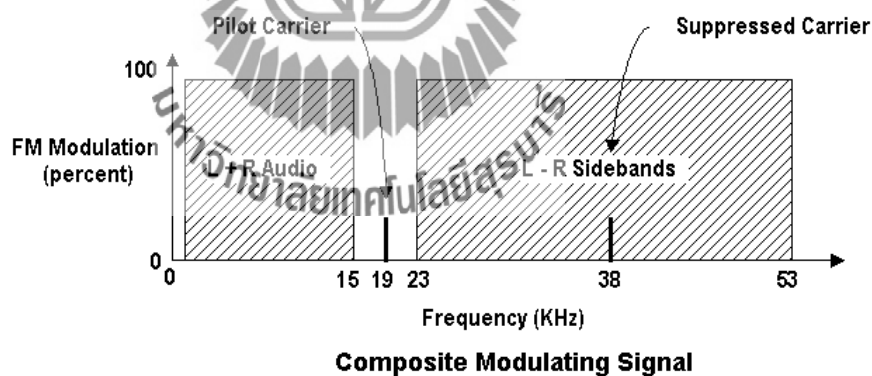
สัญญาณสเตอริโอในระบบเอฟเอ็ม FM Stereo Multiplex แยกเสียงซ้ายขวา มีภาคเข้ารหัสสเตอริโอ (Stereo Encoder) มีสัญญาณ L+R (L+R Adder) เป็นสัญญาณโมโน และมีสัญญาณ L-R โดยกลับเฟสสัญญาณ R 180 องศา แล้วไปรวมกับ L ได้ L-R นำ L-R ไปผสมคลื่นแบบ บาลานซ์ มอดูเลเตอร์ (Balance Modulator) กับสัญญาณคลื่นพาหะย่อย 38 kHz แบบ AM 100% โดยกำจัดคลื่นพาหะออก เอาเฉพาะ USB กับ LSB เรียกว่า สัญญาณไซด์แบนด์ L-R และมีสัญญาณ ไพลอต (Pilot Signal) ความถี่ 19 kHz เป็นความถี่ที่มีความสำคัญ ในการส่งและรับ FM Stereo Multiplex ถูกส่งออกสองทาง คือส่งเข้าในวงจรรวมสัญญาณทั้งหมด และส่งเข้าวงจรทวิคูณความถี่สองเท่า เป็น 38 kHz (บางวงจรใช้วิธีผลิต 38 kHz ขึ้นมาเป็นพาหะย่อยโดยตรง แล้วหารสองเป็นไพลอต) วงจรรวมสัญญาณทั้งหมด (Adder) จะรับสัญญาณทั้งสาม คือ L+R (Mono), 19 kHz (Pilot Signal) และ ไซด์แบนด์ L-R รวมกันส่งออกเป็นสัญญาณเดี่ยว แล้วส่งไปผสมคลื่นแบบ FM

Block Diagram of a Stereo Encoder



รูปที่ 2.2 Block Diagram of a Stereo Encoder [3]

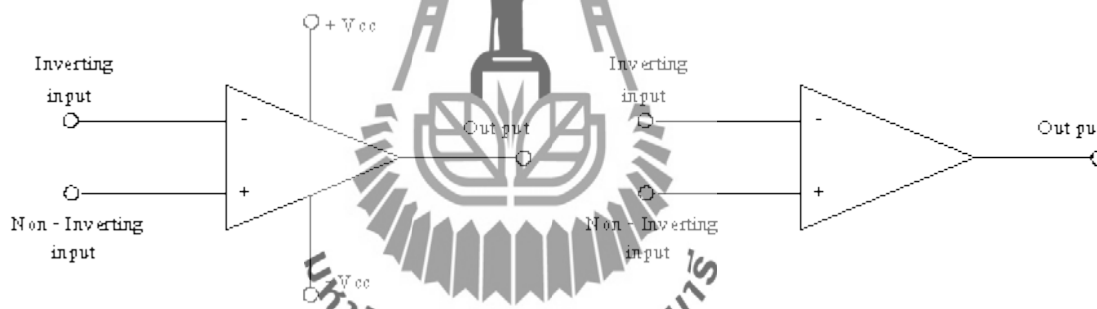
เปอร์เซ็นต์การผสมคลื่น ของสัญญาณสเตอริโอ และสเปกตรัมความถี่ แสดงในรูปที่ 2.3 ตามมาตรฐานของ FCC กำหนด L+R ผสมคลื่น 45%, พัลส์ 19 kHz ผสมคลื่น 10% และไซด์แบนด์ L-R ผสมคลื่น 45%



รูปที่ 2.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การผสมคลื่นของสัญญาณสเตอริโอ และสเปกตรัมความถี่ [3]

2.3 ออปแอมป์ (Op-Amp)

ออปแอมป์ (Op-Amp) เป็นชื่อย่อสำหรับเรียกวงจรรขยายที่มาจาก Operating Amplifier เป็นวงจรรขยายแบบต่อตรง (Direct coupled amplifier) ที่มีอัตราขยายสูงมากใช้การป้อนกลับแบบลบไปควบคุมลักษณะการทำงาน ทำให้ผลการทำงานของวงจรไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ภายในของออปแอมป์ วงจรภายในประกอบด้วยวงจรรขยายที่ต่ออนุกรมกัน ภาคคือ วงจรรขยายดิฟเฟอเรนเชียลด้านทางเข้า วงจรรขยายดิฟเฟอเรนเชียลภาคที่สอง วงจรเลื่อนระดับและวงจรรขยายกำลังด้านทางออก สัญลักษณ์ที่ใช้แทนออปแอมป์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม ไอซีออปแอมป์เป็นไอซีที่แตกต่างไปจากลิเนียร์ไอซีต่างๆ ไปคือไอซีออปแอมป์มีขาอินพุต 2 ขา เรียกว่าขาเข้าไม่กลับเฟส (Non-Inverting Input) หรือ ขา + และขาเข้ากลับเฟส (Inverting Input) หรือขา - ส่วนทางด้านออกจะมีเพียงขาเดียว เมื่อสัญญาณป้อนเข้าขาไม่กลับเฟสสัญญาณทางด้านออกจะมีเฟสตรงกับทางด้านเข้า แต่ถ้าป้อนสัญญาณเข้าที่ขาเข้ากลับเฟส สัญญาณทางออกจะมีเฟสต่างไป 180 องศา จากสัญญาณทางด้านเข้า



รูปที่ 2.4 แสดงสัญลักษณ์ออปแอมป์ [2]

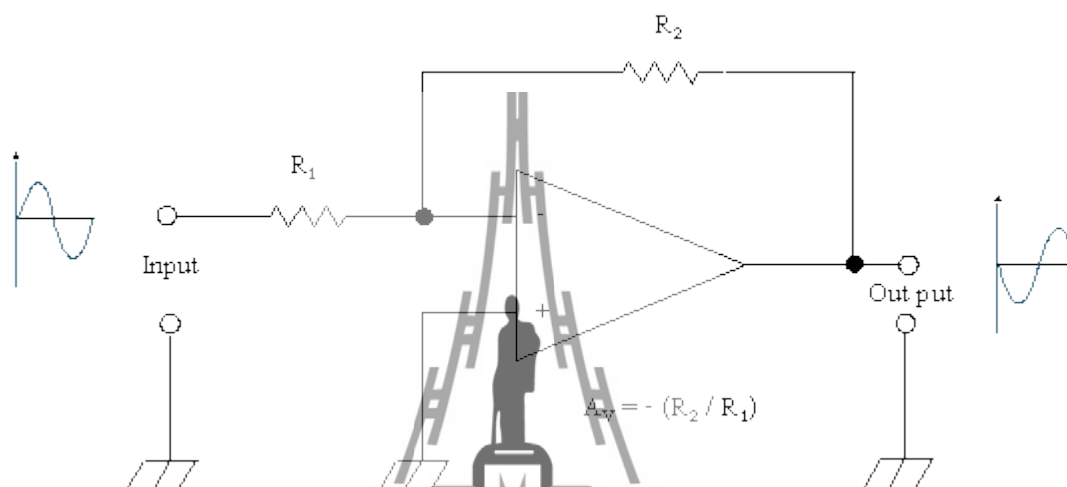
คุณสมบัติของออปแอมป์ในทางอุดมคติ

1. อัตราขยายมีค่าสูงมากเป็นอนันต์หรือ อินฟินิตี้ ($AV = \infty$)
2. อินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าสูงมากเป็นอนันต์ ($Z_i = \infty$)
3. เอาท์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำมากเท่ากับศูนย์ ($Z_o = 0$)
4. ความกว้างของแบนด์วิท (Bandwidth) ในการขยายสูงมาก ($BW = \infty$)
5. สามารถขยายสัญญาณได้ทั้งสัญญาณ AC และ DC
6. การทำงานไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

เมื่อศึกษาคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติแล้วพบว่า ออปแอมป์ได้รวมข้อดีของวงจรรขยายไว้ได้อย่างครบถ้วน เนื่องจากมีอัตราขยายเป็นอนันต์และสามารถขยายสัญญาณได้ทั้งไฟกระแสดับและไฟกระแสตรง การนำไปใช้งานในบางครั้งเมื่อต้องการลดอัตราขยายก็สามารถ

กระทำได้โดยการป้อนกลับ (Feed Back) เพื่อมาลดอัตราการขยายลง และข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ อิมพีแดนซ์ทางอินพุตมีอิมพีแดนซ์สูงมาก จึงทำให้เหมือนไม่มีกระแสอินพุตไหลเลยลักษณะเช่นนี้ จึงทำให้วงจรทางอินพุตไม่ไหลดวงจรส่งกำลังในส่วนหน้า เช่นเดียวกันที่เอาท์พุตมีอิมพีแดนซ์เป็น ศูนย์สามารถนำไปเชื่อมต่อกับวงจรอื่น ได้ดี

2.3.1 วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)



รูปที่ 2.5 วงจรขยายออปแอมป์แบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) [2]

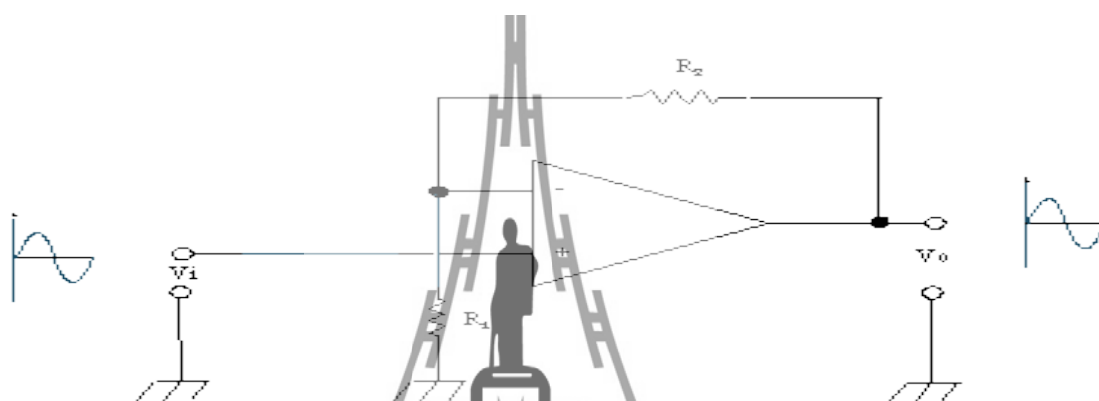
ในวงจรขยายออปแอมป์นั้นสามารถที่จะกำหนดอัตราการขยายของวงจรได้โดยการใช้ วงจรเนกาทีฟฟีดแบ็ค (Negative Feedback) เมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าทางขากลับเฟส (ขา -) แรงดัน ด้านทางออกจะมีมุมเฟสต่างไปจากแรงดันทางเข้า 180 องศา ซึ่งมีลักษณะตรงข้าม สัญญาณตรงกัน ข้ามนี้จะถูกป้อนกลับผ่าน R_2 เข้ามายังขาอินเวอร์ตอีกครึ่งหนึ่ง ตรงจุดนี้จะทำให้สัญญาณเกิดการ หักล้างกันอัตราการขยายก็จะลดลง ถ้าตัวต้านทานที่เป็นตัวป้อนกลับมีค่ามาก จะทำให้สัญญาณ ป้อนกลับมีขนาดเล็กอัตราการขยายออกจึงสูง ถ้าตัวต้านทานที่ป้อนกลับมีค่าน้อยสัญญาณ ป้อนกลับไปได้มากอัตราการขยายก็จะลดลง ฉะนั้นอัตราส่วนของความต้านทาน R_1 และ R_2 จะเป็น ตัวกำหนดอัตราการขยายของวงจร โดยไม่ขึ้นกับอัตราการขยายของออปแอมป์ ซึ่งสามารถหาอัตรา การขยายแรงดันได้จากสูตร

$$A_V = - \frac{R_2}{R_1} \quad (2.1)$$

2.3.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

วงจรขยายนี้เป็นวงจรขยายอีกแบบหนึ่งที่ต้องการเฟสในการขยายเป็นเฟสเดียวกัน ดังนั้นการป้อนสัญญาณอินพุตจึงต้องป้อนเข้าที่ขาอินพุตไม่กลับเฟส (+) ซึ่งเมื่อขยายออกที่เอาต์พุตแล้วจะได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีเฟสเหมือนเดิม ดังนั้นในวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสนี้การป้อนกลับเพื่อลดอัตราขยายจึงยังคงต้องป้อนไปยังขาอินเวอร์ตติ้ง (-) เพื่อให้เกิดการหักล้างของสัญญาณกันภายในตัวไอซีออปแอมป์ โดยสามารถหาอัตราขยายของวงจรได้จากสูตร

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.2)$$



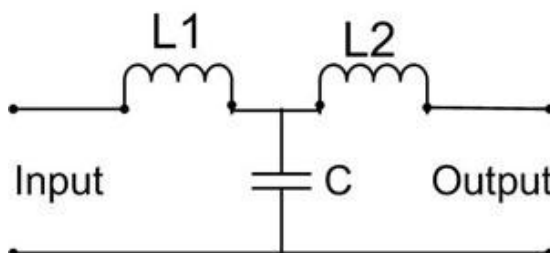
รูปที่ 2.6 วงจรขยายออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) [2]

2.4 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter: LPF)

หมายถึง วงจรที่จะยอมให้สัญญาณ ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ที่กำหนดสูงขึ้น ไปเรื่อยๆ จะลดทอนไปจนหมด

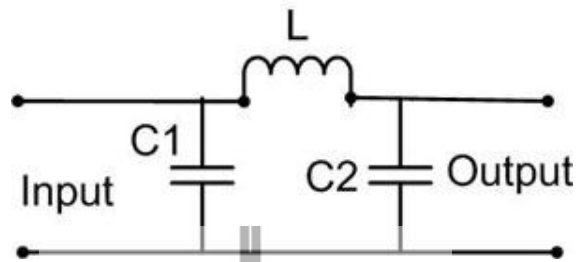
วงจร low pass filter ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

- T Type low pass filter การใช้ L หรือ C เพียงตัวเดียว ไม่สามารถกำจัดสัญญาณความถี่สูงได้หมด ตรงจุด Cut Off ทำให้ความถี่สูงผ่านไป เราจึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่ม L เข้าไปในวงจรอีกชุด เมื่อต่อแล้ว ลักษณะวงจรคล้าย ตัว T เราจึงเรียกว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบที่ การกรองความถี่ ถ้าต้องการประสิทธิภาพ เราอาจจะใช้วงจรนี้หลายชุด

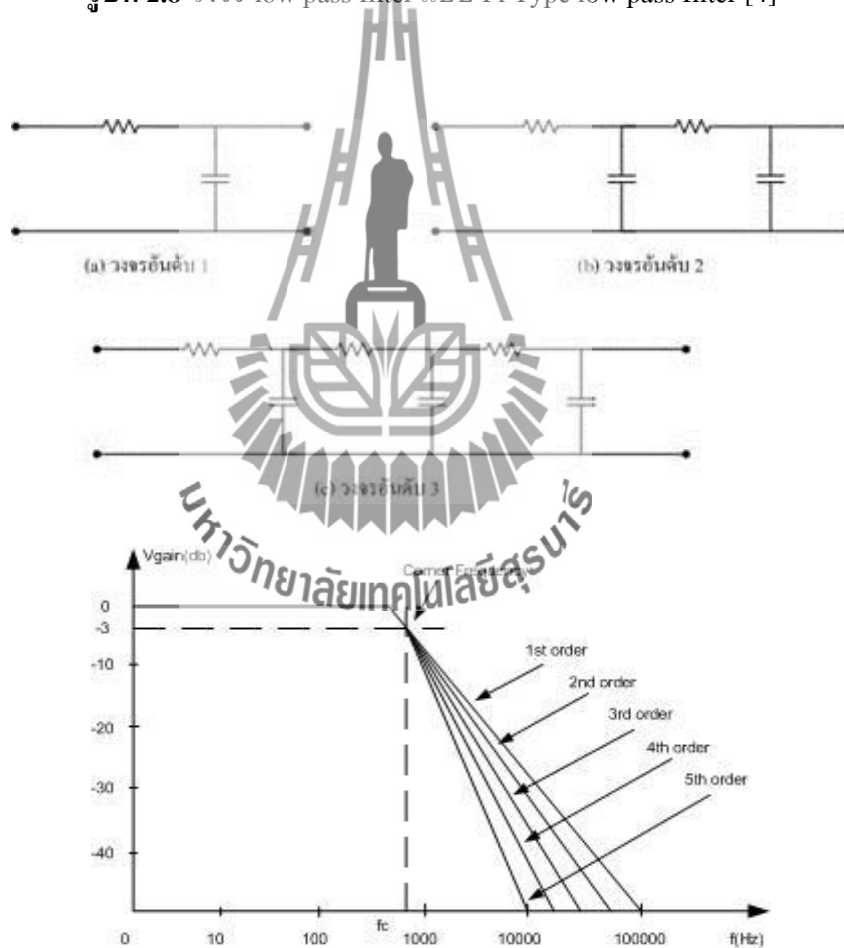


รูปที่ 2.7 วงจร low pass filter แบบ T Type low pass filter [4]

- Pi Type low pass filter วงจรนี้จะใช้ C 2 ตัวและ L 1 ตัว ต่อกันดังรูป รูปร่างคล้ายตัว Pi (พาย) เราก็มักเรียกกันว่า วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบพาย วงจรแบบนี้จะนิยมใช้ในภาคจ่ายไฟ และวงจร Regulator



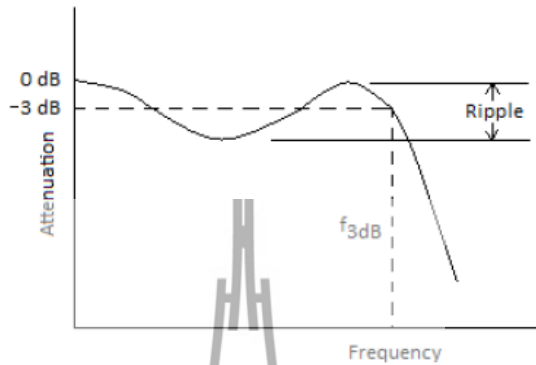
รูปที่ 2.8 วงจร low pass filter แบบ Pi Type low pass filter [4]



รูปที่ 2.9 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆ และกราฟแสดงอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (dB) [5]

2.4.1 ความถี่ตัด (Cut off frequency: f_c)

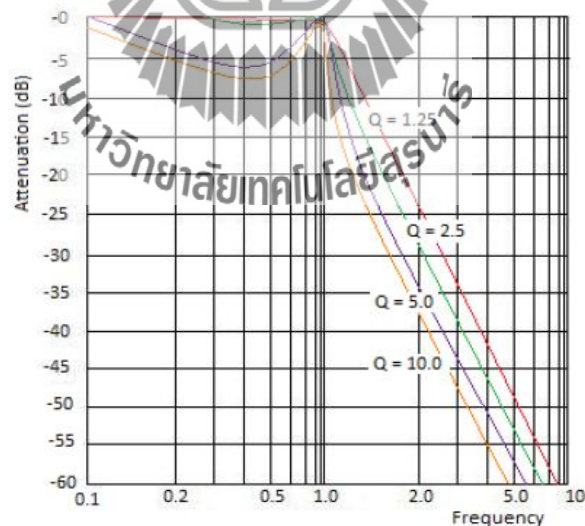
Cut off frequency คือ ความถี่ความแรงแสุดที่อยู่ในแถบตัดความถี่ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในช่วงการส่งผ่านที่มีค่าของการลดทอน (attenuation) เท่ากับ -3dB การลดทอนคืออัตราลดลงของสัญญาณมีค่าเท่ากับ $20 \log \frac{V_o}{V_i}$



รูปที่ 2.10 ลักษณะของ Cut off frequency [5]

2.4.2 ค่า Roll off

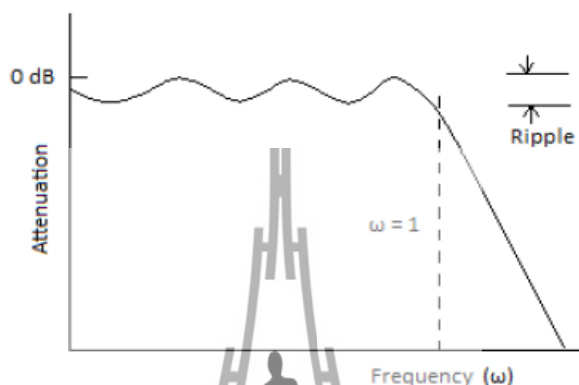
เป็นค่าที่แสดงลักษณะการส่งผ่านแถบความถี่ของวงจรกรอง โดยค่า Roll off คืออัตราการลดทอนของสัญญาณต่อจำนวนความถี่ที่เปลี่ยนไป หรือความชันของการส่งผ่าน



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบการ Roll off ค่าต่างๆ [5]

2.4.3 การเกิดการกระเพื่อมในแถบความถี่ (Rippleband)

สำหรับวงจรกรองในทางอุดมคติจะต้องมีขนาดของสัญญาณเท่าๆ กันทุกความถี่ที่วงจรยอมให้ผ่าน แต่ในทางปฏิบัติจะทำให้ที่เอาต์พุต มีขนาดเท่าอาจมีผลกระทบที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนไป ลักษณะผลกระทบเช่นของวงจรเปลี่ยนนี้จะทำให้เกิดการกระเพื่อมขึ้นมา การกระเพื่อมไม่เพียงแต่จะเกิดขึ้นในแถบผ่านเท่านั้นยังสามารถเกิดขึ้นในแถบหยุดได้อีกด้วย



รูปที่ 2.12 ลักษณะการกระเพื่อมที่เกิดขึ้น [5]

2.4.4 การออกแบบวงจร Low Pass Filter

สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านก็คือค่าความถี่คัตออฟ ω_c ที่ต้องการใช้งาน ที่ค่าความถี่นี้อัตราขยายจะมีค่าเป็น 0.707 ของอัตราขยายที่ความถี่ต่ำ ความถี่คัตออฟหาได้จากสมการ

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.3)$$

โดยที่ ω_c คือ ความถี่เชิงมุม

f_c คือ ความถี่คัต

R คือ ความต้านทาน

C คือ ตัวเก็บประจุ

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ (2.3) เมื่อกำหนด ω_c ไว้แล้ว ต้องการจะหาค่า R ก็จะได้

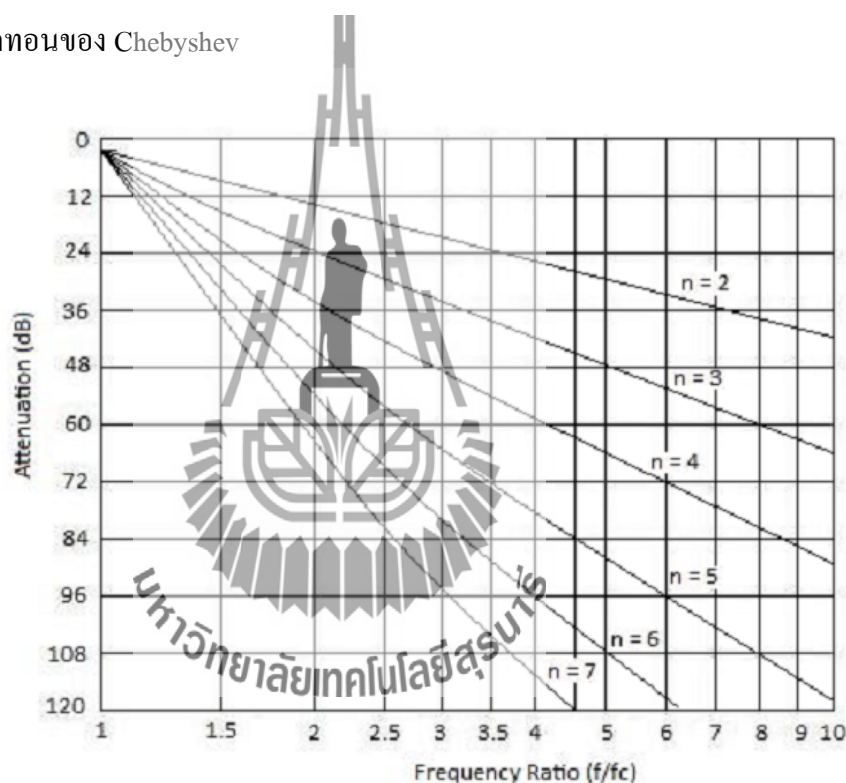
$$R = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (2.4)$$

ขั้นตอนต่อมาเราจะคำนวณหาค่า Frequency Ratio หรืออัตราส่วนความถี่ เพื่อนำไปใช้ในการหาจำนวน Element โดยสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{Frequency Ratio} = \frac{f}{f_c} \quad (2.5)$$

โดยที่ f คือ ความถี่สูงสุดที่ยอมรับได้
 f_c คือ ความถี่ตัด

เมื่อทราบค่า Frequency Ratio ที่หาจากสมการ เราจะสามารถหาค่าการลดทอนได้จากกราฟแสดงค่าการลดทอนของ Chebyshev



รูปที่ 2.13 ลักษณะการลดทอนสัญญาณแบบ Chebyshev filter ที่การกระเพื่อม 0.5 dB [5]

จากรูปที่ 2.13 จะแสดงให้เห็นว่าในแกนนอนจะแสดงค่าอัตราส่วนความถี่ และในแกนตั้งจะแสดงค่าลดทอนของสัญญาณ จากทฤษฎีของ Chebyshev จำนวนของ n จะเท่ากับจำนวนของ Elements เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบวงจร ถ้าจำนวน Elements มีค่ามากๆจะทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น และระบบมีประสิทธิภาพในการใช้งานดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.1 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.5-dB Ripple [5]

| Chebyshev Low-Pass Element Values for 0.5-dB Ripple | | | | | | | | |
|---|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | | | | | | | | |
| n | R_S/R_L | C_1 | L_2 | C_3 | L_4 | C_5 | L_6 | C_7 |
| 2 | 1.984 | 0.983 | 1.950 | | | | | |
| | 2.000 | 0.909 | 2.103 | | | | | |
| | 2.500 | 0.564 | 3.165 | | | | | |
| | 3.333 | 0.375 | 4.411 | | | | | |
| | 5.000 | 0.228 | 6.700 | | | | | |
| | 10.000 | 0.105 | 13.322 | | | | | |
| | ∞ | 1.307 | 0.975 | | | | | |
| 3 | 1.000 | 1.864 | 1.280 | 1.834 | | | | |
| | 0.900 | 1.918 | 1.209 | 2.026 | | | | |
| | 0.800 | 1.997 | 1.120 | 2.237 | | | | |
| | 0.700 | 2.114 | 1.015 | 2.517 | | | | |
| | 0.500 | 2.557 | 0.759 | 3.436 | | | | |
| | 0.400 | 2.985 | 0.615 | 4.242 | | | | |
| | 0.300 | 3.729 | 0.463 | 5.576 | | | | |
| | 0.200 | 5.254 | 0.309 | 8.225 | | | | |
| | 0.100 | 9.890 | 0.153 | 16.118 | | | | |
| | ∞ | 1.572 | 1.518 | 0.932 | | | | |
| 4 | 1.984 | 0.920 | 2.586 | 1.304 | 1.826 | | | |
| | 2.500 | 0.516 | 3.766 | 0.869 | 3.121 | | | |
| | 3.333 | 0.344 | 5.120 | 0.621 | 4.480 | | | |
| | 5.000 | 0.210 | 7.708 | 0.400 | 6.987 | | | |
| | 10.000 | 0.098 | 15.352 | 0.194 | 14.262 | | | |
| | ∞ | 1.456 | 1.889 | 1.521 | 0.913 | | | |
| | 5 | 1.000 | 1.807 | 1.203 | 2.961 | 1.303 | 1.807 | |
| 0.900 | | 1.854 | 1.200 | 2.849 | 1.238 | 1.970 | | |
| 0.800 | | 1.926 | 1.126 | 3.060 | 1.157 | 2.185 | | |
| 0.700 | | 2.035 | 1.015 | 3.353 | 1.058 | 2.470 | | |
| 0.600 | | 2.200 | 0.890 | 3.765 | 0.942 | 2.861 | | |
| 0.500 | | 2.547 | 0.754 | 4.367 | 0.810 | 3.414 | | |
| 0.400 | | 2.870 | 0.609 | 5.296 | 0.664 | 4.245 | | |
| 0.300 | | 3.588 | 0.459 | 6.871 | 0.508 | 5.625 | | |
| 0.200 | | 5.064 | 0.306 | 10.054 | 0.343 | 8.367 | | |
| 0.100 | | 9.556 | 0.153 | 19.647 | 0.173 | 16.574 | | |
| ∞ | | 1.630 | 1.740 | 1.922 | 1.514 | 0.903 | | |
| n | R_L/R_S | L_1 | C_2 | L_3 | C_4 | L_5 | C_6 | L_7 |

ตารางที่ 2.1 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.5-dB Ripple (ต่อ) [5]

| Chebyshev Low-Pass Element Values for 0.5-dB Ripple | | | | | | | | |
|---|-----------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| n | R_s/R_L | C_1 | L_2 | C_3 | L_4 | C_5 | L_6 | C_7 |
| 6 | 1.984 | 0.905 | 2.577 | 1.368 | 2.713 | 1.299 | 1.796 | |
| | 2.000 | 0.830 | 2.704 | 1.291 | 2.872 | 1.237 | 1.956 | |
| | 2.500 | 0.506 | 3.722 | 0.890 | 4.109 | 0.881 | 3.103 | |
| | 3.333 | 0.337 | 5.055 | 0.632 | 5.699 | 0.635 | 4.481 | |
| | 5.000 | 0.206 | 7.615 | 0.406 | 8.732 | 0.412 | 7.031 | |
| 10.000 | 0.096 | 15.186 | 0.197 | 17.681 | 0.202 | 14.433 | | |
| 7 | 1.000 | 1.790 | 1.296 | 2.718 | 1.385 | 2.718 | 1.296 | 1.790 |
| | 0.900 | 1.835 | 1.215 | 2.869 | 1.308 | 2.883 | 1.234 | 1.953 |
| | 0.800 | 1.905 | 1.118 | 3.076 | 1.215 | 3.107 | 1.155 | 2.168 |
| | 0.700 | 2.011 | 1.007 | 3.364 | 1.105 | 3.416 | 1.058 | 2.455 |
| | 0.600 | 2.174 | 0.883 | 3.772 | 0.979 | 3.852 | 0.944 | 2.848 |
| | 0.500 | 2.428 | 0.747 | 4.370 | 0.838 | 4.289 | 0.814 | 3.405 |
| | 0.400 | 2.835 | 0.604 | 5.295 | 0.685 | 5.470 | 0.669 | 4.243 |
| | 0.300 | 3.546 | 0.455 | 6.867 | 0.522 | 7.134 | 0.513 | 5.635 |
| | 0.200 | 5.007 | 0.303 | 10.049 | 0.352 | 10.496 | 0.348 | 8.404 |
| | 0.100 | 9.456 | 0.151 | 19.649 | 0.178 | 20.631 | 0.176 | 16.665 |
| ∞ | 1.646 | 1.777 | 2.031 | 1.789 | 1.924 | 1.503 | 0.895 | |
| n | R_L/R_s | L_1 | C_2 | L_3 | C_4 | L_5 | C_6 | L_7 |

จากตารางที่ 2.1 จะแสดงจำนวน Element เพื่อใช้ในการออกแบบค่า C และ L จากรูปวงจร
 ด้านบนเป็นรูปวงจรที่ใช้ในการออกแบบ Low Pass Filter โดยใช้ $\frac{R_s}{R_L}$ และในรูปด้านล่างจะเป็นรูป
 วงจรที่ใช้ในการออกแบบ Low Pass Filter โดยใช้ $\frac{R_L}{R_s}$

จากนั้นจะคำนวณหาค่า C และ L ที่นำไปใช้งานจริง สามารถหาได้จาก

$$C = \frac{C_n}{2\pi f_c R_L} \quad (2.6)$$

และ

$$L = \frac{R_L L_n}{2\pi f_c} \quad (2.7)$$

โดยที่ C คือ ค่าตัวเก็บประจุสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณ

L คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณ

C_n คือ ค่าตัวเก็บตัวเก็บประจุใดๆตัวที่ n

L_n คือ ค่าตัวเหนี่ยวนำใดๆตัวที่ n

R คือ ตัวต้านทานที่โหลด

f_c คือ ความถี่คัตออฟ

2.5 การมอดูเลตแบบสมดุลย์ (Balance Modulator)

การมอดูเลตแบบสมดุลย์ เป็นการนำวงจรมอดูเลต 2 ชุดมาประกอบกัน โดยใช้คลื่นพาห์เดียวกัน สัญญาณข้อมูลที่ป้อนเข้าวงจรแต่ละส่วนจะกลับเฟสกัน ผลที่ได้จะนำมารวมกันอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 บล็อกไดอะแกรมของบาลานซ์มอดูเลเตอร์ [3]

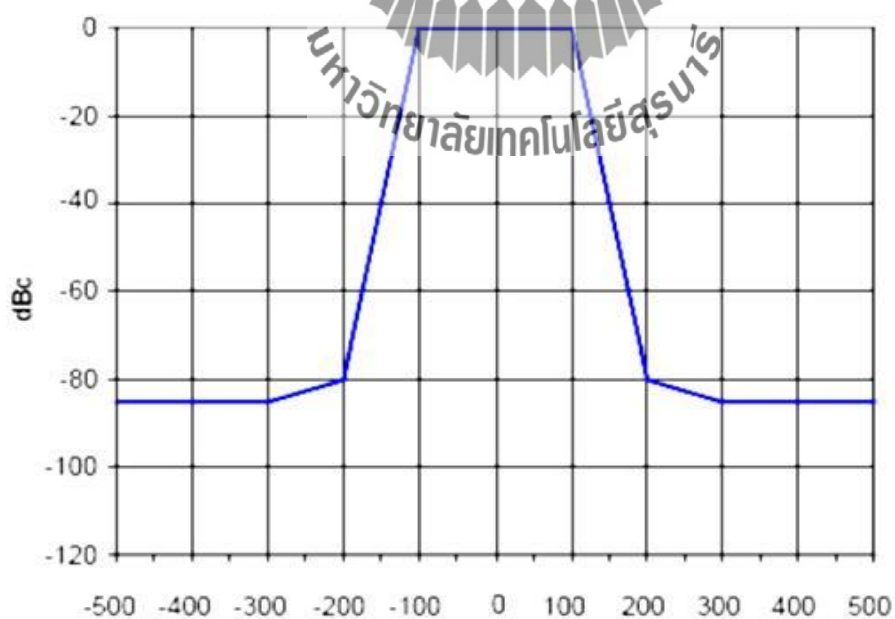
2.6 การแพร่รบกวนแถบ (Out-of-Band Emission)

การแพร่รบกวนแถบ หมายถึง การแพร่ที่ชั่วต่อสายอากาศที่ความถี่ใดๆ ที่อยู่นอกเหนือแถบความถี่จำเป็น (necessary bandwidth) ในขณะที่มีการมอดูเลตความถี่เสียงตามที่กำหนด โดยไม่รวมถึงการแพร่แปลกปลอม (spurious emission)

ขีดจำกัด การแพร่รบกวนแถบต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ในรูปที่ 2.15

ตารางที่ 2.2 การแพร่รบกวนแถบต้องอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้

| Frequency relative to the center of the channel (kHz) | Relative level (dBc) |
|---|----------------------|
| -500 | -85 |
| -300 | -85 |
| -200 | -80 |
| -100 | 0 |
| 100 | 0 |
| 200 | -80 |
| 300 | -85 |
| 500 | -85 |



รูปที่ 2.15 Frequency relative to the center of the channel [6]

จากข้อกำหนดจะเห็นได้ว่าคลื่นความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง $= \pm 100 \text{ kHz}$ สำหรับคลื่นความถี่หลัก กำหนดความกว้างที่จำเป็นต้องใช้ (Necessary Bandwidth) เครื่องส่งวิทยุ จะต้องมีความกว้างของแถบคลื่นที่จำเป็นต้องใช้ไม่เกิน 200 kHz (หรือ $\pm 100 \text{ kHz}$)

วิธีการตั้งค่าสัญญาณ audio เพื่อวัดค่า Out-of-Band Emission

1. ตั้ง audio โดยใช้ช่องขวาเป็นหลัก (ช่องซ้าย = ช่องขวา -6dB)
2. ตั้งสัญญาณ audio ที่ความถี่ 1 kHz แล้วปรับความแรงเพื่อให้ได้ deviation $\pm 40 \text{ kHz}$
3. วัดความแรงของสัญญาณ audio จากข้อ 2 ด้วย noise meter
4. ถอด audio gen ออก แล้วแทนด้วย colored noise gen มาตรฐาน
5. วัดความแรงของ colored noise gen ด้วย noise meter
6. ปรับความแรงของ colored noise gen เพื่อให้ได้ความแรงเท่ากับความแรงในข้อ 3
7. อ่านค่า spectrum ที่ได้เทียบกับขีดจำกัด



บทที่ 3

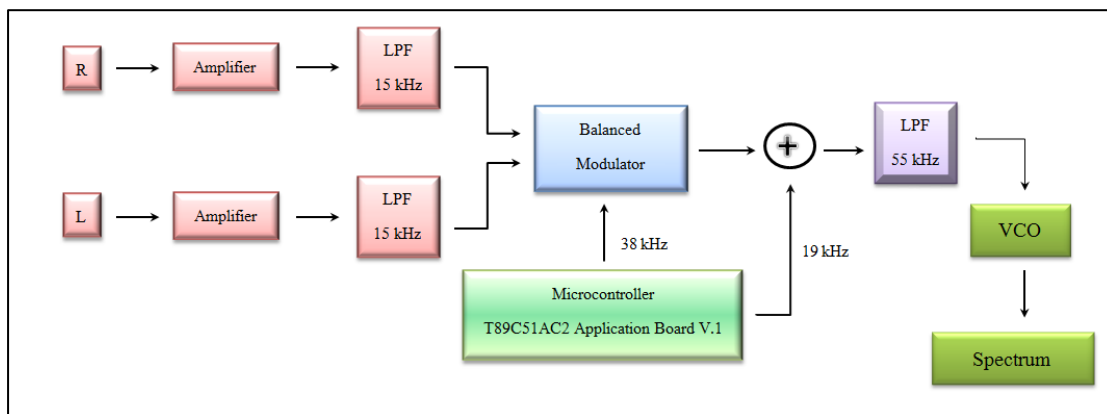
การออกแบบโครงงาน

3.1 บทนำ

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจร Stereo Encoder ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนการขยายสัญญาณ, Low Pass Filter , Balanced Modulator และ วงจรรวมสัญญาณ 19 kHz ตลอดจนได้มีการออกแบบวงจร Low Pass Filter ที่ Cut Off Frequency 15 kHz และ Cut Off Frequency 55 kHz โดยใช้โปรแกรม OrCAD เพื่อจำลองผลการตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) และการออกแบบวงจร Stereo Encoder โดยใช้โปรแกรม Protel 99 se เพื่อออกแบบลาย PCB

3.2 องค์ประกอบและหลักการทำงานของ Stereo Encoder

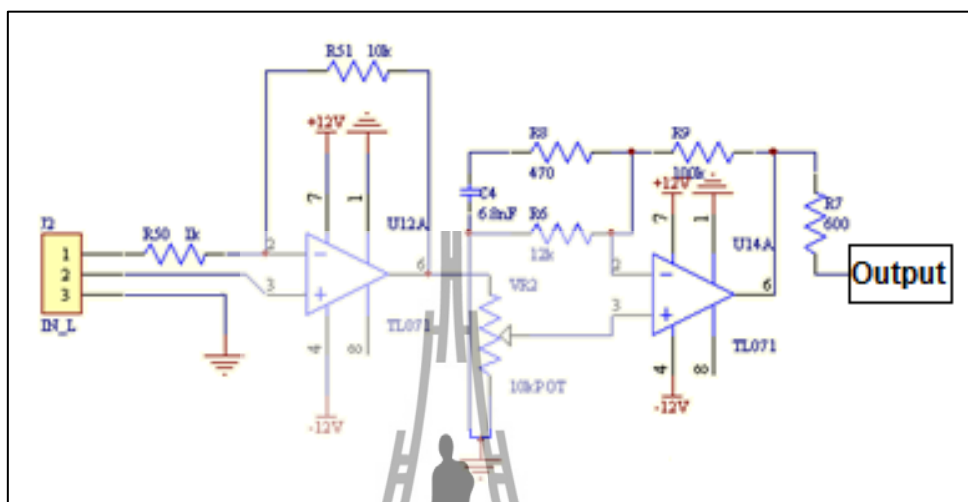
หลักการทำงานของ Stereo Encoder จะเริ่มจากสัญญาณเสียงด้านซ้ายและขวา จะถูกส่งเข้าวงจรขยายสัญญาณ Input เพื่อยกระดับความแรงสัญญาณเสียงให้มากขึ้น จากนั้นสัญญาณด้านซ้ายและสัญญาณด้านขวาจะถูกวงจร Low Pass Filter กรองความถี่ให้ไม่เกิน 15 kHz ก่อนที่จะเข้าวงจร Balanced Modulator เพื่อทำให้เกิดสัญญาณ L+R และสัญญาณ L-R จากนั้นจะถูกมารวมกับสัญญาณ Pilot ซึ่งเป็นสัญญาณ sine 19kHz Output ของวงจรรวมสัญญาณ จะถูกกรองความถี่อีกครั้งด้วยวงจร Low Pass Filter ที่มี Cut Off Frequency 55 kHz หลังจากนั้นนำสัญญาณมา Modulate กับวงจร VCO โดยใช้เครื่อง Spectrum Analyzer วัดสัญญาณเพื่อหาการแพร่รบกวน แถบ ซึ่งจะแสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร Stereo Encoder

3.3 วงจรขยายสัญญาณ Input

วงจรขยายสัญญาณ Input จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงให้มีระดับความแรงมากขึ้น เพื่อส่งต่อไปยังวงจร Low Pass Filter 15 kHz

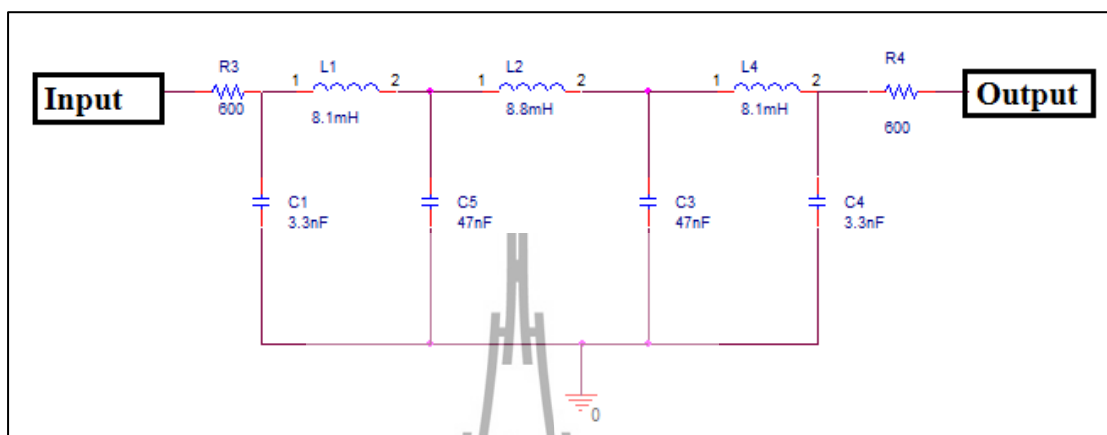


รูปที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณ Input

จากรูปที่ 3.2 เป็นการทํางานเริ่มต้นของวงจร Stereo Encoder ซึ่งจะเริ่มจากสัญญาณด้านซ้ายและสัญญาณด้านขวาจะรับสัญญาณเสียงเข้ามา โดยผ่านออปแอมป์ TL071 เมื่อป้อนสัญญาณ Input ของออปแอมป์ แรงดันด้าน Output จะมีมูมเฟสต่างไปจากแรงดันด้าน Input 180 องศา ซึ่งมีลักษณะตรงข้าม จากนั้นสัญญาณจะผ่านโพเทนซีโอมิเตอร์ 10kΩ เพื่อความแรงของสัญญาณ ก่อนจะถูกขยายสัญญาณด้วยออปแอมป์ TL071 ตัวที่สองอีกครั้ง

3.4 วงจร Low Pass Filter 15 kHz

วงจร Low Pass Filter 15 kHz จะมีหน้าที่กรองสัญญาณจากภาคขยายสัญญาณ Input เพื่อให้ไม่ให้ความถี่เกิน 15 kHz



รูปที่ 3.3 วงจร Low Pass Filter 15 kHz

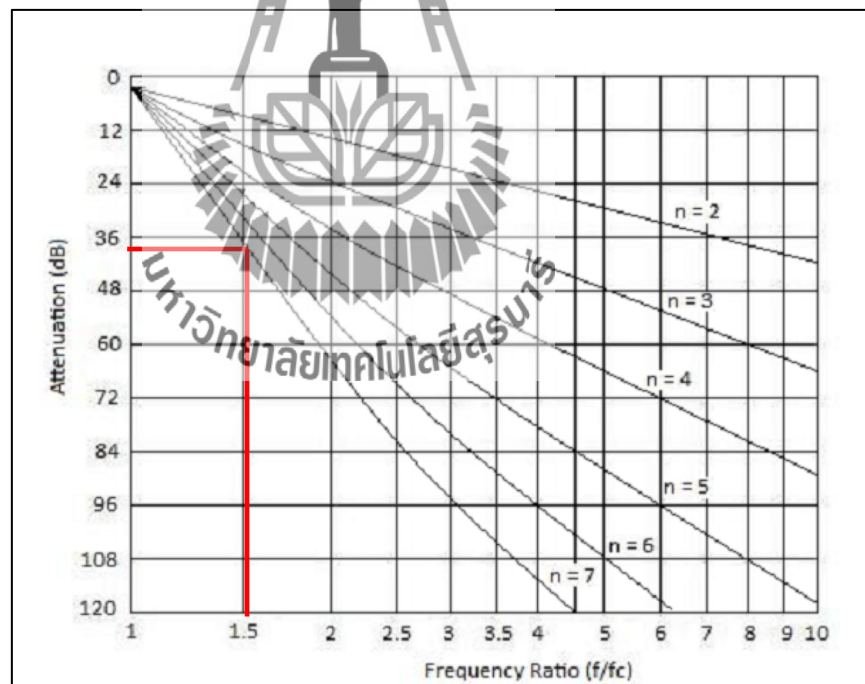
จากรูปที่ 3.3 จะแสดงถึงวงจร Low Pass Filter 15 kHz ซึ่งจะช่วยในการกรองความถี่ต่ำเพื่อให้ความถี่ที่จะเข้าไป Modulation มีความถี่ไม่เกิน 15 kHz

การออกแบบวงจร Low Pass Filter ที่ Cut Off Frequency 15 kHz

สิ่งที่จะต้องพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบ Low Pass Filter คือ Cut Off Frequency ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งในโครงการนี้ใช้ค่าความถี่คutoff ที่ 15 kHz และมีความถี่สูงสุดที่ยอมรับได้คือ 19 kHz และใช้ตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากับ 600Ω ซึ่งเราจะนำ 2 ความถี่ไปคำนวณหา Frequency Ratio ซึ่งหาได้ดังนี้

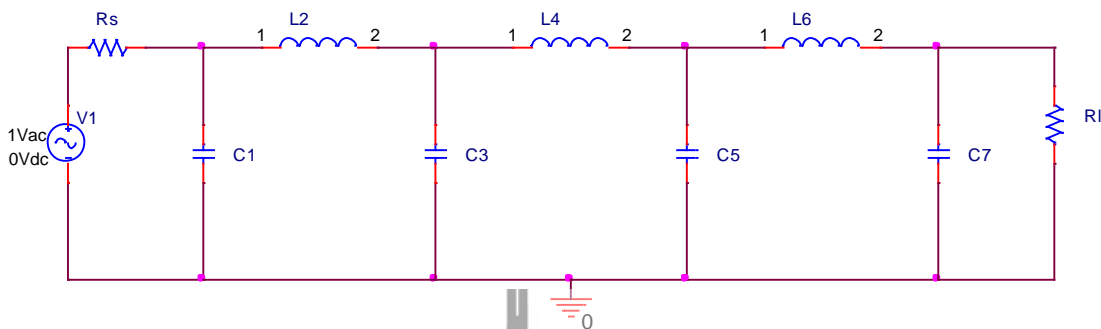
$$\text{Frequency Ratio} = \frac{f}{f_c} = \frac{19 \text{ kHz}}{15 \text{ kHz}} = 1.266$$

จากค่า Frequency Ratio ที่คำนวณได้ จะทำให้เกิดค่า Attenuation ที่มีค่าน้อย ดังนี้จึงใช้ค่า Frequency Ratio ที่มีค่าเท่ากับ 1.5 จะได้ค่า Attenuation ที่มีค่า 40 dB เพื่อนำมาหาจำนวน Element จากการใช้ออกแบบ Chebyshev Filter 0.5 dB Ripple โดยการเปรียบเทียบค่า Frequency Ratio จากรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Chebyshev Filter 0.5 dB Rippleb [5]

จากรูปที่ 3.4 จะได้ค่า Element เท่ากับ 7 Element ซึ่งจะได้วงจร Low Pass Filter 15 kHz 7 Element ดังรูปที่ 3.5

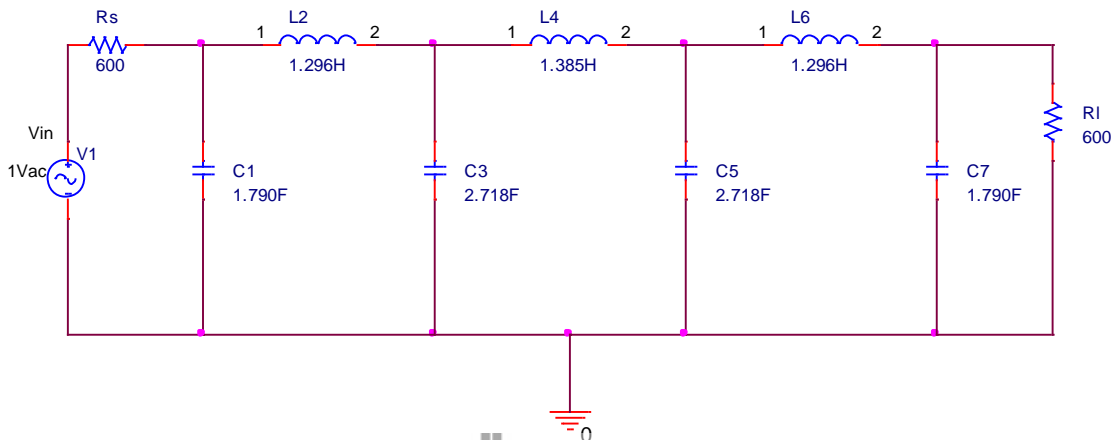


รูปที่ 3.5 วงจร Low Pass Filter 15 kHz ที่ 7 Element

จากนั้นจะสามารถหาค่า C และ L ต้นแบบได้จากตารางที่ 3.1 โดยที่ตัวต้านทานที่โหลดและตัวต้านทาน Input มีค่าเท่ากับ 600Ω ซึ่งจะพิจารณาจากตารางที่ 3.1 จะได้ $\frac{R_s}{R_L} = 1 \Omega$ จะได้รูปวงจร Low Pass Filter 15 kHz ดังรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.5-dB Ripple [5]

| Chebyshev Low-Pass Element Values for 0.5-dB Ripple | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| n | R_L/R_S | C_1 | L_2 | C_3 | L_4 | C_5 | L_6 | C_7 | |
| 6 | 1.984 | 0.905 | 2.577 | 1.368 | 2.713 | 1.299 | 1.796 | | |
| | 2.000 | 0.830 | 2.704 | 1.291 | 2.872 | 1.237 | 1.956 | | |
| | 2.500 | 0.506 | 3.722 | 0.890 | 4.105 | 0.881 | 3.103 | | |
| | 3.333 | 0.337 | 5.155 | 0.631 | 5.177 | 0.635 | 4.481 | | |
| | 5.000 | 0.206 | 7.615 | 0.406 | 8.732 | 0.412 | 7.031 | | |
| | 10.000 | 0.096 | 15.186 | 0.197 | 17.681 | 0.202 | 14.433 | | |
| 7 | 1.000 | 1.790 | 1.296 | 2.718 | 1.385 | 2.718 | 1.296 | 1.790 | |
| | 0.900 | 1.835 | 1.215 | 2.869 | 1.308 | 2.883 | 1.234 | 1.953 | |
| | 0.800 | 1.905 | 1.118 | 3.076 | 1.215 | 3.107 | 1.155 | 2.168 | |
| | 0.700 | 2.011 | 1.007 | 3.364 | 1.105 | 3.416 | 1.058 | 2.455 | |
| | 0.600 | 2.174 | 0.883 | 3.772 | 0.979 | 3.852 | 0.944 | 2.848 | |
| | 0.500 | 2.428 | 0.747 | 4.370 | 0.838 | 4.289 | 0.814 | 3.405 | |
| | 0.400 | 2.835 | 0.604 | 5.295 | 0.685 | 5.470 | 0.669 | 4.243 | |
| | 0.300 | 3.546 | 0.455 | 6.867 | 0.522 | 7.134 | 0.513 | 5.635 | |
| | 0.200 | 5.007 | 0.303 | 10.049 | 0.352 | 10.496 | 0.348 | 8.404 | |
| | 0.100 | 9.456 | 0.151 | 19.649 | 0.178 | 20.631 | 0.176 | 16.665 | |
| | ∞ | 1.646 | 1.777 | 2.031 | 1.789 | 1.924 | 1.503 | 0.895 | |
| | n | R_L/R_S | L_1 | C_2 | L_3 | C_4 | L_5 | C_6 | L_7 |



รูปที่ 3.6 วงจร Low Pass Filter 15 kHz

ขั้นตอนต่อมาจะคำนวณหาค่า C และ L ที่นำไปใช้งานจริง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.6) และ (2.7) ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

สมการ (2.6)

$$C = \frac{C_n}{2\pi f_c R_L}$$

สมการ (2.7)

$$L = \frac{R_L L_n}{2\pi f_c}$$

การคำนวณหาค่า C1

จากสมการที่ (2.6) และรูปวงจรที่ 3.6 จะได้ว่า $C_1 = 1.79 \text{ F}$, $f_c = 15 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \text{ } \Omega$

$$C = \frac{1.79}{2\pi \times 15 \times 10^3 \times 600}$$

ดังนั้น จะได้

$$C = 31.654 \text{ nF}$$

ซึ่งจากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าค่า C1 และ C7 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น C7 จึงมีค่าเท่ากับ 31.654 nF

การคำนวณหาค่า C3

จากสมการที่ (2.6) และรูปวงจรถูกที่ 3.6 จะได้ค่า $C_n = 2.718 \text{ F}$, $f_c = 15 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \Omega$

$$C = \frac{2.718}{2\pi \times 15 \times 10^3 \times 600}$$

ดังนั้น จะได้

$$C3 = 48.064 \text{ nF}$$

ซึ่งจากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าค่า C3 และ C5 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น C5 จึงมีค่าเท่ากับ 48.064 nF

การคำนวณหาค่า L2

จากสมการที่ (2.7) และรูปวงจรถูกที่ 3.6 จะได้ค่า $L_n = 1.296 \text{ H}$, $f_c = 15 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \Omega$

$$L = \frac{600 \times 1.296}{2\pi \times 15 \times 10^3}$$

ดังนั้น จะได้

$$L2 = 8.25 \text{ mH}$$

ซึ่งจากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าค่า L2 และ L6 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น L6 จึงมีค่าเท่ากับ 8.25 mH

คำนวณหาค่าที่ L4

จากสมการที่ (2.7) และรูปวงจรถูกที่ 3.6 จะได้ค่า $L_n = 1.385 \text{ H}$, $f_c = 15 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \Omega$

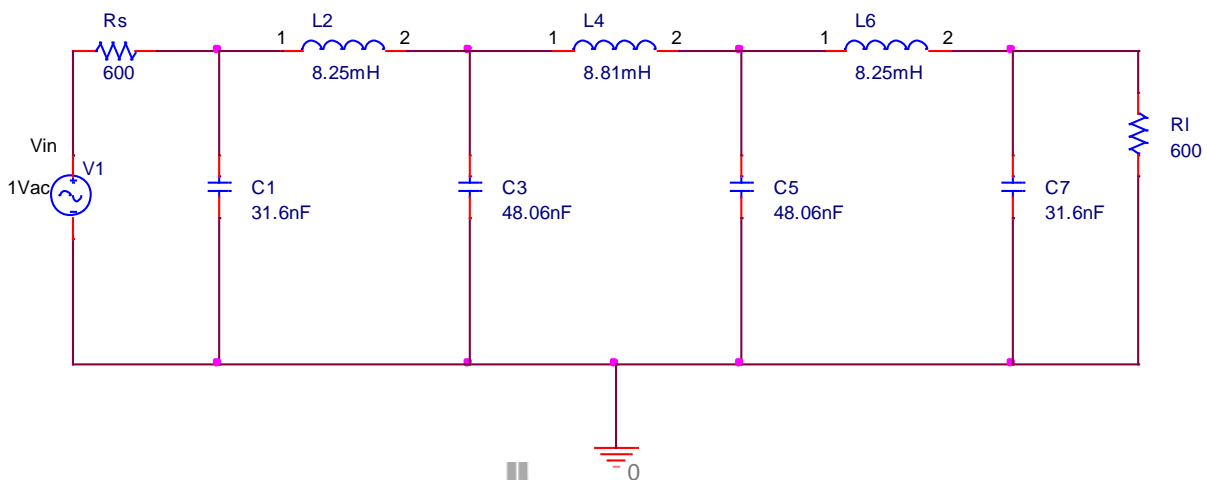
$$L = \frac{600 \times 1.385}{2\pi \times 15 \times 10^3}$$

ดังนั้น จะได้

$$L4 = 8.81 \text{ mH}$$

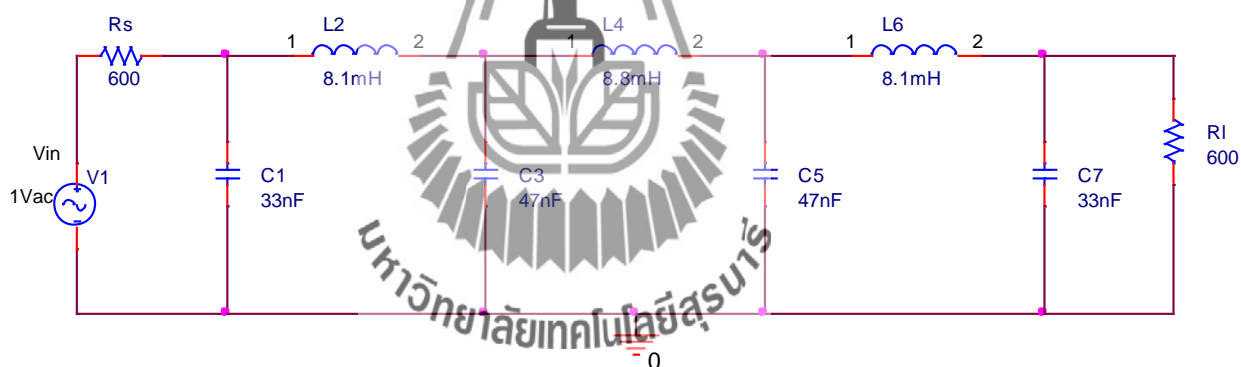
จากการคำนวณที่ผ่านมาจะทำให้ได้ค่า C และ L ที่นำมาใช้งานจริง ซึ่งจะได้รูปวงจรถูกที่ 3.7

Low Pass Filter 15 kHz ดังรูปที่ 3.7



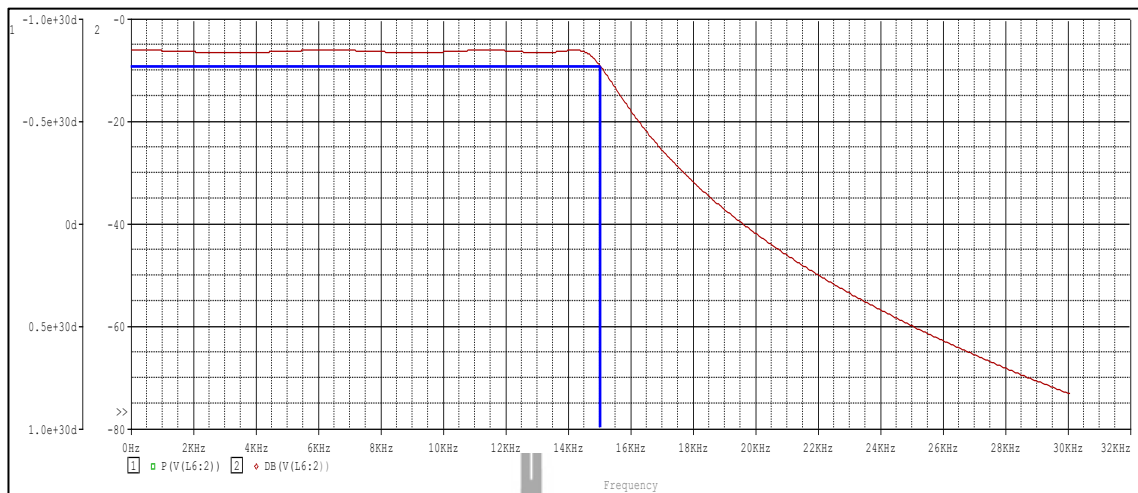
รูปที่ 3.7 วงจร Low Pass Filter 15kHz ที่ได้จากการคำนวณ

แต่เนื่องจากค่า C และ L ที่ได้จากการคำนวณมีค่าที่ไม่ได้มาตรฐาน จึงใช้ค่าที่ใกล้เคียงกันนำมาใช้กับวงจรแทน ซึ่งได้จะตามวงจร Low Pass Filter ดังนี้

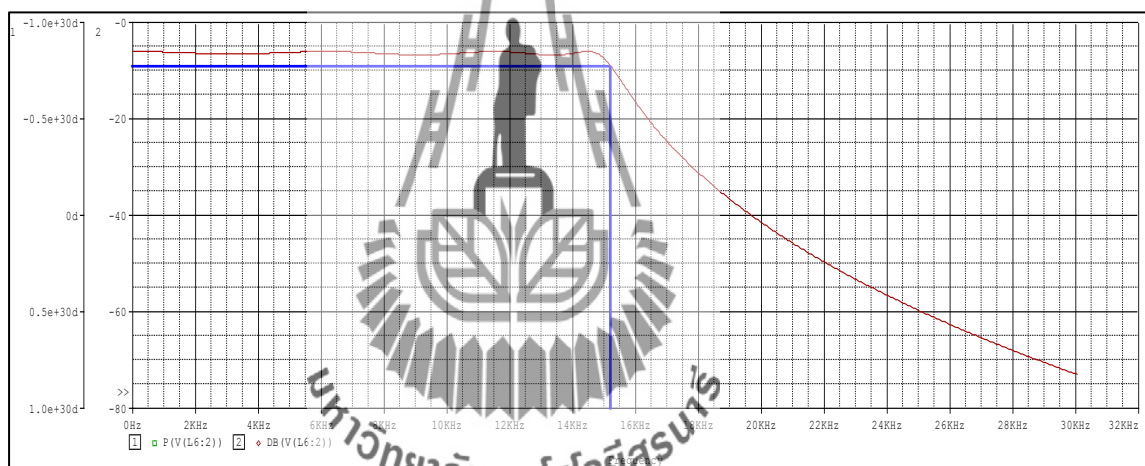


รูปที่ 3.8 วงจร Low Pass Filter 15kHz ที่ใช้ค่ามาตรฐาน

จากนั้นจะนำวงจรในรูปที่ 3.7 และ 3.8 มาหาผลตอบสนองทางความถี่ เพื่อเปรียบเทียบว่า วงจร Low Pass Filter ที่เปลี่ยนค่า C และ L ที่มาตรฐานนั้น มีผลตอบสนองทางความถี่ใกล้เคียงกับ วงจร Low Pass Filter ที่ได้จากการคำนวณหรือไม่



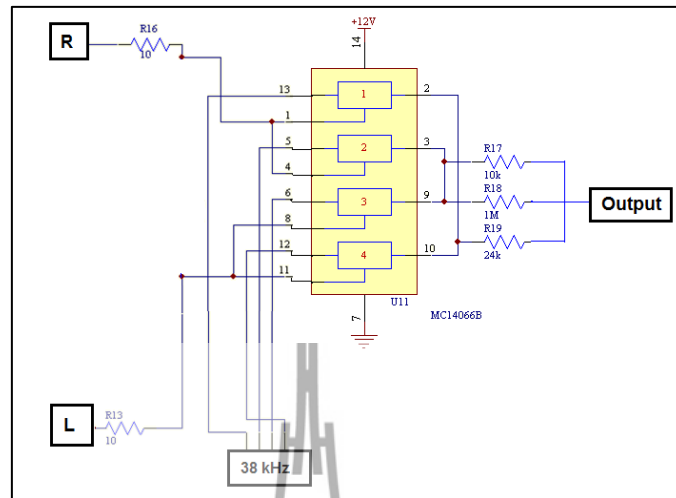
รูปที่ 3.9 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 15 kHz ที่จากได้การคำนวณ



รูปที่ 3.10 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 15 kHz ที่จากได้ค่ามาตรฐานของอุปกรณ์

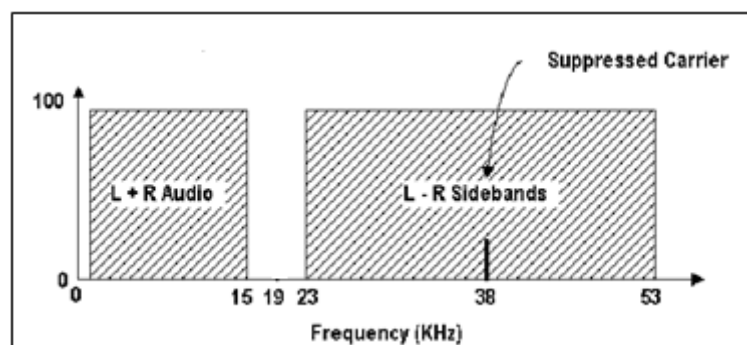
จากกราฟรูปที่ 3.9 และ 3.10 เป็นรูปผลตอบสนองทางความถี่ Low Pass Filter 15kHz ที่ได้จากการคำนวณและค่ามาตรฐาน ซึ่งจะเห็นได้ว่า cut off frequency ของรูปที่ 3.9 มีค่าเท่ากับ 15 kHz และ cut off frequency ของรูปที่ 3.10 มีค่าเท่ากับ 15.3 kHz ดังนั้นจึงสามารถนำค่ามาตรฐานนี้ไปใช้ในการออกแบบได้ เนื่องจากมีค่า cut off frequency ที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้

3.5 วงจร Balanced Modulator



รูปที่ 3.11 วงจร Balanced Modulator

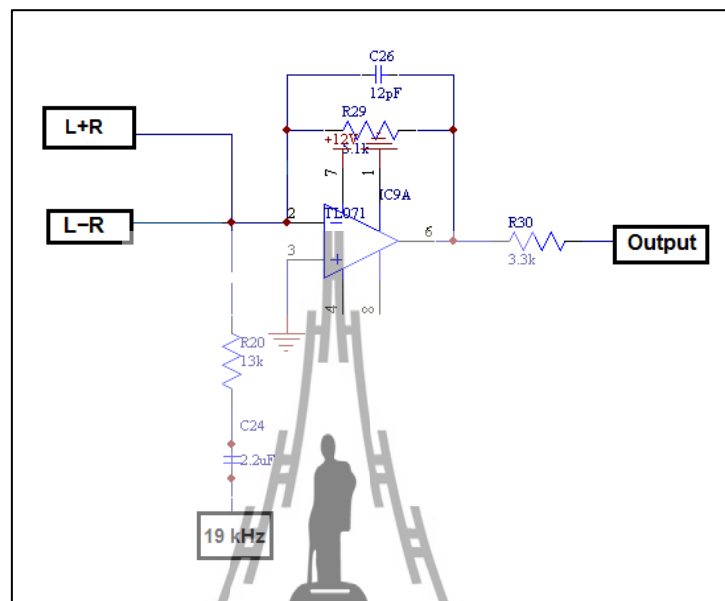
จากรูปที่ 3.11 แสดงถึงวงจร Balanced Modulator ซึ่งจะรับสัญญาณเข้ามา 3 สัญญาณ คือ สัญญาณเสียงด้านซ้าย , สัญญาณเสียงด้านขวา และสัญญาณคลื่นพาหะย่อย 38 kHz เข้ามาผสมคลื่นกันในแบบ AM โดยผสมคลื่นเสียง L-R กับความถี่พาหะย่อย 38 kHz. แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ และการจัดคลื่นพาหะทิ้งไปเหลือเพียง ไชด์แบนด์ด้านสูง (USB) หรือ + (L-R) กับไชด์แบนด์ด้านต่ำ (LSB) หรือ - (L-R) เรียกรวมว่าสัญญาณ 38 kHz. ไชด์แบนด์ L-R หรือสัญญาณ L-R ส่งต่อสัญญาณไปวงจรรวมสัญญาณทั้งหมด ซึ่งจะได้กราฟสเปกตรัมความถี่ ของวงจร Balanced Modulator ดังรูปที่ 3.12 และจากรูปวงจร Balanced Modulator จะเห็นว่ามีตัว Analog Switch มีทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งตัวที่ 1 และ 2 จะถูกป้อนสัญญาณพัลส์ 38kHz ที่มี Phase Shift 180° ตัวที่ 3 และ 4 จะถูกป้อนสัญญาณพัลส์ 38kHz ที่มี Phase Shift 0°



รูปที่ 3.12 กราฟสเปกตรัมความถี่ของวงจร Balanced Modulator

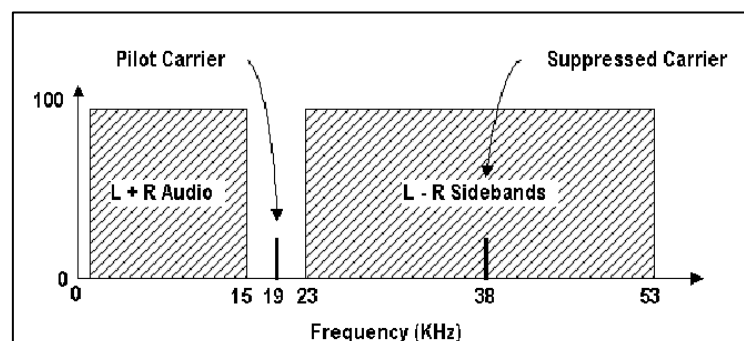
3.6 วงจรรวมสัญญาณ 19 kHz

วงจรรวมสัญญาณ 19 kHz ซึ่งเป็นผลรวมสัญญาณของวงจร Stereo Encoder ที่จะส่งสัญญาณต่อไปยัง ภาค Modulation FM



รูปที่ 3.13 วงจรรวมสัญญาณ 19 kHz

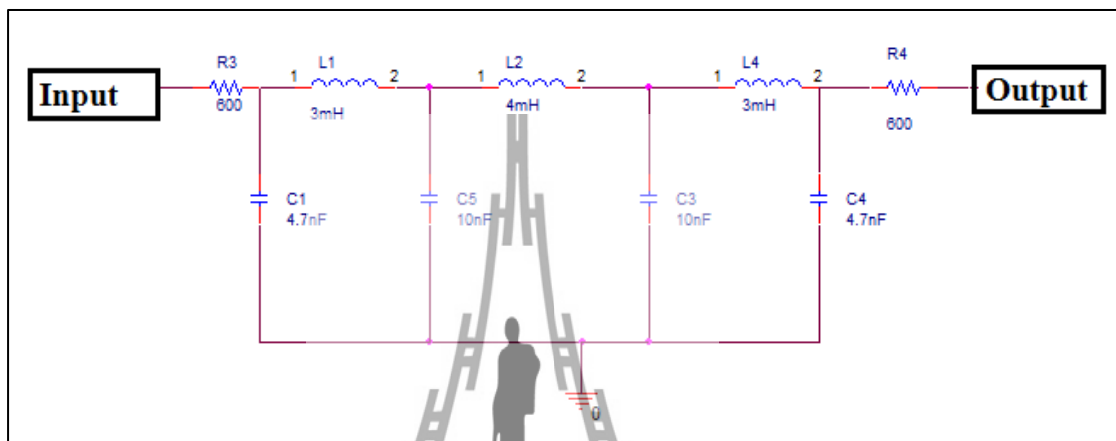
จากรูปที่ 3.13 จากวงจรจะเห็นได้ว่าจะมีการรวมสัญญาณทั้งหมด 3 ช่องสัญญาณ นั่นคือ สัญญาณเสียง (L + R) , สัญญาณ (L - R) และสัญญาณไฟลิตโทน 19 kHz ซึ่ง IC TL071 ทำหน้าที่รวม 3 สัญญาณนี้เข้าด้วยกัน ซึ่งลักษณะ Output ของสัญญาณ จะได้ลักษณะกราฟสเปคตัมความถี่ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กราฟสเปคตัมความถี่ สัญญาณ Output จากวงจรรวมสัญญาณ

3.7 วงจร Low Pass Filter 55 kHz

สัญญาณที่ออกจาก Stereo Encoder ซึ่งมีสัญญาณ L+R, สัญญาณ ไฟล๊อค และสัญญาณ L-R นอกจากนี้ยังมีสัญญาณอื่นปะปนมาด้วย เช่น สัญญาณฮาร์โมนิกของความถี่ 19 kHz ที่มีความถี่เกินความถี่ที่เราต้องการ ดังนั้นจึงนำวงจร Low Pass Filter 55 kHz มากรองความถี่เพื่อต้องการสัญญาณ L+R, สัญญาณไฟล๊อค และสัญญาณ L-R ซึ่งทั้ง 3 สัญญาณอยู่ในช่วง 0-53 kHz



รูปที่ 3.15 วงจร Low Pass Filter 55 kHz

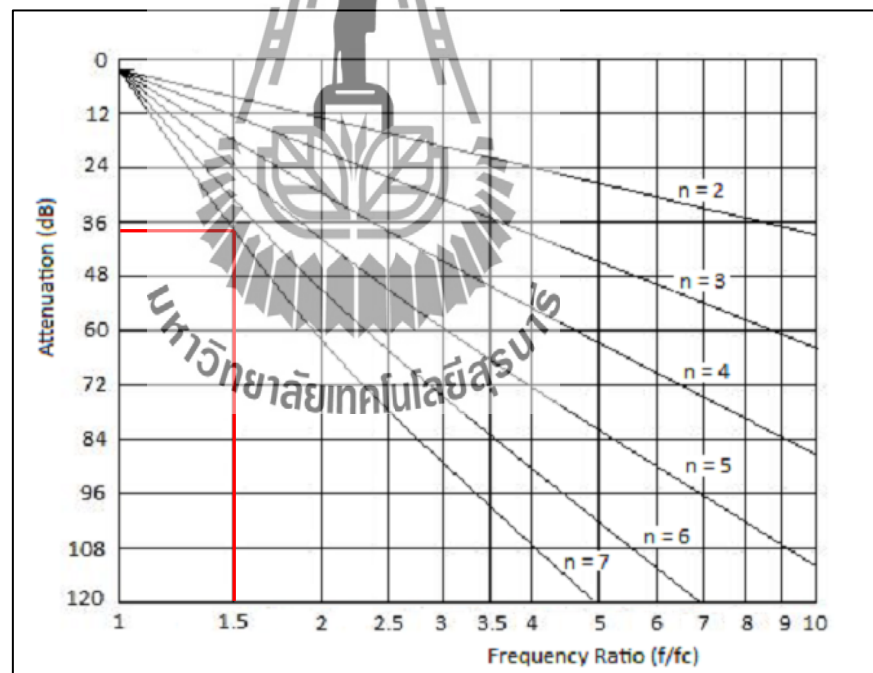


การออกแบบวงจร Low Pass Filter ที่ Cut Off Frequency 55 kHz

Cut Off Frequency ที่ต้องการใช้งานคือ 55 kHz และมีความถี่สูงสุดที่ยอมรับได้คือ 57 kHz และใช้ตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากับ 600 Ω ซึ่งจะนำ 2 ความถี่ไปคำนวณหา Frequency Ratio ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\text{Frequency Ratio} = \frac{f}{f_c} = \frac{57 \text{ kHz}}{55 \text{ kHz}} = 1.036$$

จากค่า Frequency Ratio ที่คำนวณได้ จะทำให้เกิดค่า Attenuation ที่มีค่าน้อย ดังนี้จึงใช้ค่า Frequency Ratio ที่มีค่าเท่ากับ 1.5 จะได้ค่า Attenuation ที่มีค่า 40 dB เพื่อนำมาหาจำนวน Element จากการใช้การออกแบบ Chebyshev Filter 0.01 dB Ripple โดยการเปรียบเทียบค่า Frequency Ratio จากรูปที่ 3.16

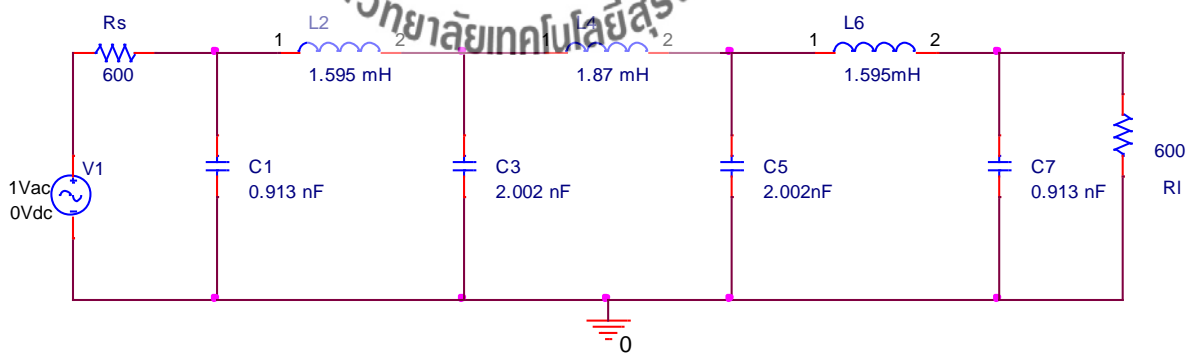


รูปที่ 3.16 Chebyshev Filter 0.01 dB Ripple [5]

จากนั้นจะสามารถหาค่า C และ L ต้นแบบได้จากตารางที่ 3.2 โดยที่ตัวต้านทานที่โหลด และตัวต้านทาน Input มีค่าเท่ากับ 600Ω ซึ่งจะพิจารณาจากตารางที่ 3.1 จะได้ $\frac{R_S}{R_L} = 1 \Omega$ จะได้รูปวงจร Low Pass Filter 15 kHz ดังรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.2 Chebyshev Low-Pass Prototype Element Values for 0.01-dB Ripple [5]

| Chebyshev Low-Pass Element Values for 0.01-dB Ripple | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--|
| n | R_S/R_L | C_1 | L_2 | C_3 | L_4 | C_5 | L_6 | C_7 | |
| 7 | 1.000 | 0.913 | 1.595 | 2.002 | 1.870 | 2.002 | 1.595 | 0.913 | |
| | 0.900 | 0.816 | 1.862 | 2.089 | 1.722 | 2.202 | 1.581 | 1.206 | |
| | 0.800 | 0.811 | 1.150 | 2.262 | 1.525 | 2.465 | 1.464 | 1.538 | |
| | 0.700 | 0.857 | 0.967 | 2.516 | 1.323 | 2.802 | 1.307 | 1.910 | |
| | 0.600 | 0.943 | 0.803 | 2.872 | 1.124 | 3.250 | 1.131 | 2.359 | |
| | 0.500 | 1.080 | 0.650 | 3.382 | 0.928 | 3.875 | 0.947 | 2.948 | |
| | 0.400 | 1.297 | 0.507 | 4.156 | 0.735 | 4.812 | 0.758 | 3.790 | |
| | 0.300 | 1.669 | 0.372 | 5.454 | 0.546 | 6.370 | 0.568 | 5.148 | |
| | 0.200 | 2.242 | 0.242 | 8.057 | 0.360 | 9.484 | 0.378 | 7.802 | |
| | 0.100 | 4.701 | 0.119 | 15.872 | 0.178 | 18.818 | 0.188 | 15.652 | |
| | ∞ | 1.559 | 1.867 | 1.866 | 1.765 | 1.563 | 1.161 | 0.456 | |



รูปที่ 3.17 วงจร Low Pass Filter 55 kHz

การคำนวณหาค่า C1

จากสมการที่ (2.6) และรูปวงจรที่ 3.17 จะได้อ่า $C_n = 0.913 \text{ F}$, $f_c = 55 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \text{ } \Omega$

$$C = \frac{0.913}{2\pi \times 55 \times 10^3 \times 600}$$

ดังนั้น จะได้

$$C1 = 4.57 \text{ nF}$$

ซึ่งจากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าค่า C1 และ C7 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น C7 จึงมีค่าเท่ากับ 4.57 nF

การคำนวณหาค่า C3

จากสมการที่ (2.6) และรูปวงจรที่ 3.17 จะได้อ่า $C_n = 2.002 \text{ F}$, $f_c = 55 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \text{ } \Omega$

$$C = \frac{2.002}{2\pi \times 55 \times 10^3 \times 600}$$

ดังนั้น จะได้

$$C3 = 10.02 \text{ nF}$$

ซึ่งจากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าค่า C3 และ C5 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น C5 จึงมีค่าเท่ากับ 10.02 nF

การคำนวณหาค่า L2

จากสมการที่ (2.7) และรูปวงจรที่ 3.17 จะได้อ่า $L_n = 1.595 \text{ H}$, $f_c = 55 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \text{ } \Omega$

$$L = \frac{600 \times 1.595}{2\pi \times 55 \times 10^3}$$

ดังนั้น จะได้

$$L2 = 2.87 \text{ mH}$$

ซึ่งจากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าค่า L2 และ L6 มีค่าเท่ากัน ดังนั้น L6 จึงมีค่าเท่ากับ 2.87 mH

คำนวณหาค่าที่ L4

จากสมการที่ (2.7) และรูปวงจรที่ 3.17 จะได้ค่า $L_n = 1.870 \text{ H}$, $f_c = 55 \text{ kHz}$, $R_L = 600 \Omega$

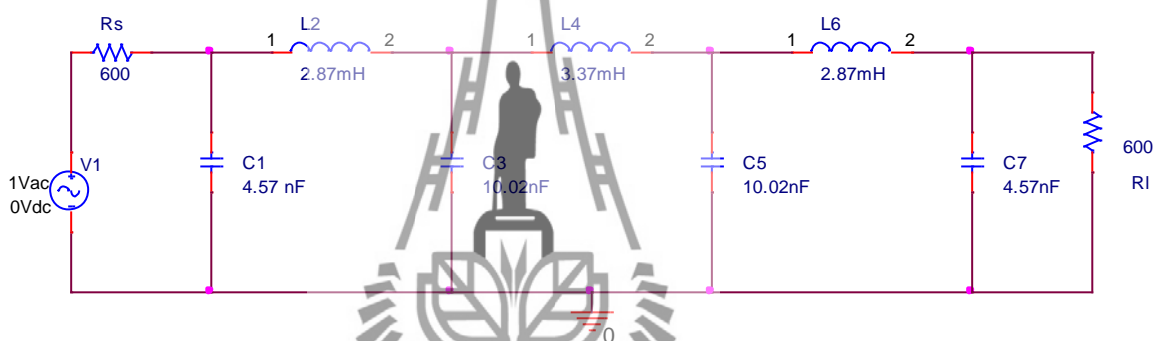
$$L = \frac{600 \times 1.87}{2\pi \times 55 \times 10^3}$$

ดังนั้น จะได้

$$L4 = 3.37 \text{ mH}$$

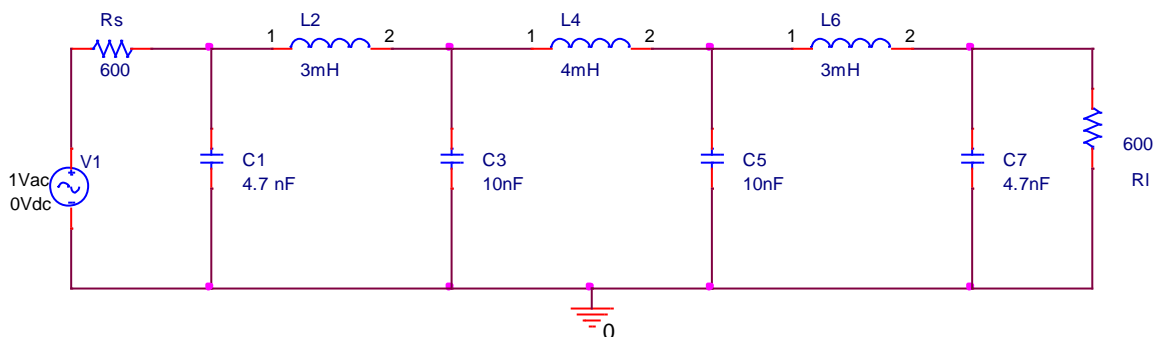
จากการคำนวณที่ผ่านมาจะทำให้ได้ค่า C และ L ที่นำมาใช้งานจริง ซึ่งจะได้รูปวงจร

Low Pass Filter 55 kHz ดังรูปที่ 3.18



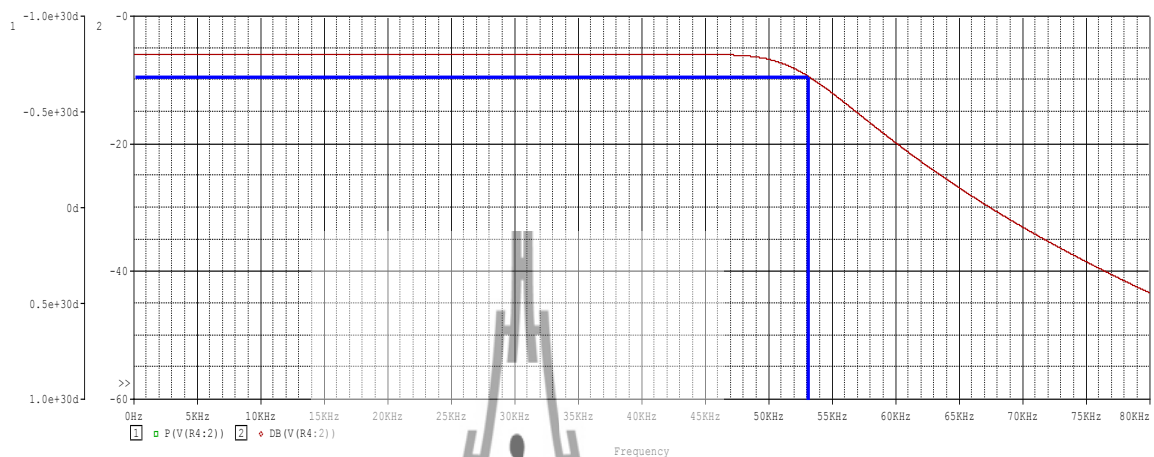
รูปที่ 3.18 วงจร Low Pass Filter 55kHz ที่ได้จากการคำนวณ

แต่เนื่องจากค่า C และ L ที่ได้จากการคำนวณยังไม่ได้มาตรฐาน จึงใช้ค่าที่ใกล้เคียงกันนำมาใช้กับวงจรแทน ซึ่งได้จะตามวงจร Low Pass Filter ดังนี้

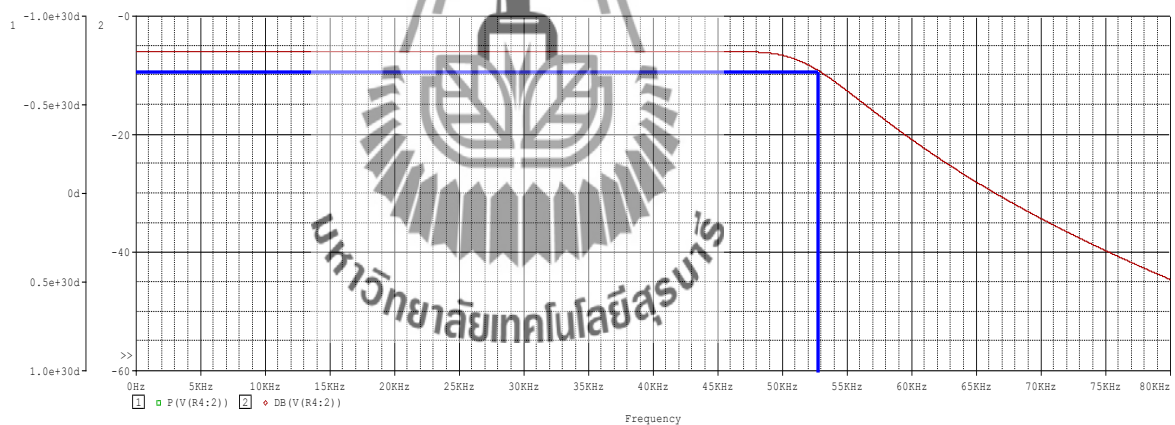


รูปที่ 3.19 วงจร Low Pass Filter 55kHz ที่ใช้ค่ามาตรฐาน

จากนั้นจะนำวงจรในรูปที่ 3.18 และ 3.19 มาหาผลตอบสนองทางความถี่ เพื่อเปรียบเทียบว่าวงจร Low Pass Filter ที่เปลี่ยนค่า C และ L ที่มาตรฐานนั้น มีผลตอบสนองทางความถี่ใกล้เคียงกับวงจร Low Pass Filter ที่ได้จากการคำนวณหรือไม่



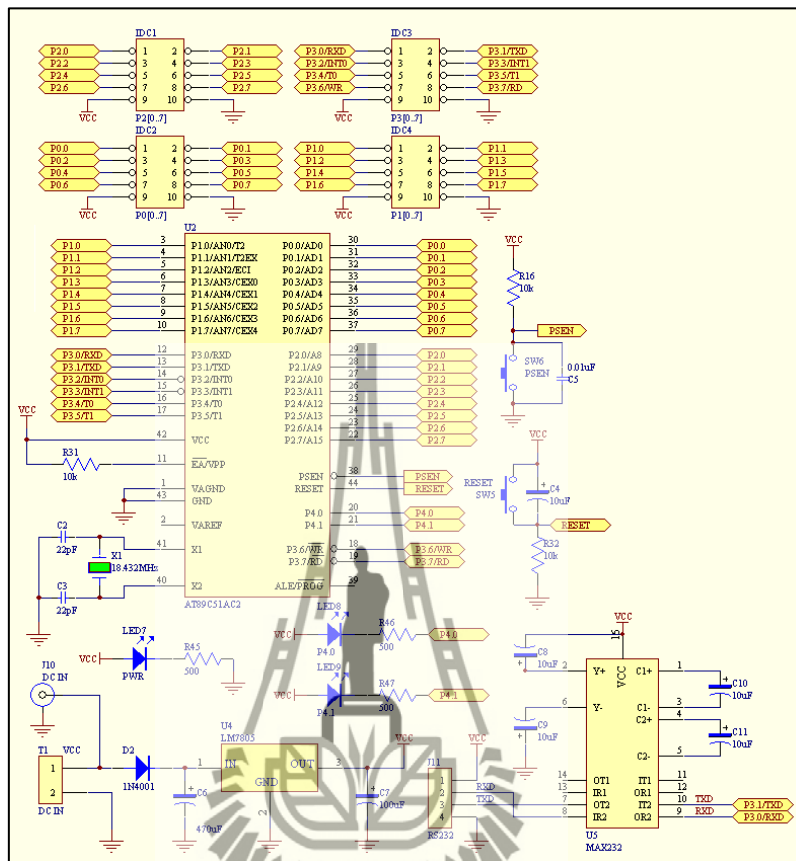
รูปที่ 3.20 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 55 kHz ที่จากได้การคำนวณ



รูปที่ 3.21 แสดงกราฟ Cut Off Frequency 55 kHz ที่จากได้ค่ามาตรฐานของอุปกรณ์

จากกราฟรูปที่ 3.20 และ 3.21 เป็นรูปผลตอบสนองทางความถี่ Low Pass Filter 55kHz ที่ได้จากการคำนวณและค่ามาตรฐานของอุปกรณ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า cut off frequency ของรูปที่ 3.20 มีค่าเท่ากับ 53 kHz และ cut off frequency ของรูปที่ 3.21 มีค่าเท่ากับ 53 kHz ดังนั้นจึงสามารถนำค่ามาตรฐานนี้ไปใช้ในการออกแบบได้

3.8 บอร์ด T89C51AC2 Application Board V.1



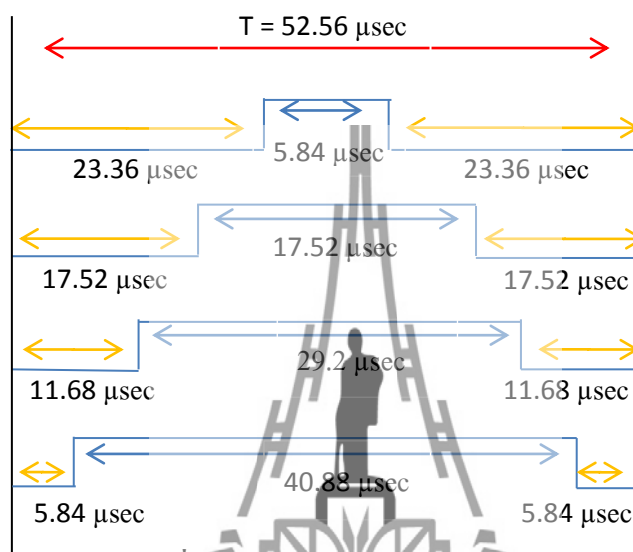
รูปที่ 3.22 บอร์ด T89C51AC2 Application Board V.1

ในการสร้างวงจร Stereo Encoder ที่เป็นอะนาล็อกที่มีสัญญาณ 3 สัญญาณ คือ สัญญาณ sine 19 kHz , สัญญาณพัลส์ 38 kHz สองสัญญาณที่มีความต่างเฟสอยู่ 180 องศา ซึ่งทั้ง 3 สัญญาณนี้ จะใช้บอร์ด T89C51AC2 Application Board V.1 สร้างสัญญาณ เพื่อไม่ให้ต้องใช้ตัวกำเนิดสัญญาณ หลาย ๆ แหล่ง ซึ่งขั้นตอนการสร้างสัญญาณดังนี้

1. การสร้างสัญญาณ sine 19 kHz
2. การสร้างสัญญาณพัลส์ 38 kHz สองสัญญาณที่มีความต่างเฟสกันอยู่ 180 องศา

3.8.1 สร้างสัญญาณ sine 19 kHz

เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสามารถในการออกแบบได้เพียงสัญญาณพัลส์เท่านั้น ดังนั้นจึงแก้ไขโดยออกแบบการสร้างสัญญาณพัลส์ ให้เหมือนหรือคล้ายกับรูปคลื่น sine มากที่สุดเพื่อจะนำไปใช้ร่วมกับบอร์ด Stereo Encoder โดยการนำสัญญาณพัลส์มาวางต่อกัน 4 ระดับ โดยแต่ละระดับจะมีขนาดสัญญาณไม่เท่ากัน จะได้ลักษณะดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงการ on, off ของแต่ละ port

เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีไฟเลี้ยงเพียง 5V ดังนั้นจึงต้องแบ่งไฟเลี้ยง 5V ออกเป็น 4 ระดับ จะได้

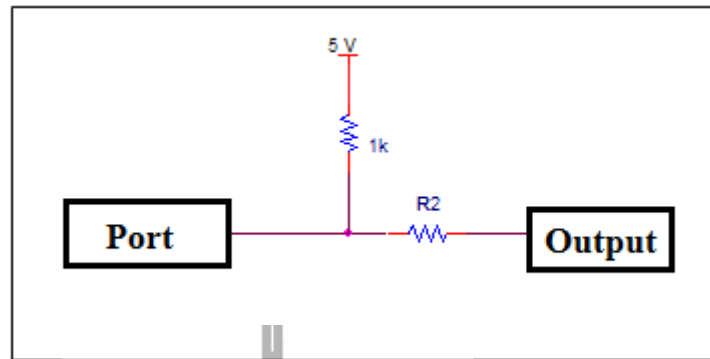
ระดับที่ 1 ทำการจ่ายไฟ 5V ได้ $R_2 = 10\text{ k}\Omega$

ระดับที่ 2 ทำการจ่ายไฟ 3.75V ได้ $R_2 = 3\text{ k}\Omega$

ระดับที่ 3 ทำการจ่ายไฟ 2.5V ได้ $R_2 = 1\text{ k}\Omega$

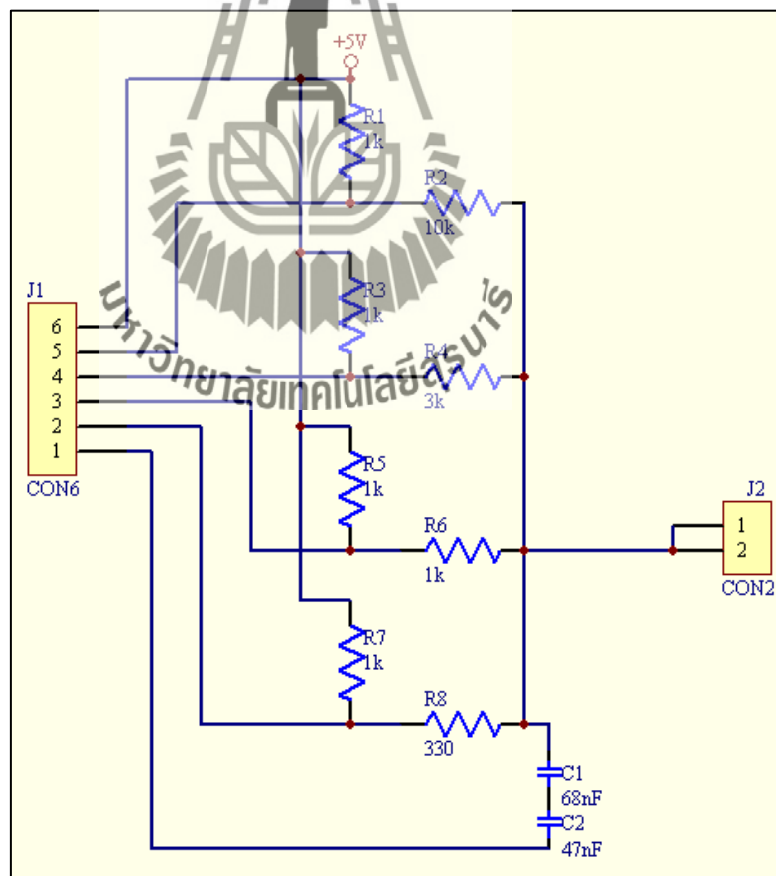
ระดับที่ 4 ทำการจ่ายไฟ 1.25V ได้ $R_2 = 330\ \Omega$

โดยสามารถคำนวณ R2 ได้จากวงจรด้านล่างนี้



รูปที่ 3.24 วงจรการแบ่งแรงดัน

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาสร้างวงจรซึ่งจะได้รูปดังนี้

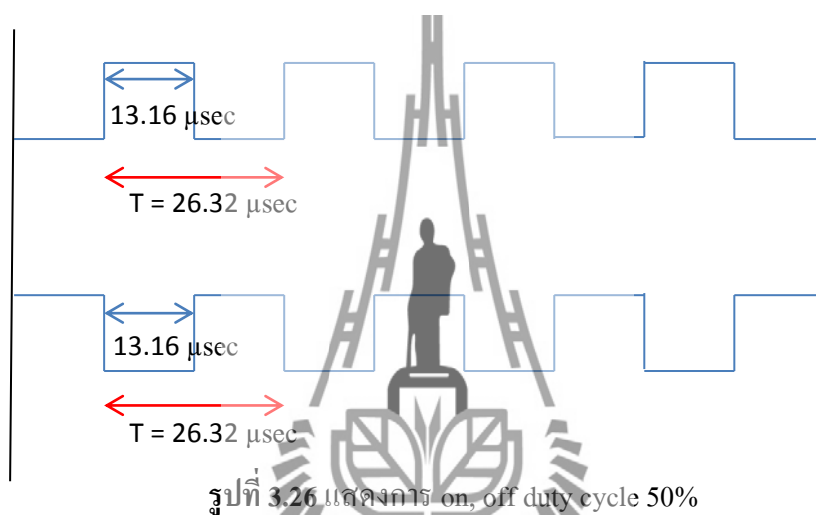


รูปที่ 3.25 วงจรแบ่งระดับสัญญาณ

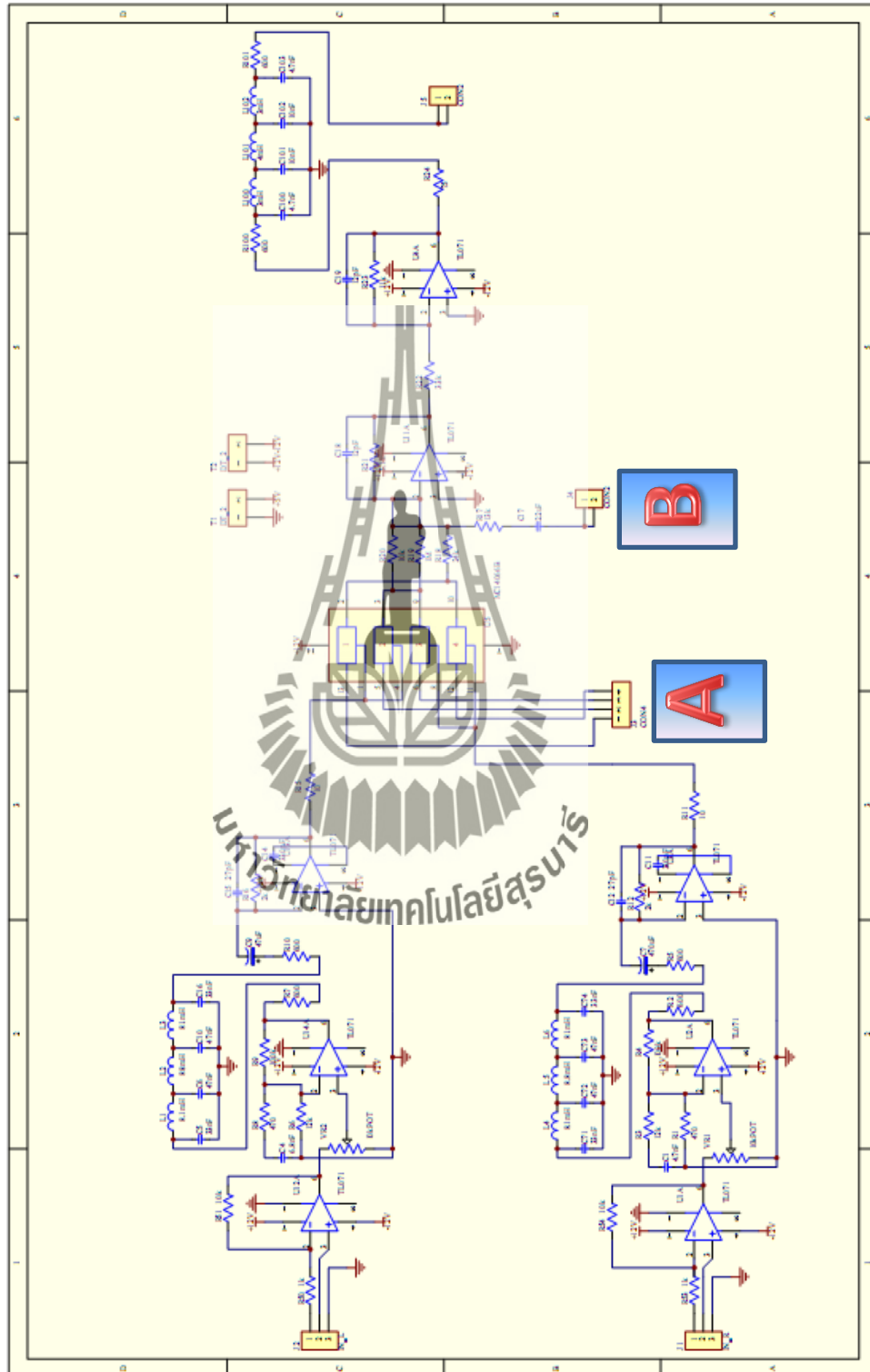
สัญญาณพัลส์ 19 kHz ที่ได้ยังไม่สามารถใช้งานได้ จึงแก้ปัญหาโดยใช้ Capacitor 120 nF เพื่อกรองสัญญาณให้ได้รูปสัญญาณ sine มากขึ้น

3.8.2 สร้างสัญญาณพัลส์ 38 kHz

ต้องการสร้างสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มีความถี่เท่ากันแต่มีความต่างเฟสกันอยู่ 180 องศา จากนั้นกำหนดเวลา On , Off duty cycle 50% ดังรูปที่ 3.26

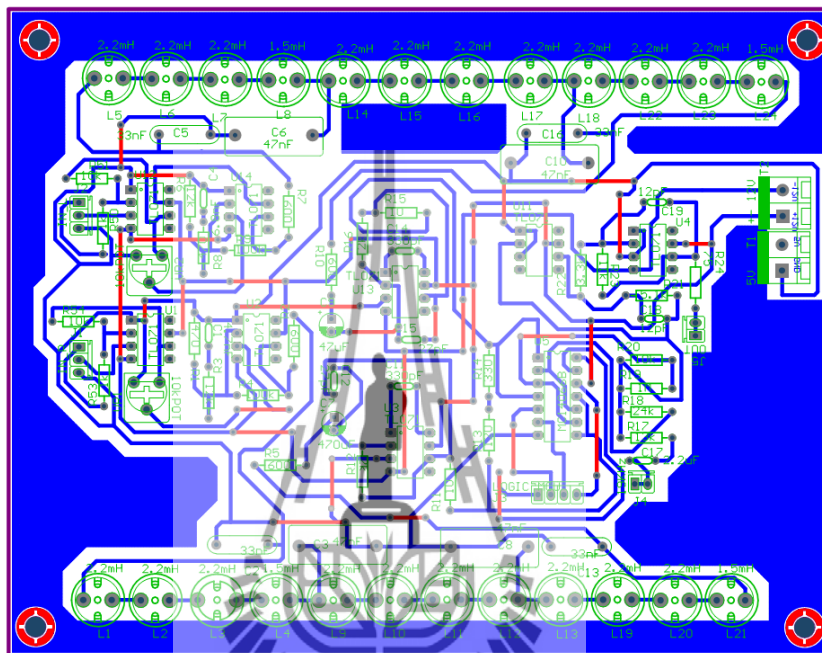


3.9 แบบวงจรรวม Stereo Encoder



รูปที่ 3.27 วงจร Stereo Encoder

จากรูปที่ 3.27 แสดงรูปวางจรรวมของ Stereo Encoder ซึ่งที่ตำแหน่ง A จะเห็นได้ว่า Connector ที่ Pin 1, 2 เชื่อมต่อสัญญาณพัลส์ 38 kHz Phase Shift 0 องศา และ Connector ที่ Pin 3, 4 เชื่อมต่อสัญญาณพัลส์ 38 kHz Phase Shift 180 องศา ที่ตำแหน่ง B จะเชื่อมต่อสัญญาณ sine 19 kHz จากนั้นจะนำวงจร Stereo Encoder มาออกแบบลาย ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ลายวางจร PCB ของวงจร STEREO ENCODER

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบวงจร Stereo Encoder ในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น การทดสอบวงจร Low Pass Filter ที่มีความถี่ Cut of Frequency 15kHz สำหรับกรองสัญญาณเสียงที่ ส่วนของ Input สำหรับด้านซ้ายและด้านขวา การทดสอบสัญญาณที่ออกจากวงจร Stereo Encoder เพื่อตรวจสอบว่าเป็นไปตามทฤษฎี นอกจากนี้ยังทำการวัดการแพร่นอกแถบ (Out Off Band) ของ วงจร Stereo Encoder เมื่อใช้งานร่วมกับ VCO เพื่อส่งกระจายเสียงวิทยุ

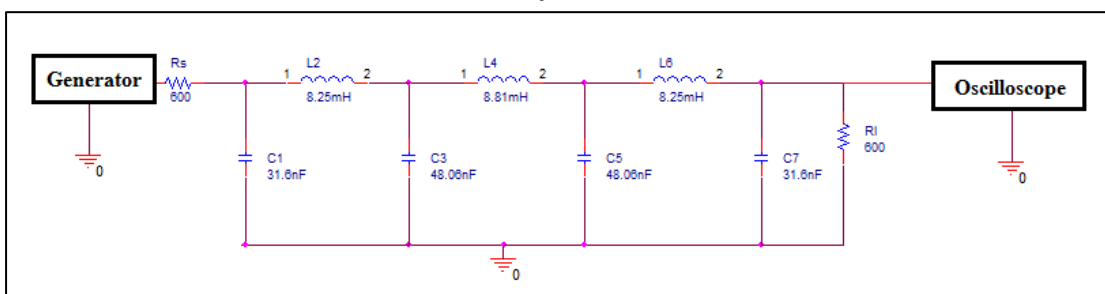
4.2 ผลการทดสอบวงจร Low Pass Filter

จากการออกแบบวงจร Low Pass Filter ในบทที่ 3 นั้น ทำให้ได้วงจร Low Pass Filter 15 kHz และวงจร Low Pass Filter 55 kHz ที่ใช้สำหรับกรองความถี่ต่ำ ในวงจร Stereo Encoder ซึ่ง ขั้นตอนการทำ Low Pass Filter มีวิธีการดังนี้

4.2.1 วิธีการทำ Low Pass Filter 15 kHz

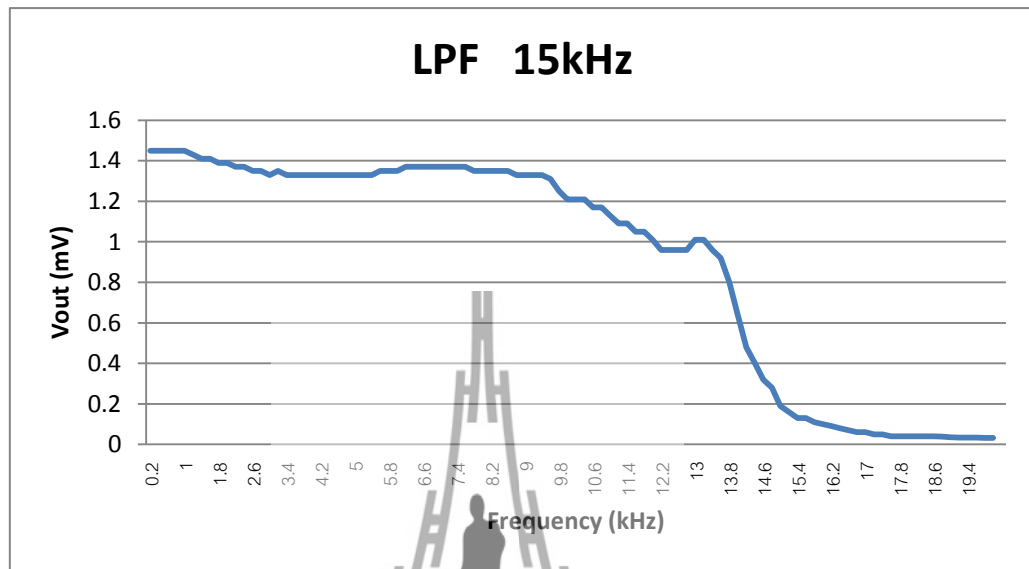
1. ใช้เครื่อง Generator จ่ายสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 1 kHz – 20 kHz เข้าที่ Input ของวงจร Low Pass Filter 15 kHz โดยปรับค่าแรงดันไว้คงที่ 3 Vpp เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงทาง ความถี่
2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ในหน่วยของ Vpp ที่วงจร Low Pass Filter 15 kHz
3. บันทึกผลการทดลองและดูผลการเปลี่ยนแปลง

ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการทำ Low Pass Filter 15 kHz

จากนั้นนำผลทดสอบที่ได้พล็อตกราฟ Low Pass Filter 15 kHz จะได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter 15 kHz

จากผลการทดสอบ Low Pass Filter 15 kHz จะสามารถคำนวณหาค่า Cut Off Frequency ได้ดังนี้

4.2.2 วิธีการคำนวณหา Cut Off Frequency ของ Low Pass Filter 15 kHz

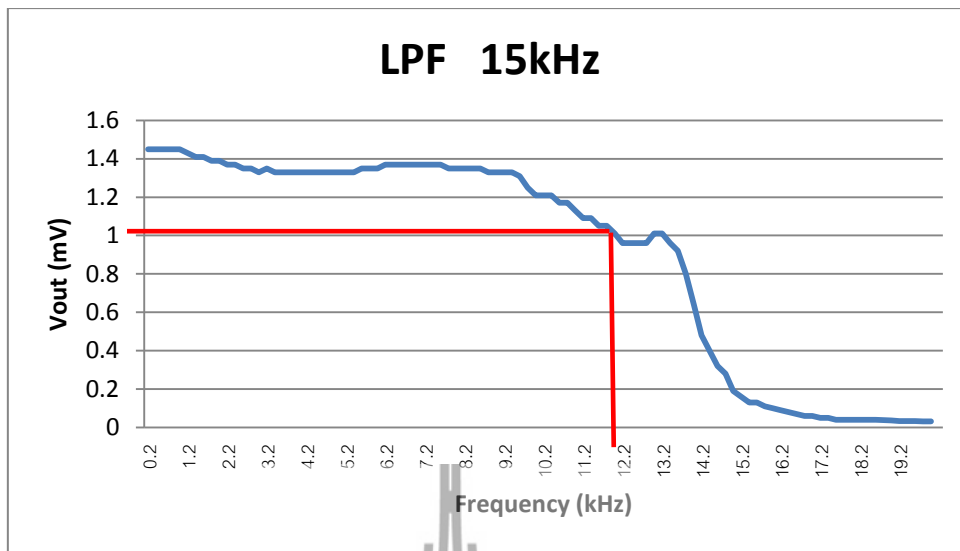
จากผลการทดสอบ Low Pass Filter 15 kHz สามารถคำนวณ Cut Off Frequency ได้จากสมการที่ (4.1)

$$\text{dB} = 20\log V_{\text{max}} - 3\text{dB} \quad (4.1)$$

ค่า V_{max} ที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าเท่ากับ 1.45 mV

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{dB} = 20\log(1.45 \times 10^{-3}) - 3\text{dB}$$

จึงจะได้ค่าลดทอนสัญญาณมีค่าเท่ากับ -59.77 dB หรือ 1.026 mV



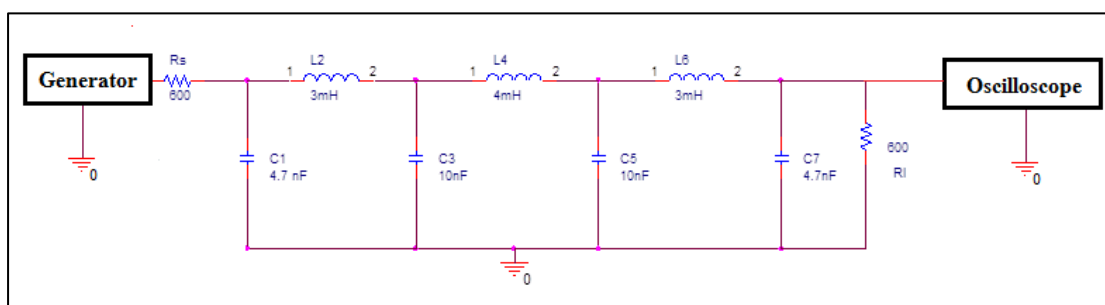
รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter ที่ Cut Off Frequency 15 kHz

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าผลทดสอบ Low Pass Filter 15 kHz จะมีค่า Cut Off Frequency ที่ประมาณ 12 kHz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี

4.2.3 วิธีการทำ Low Pass Filter 55 kHz

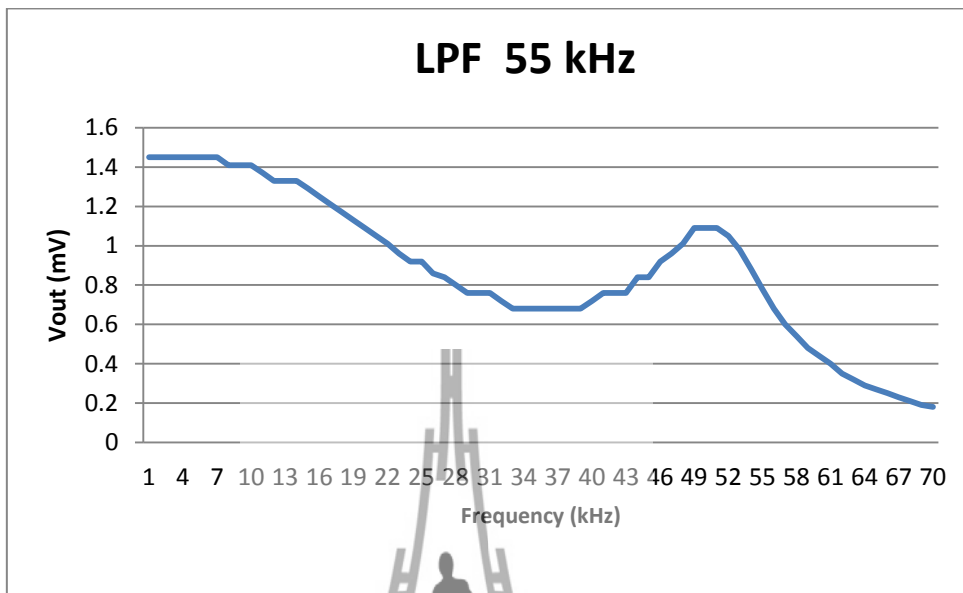
1. ใช้เครื่อง Generator จ่ายสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 1 kHz – 70 kHz เข้าที่ Input ของวงจร Low Pass Filter 55 kHz โดยปรับค่าแรงดันไว้คงที่ 3 Vpp เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงทางความถี่
2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ในหน่วยของ Vpp ที่วงจร Low Pass Filter 55 kHz
3. บันทึกผลการทดลองและดูผลการเปลี่ยนแปลง

ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงขั้นตอนการทำ Low Pass Filter 55 kHz

จากนั้นนำผลทดสอบที่ได้พล็อตกราฟ Low Pass Filter 55 kHz จะได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบ Low Pass Filter 55 kHz

จากผลการทดสอบ Low Pass Filter 55 kHz จะได้สามารถคำนวณหาค่า Cut Off Frequency 55 kHz ได้ดังนี้

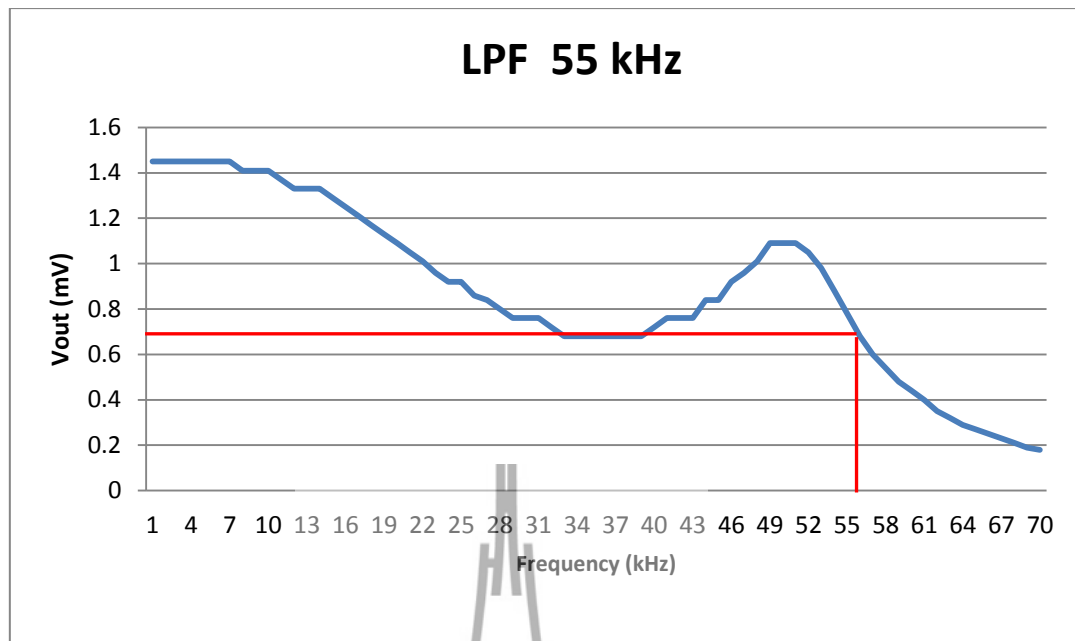
4.2.4 วิธีการคำนวณหา Cut Off Frequency ของ Low Pass Filter 55 kHz

จากผลการทดสอบ Low Pass Filter 55 kHz สามารถคำนวณ Cut Off Frequency ได้จากสมการที่ (4.1)

ค่า V_{max} ที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าเท่ากับ 1.09 mV

ดังนั้น
$$dB = 20\log(1.09 \times 10^{-3}) - 3dB$$

จึงจะได้ค่าลดทอนสัญญาณมีค่าเท่ากับ -62.251 dB หรือ 0.77 mV



รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลอง Low Pass Filter ที่ Cut Off Frequency 55 kHz

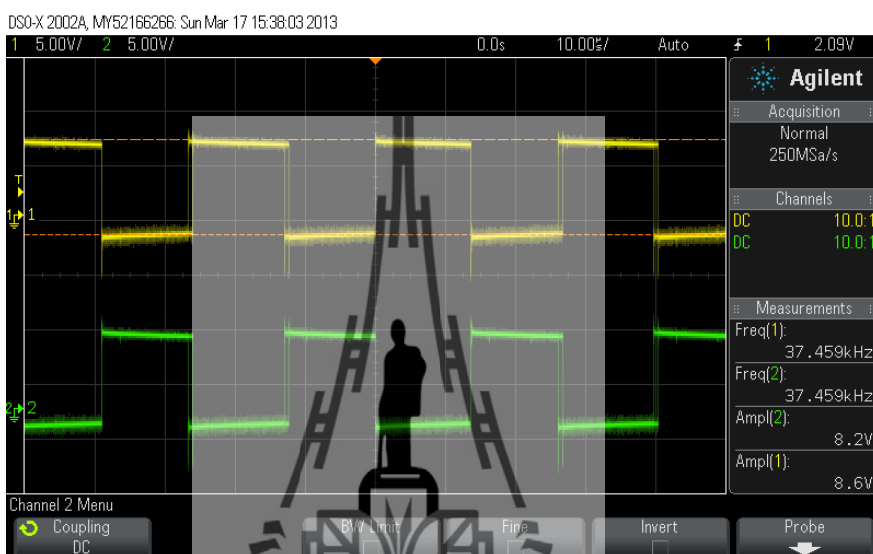
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบ Low Pass Filter 55 kHz จะมีค่า Cut Off Frequency ที่ประมาณ 56 kHz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี



4.3 ผลการทดสอบความถี่ที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

จากการที่ได้ออกแบบการสร้างสัญญาณพัลส์ 2 สัญญาณที่มีความต่างเฟสกัน 180 องศา ที่มีความถี่ 38 kHz ในบทที่ 3 นั้น จะมีผลทดสอบความถี่จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังนี้

4.3.1 ผลการทดสอบความถี่ที่ 38 kHz

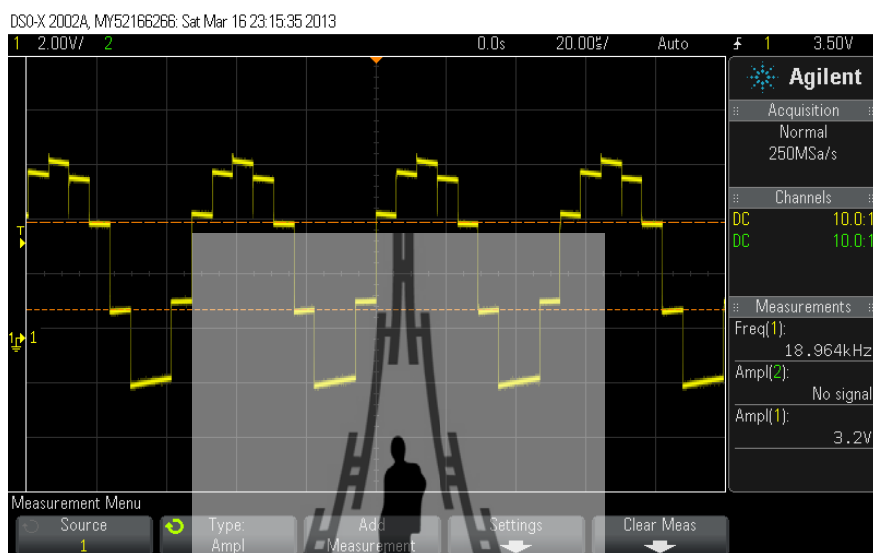


รูปที่ 4.7 สัญญาณ 38 kHz ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

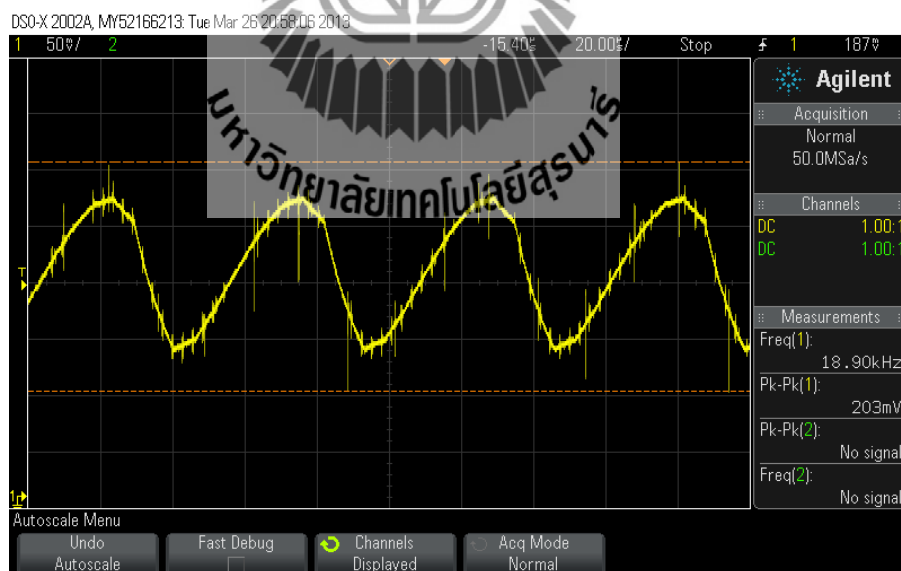
จากรูปที่ 4.7 เป็นรูปสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ตำแหน่งจุด A จากรูปที่ 3.26 ในบทที่ 3 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มี Amplitude ของสัญญาณเฟส 0 องศา มีค่าเท่า Amplitude กับ 8.2V และ Amplitude ของสัญญาณเฟส 180 องศา มีค่าเท่ากับ 8.6V มี Frequency เท่ากับ 37.459 kHz ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังภาค Balanced Modulator ต่อไป

4.3.2 ผลทดสอบความถี่ 19 kHz

ความถี่ 19 kHz เป็นความถี่ที่ถูกสร้างขึ้นให้เป็นสัญญาณไฟลัดเพื่อทำหน้าที่ส่งสัญญาณเข้าสู่วงจรรวมสัญญาณ ซึ่งจะได้ลักษณะสัญญาณดังนี้



รูปที่ 4.8 แสดง Output ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



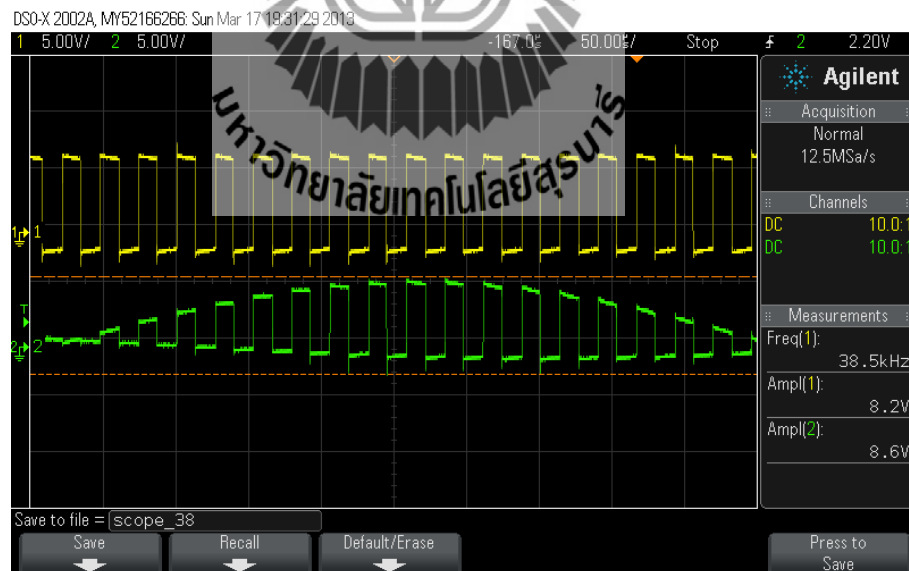
รูปที่ 4.9 สัญญาณ 19kHz ที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณ

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าสัญญาณไฟลัด 19 kHz ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตำแหน่ง B จากรูปที่ 3.26 ในบทที่ 3 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณ Step เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มีความสามารถในการออกแบบได้เพียงสัญญาณพัลส์เท่านั้น จึงแก้ปัญหาโดยใช้ Capacitor 120 nF เพื่อกรองสัญญาณให้ได้มีลักษณะคล้ายรูปคลื่น sine มากขึ้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9

4.4 ผลการทดสอบสัญญาณ Output ของ Balanced Modulator

ผลการทดสอบสัญญาณ Output ของ Balanced Modulator โดยการป้อนสัญญาณ Sine 1 kHz ทางด้านช่องซ้ายเพียงช่องเดียว และป้อนสัญญาณทางด้านช่องขวาเพียงช่องเดียว เพื่อทดสอบผลสัญญาณช่องซ้าย เมื่อนำสัญญาณมาทำการ Modulation จากนั้นนำทั้งสัญญาณช่องซ้ายและสัญญาณช่องขวา มาทำการ Modulation ซึ่งจะได้ผลทดสอบสัญญาณที่ออก Balanced Modulator มีลักษณะสัญญาณดังนี้

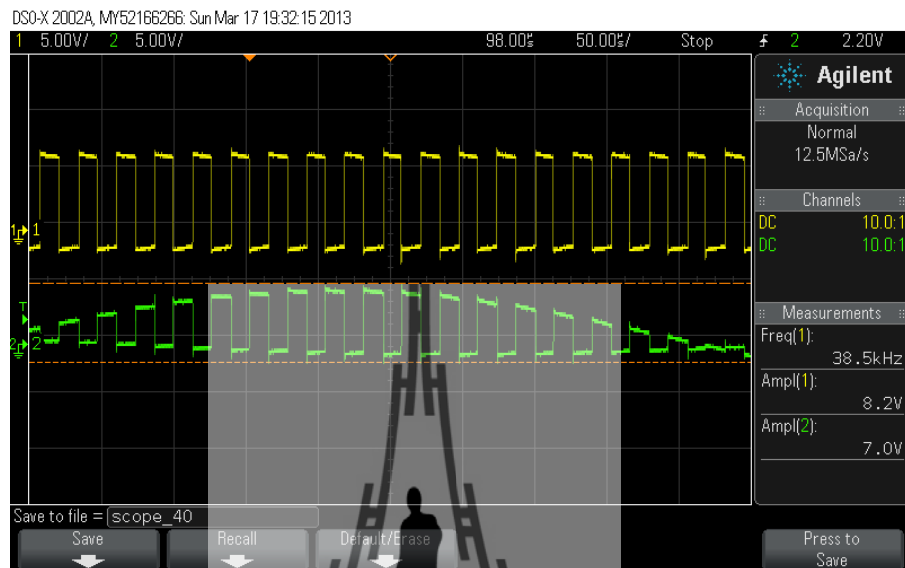
4.4.1 ผลการทดสอบการป้อนสัญญาณด้านซ้ายเพียงด้านเดียว เมื่อเทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0°



รูปที่ 4.10 เมื่อป้อนสัญญาณด้านซ้าย เทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0°

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนสัญญาณด้านซ้ายจะถูก Sampling ด้วยสัญญาณ sine จึงทำให้สัญญาณที่ได้ มี Phase Shift ที่มีค่าตรงกัน

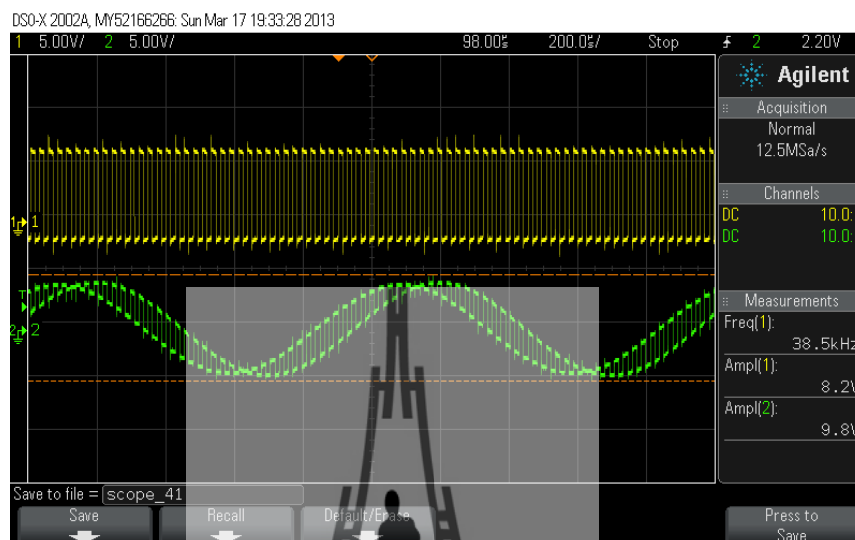
4.4.2 ผลการทดสอบการป้อนสัญญาณด้านขวาเพียงด้านเดียว เมื่อเทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0°



รูปที่ 4.11 เมื่อป้อนสัญญาณด้านขวา เทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0°

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนสัญญาณด้านขวาเพียงด้านเดียวจะถูก Sampling ด้วยสัญญาณ sine จึงทำให้สัญญาณที่ได้เกิดการ Phase Shift 180°

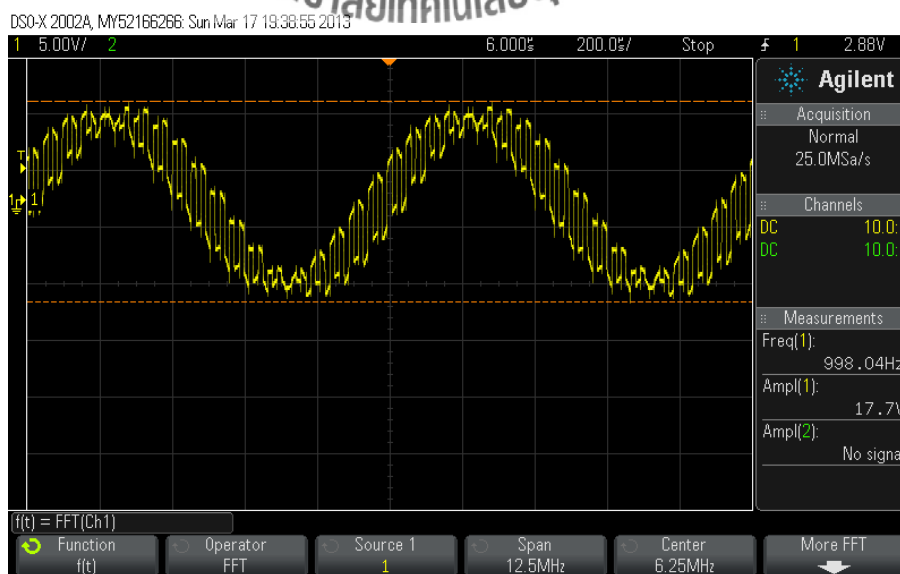
4.4.3 ผลการทดสอบการป้อนสัญญาณด้านซ้ายและด้านขวา เมื่อเทียบสัญญาณพัลส์ 38 kHz ที่มี Phase Shift 0°



รูปที่ 4.12 เมื่อป้อนสัญญาณ L และ R เทียบสัญญาณพัลส์

จากรูปที่ 4.12 เป็นการป้อนสัญญาณด้านซ้ายและด้านขวา โดยวัด Output จากวงจร Balanced Modulator จะเห็นว่าสัญญาณจะมีลักษณะเป็นรูป sine เหมือนเดิม แต่จะสัญญาณด้านซ้ายและด้านขวาจะเกิด Phase Shift กัน

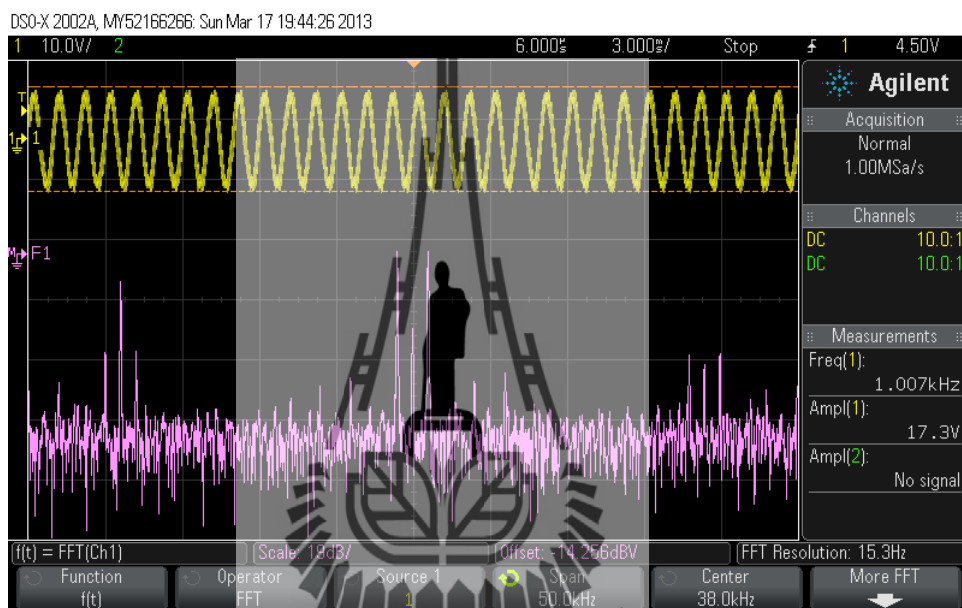
4.5 ผลทดสอบสัญญาณ Output ที่ออกจาก Stereo Encoder เมื่อรวมกับสัญญาณ 19 kHz



รูปที่ 4.13 สัญญาณ Output เมื่อป้อนสัญญาณ sine 1 kHz

จากรูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณ Output เมื่อป้อนสัญญาณ sine 1 kHz ซึ่งรับสัญญาณเข้ามาทั้งหมด 3 สัญญาณ คือ สัญญาณเสียงโมโน L+R สัญญาณไฟลิต 19 KHz. และสัญญาณ 38 kHz ไซด์แบนด์ L-R เข้ามารวมกัน ซึ่งความถี่ไฟลิต 19 KHz. นี้เป็นความถี่ที่สำคัญที่จะทำให้การส่งและการรับในระบบ FM สเตอริโอมีดัดแปลงได้ถูกต้องและสมบูรณ์

4.5.1 สัญญาณ Spectrum ที่ออกจาก Stereo Encoder

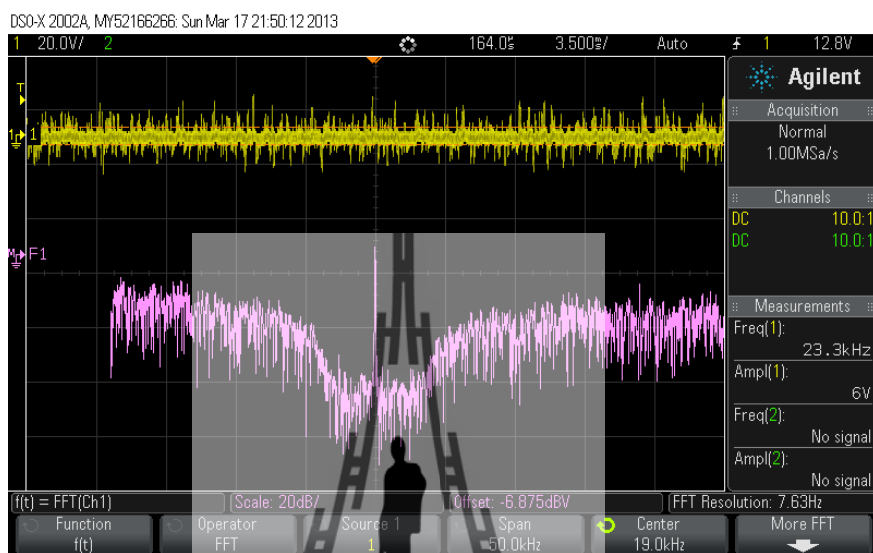


รูปที่ 4.14 สัญญาณ Spectrum จาก Output Stereo Encoder เมื่อมี Center 38 kHz , Span 50 kHz

จากรูปที่ 4.14 จะแสดงสัญญาณ Spectrum ของสัญญาณที่ออกจาก Stereo Encoder เมื่อป้อนสัญญาณ sine 1 kHz เพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร ซึ่งจะมีสัญญาณ Spectrum 38 kHz เป็น Center โดยกำหนด Span 50 kHz และจะเห็นว่าด้านซ้ายของกราฟ จะมี Spectrum ของ 19 kHz

4.6 ผลทดสอบวงจร Stereo Encoder โดยป้อนสัญญาณ Color Noise

เมื่อได้ผลทดสอบสัญญาณ Spectrum จากนั้นจะป้อนสัญญาณ Color Noise ซึ่งจะได้ผลทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.15 ป้อนสัญญาณ Color Noise ที่วงจร Stereo Encoder โดยที่ Center ที่ 19 kHz

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลทดสอบการป้อนสัญญาณ Color Noise โดยมีสัญญาณไฟลัด 19 kHz เป็นจุด Center ซึ่งทางด้านซ้ายจะเป็นสัญญาณเสียงโมนอล L+R จะมีความถี่ในช่วง 0 kHz ถึง 15 kHz และสัญญาณด้านขวาเป็นสัญญาณ 38 kHz ไซด์แบนด์ L-R มีความถี่ในช่วง 23 kHz ถึง 53 kHz ซึ่งหาได้จากการรวมกันและหักล้างกันของสัญญาณคลื่นพาหะย่อย 38 kHz กับสัญญาณเสียงความถี่สูงสุด

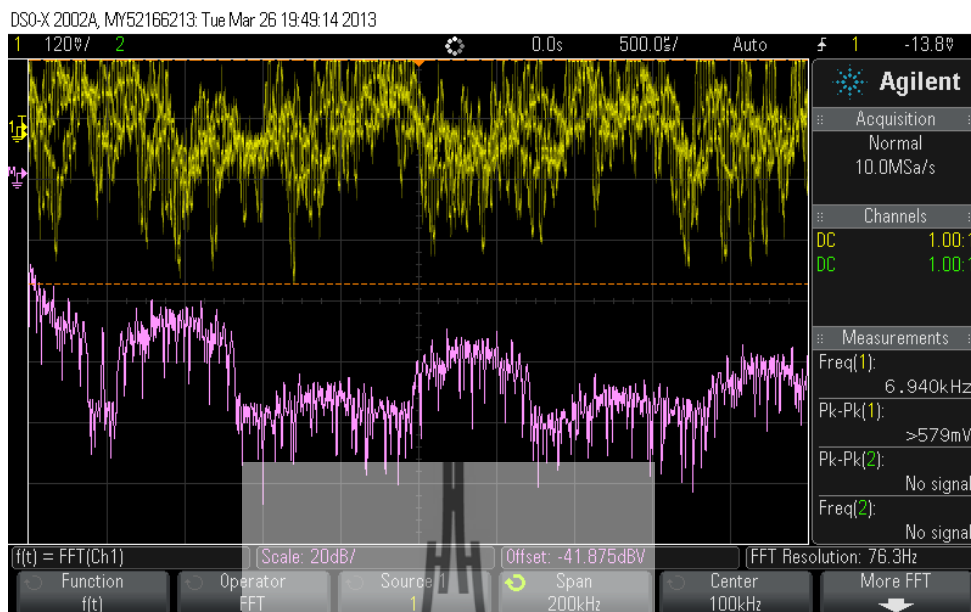


รูปที่ 4.16 ป้อนสัญญาณ Color Noise ที่วงจร Stereo Encoder โดยที่ Center ที่ 38 kHz

จากรูปที่ 4.16 แสดงการป้อนสัญญาณ Color Noise ที่วงจร Stereo Encoder โดยมี center ที่ 38 kHz มีช่วงของสัญญาณ L-R ที่เกิดขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 23kHz ถึง 53 kHz และช่วงความถี่ของสัญญาณไฟลัด 19 kHz จะอยู่ทางด้านซ้าย โดยมีช่วงสัญญาณ L+R จะอยู่ในช่วง 0 kHz ถึง 15 kHz จะเห็นได้ว่าด้านขวาสุดของกราฟ จะมีความถี่ฮาโมนิค 57 kHz แทรกมาด้วย ซึ่งเป็นความถี่ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงควรมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในช่วง Cut Off Frequency 55 kHz

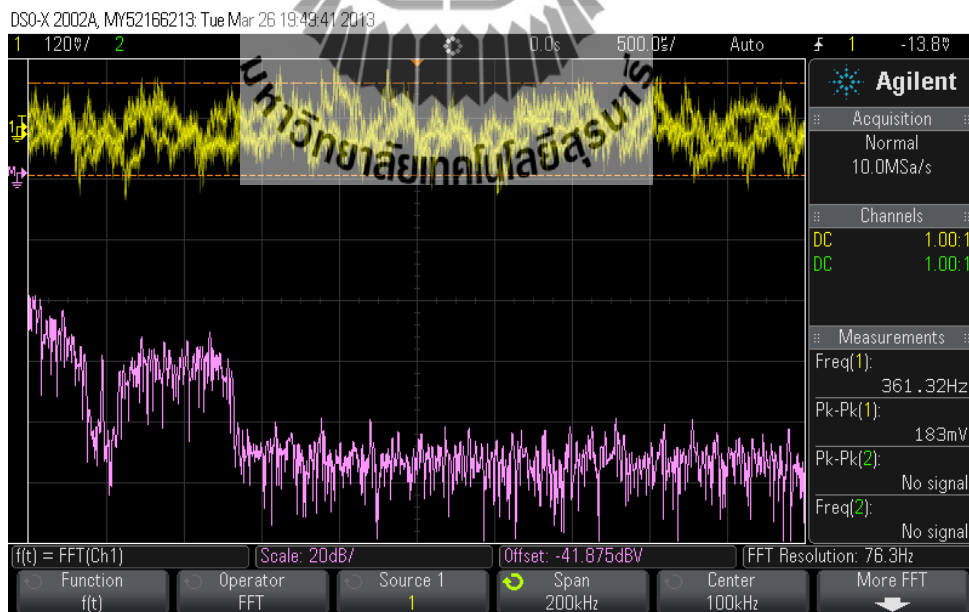
4.7 ผลการทดสอบสัญญาณ Stereo Encoder ที่ผ่านวงจร Low Pass Filter 55 kHz

จากผลทดสอบสัญญาณ Output ของ Stereo Encoder จะเห็นได้ว่ามีสัญญาณฮาโมนิคอื่นๆ ซึ่งเกิดจากสัญญาณไฟลัด 19 kHz และฮาโมนิคของสัญญาณ L-R สัญญาณทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้ เป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการ เพราะเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดการแผ่อกแถบ (Out Of Band) ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณ Output ของวงจร Stereo Encoder ผ่านวงจร Low Pass Filter 55 kHz ได้ผลทดสอบดังนี้



รูปที่ 4.17 สัญญาณ Output ของวงจร Stereo Encoder ก่อนเข้าวงจร Low Pass Filter 55 kHz โดยป้อนสัญญาณ Color Noise

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่เกิน 53 kHz มีสัญญาณอื่น ๆ ที่ไม่ต้อง ดังนั้นจึงต้องผ่านวงจร Low Pass Filter 55 kHz เพื่อกำจัดสัญญาณเหล่านี้ออกไป



รูปที่ 4.18 สัญญาณ Output ของวงจร Low Pass Filter 55 kHz โดยป้อนสัญญาณ Color Noise

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณ Output ที่ผ่าน Low Pass Filter 55 kHz สัญญาณฮาร์โมนิกอื่น ๆ จะถูกกำจัดออกไป ซึ่งจะมีเพียงสัญญาณ L+R สัญญาณไฟล้ต 19 kHz และสัญญาณ L-R

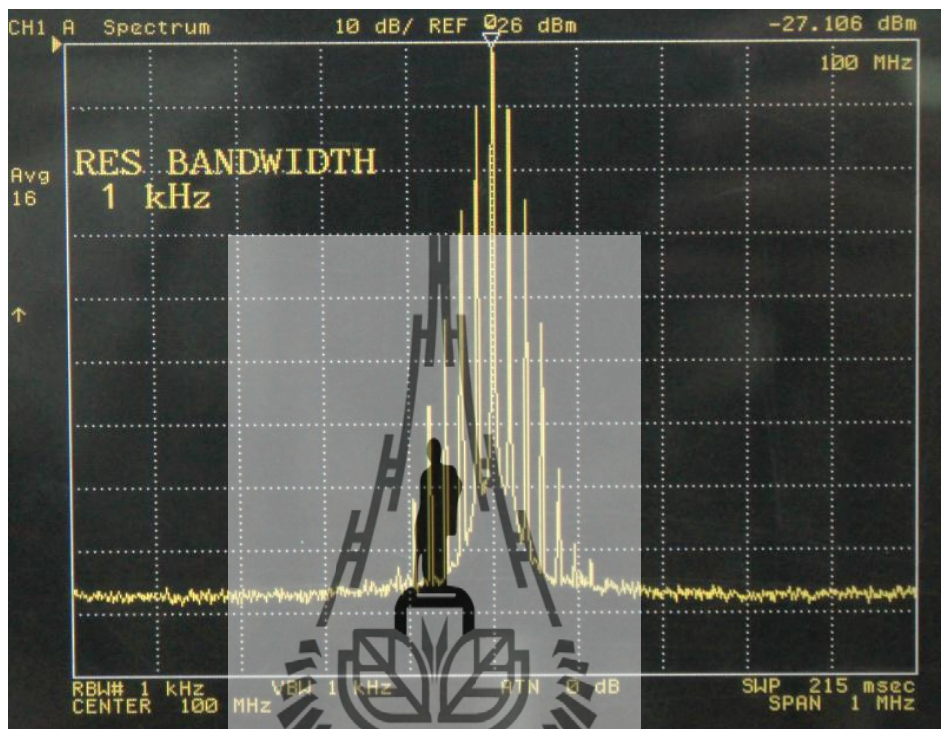
4.8 ผลการทดสอบการแพร่แถบ (Out Of Band) ของวงจร Stereo Encoder เมื่อใช้งานร่วมกับ VCO

รูปที่ 4.19 แสดง Spectrum ของสัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่ 100 MHz จาก VCO โดยจะทำการตั้งค่าของเครื่อง Spectrum Analyzer ให้มี Center frequency อยู่ที่ 100 MHz Span 1 MHz และตั้งค่า Reference Value ให้เป็นค่าสูงสุดของคลื่นพาห้



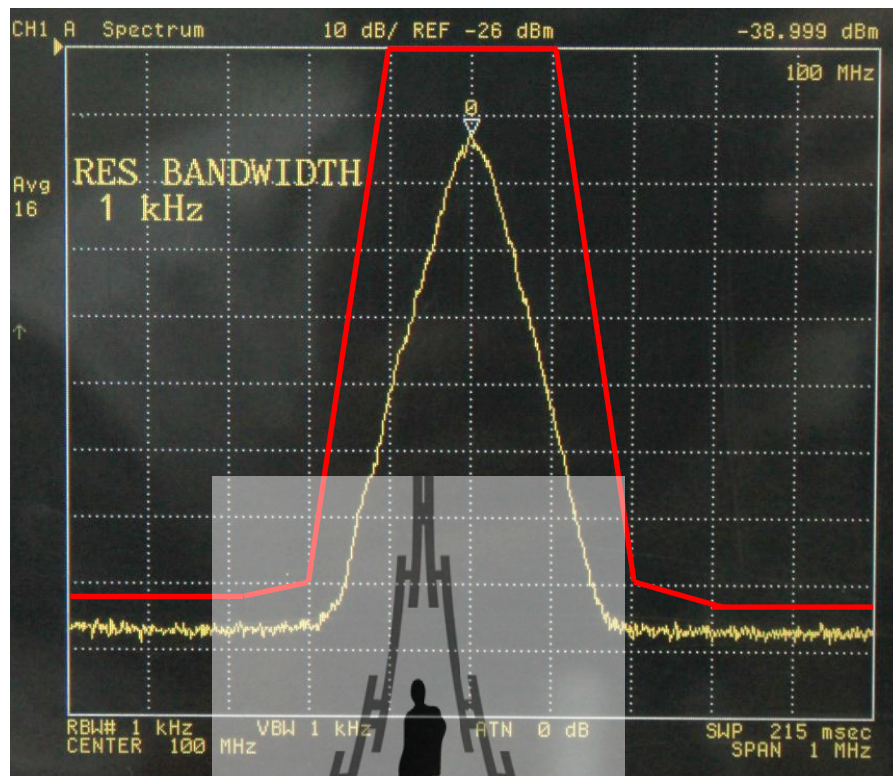
รูปที่ 4.19 Spectrum ของสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่ 100MHz จาก VCO

รูปที่ 4.20 เป็นสัญญาณ Spectrum 100 MHz จาก VCO ที่ถูก Modulate กับสัญญาณที่ได้จาก Stereo Encoder ในขณะที่ยังไม่ได้ป้อนสัญญาณเสียง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าจะมีเพียงสัญญาณที่เป็นสัญญาณ Pilot 19 kHz เท่านั้น



รูปที่ 4.20 สัญญาณ Spectrum 100MHz จาก VCO ที่ถูก Modulate จาก Stereo Encoder

เพื่อทำการวัด Band Width ของสัญญาณ เราวัดในขณะที่ต้องทำการป้อนสัญญาณ Color Noise ที่ภาค Input ของวงจร Stereo Encoder และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการวัดมาตรฐานของการวัดเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงในระบบเอฟเอ็ม ซึ่งจะต้องมี Band Width ไม่เกินไปกว่าค่าที่กำหนดเอาไว้ในที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ซึ่งจากการวัด Band Width ของวงจร Stereo Encoder จะแสดงดังรูปที่ 4.21



จากรูปที่ 4.21 เป็นรูปสัญญาณ Spectrum ของ Bandwidth ที่เกิดจากการป้อนสัญญาณ Color Noise ให้กับ Stereo Encoder จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งหมดมีความแรงไม่เกินขอบ Bandwidth ที่กำหนด ดังนั้นจึงไม่ทำให้เกิดการแพร่รอบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการเรื่อง STEREO ENCODER เป็นส่วนหนึ่งในเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงของระบบ FM ซึ่งปัจจุบันมีการใช้งานวิทยุ FM อย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่ใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณไม่ได้ตามมาตรฐานเกิดการแพร่แถบ (Out Of Band) ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนของช่องสัญญาณข้างเคียง ดังนั้นในโครงการนี้ จึงศึกษาการทำงานและออกแบบวงจร STEREO ENCODER เพื่อลดการรบกวนของช่องสัญญาณข้างเคียง โดยโครงการนี้จะมีวงจร Low Pass Filter ที่ Cut Off Frequency 15 kHz เพื่อจะให้สัญญาณเสียงที่มอดูเลตในระบบ FM มีความถี่ไม่เกิน 15 kHz ตามมาตรฐานของการมอดูเลตเอฟเอ็ม จากการทดสอบวงจร STEREO ENCODER พบว่าเกิดความถี่ฮาร์มอนิกของ Pilot 19 kHz และสัญญาณ L-R ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงทำการแก้ไขโดยการสร้างวงจร Low Pass Filter ที่ Cut Off Frequency 55 kHz จะกรองสัญญาณที่ออกจากวงจร Stereo Encoder เพื่อให้ได้สัญญาณ L+R , สัญญาณ Pilot 19 kHz และสัญญาณ L-R จากผลการทดสอบนำวงจร STEREO ENCODER ต่อเข้ากับ VCO จะเห็นได้ว่าไม่เกิดการแพร่แถบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. สัญญาณรบกวนในวงจรสูง
2. ไม่สามารถสร้างสัญญาณ sine ให้สมบูรณ์ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย
3. ไม่ได้สร้างวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 19 kHz ที่ออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

5.3 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้กับวงจรอื่นๆ ได้
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับการใช้งาน โปรแกรม OrCAD และ Protel 99 se เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับโครงการได้
3. สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานได้
4. ได้เรียนรู้การทำงานร่วมกับผู้อื่น



ประวัติผู้เขียน



นางสาวภาคินี นิลละออ เกิดวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ.2533
ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลดงมะรุม อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพิบูล-
วิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

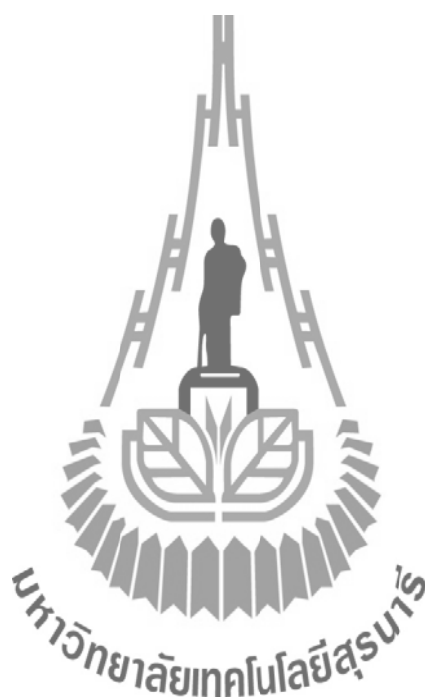


นางสาวอรรณพ วัฒนสกุลไทย เกิดวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ.2533
ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนดอน-
บอสโกวิทยา อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ปัจจุบันเป็นนักศึกษา
ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

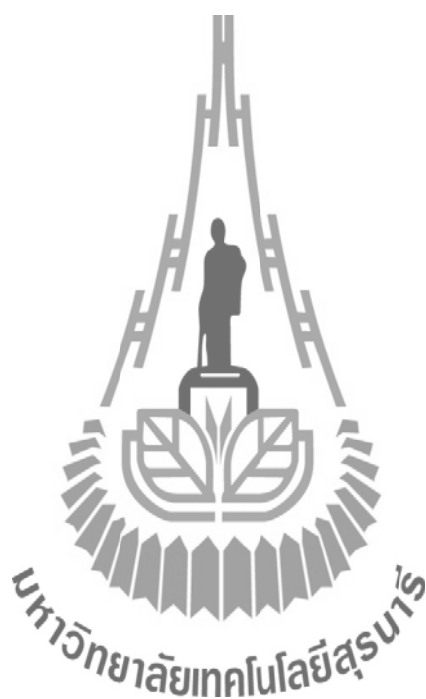


นายจักรกร สดุดิษฐ์ เกิดวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ.2533
ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลสบง อำเภอภูซาง จังหวัดพะเยา
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนปิยะ-
มิตรวิทยา อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้น
ปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก



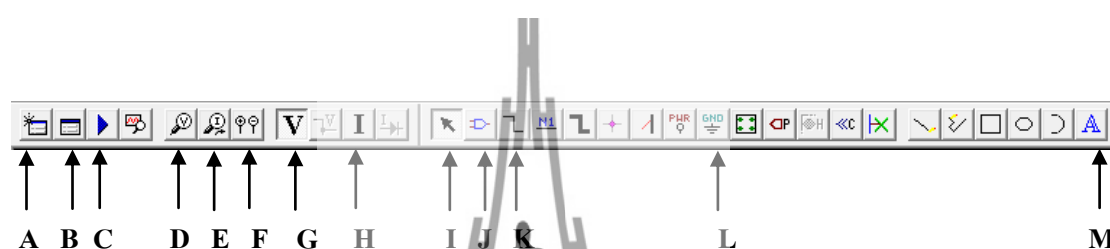
หลักการใช้งานโปรแกรม OrCAD เบื้องต้น

OrCAD เป็นโปรแกรมงานด้าน CAD อิเล็กทรอนิกส์เช่นเดียวกับ Protel, Eagle, Circuit Maker 2000, Auto Engineer ฯลฯ ที่มีความสามารถในการวาดวงจรไฟฟ้า (Schematic), ออกแบบลายวงจรพิมพ์ (PCB) โดยที่สามารถเดินลายทองแดงแบบอัตโนมัติ หรือกึ่งอัตโนมัติได้ พร้อมทั้งยังตั้งกฎในการออกแบบลายวงจรพิมพ์ได้อีกด้วย นอกจากนี้โปรแกรม OrCAD ยังได้รวมโปรแกรม PSpice เข้ามาเสริมอีกหนึ่งโปรแกรมจึงทำให้สามารถวิเคราะห์หลักการการทำงานของวงจรไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้านั้นก็สามารถเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ได้ อาทิเช่นการวิเคราะห์แบบ Time Domain (Transient), การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าแบบ DC Sweep, การวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าแบบ AC Sweep เป็นต้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า จะแสดงออกมาเป็นเส้นกราฟรูปคลื่น, ค่าแรงดัน, ค่ากระแส ตามที่ได้กำหนดตำแหน่งจุดวัดเอาไว้ภายในวงจร ซึ่งทั้งนี้จะต้องมีความรู้พื้นฐานด้านอิเล็กทรอนิกส์พอสมควร

ประโยชน์ของโปรแกรม OrCAD

- OrCAD สามารถที่จะช่วยในการออกแบบวงจรและตั้งวิเคราะห์วงจรด้วย : schematic และ VHDL-based วงจร FPGA, CPLD
- วงจร linear analog, digital หรือวงจร mixed-signal จำลองการทำงานของวงจร ช่วยในการออกแบบวงจรพิมพ์
- ใช้ในการพิสูจน์กฎเกณฑ์ต่างๆ เช่น กฎของโอห์ม กฎของเคอร์ชอฟฟ์ ศึกษาคุณลักษณะของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ Op amp และไอซีเกตเบอร์ต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้ได้กับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรกระแสสลับ ที่สำคัญใช้จำลองการทำงานของวงจรที่ได้ออกแบบไว้ว่าทำงานได้หรือไม่

ในหน้านี้จะแสดงการอธิบายเครื่องมือที่ใช้บ่อยในโปรแกรม โดยเครื่องมือที่จะใช้งานบ่อยจะแสดงในแถบเครื่องมือ (toolbar) ดังรูปที่ ก.1 โดยในรูปจะมีอักษร A-M กำกับชี้ไปที่ไอคอนเครื่องมือที่จะได้อธิบายถึงการใช้งานไว้ในตารางที่ ก.1.1



รูปที่ 1 แสดงแถบเครื่องมือที่ใช้บ่อยใน OrCAD

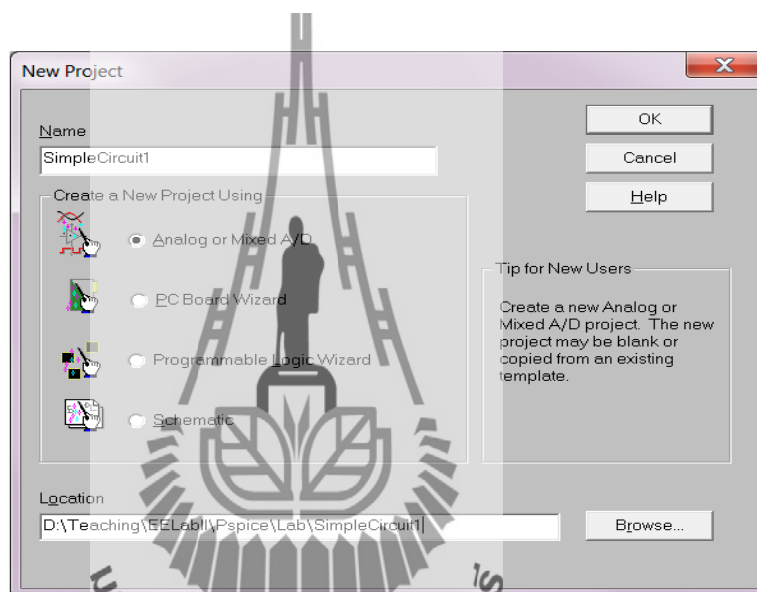
ตารางที่ 1 แสดงหน้าที่การทำงานของไอคอนที่กำกับในแถบเครื่องมือในรูปที่ ก.1

| ไอคอน | การใช้งาน |
|-------|---|
| A | สร้างโปรไฟล์ของการจำลองวงจรใหม่ |
| B | แก้ไขค่าเซตตั้งของการจำลองวงจร |
| C | รันซิมูเลชัน(ทำการจำลองการทำงานของวงจรเพื่อดูผลลัพธ์ เช่น กราฟแสดงผลระหว่างแรงดันกับเวลา) |
| D | ตัวมาร์กแรงดัน |
| E | ตัวมาร์กกระแส |
| F | ตัวมาร์กความต่างศักย์ |
| G | แสดงค่าแรงดันกำกับในวงจร |
| H | แสดงค่ากระแสกำกับในวงจร |
| I | ตัวชี้เพื่อเลือกอุปกรณ์เพื่อทำกิจกรรมกับอุปกรณ์ที่เลือกไว้ |
| J | วางอุปกรณ์ที่เลือกจาก Library |
| K | ทำการวางสายไฟเชื่อมต่ออุปกรณ์ |
| L | กราวด์ * ต้องเซตให้เป็น 0 ทุกครั้ง * |

M วางตัวอักษรหรือข้อความที่ต้องการ

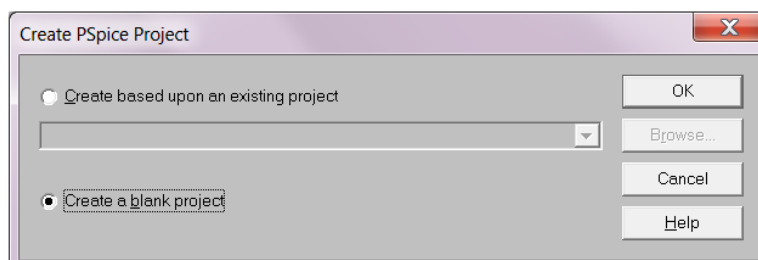
ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม OrCAD

1. คลิกเลือกเมนู File >> New >> Project... แล้วทำการป้อนชื่องาน เช่น SimpleCircuit1 และระบุตำแหน่งที่จะจัดเก็บไฟล์ ตามลำดับ

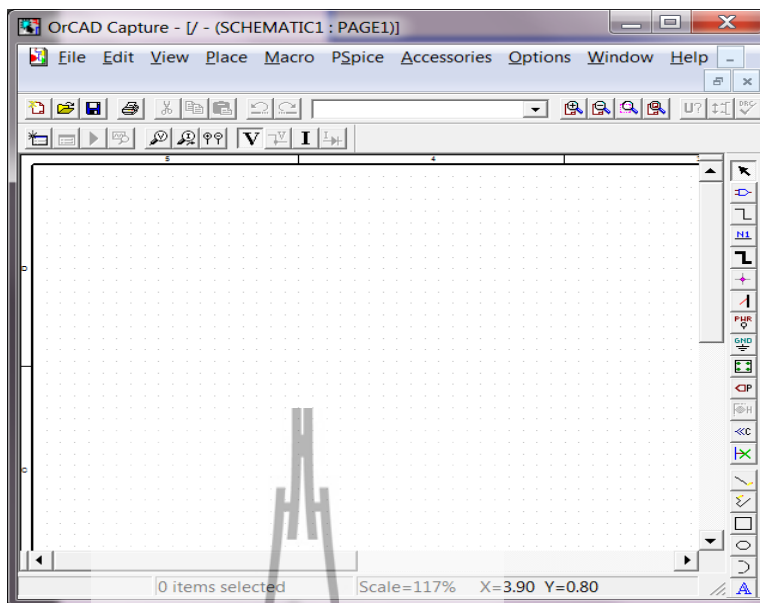


รูปที่ 2 แสดงหน้าต่างการทำงานของการเปิดโปรเจกต์ไฟล์ใหม่

2. ทำการเลือกตัวเลือก Create a blank project ดังแสดงในรูปที่ 3(1) จะได้นหน้าต่าง schematic ดังรูปที่ 3(2)

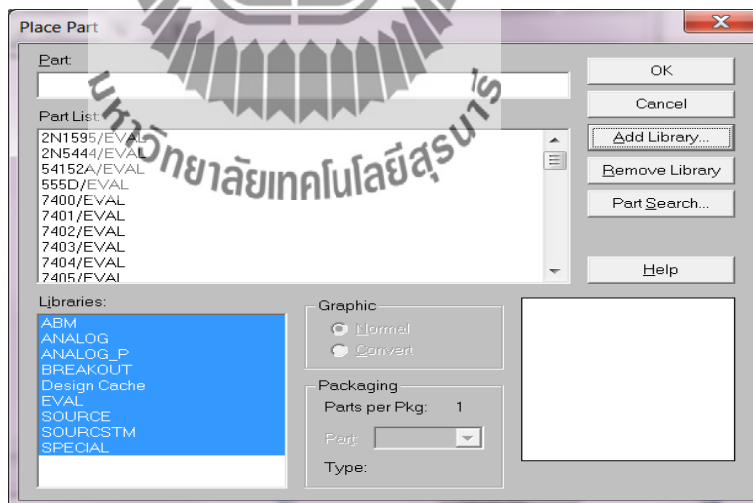


รูปที่ 3 (1) แสดงหน้าต่างผลลัพธ์ของการทำงานในขั้นตอนที่ 2



รูปที่ 3 (2) แสดงหน้าต่างผลลัพธ์ของการทำงานในขั้นตอนที่ 2

3. เลือกเมนู Place >> Part... ทำการเลือกรายการอุปกรณ์ตัวต้านทานและแหล่งจ่ายไฟ
กระแสตรง

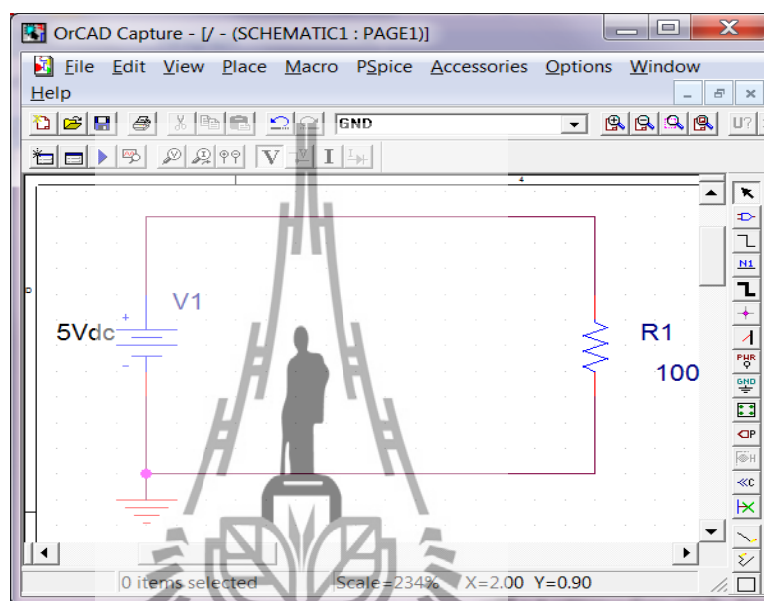


รูปที่ 4 แสดงหน้าต่างของการทำงานในขั้นตอนที่ 3

หรือคลิกที่ไอคอน Place part (ไอคอน J ที่แสดงในรูปที่ 1) แทนก็ได้เช่นกันสำหรับ
ขั้นตอนนี้

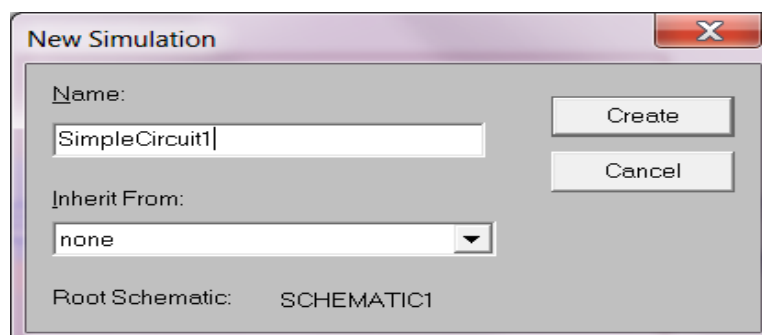
* หากไม่พบรายการอุปกรณ์ใดๆ ให้คลิก Add Library... แล้วเลือกรายการ library ที่ต้องการเพิ่ม

- นำตัวต้านทานและแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงในขั้นตอนที่ 3 มาสร้างเป็นวงจรดังแสดงในรูปที่ ก.5 ทำการเชื่อมต่อสายไฟด้วยใช้ไอคอน Place wire (ไอคอน K ที่แสดงในรูปที่ 1) ทำการต่อกราวด์โดยใช้ไอคอน Place ground (ไอคอน L ที่แสดงในรูปที่ 1)



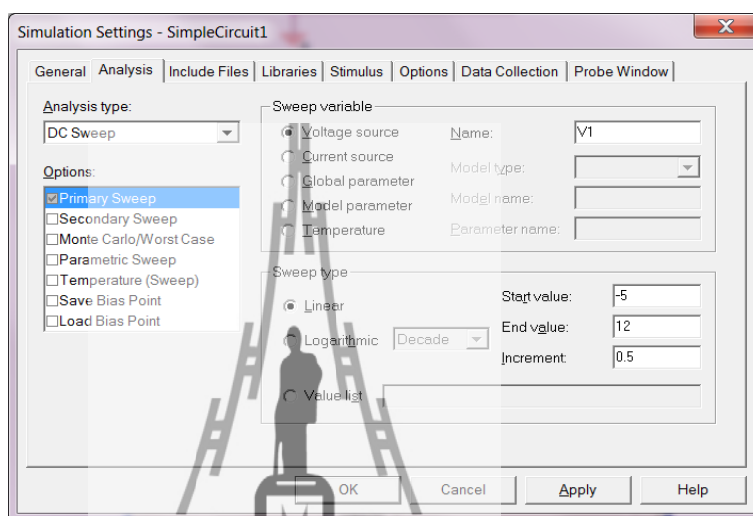
รูปที่ 5 แสดงวงจร SimpleCircuit1

- ลองเปลี่ยนค่าความต้านทานและแหล่งจ่ายไฟตรง (คลิกขวาเลือก Edit Properties...) จากนั้นทำการบันทึกข้อมูลไฟล์ที่สร้างขึ้น โดยเลือกเมนู File >> Save
- เลือกเมนู PSpice >> New Simulation Profile ป้อนชื่อโปรไฟล์ แล้วคลิกปุ่ม Create ดังแสดงในรูปที่ 6



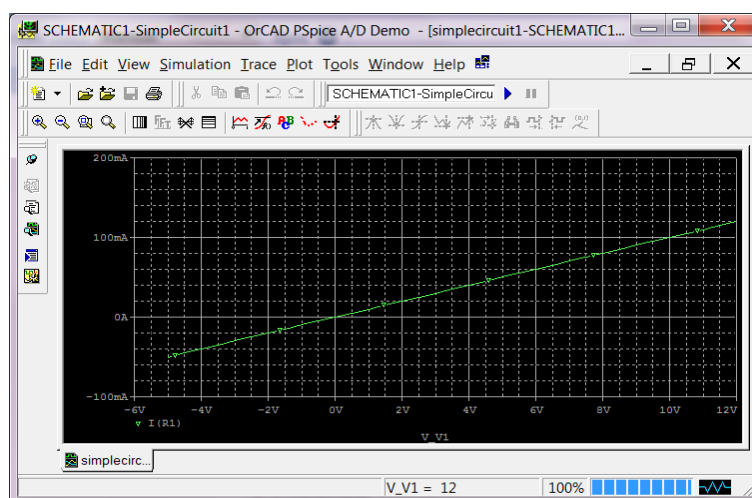
รูปที่ 6 แสดงการสร้าง Simulation Profile

7. จะปรากฏหน้าต่าง Simulation Settings ดังแสดงในรูปที่ 7 ให้ทำการเลือกชนิดของการวิเคราะห์เป็น DC Sweep ทำการป้อนชื่อ Voltage Source เป็น V1 และกำหนดค่าเริ่มต้น, ค่าสิ้นสุด, และค่าสเกลการเพิ่มค่าเป็น -5, 12, 0.5 ตามลำดับ



รูปที่ 7 แสดงการกำหนดค่าใน Simulation Settings

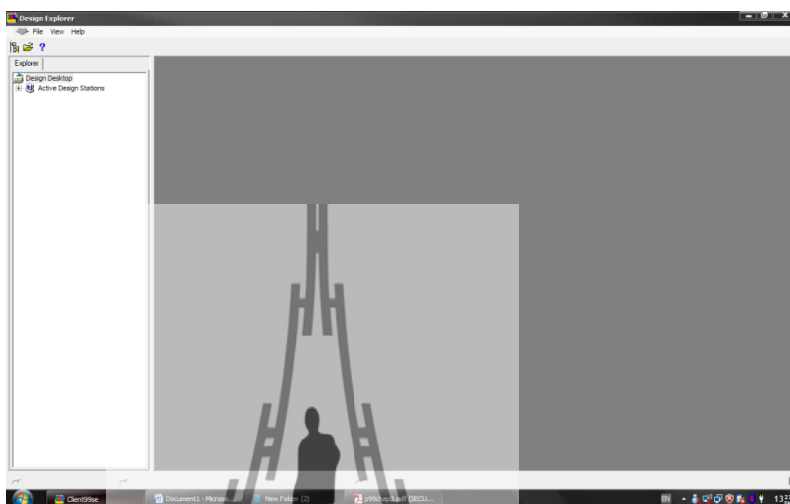
8. ทำการรัน โดยคลิกที่ไอคอน Run PSpice (ไอคอน C ที่แสดงในรูปที่ 1) จะปรากฏหน้าต่างใหม่ของการ Simulation ขึ้นมา ทำการเลือกเมนู Trace >> Add Trace... จะปรากฏหน้าต่าง Add Traces เลือกตัวแปรเอาต์พุตเป็น I(R1) คลิกปุ่ม OK จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์วงจร SimpleCircuit

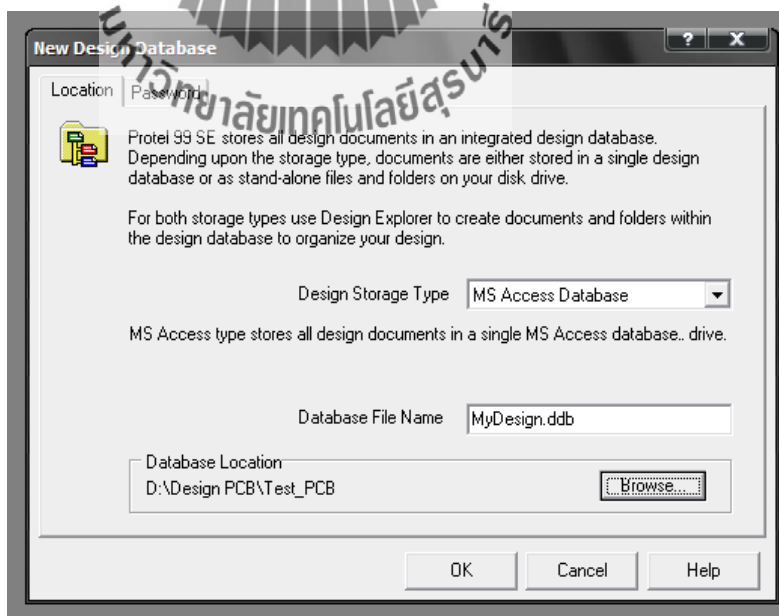
การสร้าง New Design ของโปรแกรม Protel 99 se

- 1 .เริ่มต้นการสร้าง Design PCB โดยเปิดโปรแกรม Protel 99 SE จะได้นหน้าต่างดังรูป



รูปที่ 9 หน้าแรกของ โปรแกรม Protel 99 se

2. หลังจากนั้นทำการสร้าง New Design ใหม่ขึ้นมา โดยคลิกที่ File --> New จะได้นหน้าต่างดังรูป

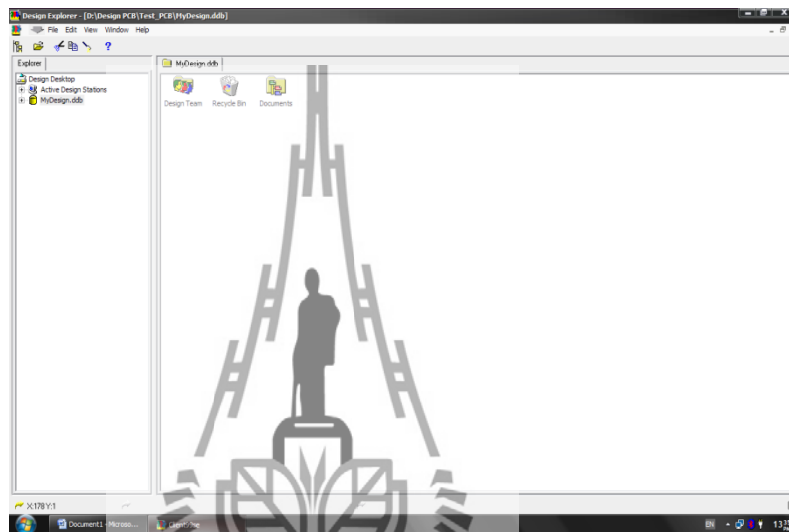


รูปที่ 10 การสร้าง New Design

ตั้งชื่อ File และเลือก Location ที่ต้องการบันทึกข้อมูล

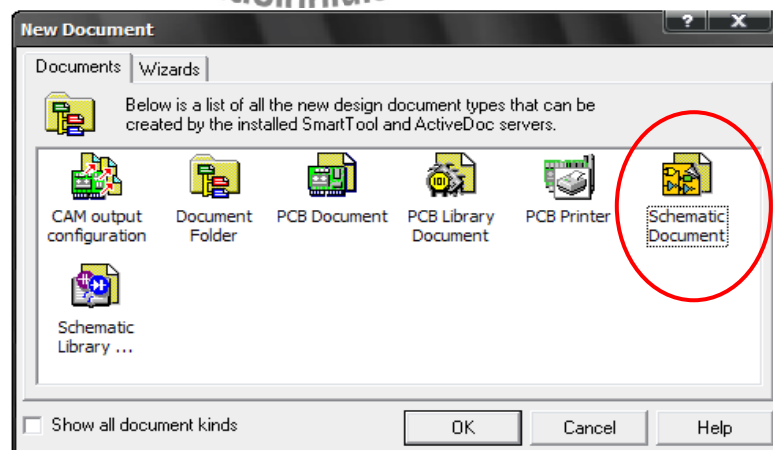
- ตั้งชื่อ File เป็น MyDesign.bbd
- จัดเก็บ File ไว้ที่ D:\Design PCB\Test_PCB

เสร็จแล้วคลิก OK จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 11 การตั้งชื่อ File งาน

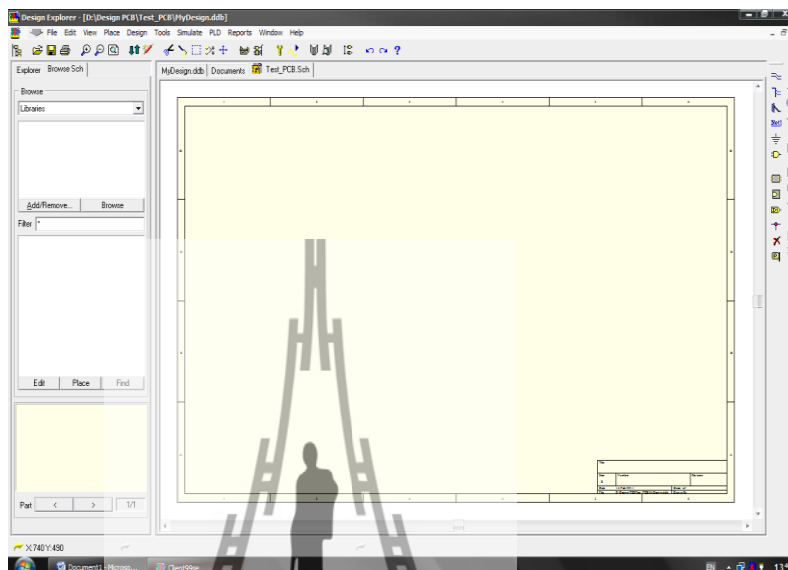
3. เข้าไปที่ Folder Documents แล้วคลิกขวา เลือก NEW.



รูปที่ 12 เลือก Schematic Document

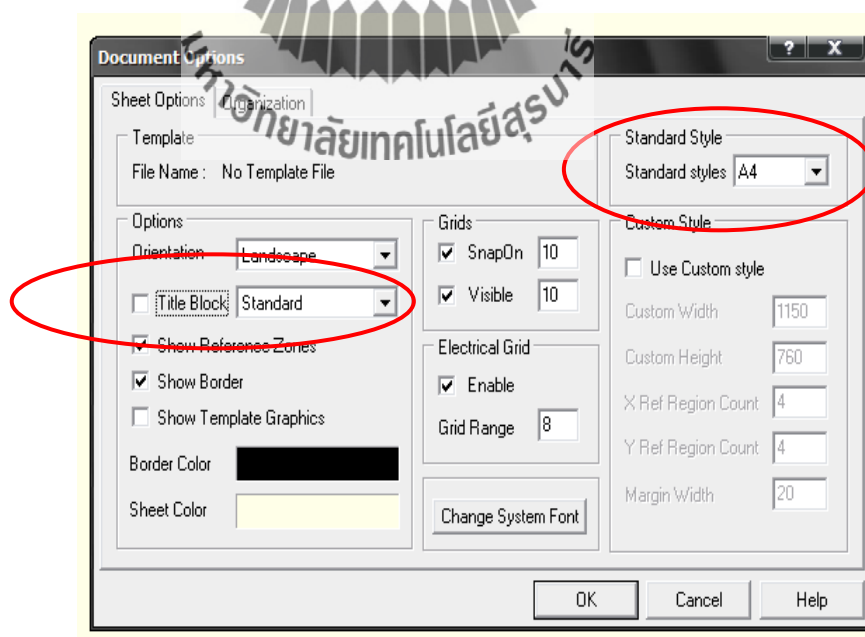
จะแสดงหน้าต่างดังรูป เลือก Schematic Document ทำการตั้งชื่อ Schematic เป็น Test_PCB.Sch

4. เลือก File Test_PCB.Sch ที่อยู่ใน Folder Docment จะแสดงหน้าต่างดังรูป



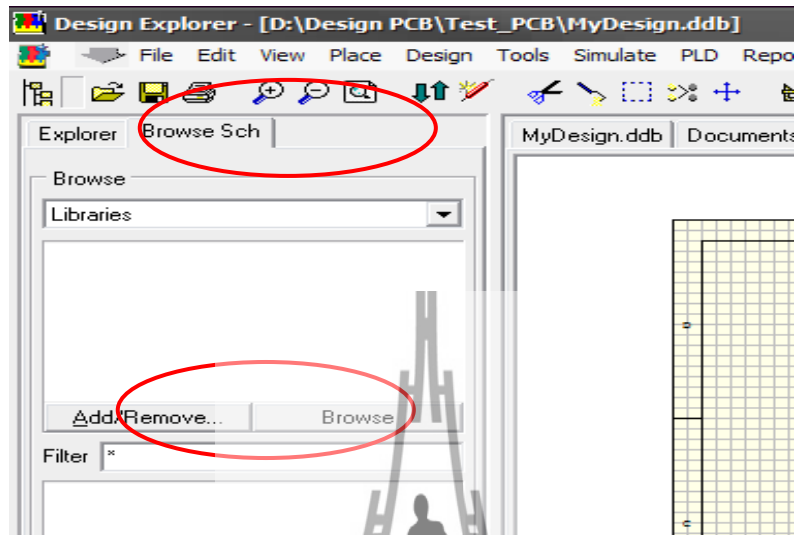
รูปที่ 13 File Test_PCB.Sch

กำหนด Option ของ schematic โดยเลือกที่ Design --> Option...



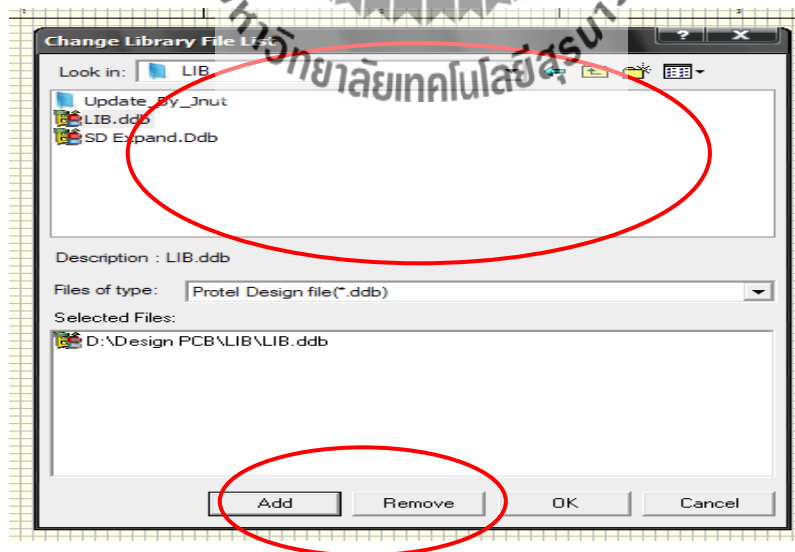
รูปที่ 14 กำหนด Option ของ schematic

5. ทำการ Add library โดยการคลิกที่แท็บ Browse Sch --> คลิกที่ Add/Remove



รูปที่ 15 การ Add library(1)

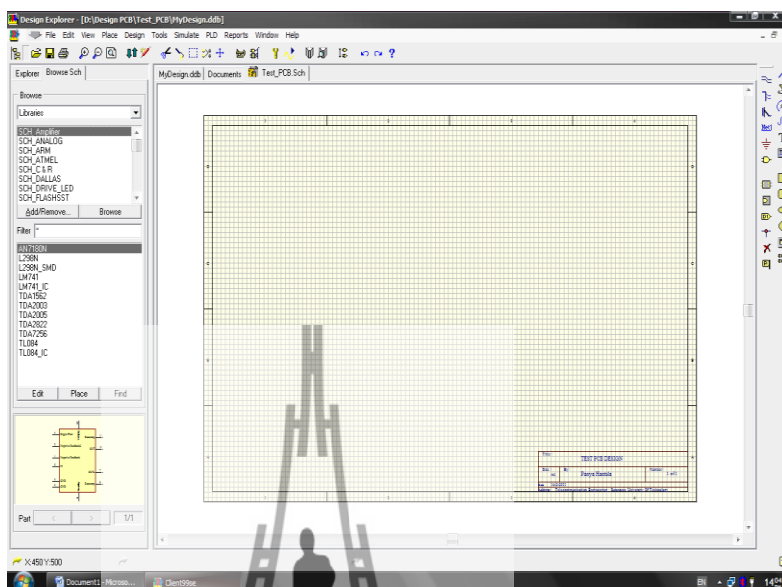
เลือก File Library ที่เก็บอยู่ในเครื่อง แล้วคลิกที่ Add จะปรากฏชื่อที่จะทำการ Add Library ในช่อง Selected File ด้านล่าง --> คลิก OK



รูปที่ 16 การ Add library(2)

ในกรณีที่ไม่มี Library จะต้องหา Library ที่จะใช้งานก่อนจึงจะสามารถใช้งานได้

เมื่อทำการ Add Library เรียบร้อยแล้วจะเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ด้านซ้ายมือ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้ โดยการคลิก แล้วนำมาวางที่ schematic



รูปที่ 17 อุปกรณ์ Library



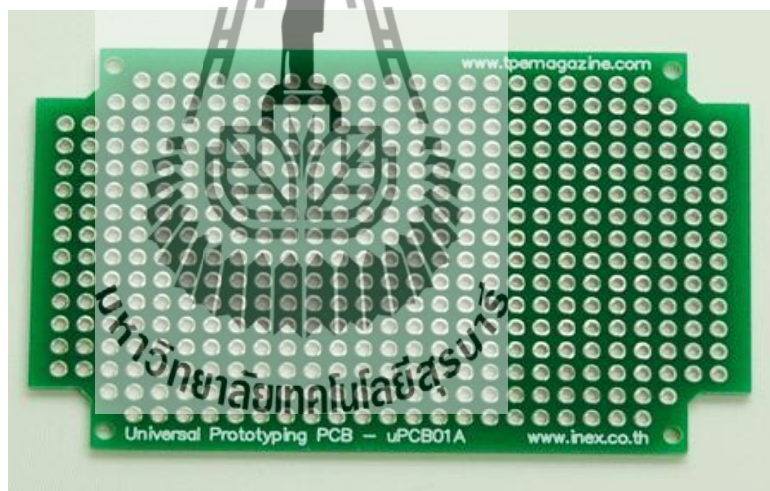
PCB (Print Circuit Board)

PCB (Print Circuit Board) คือ ส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นทางเดินสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่อยู่บนแผงวงจร ทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เชื่อมต่อกันได้ และสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้

PCB ประกอบไปด้วยแผ่นฐานหรือซับสเตรท (substrate) ที่ทำจากแผ่นฉนวนบาง ๆ อัดยึตรวมกันด้วยพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting plastic) เพื่อรองรับแผ่นตัวนำที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ ส่วนวัสดุที่ใช้ทำซับสเตรทที่นิยม เช่น กระดาษชุบฟีนอลิก อัด, อีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

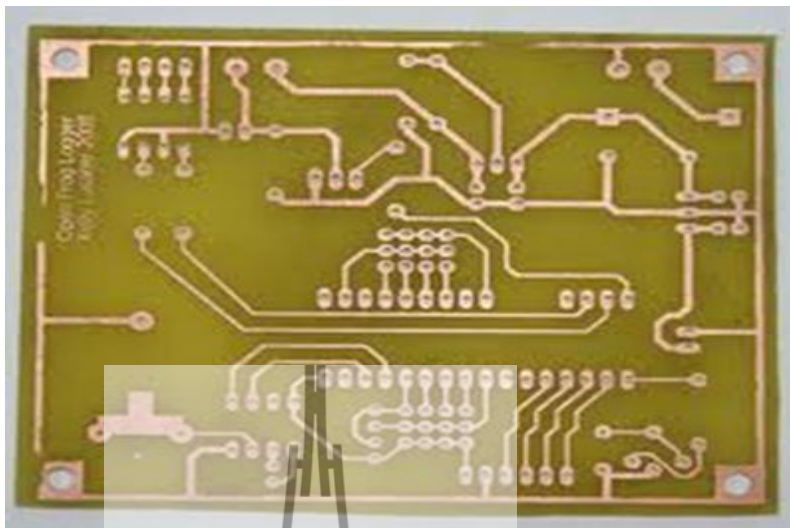
แผ่นวงจรพิมพ์จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. แผ่นวงจรพิมพ์อเนกประสงค์ (Universal PCB Board) จะเป็นรูๆ เพิ่มใส่ขาอุปกรณ์แล้วก็โยงสายทองแดงหากันตามที่ออกแบบ



รูปที่ 18 ลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์อเนกประสงค์

. แผ่นวงจรพิมพ์เปล่า หรือ แผ่นปรินต์ จะต้องลงลายและกัดปรินต์เอง

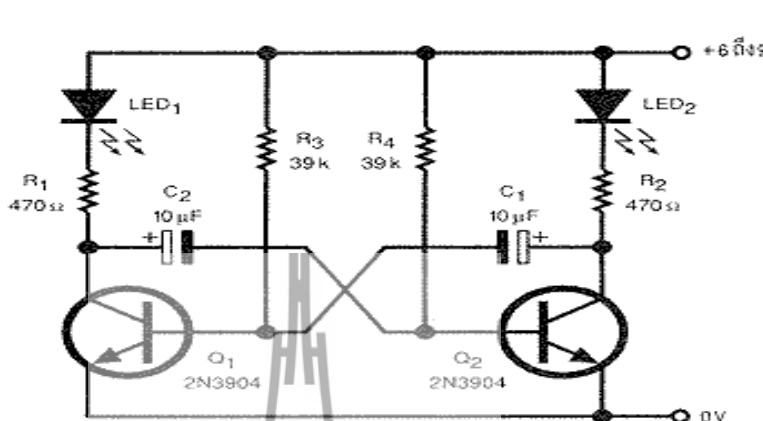


รูปที่ 19 ลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์เปล่า



ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Protel 99 se เพื่อใช้ในการออกแบบ PCB

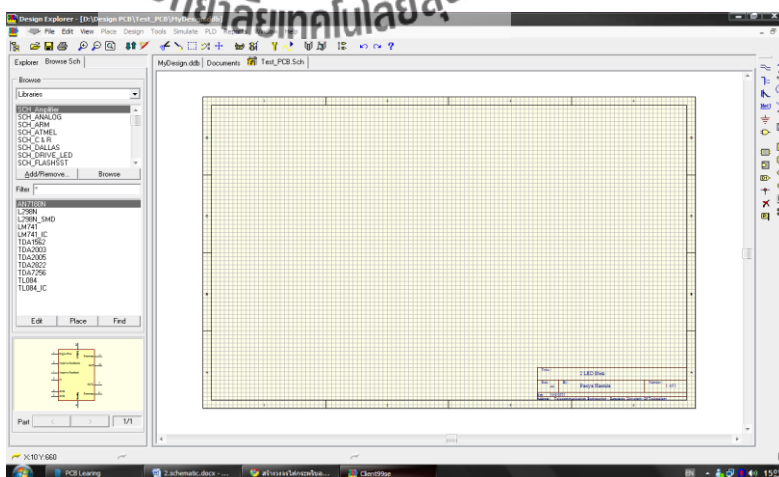
เราจะทำการวาดวงจรที่เราต้องการออกแบบใน Schematic โดยจะทำการออกแบบตามวงจรตัวอย่างดังนี้



รูปที่ 20 วงจรตัวอย่าง

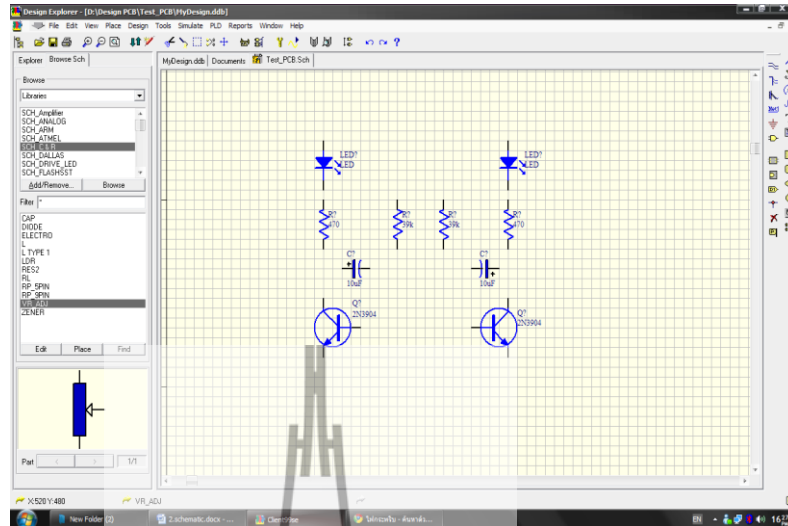
ในวงจรตัวอย่างเป็นวงจรไฟกระพริบอย่างง่าย ซึ่งการที่จะออกแบบวงจรได้ ควรที่จะเข้าใจการทำงานของวงจรอย่างคร่าว ๆ เพื่อที่ว่าเมื่อออกแบบเสร็จแล้ว เราสามารถตรวจสอบได้ ว่ามีความถูกต้องหรือไม่

1. สร้าง New Design ขึ้นมาตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วจะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 21 หน้าต่างแสดง New Design

2. จัดวางอุปกรณ์ตามวงจรตัวอย่าง



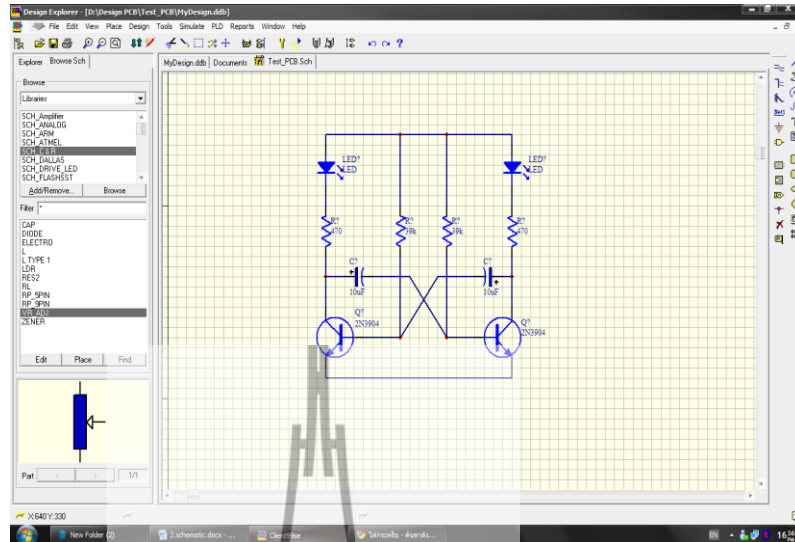
รูปที่ 22 การจัดเรียงอุปกรณ์ตามตัวอย่าง

คำสั่งพื้นฐานในการทำงาน

- **Page Up** (Zoom In) , **Page Down** (Zoom Down)
- **Key X** --> Flip Horizontal , **Key Y**--> Flip Vertical
- **Key Space Bar** --> Rotate

**หมายเหตุ ใน Library ที่ต่างกัน อุปกรณ์ที่นำมาวางจะไม่เหมือนกัน

3. เชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วยคำสั่ง PlaceWire โดยคลิก Place --> Wire



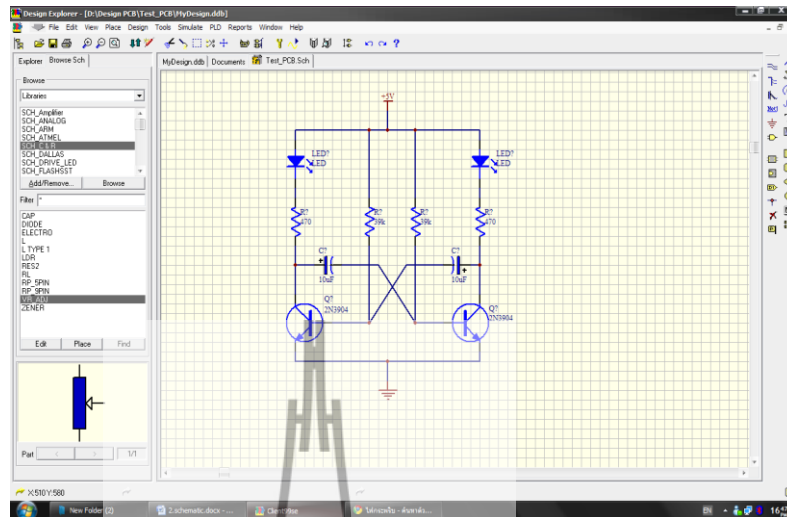
รูปที่ 23 แสดงการเชื่อมต่อของวงจร

4. ใส่แหล่งจ่ายโดยใช้คำสั่ง Place --> Power Port เพื่อเลือกคำสั่ง Power Port แล้วกด Key Tab เพื่อกำหนดคุณสมบัติของ Power Port จะเห็นหน้าต่างดังรูป ใส่ในช่อง Net เป็น +5V และเลือก Style เป็น Bar



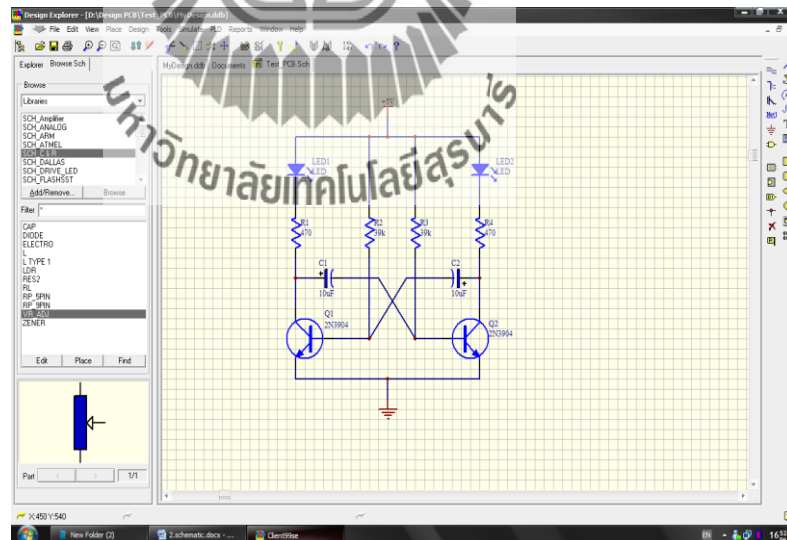
รูปที่ 24 กำหนดค่า Power Port

5. เมื่อกำหนดแล้ว ให้เพิ่มลงในวงจร และในกรณีของ GND ก็ทำเช่นเดียวกับ เพียงแต่ใส่ในช่อง Net เป็น GND และเลือก Style เป็น Power Ground



รูปที่ 25 กำหนด GND ลงในวงจร

6. ใช้คำสั่ง Annotate เพื่อตั้งชื่อของอุปกรณ์แต่ละตัวไม่ได้ซ้ำกัน โดยไปที่ Tool --> Annotate แล้วคลิก OK

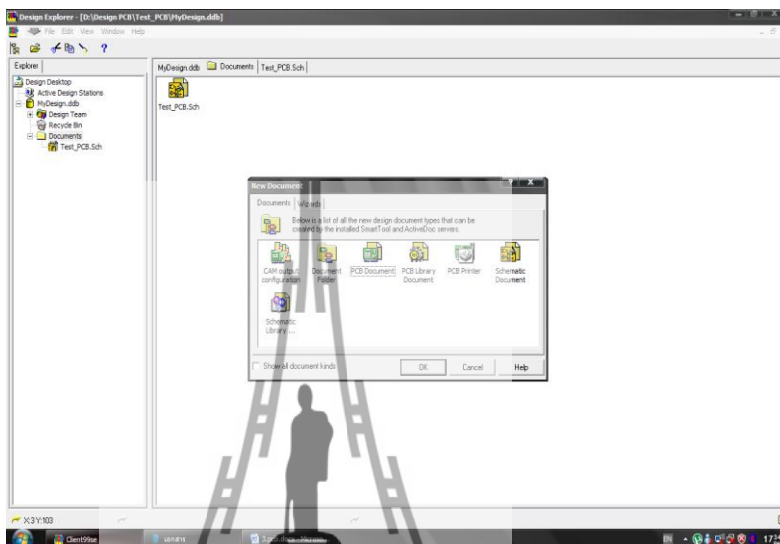


รูปที่ 26 แสดงการใช้คำสั่ง Annotate

จะเห็นได้ว่า เราได้อุปกรณ์ครบถ้วน และยังมีการตั้งชื่อของอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย ถือว่าเป็นการเสร็จในกระบวนการ schematic แล้ว

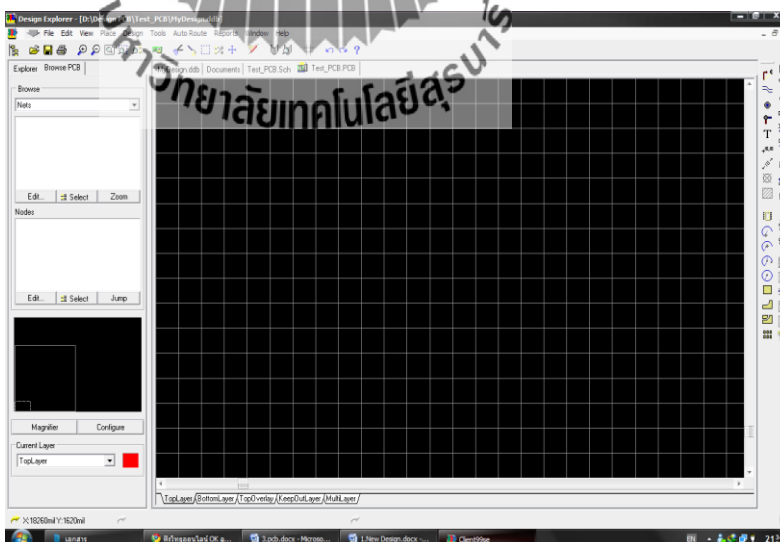
หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรแบบ Schematic เราสามารถสร้าง Artwork ของ PCB ได้จาก Schematic ได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิด File ที่เราได้สร้าง Schematic จากนั้นไปที่ Folder Documents แล้วคลิกขวา เลือก NEW.... เลือก PCB Documents และเปลี่ยนชื่อ File PCB เป็น Test_PCB.PCB



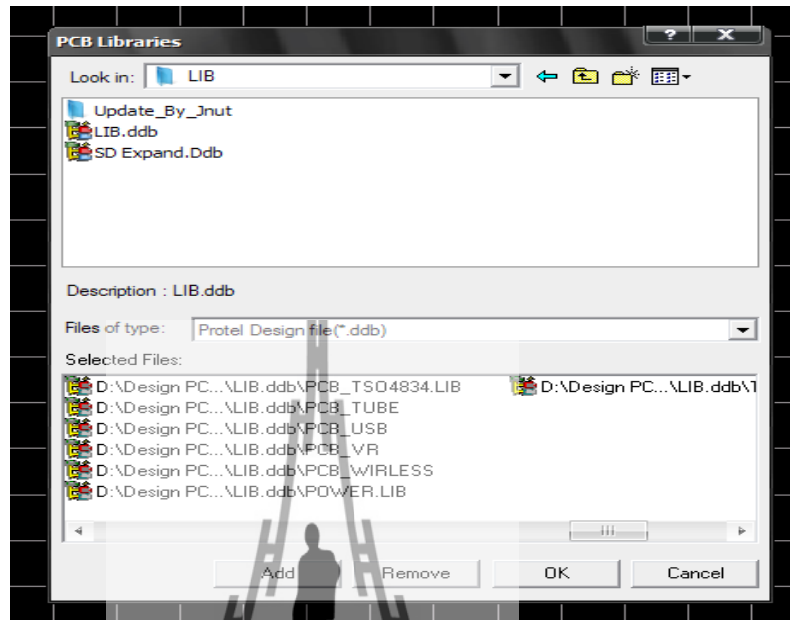
รูปที่ 27 เปิดไฟล์ Schematic ที่ได้ออกแบบไว้

จากนั้นเปิด File Test_PCB.PCB ขึ้นมา จะเห็นหน้าตาดังรูป



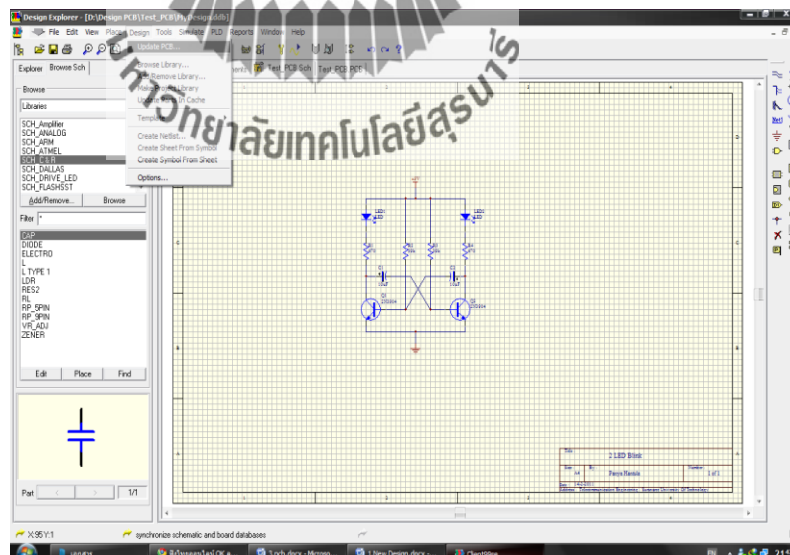
รูปที่ 28 หน้าตาของ File Test_PCB.PCB

2. ทำการ Add library โดยการคลิกที่ Design --> Add/Remove Library.... และเลือก File Library ที่ต้องการ แล้วคลิกที่ Add ==>> คลิก OK



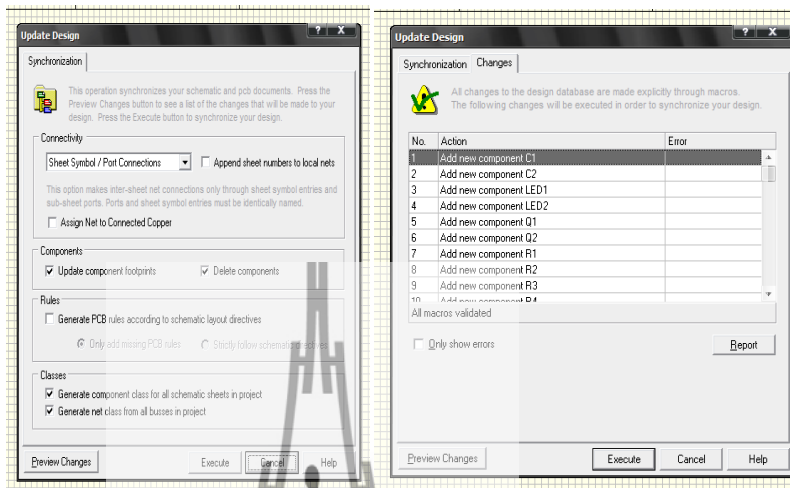
รูปที่ 29 การ Add library

3. เมื่อทำการ Add Library เสร็จแล้ว ให้เปิด File Schematic ขึ้นมา แล้วคลิกที่ Design --> Update PCB



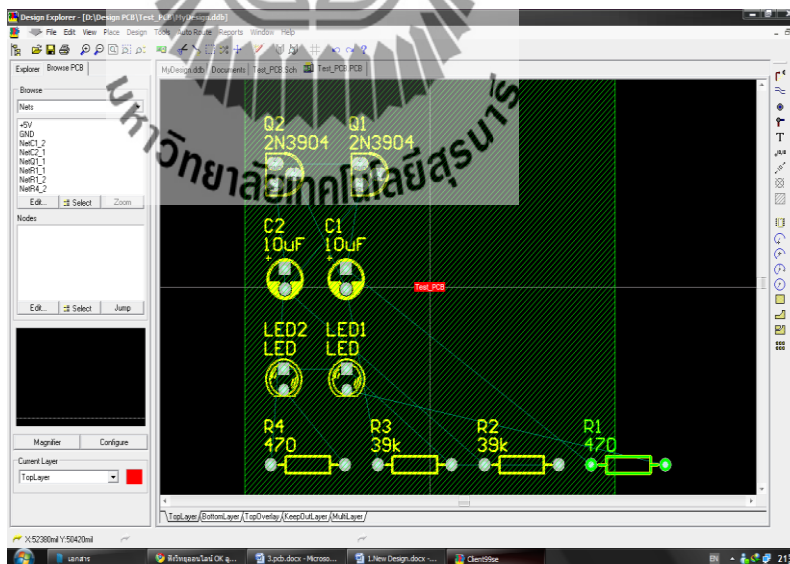
รูปที่ 30 เปิดไฟล์ File Schematic ในไฟล์งานของ PCB

4. คลิกที่ Preview Changes (รูปด้านซ้ายมือ) เพื่อตรวจสอบความผิดพลาด หากตรวจสอบแล้วพบว่าในช่อง Error ไม่มีข้อความเตือน ให้คลิกที่ Executes แต่หากเกิดข้อผิดพลาดให้ทำการแก้ไขก่อน จนกว่าจะไม่เกิด Error



รูปที่ 31 การตรวจสอบความผิดพลาด

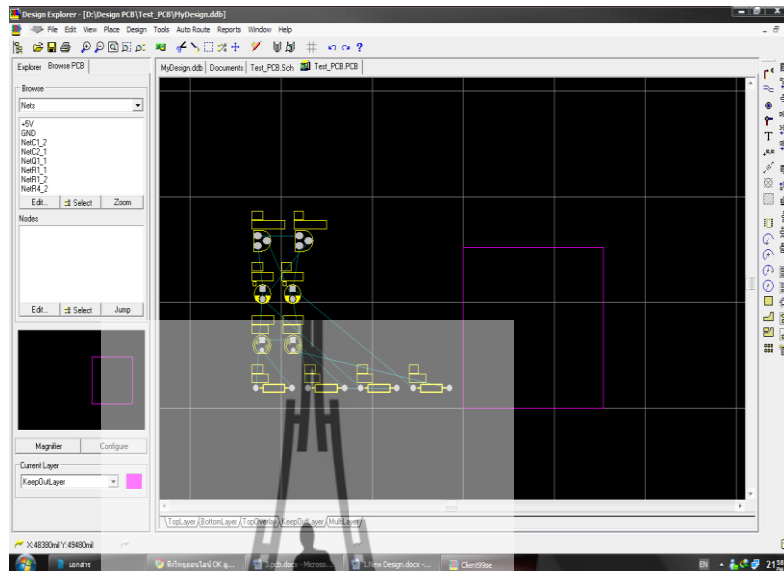
5. เมื่อทำการกด Executes แล้วกลับมาที่ File Test_PCB.PCB อีกครั้ง (ถ้าหากไม่เห็นอุปกรณ์แสดงให้กด Key Z ตามด้วย Key A เพื่อให้แสดงอุปกรณ์)



รูปที่ 32 แสดงหน้าต่าง File Test_PCB.PCB

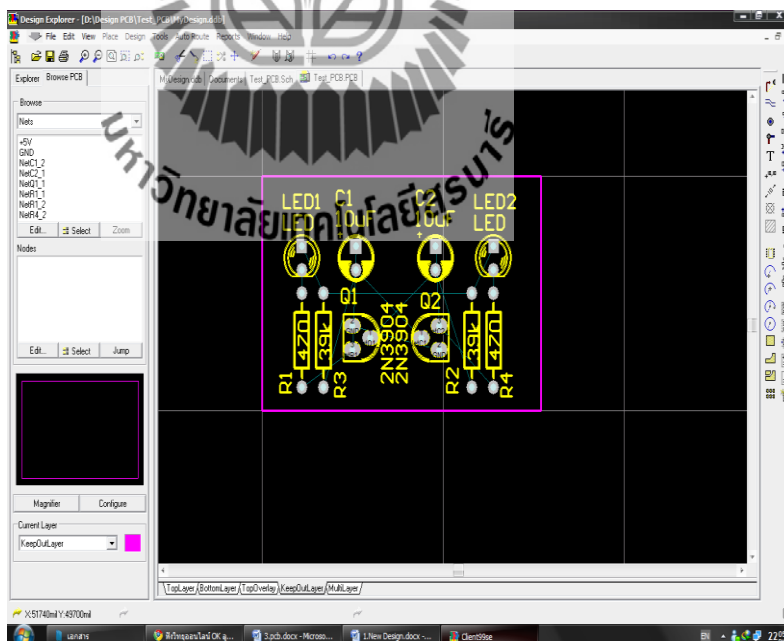
คลิกพื้นที่สีเขียวแล้วกด Key Delete เพื่อลบออก

6. เลือกพื้นที่ขอบเขตของแผ่น PCB โดยคลิกที่ KeepOutLayer ด้านล่าง แล้วคลิกที่คำสั่ง Place --> Line แล้วเลือกพื้นที่ของ PCB



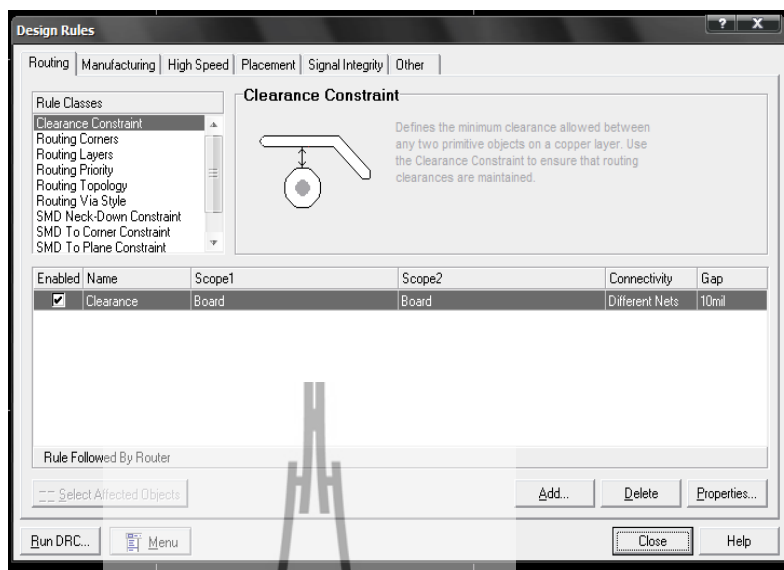
รูปที่ 33 การเลือกพื้นที่ขอบเขตของแผ่น PCB

7. จัดวางอุปกรณ์ตามต้องการ



รูปที่ 34 Artwork ของ PCB

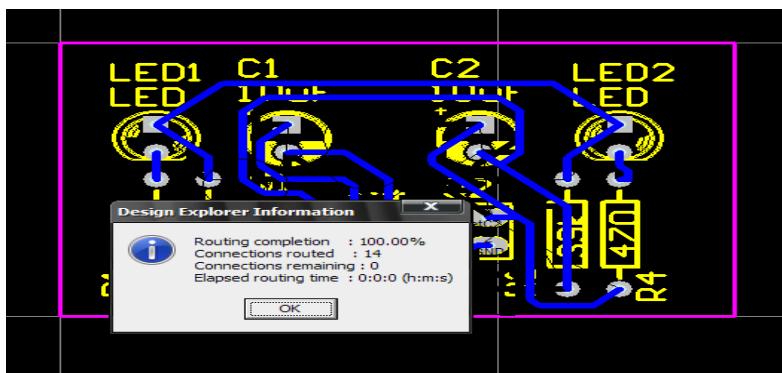
8. ทำการกำหนดค่าต่าง ๆ โดยคลิกที่ Design --> Rules จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 35 การกำหนดค่า เพื่อที่จะทำการ Rules

- **Clearance Rule** คือระยะทางของ Track กับ Pad ปรับค่า Minimum Clearance เป็น 20 mil
- **Routing Corners** คือลักษณะการเดินเส้นของ Track เมื่อเกิดจุดที่ต้องเลี้ยว
- **Routing Layers Rule** คือเลือก Layer ที่ต้องการ Rules เช่น หากเป็น PCB แบบ Single – Sided จะตั้งค่า Top Layer เป็น Not Used
- **Routing Topology** คือเทคนิคการ Rules
- **Width Constraint** คือกำหนดขนาดของเส้นที่ Rules
 Minimum Width คือขนาดของเส้นที่เล็กที่สุดที่สามารถ Rules ได้
 Maximum Width คือขนาดของเส้นที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถ Rules ได้
 Preferred Width คือขนาดของเส้นที่ Rules ใน PCB ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

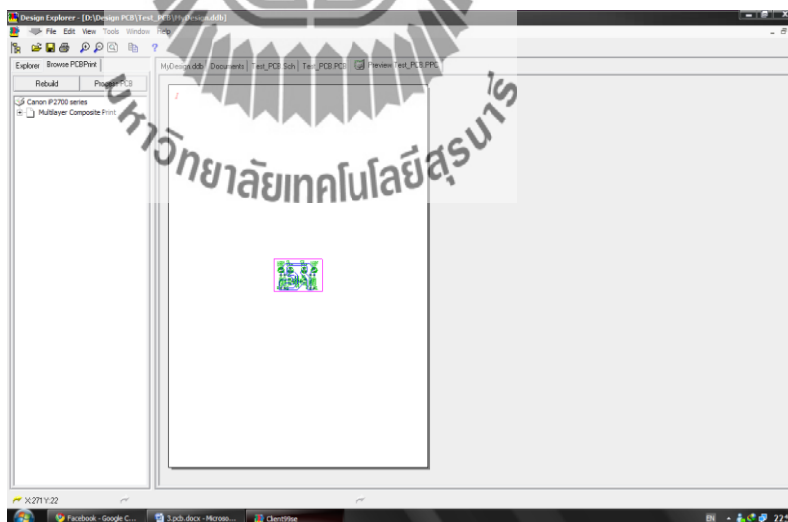
9. ทำการ Auto Rules โดยใช้คำสั่ง Auto Route --> All แล้วคลิกที่ Route All



รูปที่ 36 เมื่อทำการ Route All

หากสามารถทำ Auto Route ได้หมด จะมีข้อความเตือนว่าสามารถ Rules ได้ 100% และสังเกตลักษณะของเส้นไม่ทับกัน แต่ถ้าหากไม่สามารถทำได้ 100% จะต้องทำการยกเลิกการ Rules โดยใช้คลิกคำสั่ง Tool --> Un-Route --> All และปรับการวางอุปกรณ์ใหม่แล้วทำการ Auto Route ใหม่ตามขั้นตอนเช่นเดิม

10. หลังจากที่ได้ Artwork ของ PCB แล้วต้องทำการพิมพ์เพื่อนำไปทำเป็นแผ่น PCB ต่อไปคลิกที่ File --> print/preview จะได้ดังรูป

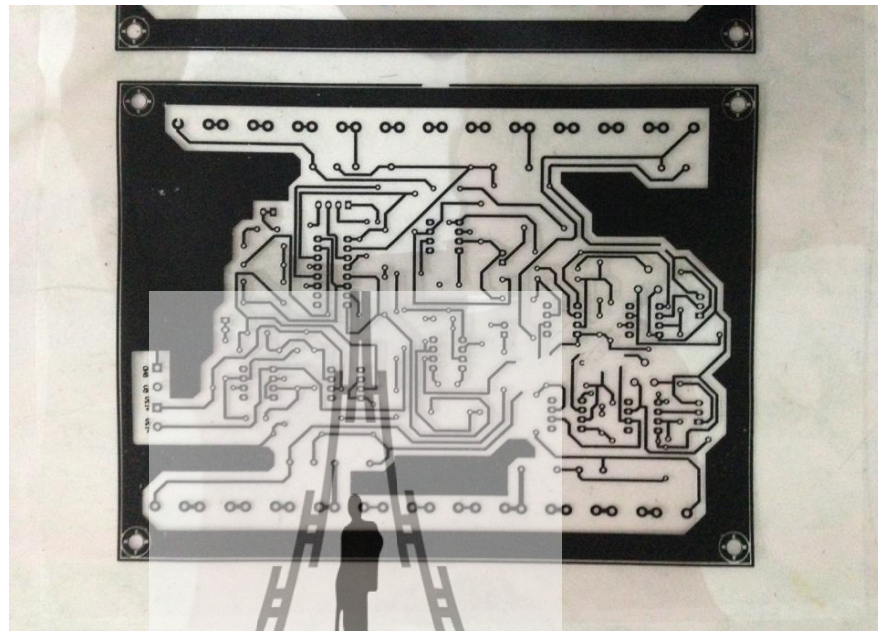


รูปที่ 37 Artwork ของ PCB เพื่อนำไปทำเป็นแผ่น PCB

เพียงเท่านี้เราก็สามารถที่จะสร้างแผ่น PCB ได้ด้วยตัวเอง

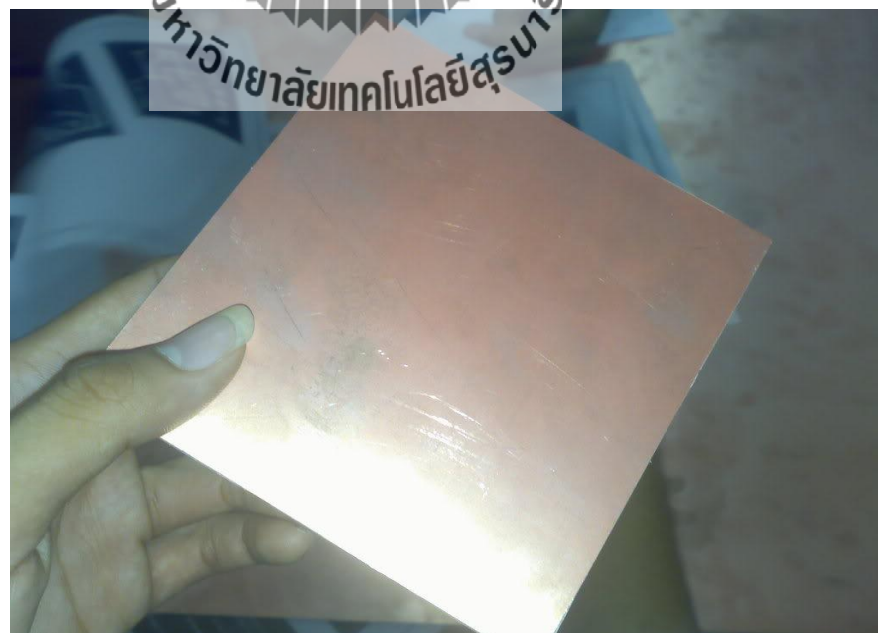
วิธีการทำแผ่น PCB

1. นำลายวงจรพิมพ์ลงบนกระดาษแล้วนำไปถ่ายเอกสาร ลงบนแผ่นใส



รูปที่ 38 ลายวงจรในแผ่นใส

2. นำแผ่นใสที่เราถ่ายเอกสารมาแล้ว มาวัดขนาดกับแผ่นทองแดงและทำการตัดแผ่นทองแดง



รูปที่ 39 แผ่นทองแดงที่จะนำไปกัดปริน

3. นำแผ่นทองแดงที่ได้มาล้างทำความสะอาด และเช็ดให้แห้ง



รูปที่ 40-1 ทำความสะอาดแผ่นทองแดง



รูปที่ 40-2 ทำความสะอาดแผ่นทองแดง

4. นำแผ่นทองแดงที่ล้างแล้วมาติดแผ่นใส ตัดให้เรียบที่สุด



รูปที่ 41 แผ่นทองแดงที่ล้างแล้วมาติดแผ่นใส

5. ใช้เตารีดรีดแผ่นทองแดงที่ติดแผ่นใสแล้ว ออกแรงกดเล็กน้อย แล้วรีดไปมาให้ทั่ว



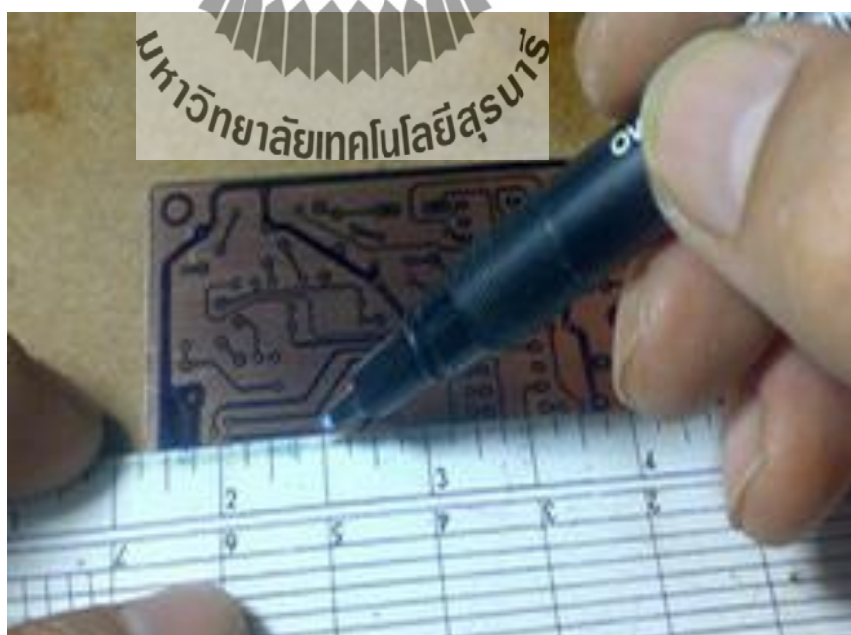
รูปที่ 42 รีดแผ่นทองแดงที่ติดแผ่นใส

6. ทิ้งไว้ให้เย็น หรือนำผ้าชุบน้ำหมาดๆมาเช็ดเพื่อให้เย็นเร็วขึ้น เมื่อลอกออกจะเห็นลายติดอยู่บนแผ่นทองแดง



รูปที่ 43 ลอกแผ่นใสออกจากทองแดง

7. นำปากกาเขียนเติมส่วนที่ไม่ชัดหรือส่วนที่ขาด



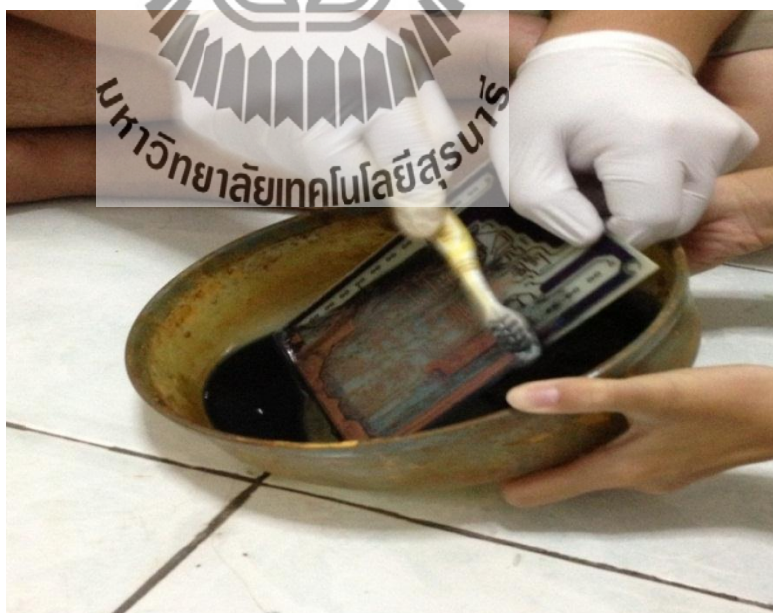
รูปที่ 44 นำปากกาเขียนเติมส่วนที่ไม่ชัด

8. จากนั้นนำไปกัดด้วยน้ำยากัดปรอท ผสมน้ำร้อนเล็กน้อย



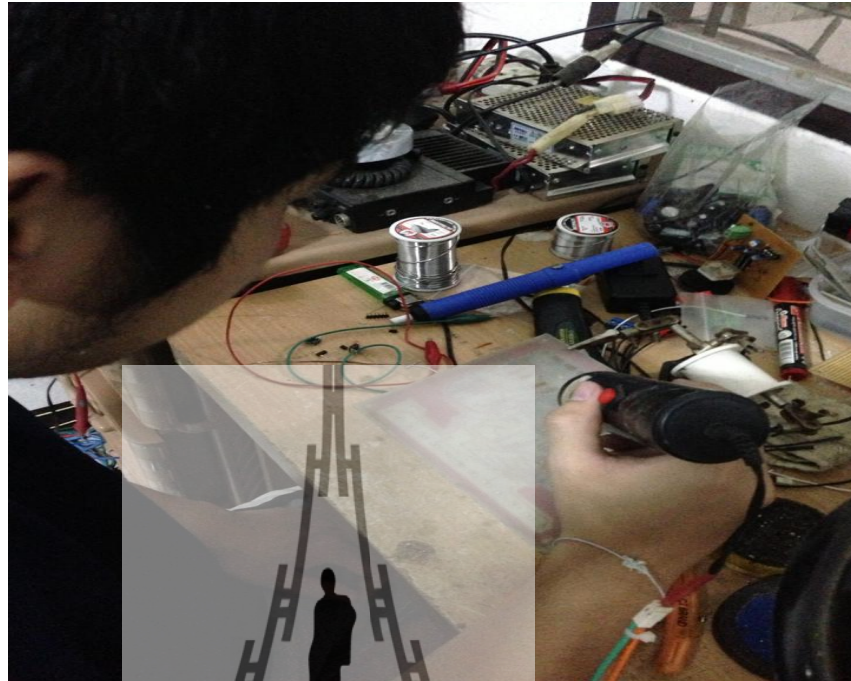
รูปที่ 45 นำทองแดงกัดด้วยน้ำยากัดปรอท

9. เอาแผ่น PCB มาขัดด้วยทินเนอร์ เพื่อทำความสะอาด



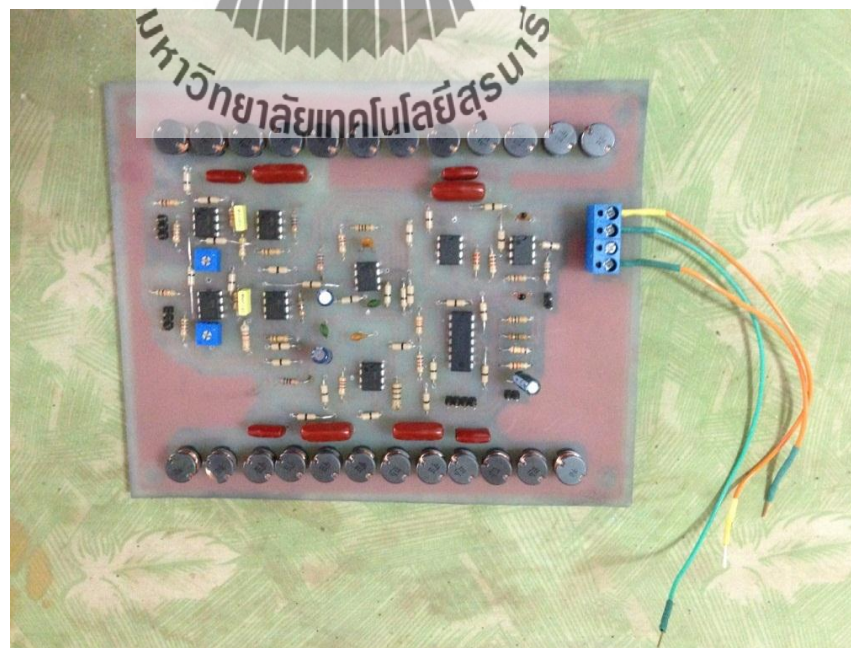
รูปที่ 46 เอาแผ่น PCB มาขัดด้วยทินเนอร์

10. นำแผ่น PCB ที่ได้ไปเจาะรูเพื่อวางชิ้นส่วนของวงจร แล้วนำไปบัดกรีให้เรียบร้อย



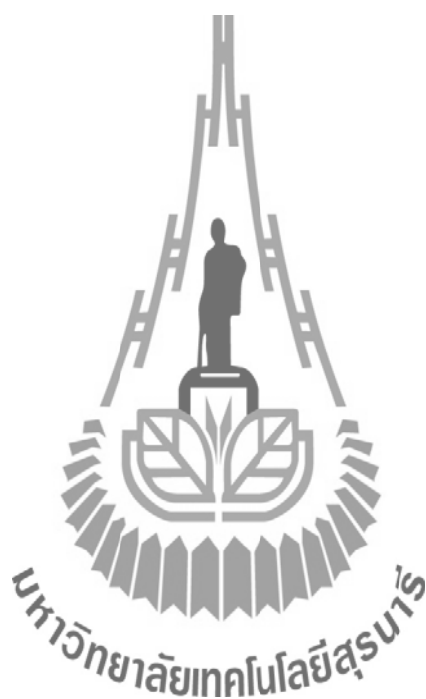
รูปที่ 47 นำแผ่น PCB ที่ได้ไปเจาะรูเพื่อวางชิ้นส่วนของวงจร

11. แผ่นวงจรเมื่อประกอบเสร็จ



รูปที่ 49 เมื่อประกอบวงจรเสร็จ

ภาคผนวก ข



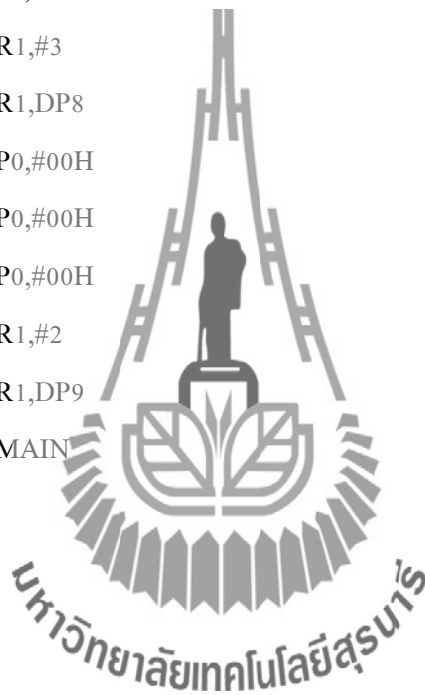
Code โปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณ Sine 38 kHz และ 19 kHz

```

                ORG    0000H
MAIN:          MOV    P0,#00H
                MOV    P1,#0CH
                MOV    R1,#2
DP1:           DJNZ   R1,DP1
                MOV    P0,#01H
                MOV    R1,#3
DP2:           DJNZ   R1,DP2
                MOV    P0,#03H
                MOV    P0,#03H
                MOV    P1,#03H
                MOV    P0,#03H
                MOV    R1,#3
DP3:           DJNZ   R1,DP3
                MOV    P0,#07H
                MOV    R1,#3
DP4:           DJNZ   R1,DP4
                MOV    P0,#0FH
                MOV    P0,#0FH
                MOV    P0,#0FH
                MOV    P0,#0FH
                MOV    P1,#0CH
                MOV    P0,#0FH
                MOV    R1,#3
DP5:           DJNZ   R1,DP5
                MOV    P0,#07H
                MOV    R1,#3

```


DP6: DJNZ R1,DP6
 MOV P0,#03H
 MOV P0,#03H
 MOV P0,#03H
 MOV P1,#03H
 MOV R1,#3
DP7: DJNZ R1,DP7
 MOV P0,#01H
 MOV R1,#3
DP8: DJNZ R1,DP8
 MOV P0,#00H
 MOV P0,#00H
 MOV P0,#00H
 MOV R1,#2
DP9: DJNZ R1,DP9
 JMP MAIN



บรรณานุกรม

- [1] ทีมงานสมาร์ตเลิร์นนิ่ง, เรียนรู้การใช้งาน OrCAD : PSpice & PCB Design, กรุงเทพฯ :
ห้างหุ้นส่วนสามัญสมาร์ตเลิร์นนิ่ง, 2551
- [2] ไอซีออปแอมป์ (Op-Amp LC) จากเว็บไซต์ (21 กุมภาพันธ์ 2556)
http://www.sptc.ac.th/prapruet/devicesweb/books/book_10.htm
- [3] ระบบของเครื่องส่งวิทยุ FM และ ระบบวิทยุกระจายเสียง (23 กุมภาพันธ์ 2556) จากเว็บไซต์
https://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_electronics/wiki/206dd/_FM_.html
- [4] วงจรกรองความถี่ (23 กุมภาพันธ์ 2556) จากเว็บไซต์
http://www.hs8jyx.com/html/filter_circuit.html
- [5] Filter Design (24 กุมภาพันธ์ 2556) จากเว็บไซต์
http://www.hs8jyx.com/html/filter_circuit.html
- [6] การแพร่กระจายคลื่น (25 กุมภาพันธ์ 2556) จากเว็บไซต์
202.47.224.92/Stick_frequency/News_NBTC/1_7.pdf

