



กระทรวงศึกษา 2539

เครื่องวัดฮาร์โมนิกส์โดยใช้ TMS320C50 DSK

Harmonics Detector Using TMS320C50 DSK

โดย

นายวิเชตร รักษ์วานิชพงศ์

รหัส 36014408

นายวิโรจน์ ฉำบุญรอด

รหัส 36014410

นายวีระพันธ์ กุณฑาโชติ

รหัส 36014423

| | |
|----------------------|--------------|
| วัน เดือน ปี..... | 30.04.2541 |
| เลขทะเบียน..... | C38210 |
| เลขเรียกหนังสือ..... | T 39230 2679 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องวัดฮาร์มอนิกส์โดยใช้ TMS320C50 DSK

ผู้จัดทำ



1. นายวิรัช รักษ์วนิชพงศ์
2. นายวิโรจน์ นำบุญรอด
3. นายวีระพันธ์ กุณฑโชติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ศิริวัฒน์ โพรเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | |
|---|-----|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| สารบัญรูป | III |
| สารบัญตาราง | IV |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 ฮาร์มอนิกส์ : สาเหตุ ผลกระทบ และวิธีการแก้ไข | 3 |
| 2.1 สาเหตุของฮาร์มอนิกส์ | 3 |
| 2.2 ฮาร์มอนิกส์อันดับคี่ | 3 |
| 2.3 ทริปเปิ้ลฮาร์มอนิกส์ | 4 |
| 2.4 ฮาร์มอนิกส์จากอนดิเนียร์โหลด | 5 |
| 2.5 ลักษณะการไหลของฮาร์มอนิกส์ | 6 |
| 2.6 ผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์ | 7 |
| 2.7 สูตรการคำนวณฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในโครงการนี้ | 9 |
| 2.8 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ | 10 |
| บทที่ 3 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ | 11 |
| 3.1 บทนำ | 11 |
| 3.2 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ฟูรีเยอร์ | 11 |
| 3.3 การแปลงฟูรีเยอร์ | 13 |
| 3.4 การแปลงฟูรีเยอร์เต็มหน่วย | 14 |
| 3.5 การแปลงฟาสต์ฟูรีเยอร์ | 17 |
| บทที่ 4 หน่วยลดทอนสัญญาณ | 32 |
| 4.1 บทนำ | 32 |
| 4.2 การแปลงสัญญาณกระแสให้เป็นแรงดัน | 32 |
| 4.3 วงจรสร้างไฟเลี้ยงออฟแอมป์และ LEM โมดูล +/- 12 โวลต์ | 34 |
| บทที่ 5 ขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณฮาร์มอนิกส์สำหรับ TMS320C50 | 39 |
| 5.1 บทนำ | 39 |
| 5.2 ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรมหลัก | 39 |
| 5.3 ขั้นตอนการคำนวณโปรแกรม FFT | 41 |

| | | |
|---------|---|----|
| บทที่ 6 | การแสดงผลสัญญาณและการส่งสัญญาณควบคุม | 50 |
| 6.1 | การใช้ LCD ในการแสดงผล | 50 |
| 6.2 | การส่งสัญญาณควบคุม | 55 |
| บทที่ 7 | ขั้นตอนการใช้งานอุปกรณ์ทั้งหมด | 56 |
| 7.1 | การเขียนคำสั่งและการนำคำสั่ง ไปใช้ | 56 |
| 7.2 | การต่อสายต่างๆเข้าด้วยกัน | 57 |
| บทที่ 8 | ผลการทดลอง | 59 |
| 8.1 | ผลการทดลองของโปรแกรม OSCILLO.ASM | 59 |
| 8.2 | การทดลองการคำนวณในส่วนของ โปรแกรม LCD.ASM | 64 |
| 8.3 | การทดลองการทดลองวัดค่าฮาร์มอนิกส์ของโพลดจริง โดยใช้โปรแกรม LCD.ASM | 65 |
| บทที่ 9 | ปัญหาและแนวทางการพัฒนาต่อ | 70 |
| 9.1 | ปัญหาในการทำงานของเครื่องวัดฮาร์มอนิกส์ | 70 |
| 9.2 | แนวทางการพัฒนาเครื่องให้สามารถใช้งานได้ดีขึ้น | 71 |

ภาคผนวก ก TMS320C50 หน่วยประมวลผลสัญญาณทางดิจิทัล

ภาคผนวก ข โปรแกรมภาษาแอสเซมบลีที่ใช้ในการวิเคราะห์และแสดงผลฮาร์มอนิกส์

ภาคผนวก ค เอกสารประกอบรายละเอียดอุปกรณ์

ภาคผนวก ง แนะนำอุปกรณ์ที่ต้องใช้พัฒนาโครงการต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เครื่องวัดฮาร์มอนิกส์โดยใช้ TMS320C50 DSK

วิรัช รัชวณิชพงศ์
วิโรจน์ นำบุญรอด
วีระพันธ์ ฤกษ์ชาติ

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ. สุริวัฒน์ โพธิเวชกุล

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเรื่องนี้เป็นกรสร้างเครื่องมือวัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ของโหลดทางไฟฟ้า เพื่อนำมาประมวลผลเป็นตัวเลขและสร้างสัญญาณเพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องกรองฮาร์มอนิกส์

ในโครงการนี้ได้ใช้บอร์ดประมวลผลทางดิจิทัล TMS320C50 DSK มาประมวลผลจากกระแสไฟฟ้า 1 เฟส โดยจะเลือกแสดงผลลัพธ์ได้ 2 สถานะคือแสดงผลทางจอ LCD ซึ่งจะวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ 2 ถึง 13 และค่า THD โดยใช้สมการของ IEEE 519:1992 และแสดงผลทางออสซิลโลสโคปซึ่งจะแสดงเป็นกราฟและวัดได้ถึงฮาร์มอนิกส์ที่ 100 โดยการในการวัดนี้ ต้องทำการโหลดคำสั่งเข้าสู่บอร์ดโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ PC และต้องทำการลดทอนกระแสที่จะวัดด้วยเครื่องลดทอนกระแสก่อน

การทำงานของเครื่องวัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์นี้สามารถวิเคราะห์และแสดงผลได้ค่อนข้างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับวัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ทั่วไป

HARMONICS DETECTOR USING TMS320C50 DSK

Wiratorn Ruksvanichpongs

Wirote Chumboonrod

Werapan Kuntachote

Siriwat Photiwetchakhun Advisor

Abstract

This project is to make an instrument for measuring harmonics distortion in power system. It has the capability to show the result on an LCD and to send digital signal to harmonics filter.

In this project, we use digital signal processor TMS320C50 DSK to calculate harmonics distortion from single phase power system. The results can be displayed in two way, first, showing both 2nd order to 13th order harmonics and THD using IEEE 519:1992 formula on LCD, second, showing harmonics spectrum up to 100th order in graphics on an oscilloscope . We use PC computer to load the instruction codes into the DSK, and the current to be measured must be attenuated by an LEM module before entering the DSK

This harmonics detector calculates and displays the result quite accurately comparing to the conventional harmonics detector.

III

สารบัญรูป

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 2.1 | รูปแสดงตัวอย่างของกระแสที่มีฮาร์โมนิกส์ | 5 |
| รูปที่ 3.1 | รูปแบบฟังก์ชันเต็มหน่วยทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ | 15 |
| รูปที่ 3.2 | กราฟการไหลแสดงถึงวิธีการคำนวณตามสมการ 3.31 | 21 |
| รูปที่ 3.3 | หน่วยมีเลื่อของการคำนวณตามขั้นตอนวิธีลดทอนทางเวลา | 23 |
| รูปที่ 3.4 | แสดงขั้นตอนการลดทอนทางเวลาสำหรับ DFT 8 จุด | 24 |
| รูปที่ 3.5a | กราฟการไหลสัญญาณแสดงการคำนวณตามรูป 3.4 | 25 |
| รูปที่ 3.5b | แสดงการสลับตำแหน่งของลำดับ $x(n)$ ด้วยการผันกลับบิต | 26 |
| รูปที่ 3.6 | ภาพรวมแสดงขั้นตอนวิธีการ DFT ขนาด N จุด แบบลดทอนทางเวลา | 27 |
| รูปที่ 3.7 | แสดงลำดับขั้นตอนวิธีการของ FFT ชนิดการลดทอนทางความถี่ | 30 |
| รูปที่ 4.1 | แสดงการแปลงสัญญาณกระแสจาก LEM โมดูลให้เป็นสัญญาณแรงดัน | 32 |
| รูปที่ 4.2 | แสดงการใช้วงจรอนอินเวอร์ตคิงมาขึ้นกลางระหว่างสัญญาณแรงดันจาก LEM โมดูลกับสัญญาณเข้าบอร์ด DSP | 33 |
| รูปที่ 4.3 | ภาพแสดง LEM โมดูลที่ต่อเข้ากับวงจรอนอินเวอร์ตคิง | 33 |
| รูปที่ 4.4 | วงจรจ่ายไฟเลี้ยง +/- 12 โวลต์ | 35 |
| รูปที่ 4.5 | แสดงภาพภาคจ่ายไฟของเครื่องลดทอนสัญญาณ | 35 |
| รูปที่ 4.6 | แสดงภายในของเครื่องลดทอนสัญญาณ | 38 |
| รูปที่ 4.7 | แสดงภายนอกของเครื่องลดทอนสัญญาณ | 38 |
| รูปที่ 5.1 | แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม OSCILLO.ASM | 42 |
| รูปที่ 5.2 | แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม LCD.ASM | 43 |
| รูปที่ 5.3 | แสดงแผนภาพขั้นตอน (flow chart) การคำนวณ FFT ของหน่วยประมวลผล | 4 |
| รูปที่ 5.4 | แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย %HARMONICS | 46 |
| รูปที่ 5.5 | แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย %THD | 47 |
| รูปที่ 5.6 | แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย H_LCD และ T_LCD | 48 |
| รูปที่ 5.7 | แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมส่งสัญญาณควบคุม | 49 |
| รูปที่ 6.1 | แสดงจอ LCD | 51 |
| รูปที่ 6.2 | หน่วยแสดงผล LCD ที่สมบูรณ์ | 53 |
| รูปที่ 6.3 | แสดงวงจรการต่อหน่วยแสดงผล LCD เข้ากับ MTS320C50 DSK | 58 |
| รูปที่ 7.1 | แสดงจุดต่อสายต่างๆบน TMS320C50 DSK | 58 |
| รูปที่ 7.2 | แสดงการต่ออุปกรณ์ต่างๆ | 58 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 8.1 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปของสัญญาณ ไซน์ความถี่ 500 Hz | 59 |
| รูปที่ 8.2 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปของสัญญาณ ไซน์ความถี่ 1000 Hz | 59 |
| รูปที่ 8.3 แสดงสัญญาณกระแสของหลอดฮาโลเจนที่รับไฟจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ | 60 |
| รูปที่ 8.4 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปของของสัญญาณกระแสของหลอดฮาโลเจนที่รับไฟจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ | 60 |
| รูปที่ 8.5 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากสเปกตรัมครีโมนาไลเซอร์ของสัญญาณกระแสของหลอดฮาโลเจนที่รับไฟจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ | 60 |
| รูปที่ 8.6 แสดงสัญญาณกระแสของเครื่องออสซิลโลสโคป | 61 |
| รูปที่ 8.7 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปของของสัญญาณกระแสของเครื่องออสซิลโลสโคป | 61 |
| รูปที่ 8.8 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากสเปกตรัมครีโมนาไลเซอร์ของสัญญาณกระแสของเครื่องออสซิลโลสโคป | 61 |
| รูปที่ 8.9 แสดงสัญญาณกระแสของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่อผ่านหม้อแปลงแบบแกนเหล็ก | 62 |
| รูปที่ 8.10 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปของของสัญญาณกระแสของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่อผ่านหม้อแปลงแบบแกนเหล็ก | 62 |
| รูปที่ 8.11 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากสเปกตรัมครีโมนาไลเซอร์ของสัญญาณกระแสของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่อผ่านหม้อแปลงแบบแกนเหล็ก | 62 |
| รูปที่ 8.12 แสดงผลการคำนวณโดย TMS320C50 โดยแสดงผลออกทาง LCD | 64 |
| รูปที่ 8.13 แสดงรูปสัญญาณกระแสของการทดลอง 8.3.2 | 68 |
| รูปที่ 8.14 แสดงภาพถ่ายจากเครื่องสาร์ทมอนิเตอร์ของ SATEC | 68 |

IV

สารบัญตาราง

| | | |
|--------------|--|----|
| ตารางที่ 2.1 | แสดงฮาร์มอนิกส์ชนิดต่างๆ | 4 |
| ตารางที่ 2.2 | แสดงค่าฮาร์มอนิกส์ชนิดต่างๆของเครื่องไฟฟ้า | 5 |
| ตารางที่ 2.3 | แสดงค่าฮาร์มอนิกส์ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ตามมาตรฐาน IEEE 519 | 10 |
| ตารางที่ 3.1 | แสดงค่า $[W^{th}]$ กรณี $N = 8$ | 17 |
| ตารางที่ 6.1 | แสดงขาสัญญาณต่างๆของ LCD โมดูล | 51 |
| ตารางที่ 6.2 | แสดงความหมายของสัญญาณ | 55 |
| ตารางที่ 8.1 | เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าฮาร์มอนิกส์ระหว่าง TMS320C50 DSK กับเครื่องฮาร์มอนิกส์อนาลิเซอร์ของ SATEC | 66 |
| ตารางที่ 8.2 | เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าฮาร์มอนิกส์ระหว่าง TMS320C50 DSK กับเครื่องฮาร์มอนิกส์อนาลิเซอร์ของ SATEC | 67 |



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันนี้คำว่าฮาร์มอนิกส์เริ่มเป็นที่รู้จักกันดี เนื่องจากปัจจุบันนี้มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Device) อยู่เป็นจำนวนมาก ที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆเริ่มมีลักษณะเช่นนี้ก็เพราะว่า การออกแบบเช่นนี้จะทำให้อุปกรณ์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ควบคุมการทำงานได้หลากหลาย และมีประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างอุปกรณ์เหล่านี้คือ ภาคจ่ายไฟแบบสวิตชิง อุปกรณ์แปลงผันทางไฟฟ้า (Inverter) หม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์ บาลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้กระทั่งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบธรรมดาคณะที่ไม่มีภาระก็เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์เช่นกัน

แม้ฮาร์มอนิกส์จะเป็นที่รู้จักและทำให้มีการตื่นตัวเกี่ยวกับผลเสียต่างๆ ที่ฮาร์มอนิกส์ส่งต่อระบบไฟฟ้ากำลังแล้วก็ตาม แต่การตรวจวัดหรือการแก้ไขอย่างจริงจังนั้นยังไม่ได้มีการปฏิบัติกันอย่างกว้างขวางหรือจริงจังมากนัก

โครงการนี้เป็นการใช้หลักการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform) มาแปลงรูปคลื่นของกระแสซึ่งอยู่ในแกนเวลาให้อยู่ในรูปของแกนความถี่ จากนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ความถี่ส่วนเกินอันเกิดจากฮาร์มอนิกส์ได้ โดยจะแปลงรูปคลื่นของกระแสให้เป็นค่าทางดิจิทัลก่อน จึงจะนำไปประมวลผลฟาสต์ฟูเรียร์ ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320C50 ซึ่งมีความสามารถในการประมวลผลทางดิจิทัล (Digital Signal Processing) ได้เป็นพิเศษ อีกทั้งยังได้มีการออกแบบมาให้แปลงฟาสต์ฟูเรียร์ในรูปดิจิทัลได้เร็ว โดยจะวิเคราะห์ถึงฮาร์มอนิกส์ที่ 13 เนื่องจากโหลดทางไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีฮาร์มอนิกส์ส่วนมากอยู่ในย่านนี้หลังจากวิเคราะห์หาปริมาณ ฮาร์มอนิกส์ได้แล้ว ก็จะทำให้ส่งสัญญาณออกสู่ภายนอกเพื่อบอกปริมาณฮาร์มอนิกส์ได้ โดยส่งออกทั้งหมดสามรูปแบบ แบบแรกจะแสดงค่ากระแสที่อยู่ในแกนความถี่ทางออสซิลโลสโคป แบบที่สองจะแสดงปริมาณฮาร์มอนิกส์ออกทางจอ LCD และแบบสุดท้ายจะแสดงผลทางกลุ่มของหลอด LED โดยจำนวนหลอดที่ติดจะต่างกันไปตามค่าฮาร์มอนิกส์ต่างๆที่สูงเกินมาตรฐาน

ลักษณะโดยรวมของโครงการจะประกอบด้วย

1. เครื่องลดทอนสัญญาณ

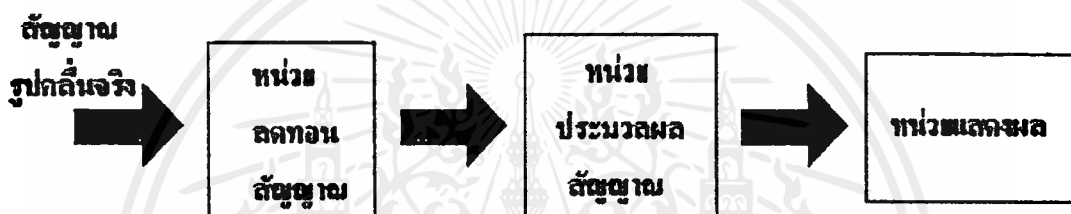
เนื่องจากไมโครโปรเซสเซอร์จะรับสัญญาณเข้าในรูปของแรงดันและมีขนาดไม่เกิน 3 โวลต์ แต่อุปกรณ์ตรวจจับกระแสซึ่งอยู่ในเครื่องลดทอนสัญญาณอีกทีจะให้สัญญาณออกมาเป็นกระแส จึงต้องมีการแปลงให้เป็นแรงดันที่มีค่าเหมาะสมก่อน ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำโดยเครื่องลดทอนสัญญาณที่ทำงาน โดยในเบื้องต้นนี้จะวัดค่ากระแสได้สูงสุด 47 แอมแปร์ และวัดจากกระแสไฟฟ้า 1 เฟส

2. หน่วยประมวลผล

คือตัวไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320C50 มีหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้จากเครื่องลดทอนสัญญาณให้เป็นดิจิทัลและทำการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ และวิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ถึง 13 และค่า THD โดยอิงสมการของ IEEE 519:1992 ตลอดจนส่งผลลัพธ์ไปยังหน่วยแสดงผล

3. หน่วยแสดงผล

จะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ต่อค่าหลักมูล ซึ่งในที่นี้คือค่า 50 Hz โดยแสดงผลทางจอ LCD ขนาด 2 บรรทัดซึ่งไม่สามารถแสดงผลการคำนวณทั้งหมดได้พร้อมกัน ดังนั้นจะแสดงผลลัพธ์ที่ถูกลบส่วนและแสดงวนไปเรื่อย ๆ จนครบและวนกลับมาที่เดิมใหม่ และแสดงผลในลักษณะเหมือนเครื่องวิเคราะห์ความถี่ทางออสซิลโลสโคป และแสดงออกเป็นคำสั่งดิจิทัล



รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพโดยรวมของอุปกรณ์วัด

บทที่ 2

ฮาร์มอนิกส์ : สาเหตุ ผลกระทบ และวิธีการแก้ไข

2.1 สาเหตุของฮาร์มอนิกส์

ในระบบไฟฟ้าสามเฟส 50 Hz ที่ผลิตจากโรงไฟฟ้า แรงดันและกระแสที่ได้ในสภาวะปกติเกือบจะเป็นคลื่นไซน์ความถี่ 50 Hz บริสุทธิ์ ใดๆก็ตามที่เปลี่ยนรูปคลื่นนี้ไปจากเดิมจะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ (ผลรวมของรูปคลื่นไซน์ของกระแสหรือแรงดันขนาดต่างๆ ที่มีความถี่เป็นผลคูณของค่าความถี่หลัก) ขึ้น นอนลิเนียร์โหลด (nonlinear load) จะกินกระแสไม่เป็นสัดส่วนกับแรงดัน ซึ่งทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสขึ้นในระบบไฟฟ้า ความผิดเพี้ยนนี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของนอนลิเนียร์โหลดเทียบกับขนาดของระบบไฟฟ้า ณ สถานที่นั้น ค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำจะทำให้กระแสและแรงดันมีเฟสไม่ตรงกัน แต่คลื่นไซน์จะยังคงบริสุทธิ์อยู่รอบใดที่ไม่มีฮาร์มอนิกส์อยู่ในระบบ แหล่งที่มาที่สำคัญของฮาร์มอนิกส์คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและนอนลิเนียร์โหลด นอนลิเนียร์โหลดรวมไปถึงอุปกรณ์โซลิดสเตท (solid state) หรืออุปกรณ์ที่มีการเปิด-ปิด จังหวะการในให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา

2.2 ฮาร์มอนิกส์อันดับที่

สำหรับระบบไฟฟ้า 50 Hz พบว่าฮาร์มอนิกส์อันดับคู่เกิดขึ้นน้อยมาก เนื่องจากนอนลิเนียร์โหลดผลิตฮาร์มอนิกส์ออกมาแต่ฮาร์มอนิกส์อันดับคี่ซึ่งจะไปรวมกับความถี่หลักทั้งช่วงไฟบวกและช่วงไฟลบ ฮาร์มอนิกส์อันดับคี่มีสามชนิดในระบบสามเฟสดังนี้ โพลีทีฟซีควอนซ์ (positive sequence) เนกาทีฟซีควอนซ์ (negative sequence) และซีโรซีควอนซ์ (zero sequence)

2.2.1 โพลีทีฟซีควอนซ์ฮาร์มอนิกส์ ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและห่างกัน 120 องศา และมีลำดับเฟสในทิศทางเดียวกับของความถี่หลัก

2.2.2 เนกาทีฟซีควอนซ์ฮาร์มอนิกส์ ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันและห่างกัน 120 องศา และมีลำดับเฟสในทิศทางตรงกันข้ามกับของความถี่หลัก

2.2.3 ซีโรซีควอนซ์ฮาร์มอนิกส์ ประกอบด้วยสามเฟสเซอร์ที่มีขนาดเท่ากันแต่แต่ละเฟสมีมุมห่างกันเป็น 0 องศา

ดังนั้นจึงก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีขนาดเป็นสามเท่าของขนาดของแต่ละเฟสเซอร์ขึ้นในสายนิวทรัลของระบบไฟฟ้า ฮาร์มอนิกส์ชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า ทริเปิลฮาร์โมนิก (triple harmonics) ฮาร์มอนิกส์นี้แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของอุปกรณ์เฟสเดียวที่เป็นนอนลิเนียร์ เช่นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล บาดตาสต์อิเล็กทรอนิกส์

| อันดับของฮาร์มอนิกส์ | ชนิด | อันดับของฮาร์มอนิกส์ | ชนิด |
|----------------------|------------------|----------------------|------------------|
| 1 | โพลีทีพีซีแควนซ์ | 19 | โพลีทีพีซีแควนซ์ |
| 3 | ซีโรซีแควนซ์ | 21 | ซีโรซีแควนซ์ |
| 5 | เนกาทีฟซีแควนซ์ | 23 | เนกาทีฟซีแควนซ์ |
| 7 | โพลีทีพีซีแควนซ์ | 25 | โพลีทีพีซีแควนซ์ |
| 9 | ซีโรซีแควนซ์ | 27 | ซีโรซีแควนซ์ |
| 11 | เนกาทีฟซีแควนซ์ | 29 | เนกาทีฟซีแควนซ์ |
| 13 | โพลีทีพีซีแควนซ์ | 31 | โพลีทีพีซีแควนซ์ |
| 15 | ซีโรซีแควนซ์ | อื่นๆ | |
| 17 | เนกาทีฟซีแควนซ์ | | |

ตารางที่ 2.1 แสดงฮาร์มอนิกส์ชนิดต่างๆ

ตารางที่ 1 แสดงฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ต่างๆพร้อมชนิดซีแควนซ์ของมัน ดังกล่าวฮาร์มอนิกส์อันดับหนึ่งก็คือความถี่หลักของระบบ ไฟฟ้าันเอง โพลีทีพีซีแควนซ์จากโพลีคอนดักทีฟเฟสจะเป็นเหตุให้มอเตอร์ตามเฟสทั้งสองชนิดหมุนไปข้างหน้า ในขณะที่เนกาทีฟซีแควนซ์จะพยายามให้มอเตอร์หมุนไปในทิศตรงกลับ การหมุนลักษณะนี้จะรุนแรงแค่ไหนขึ้นอยู่กับลำดับ (ที่ 5, 7, 9 ฯลฯ) และขนาดของฮาร์มอนิกส์เมื่อเทียบกับขนาดของความถี่หลักอีกด้วย แรงบิดจากฮาร์มอนิกส์นี้จะทำให้เกิดการสั่นครางขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาใหญ่ขึ้นได้ภายหลัง

2.3 ทริปเปิดฮาร์มอนิกส์

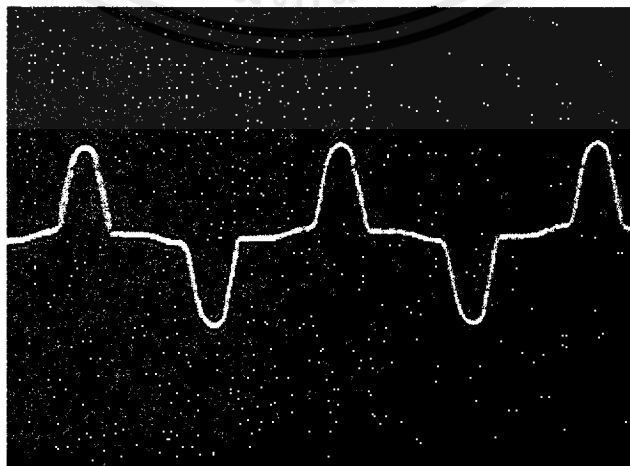
ทริปเปิดฮาร์มอนิกส์ (3, 9, 15, ฯลฯ) จะไปรวมกันที่สายนิวทรัลหรือกราวด์ อย่างไรก็ตามก็ดี ถ้าไม่มีการต่อสายนิวทรัลหรือสายกราวด์ไว้ มันก็จะหักล้างกันเองหมด แต่ถ้ามีการต่อสายนิวทรัล เช่นที่ขดลวดขั้วของหม้อแปลงต่อเป็นแบบสตาร์ ทริปเปิดฮาร์มอนิกส์จะไหลผ่านขดลวดแรงดันต่ำนี้และรวมตัวกันกับกระแสจากโพลีคอนดักทีฟที่ไม่สมดุลในสายนิวทรัล และยังสามารถส่งต่อไปและไหลวนอยู่ในขดลวดขั้วทางด้านแรงสูงได้อีกด้วย

2.4 ฮาร์โมนิกซ์จากนอนลิเนียร์โหลด

นอนลิเนียร์โหลดเช่นอินเวอร์เตอร์ โซลิดสเตททรีคิฟายเออร์ในเครื่องเชื่อม แวเรียเบิลฟ्रीควเอนซีไดรฟ์หรือ อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นแหล่งของฮาร์โมนิกซ์ในระบบไฟฟ้าที่จ่ายไฟให้โหลดเหล่านี้ โดยมากแล้วฮาร์โมนิกซ์ที่เกิดจากโหลดชนิดต่างๆจะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว ผู้ผลิตอุปกรณ์เหล่านี้สามารถบอกถึงชนิด ขนาด ของฮาร์โมนิกซ์ที่อุปกรณ์เหล่านั้นผลิตออกมาได้ แต่บางทีเมื่อโหลดของอุปกรณ์เหล่านั้นเปลี่ยนไปชนิดและขนาดของฮาร์โมนิกซ์ที่ผลิตออกมาอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับการออกแบบของอุปกรณ์นั้น

| อุปกรณ์ | อันดับ | | | | | | | |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 1 (%) | 3 (%) | 5 (%) | 7 (%) | 9 (%) | 11 (%) | 13 (%) | 15 (%) |
| 6 พัลส์เรคติฟายเออร์ | 100 | - | 17 | 11 | - | 5 | 3 | - |
| 12 พัลส์เรคติฟายเออร์ | 100 | - | 3 | 2 | - | 5 | 3 | - |
| 24 พัลส์เรคติฟายเออร์ | 100 | - | 3 | 2 | - | 1 | 0.5 | - |
| คอมพิวเตอรื | 100 | 56 | 33 | 11 | 5 | 4 | 2 | 1 |
| ระบบแสงสว่าง | 100 | 18 | 15 | 8 | 3 | 2 | 1 | 0.5 |
| สำนักงานที่มี PC | 100 | 51 | 28 | 9 | 6 | 4 | 2 | 2 |

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าฮาร์โมนิกซ์ชนิดต่างๆของเครื่องไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของกระแสที่มีฮาร์โมนิกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ลักษณะการไหลของฮาร์มอนิกส์

ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ไหลในระบบไฟฟ้าจะดูได้จากอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ค่าที่ได้จากผู้ผลิตหรือมาตรฐานอุตสาหกรรม เนื่องจากค่าอินดักแตนซ์จะเพิ่มและค่าคาปาซิแตนซ์จะลดเมื่อความถี่สูงขึ้น ในทางทฤษฎีความสัมพันธ์นี้จะเป็นเส้นตรง แต่ในความเป็นจริงอุปกรณ์เช่นนี้ทำให้ความสัมพันธ์ต่างๆ ไม่เป็นเส้นตรงนัก ตามทฤษฎีความต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างที่ละเอียดซับซ้อนสามารถทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงได้พอตัว เมื่อความถี่เปลี่ยนแปลง ถ้าปราศจากการคำนวณและทดลองที่ละเอียดแล้ว ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ฮาร์มอนิกส์ค่าต่างๆ จะไม่สามารถคำนวณได้อย่างเที่ยงตรงเลย และถ้าปราศจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เที่ยงตรงแล้วจะเป็นไปไม่ได้ที่จะศึกษาการไหลของฮาร์มอนิกส์ได้อย่างเที่ยงตรง อย่างไรก็ตาม จากประสบการณ์และจากความรู้พื้นฐานทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง เราสามารถวิเคราะห์โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ได้อย่างถูกต้อง

2.5.1 เนื่องจากค่าอินดักทิฟรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงมีค่าค่อนข้างสูง และหม้อแปลงส่วนใหญ่มีการต่อแบบเดลต้าทางด้านปฐมภูมิ ปัญหาจากฮาร์มอนิกส์จะเกิดอยู่กับอุปกรณ์ที่ต่อไว้กับแรงดันที่มีฮาร์มอนิกส์อยู่เท่านั้น

2.5.2 ตัวเก็บประจุหรืออุปกรณ์ที่มีคาปาซิทิฟรีแอกแตนซ์ จะปรากฏเป็นเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำมากสำหรับกระแสฮาร์มอนิกส์และจะดึงดูดกระแสฮาร์มอนิกส์

2.5.3 โหลดความต้านทานหรือส่วนที่เป็นความต้านทานของโหลดที่ต่ออยู่ จะเป็นตัวกระจายฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจะสูญเสียเป็นความร้อนไป ซึ่งจะเป็นปัญหาถ้าอุปกรณ์นั้นถูกเลือกขนาดไว้พอดีเกินไปหรือฮาร์มอนิกส์มีขนาดใหญ่มาก ส่วนโหลดเช่นหลอดเผาไส้หรือขดลวดทำความร้อน จะไม่ได้รับผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์

2.5.4 ฮาร์มอนิกส์ส่วนใหญ่ออกมาจากนอนลินีียร์โหลด ส่วนอุปกรณ์ที่เหลือในวงจรไฟฟ้ามักเป็นอุปกรณ์ที่มีอินดักทิฟรีแอกแตนซ์ ซึ่งจะปรากฏเป็นอิมพีแดนซ์ที่สูงสำหรับฮาร์มอนิกส์ แต่จากกฎของเคอร์ฮอฟ (Kirchhoff) กระแสจะไม่สามารถหายไปได้ ดังนั้นมันก็จะต้องไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้นอยู่ดี พลังงานส่วนใหญ่ของโพลีฟิฟและเนกาทิฟซีแควนซ์ฮาร์มอนิกส์จะสูญเสียเป็นความร้อนไป นอกจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นแล้วกระแสที่มีความถี่สูง (กระแสฮาร์มอนิกส์) ยังทำให้แกน (core) ทำงานหนักขึ้นจึงทำให้เกิดการอิ่มตัวเร็วขึ้น ในกรณีของหม้อแปลงฮาร์มอนิกส์บางส่วนจะส่งไปในหม้อแปลงด้วย

2.5.5 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นไฟฟ้าจะมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับปริมาณของนอนลินีียร์โหลดเทียบกับระบบทั้งระบบ ความผิดเพี้ยนจะมากขึ้นถ้าสัดส่วนของนอนลินีียร์โหลดเพิ่มขึ้น

2.6 ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์

2.6.1 กระแสสูงผิดปกติในสายนิวทรัล

บางทีปัญหาที่สำคัญที่สุดที่เกิดต่อหน่วยงานก็คือเกิดความร้อนสูงผิดปกติในสายนิวทรัลของระบบ 3 เฟส 4 สาย ในระบบ 3 เฟส 4 สายที่โหลดสมดุล กระแสในสายนิวทรัลจะเป็นศูนย์แม้กระทั่งในกรณีที่โหลดไม่สมดุลอย่างมาก กระแสในสายนิวทรัลก็จะไม่สูงไปกว่ากระแสสูงสุดในสายเฟส อย่างไรก็ตาม ระบบเดียวกันที่มีเฟส-นิวทรัลนอนลิเนียร์โหลดจะผลิตทริปเปิดฮาร์มอนิกส์ออกมา (3, 9, 15 ฯลฯ) ซึ่งจะไปรวมกันในสายนิวทรัล ผลก็คือจะเกิดกระแส rms ในสายนิวทรัลสูงกว่ากระแส rms ในสายเฟส 200% - 300% ถึงแม้จะเป็นระบบที่ไม่สมดุล ซึ่งจะทำให้เกิดความล้มเหลวของจุดต่อสายนิวทรัลที่ตู้ไฟฟ้าและหม้อแปลงได้ ฮาร์มอนิกส์ที่ก่อให้เกิดปัญหานี้มาจากภาคจ่ายไฟของเครื่องคอมพิวเตอร์และเฟส-นิวทรัลนอนลิเนียร์โหลด อุปกรณ์เหล่านี้ผลิตฮาร์มอนิกที่ 3 ออกมาในปริมาณมาก รวมทั้งทริปเปิดฮาร์มอนิกส์อื่นๆ เนื่องจากพวกมันต้องการกระแสเฉพาะที่จุดที่แรงดันของลูกคลื่นมีค่าสูงสุดเท่านั้น ถ้าไม่มีการกรองออกตั้งแต่ตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ กระแสฮาร์มอนิกส์จะหาเส้นทางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด นั่นก็คือผ่านสายนิวทรัล ไปยังหม้อแปลง

ด้วยกระแสที่สูงผิดปกติ และสายนิวทรัลที่เล็กเกินไป เราอาจพบกับสายนิวทรัลที่ร้อนจัด ส่งผลให้เกิด ไฟไหม้ ไฟฟ้าลัดวงจร หรือระบบส่งจ่ายล้มเหลว

2.6.2 การสูญเสียเป็นความร้อน

การสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในรูปของความร้อนที่จะเกิดขึ้นที่อุปกรณ์ ซึ่งพลังงานนี้จะดูมาจากโรงจักรไฟฟ้า ทำให้เราต้องเสียค่าไฟมากขึ้น แต่เรามักจะละเลยเนื่องจากมันยากที่จะรู้ว่าเราต้องจ่ายเพิ่มมากขึ้นอีกเท่าไรเนื่องจากฮาร์มอนิกส์

2.6.3 สกินเอฟเฟ็ค

ฮาร์มอนิกส์สามารถทำให้สายไฟและเนื้อฉนวนร้อนจัดอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าสกินเอฟเฟ็ค มันสัมพันธ์กับความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นกระแสที่ผิวตัวนำจะมากขึ้นกว่าที่ความถี่ต่ำ ดังนั้น เมื่อความถี่ยิ่งสูง กระแสยิ่งไหลแต่ที่ผิวมากขึ้น ถ้าเกิดที่หม้อแปลง จะทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นที่ขดลวดของหม้อแปลง

2.6.4 ปัญหาที่หม้อแปลง

ความผิดปกติของรูปคลื่นจะก่อให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในหม้อแปลงทุกชนิด ความร้อนนี้เกิดจาก เอ็ดดี้ เคอร์เรนท์ ลอส และ ฮิสเทเรซิส ลอส ซึ่งแปรผันตรงกับความถี่ และความร้อนที่เพิ่มขึ้นในหม้อแปลงยังเกิดจากสกินเอฟเฟ็คท์ที่ขดลวดด้วย

2.6.5 ปัญหาที่ตัวเก็บประจุ

เนื่องจากความต้านทานของตัวเก็บประจุจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ตัวเก็บประจุจึงได้รับผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์ ดังนั้นตัวเก็บประจุสำหรับปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจะเป็นเส้นทางที่มีความต้านทานต่ำมากสำหรับฮาร์มอนิกส์ ผลคืออาจมีฟิวส์ขาดหรือตัวเก็บประจุระเบิด ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากการที่ตัวเก็บประจุเกิดการเรโซแนนซ์ที่ค่าฮาร์มอนิกส์ค่าใดค่าหนึ่ง

2.6.6 ปัญหาที่เครื่องป้องกันกระแสเกิน

เครื่องป้องกันกระแสเกินแบบตรวจอุณหภูมิ เช่น ฟิวส์ และ เซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอินเวอร์สไทม์ จะได้ผลกระทบความร้อนจากสกินเอฟเฟ็คท์เมื่อกระแสจากฮาร์มอนิกส์สูงขึ้น ความร้อนที่สูงเกินไปจะมีผลให้ช่วงการทำงานของอุปกรณ์นี้เปลี่ยนไป ทำให้เกิดการตัดไฟโดยปราศจากเหตุผลอันสมควร (กระแสเกิน) สำหรับเซอร์กิตเบรกเกอร์รุ่นเก่าที่ใช้ระบบแม่เหล็กในการทริป ซึ่งทำงานโดยอาศัยแรงแม่เหล็กซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสสูงสุดสูงขึ้น ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทริปก่อนกำหนด ปัจจุบันเซอร์กิตเบรกเกอร์รุ่นใหม่ๆ ได้ออกแบบมาให้ทำงานตามค่า rms แล้ว

2.6.7 ปัญหาต่อมอเตอร์

จะทำให้เกิดการสูญเสียในขดลวดต่างๆ ของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเกิดเป็นความร้อนสูงเนื่องจากสกินเอฟเฟ็คท์

2.6.8 ปัญหาต่อเครื่องวัด

ฮาร์มอนิกส์จะทำให้เครื่องวัดการใช้ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำแสดงค่าผิดพลาด เนื่องจากงานที่หมุนอยู่ในมิเตอร์ออกแบบมาให้ทำงานกับคลื่นไซน์ ถ้าคลื่นไม่เป็นรูปไซน์บริสุทธิ์ จะทำให้งานหมุนเร็วเกินความจริง ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องจ่ายค่าไฟฟ้ามากเกินไปกว่าที่ใช้ไปจริง

2.6.9 ปัญหาต่อรีเลย์ป้องกัน

ฮาร์มอนิกส์จะทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดได้ เนื่องจากคุณลักษณะการトリ핑จะเปลี่ยนไปเมื่อมีฮาร์มอนิกส์

2.6.10 ปัญหาต่อเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์

เมื่อรูปคลื่นไฟฟ้าผิดเพี้ยนไป การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอาจผิดพลาดได้ เช่น นาฬิกาอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งทำงานโดยการนับจุดที่แรงดันเป็นศูนย์ แต่รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนอาจทำให้มีจุดที่แรงดันเป็นศูนย์มากกว่าคลื่นไซน์ นาฬิกาจึงเดินเร็วขึ้น ทำให้อุปกรณ์ที่ทำงานตามนาฬิกาเหล่านี้ทำงานผิดพลาดไปด้วย

2.6.11 ปัญหาอื่น

เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางแบบจะวัดที่จุดที่แรงดันสูงสุดเพื่อควบคุมแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจะทำให้ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันสูงขึ้น ทำให้เครื่องวัดมองเห็นค่าสูงสุดอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิกส์แทน ทำให้การทำงานผิดพลาด

ในระบบสื่อสาร ฮาร์มอนิกส์อาจทำให้เกิดการรบกวนข้ามแชนแนล (Crosstalk) ขึ้น ซึ่งทำให้ข้อมูลผิดเพี้ยนไปในระหว่างการเดินทางผ่านสายสัญญาณได้

2.7 สูตรการคำนวณค่าฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในโครงการนี้ (ตามมาตรฐาน IEEE 519)

$$DF_v = HV_v = THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{\infty} V^2}}{V_1} \times 100\% \quad 2.1$$

$$DF_i = HV_i = THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{\infty} I^2}}{I_1} \times 100\% \quad 2.2$$

DF = Distortion Factor

HF = Harmonics Factor

THD = Total Harmonics Distortion

ในนิยามของ IEEE นั้นค่า THD มีโอกาสเกิน 100 % ได้ถ้าในรูปคลื่นมีฮาร์มอนิกส์ปนอยู่มาก ดังนั้นการกล่าวถึงปริมาณ THD ต้องดูว่าค่าที่คำนวณมาจากค่านิยามของใครจึงจะเทียบกันได้อย่างเที่ยงตรง

| I_M/I_L | ลำดับ ฮาร์มอนิกส์ | | | | | THD |
|-----------|----------------------|---------------|---------------|---------------|----------|------|
| | $h < 11$ | $11 < h < 17$ | $17 < h < 23$ | $23 < h < 35$ | $35 < h$ | |
| < 20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20 - 50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50 - 100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100-1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| > 1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าฮาร์มอนิกส์ที่ยอมให้เกิดได้ โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ จาก IEEE 519:1992 (I_M คือค่ากระแสแอมป์สูงสุด ณ จุดต่อเชื่อมระบบและ I_L คือค่ากระแสแอมป์สูงสุด)

2.8 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์

ในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้วงจรกรองเท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีที่เกี่ยวข้องกับ โพรเจกต์โดยตรง วงจรกรองสามารถกำจัดฮาร์มอนิกส์ออกไปได้อย่างมาก โดยการกรองความถี่ที่ไม่ใช้ความถี่หลักออกจากวงจร วงจรกรองสามารถใช้งานได้ 2 แบบ แบบที่ 1 คือแบบอนุกรม ซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุต่อขนานกันอยู่ จะทำให้เกิดความต้านทานที่สูงเป็นพิเศษสำหรับความถี่บางความถี่ ใช้กันไม่ให้ฮาร์มอนิกส์ไหลผ่าน ส่วนแบบที่ 2 คือ แบบขนาน จะเป็นตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับ

ตัวเก็บประจุนำไปต่อแบบขนานกับระบบ จะก่อให้เกิดความต้านทานที่ต่ำมากสำหรับความถี่บางความถี่ ซึ่งจะล่อให้ฮาร์มอนิกส์ไหลผ่านวงจรกรองนี้ลงดินไป

ถึงทั้ง 2 วิธีจะใช้งานได้ผลดีทั้งคู่ แต่การต่อแบบขนานจะนิยมกว่า เนื่องจากแบบอนุกรมจะต้องออกแบบให้สามารถรับกระแสไหลทั้งหมดที่ต่ออยู่หลังวงจรกรอง ซึ่งอาจมีขนาดใหญ่มาก

ตัวอย่างเช่น การต่อวงจรกรองแบบขนานตรงช่วงระหว่างตัวเก็บประจุสำหรับปรับปรุงค่าประกอบกำลังกับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ จะทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ไหลผ่านวงจรกรองลงดินไปก่อนที่จะเข้าไปทำความเสียหายต่อชุดตัวเก็บประจุ

บทที่ 3

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonics Analysis)

3.1 บทนำ (Introduction)

โดยทั่วไปเราอาจกล่าวได้ว่าฟังก์ชันต่อเนื่อง (Continuous function) ใด ๆ ซึ่งมีการซ้ำทุก ๆ ช่วงเวลา T เราจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลบวกของคลื่นไซน์ (Sine wave) ที่มีความถี่หลักมูล (Fundamental) กับความถี่ฮาร์มอนิกที่ลำดับสูงขึ้น ไป ซึ่งเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลได้เสมอ

ดังนั้นในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะกล่าวถึง กระบวนการในการคำนวณขนาด (Magnitude) และมุมเฟส (Phase angle) ของแต่ละส่วนประกอบที่เป็นมูลฐานและในลำดับฮาร์มอนิกที่สูงขึ้น ผลของอนุกรมที่ได้เรียกว่า อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปโดเมนเวลา (Time domain) และ โดเมนความถี่ (Frequency domain)

ในกรณีการวิเคราะห์สำหรับฟังก์ชันทั่ว ๆ ไป ซึ่งอยู่ในช่วง 00 ถึง -00 จะทำการวิเคราะห์โดยอาศัยการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) และ อินเวอร์สการแปลงฟูรีเยร์ (Inverse Fourier Transform) ซึ่งการแปลงฟูรีเยร์เป็นการแปลงฟังก์ชันในโดเมนความถี่ไปสู่โดเมนเวลา ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า อนุกรมฟูรีเยร์เป็นกรณีหนึ่งของการแปลงฟูรีเยร์

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ข้อมูลหรือค่าที่จะทำการวิเคราะห์นั้น เป็นค่าซึ่งได้จากการสุ่มค่า (Sampled data) ของฟังก์ชันในโดเมนเวลา ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของขนาดของฟังก์ชัน ณ เวลาที่ทำการสุ่ม ซึ่งระยะห่างในการสุ่มแต่ละครั้ง จะเป็นช่วงเวลาที่แน่นอน ในการแปลงฟูรีเยร์ ของค่าที่ได้จากการสุ่มเหล่านี้จะต้องใช้การแปลงที่เรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform : DFT) แต่เราสามารถทำ DFT ให้รวดเร็วขึ้นโดยอาศัยวิธีการที่เรียกว่า การแปลงฟาสต์ฟูรีเยร์ (Fast Fourier Transform : FFT) FFT เป็นวิธีการพื้นฐานซึ่งถือได้ว่ารวดเร็ว และได้รับการยอมรับมากที่สุด ในการนำมาวิเคราะห์สเปกตรัม และฮาร์มอนิกของระบบ ดังนั้นในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และการประยุกต์ใช้ต่อไป จะเน้นความสำคัญของ FFT

3.2 การวิเคราะห์อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier Series Analysis)

อนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชันคาบ (Periodic function) $X(t)$ ใด ๆ อาจแสดงได้ดังนี้

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad 3.1$$

โดยที่ a_0 เป็นค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน $X(t)$

a_n และ b_n เป็นสัมประสิทธิ์ของอนุกรมของฟังก์ชัน $X(t)$

ทั้งนี้ a_0 , a_n และ b_n สามารถหาได้จากผลการอินทิเกรตต่อไปนี้

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad 3.2$$

ซึ่งหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของ $X(t)$ ในช่วง $-T/2$ ถึง $T/2$ นั่นเอง

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad \text{โดยที่ } n = 1 \rightarrow \infty \quad 3.3$$

และ

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad \text{โดยที่ } n = 1 \rightarrow \infty \quad 3.4$$

3.2.1 อนุกรมฟูเรียร์ในรูปเชิงซ้อน (Complex Form of the Fourier Series)

โดยทั่วไปเราสามารถเขียนอนุกรมฟูเรียร์ของฟังก์ชันคาบ $X(t)$ ใด ๆ ได้ในรูปต่อไปนี้

$$X(t) = a_0 + A_1 \sin(a)t + \phi_1 + A_2 \sin(2a)t + \phi_2 + \dots \quad 3.5$$

โดยแต่ละลำดับของอนุกรมอาจสามารถเขียนได้ดังนี้

$$X(f_n) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi f_n t} dt \quad \text{เมื่อ } f_n = nf \quad 3.6$$

โดยที่ $e^{-j2\pi f t}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย และ $X(f)$ เป็นแอมพลิจูดและมุมเฟสของเวกเตอร์ฮาร์มอนิกใด ๆ

ดังนั้นสำหรับฟังก์ชันในโดเมนเวลา $X(t)$ ใด ๆ เราสามารถเขียนในรูปเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f_n) e^{j2\pi f_n t} \quad \text{และ } f_{-n} = -f_n \quad 3.7$$

3.3 การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier transform)

ในการวิเคราะห์ฟูรีเยร์นั้น สำหรับสัญญาณซึ่งเป็นคาบ เราจะได้ว่าผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของอนุกรมของแต่ละความถี่ซึ่งเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลเท่านั้น (Series of discrete frequency component)

ถ้าเรานำมาประยุกต์ใช้กับสัญญาณซึ่งต่อเนื่องทั่ว ไปซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นสัญญาณที่เป็นคาบ โดยขยายการการอินทิเกรทในช่วงคาบ T ให้กว้างมาก ๆ หรือเป็นช่วง ∞ นั่นเอง ดังนั้นช่วงกว้างของแต่ละความถี่เข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นเราจะได้ ฟังก์ชัน $X(f)$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องหรือเราอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad 3.8$$

โดยที่ $X(f)$ เป็นฟังก์ชันโดเมนเวลาซึ่งต่อเนื่อง และเรียก $X(f)$ ว่าเป็นการแปลงฟูรีเยร์ของโดเมนเวลา $x(t)$ ในทางกลับกัน เราจะได้

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad 3.9$$

เรียก $X(f)$ ว่าเป็นอินเวอร์สการแปลงฟูรีเยร์ของฟังก์ชันโดเมนความถี่ $x(t)$ โดยเรียกคู่ $X(f)$ จะอยู่ในรูปเชิงซ้อนซึ่งอาจเขียนได้ดังนี้

$$X(f) = \text{Re } X(f) + j \text{Im } X(f) \quad 3.10$$

ส่วนจริงของ $X(f)$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Re } X(f) &= 0.5[X(f) + X(-f)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos 2\pi ft dt \end{aligned} \quad 3.11$$

และส่วนจินตภาพของ $X(f)$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Im } X(f) &= 0.5j[X(f) - X(-f)] \\ &= -\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin 2\pi ft dt \end{aligned} \quad 3.12$$

ดังนั้นสเปกตรัมของแอมพลิจูด (Amplitude spectrum) ของแต่ละความถี่หาได้จาก

$$|X(f)| = [(\text{Re } X(f))^2 + (\text{Im } X(f))^2]^{1/2} \quad (3.13)$$

และสเปกตรัมของมุมเฟส (Phase spectrum) หาได้จาก

$$\phi(f) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im } X(f)}{\text{Re } X(f)} \right] \quad (3.14)$$

3.4 การแปลงฟูรีเยอร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform)

ในกรณีที่ต้องการให้ค่าในโดเมนความถี่เป็นฟังก์ชันที่ผ่านการสุ่มค่าเช่นเดียวกับในโดเมนเวลา ผลการแปลงฟูรีเยอร์ที่ได้จะประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยรวมกันดังนี้

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-j2\pi f_k n / N} \quad (3.15)$$

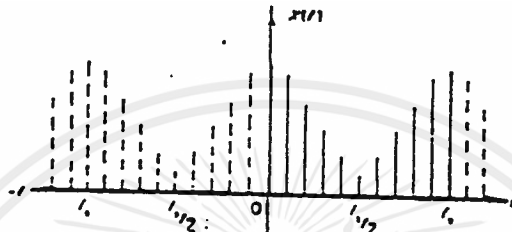
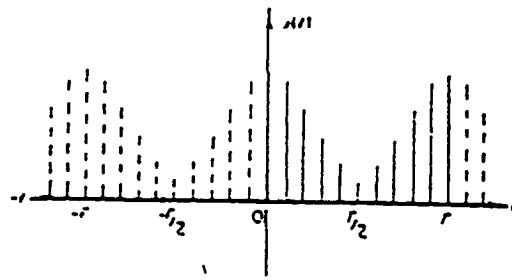
เรียกการแปลงฟูรีเยอร์ลักษณะนี้ว่า การแปลงฟูรีเยอร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform : DFT) และ

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(f_k) e^{j2\pi f_k n / N} \quad (3.16)$$

เรียกการแปลงลักษณะนี้ว่า อินเวอร์การแปลงฟูรีเยอร์แบบเต็มหน่วย (Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT)

สมมติให้ฟังก์ชันทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่เป็นฟังก์ชันคาบดังรูปที่ 1 ซึ่งมีอัตราการสุ่ม N ครั้งต่อคาบ

คู่การแปลงฟูรีเยอร์ที่ได้จะอยู่ในรูปเต็มหน่วย (Discrete form) ซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการนำมาคำนวณโดยการประมวลผลแบบดิจิทัลต่อไป



รูปที่ 3.1 รูปแบบฟังก์ชันเติมหน่วยทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่

เราอาจเขียนผลการแปลงได้ใหม่ในรูปดังนี้

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) W^{kn} \quad 3.17$$

โดยที่

$$W = e^{-j2\pi/N} \quad 3.18$$

ดังนั้นจากสมการดังกล่าวเราอาจเขียนในรูปเมทริกได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X(f_0) \\ X(f_1) \\ \vdots \\ X(f_k) \\ \vdots \\ X(f_{N-1}) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W & \dots & W^k & \dots & W^{N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^k & \dots & W^{k^2} & \dots & W^{k(N-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & \dots & W^{(N-1)k} & \dots & W^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_0) \\ x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_k) \\ \vdots \\ x(t_{N-1}) \end{bmatrix}$$

หรือเขียนในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$[X(f_k)] = \frac{1}{N} [W^{kn}] [x(t_n)] \quad 3.19$$

จะเห็นได้ว่าตามสมการข้างบนถ้าต้องการคำนวณค่าในโดเมนความถี่จากข้อมูลซึ่งได้จากการสุ่มค่าในโดเมนเวลาจำนวน N คำนี้นั้นจะต้องทำการคูณค่าเชิงซ้อนถึง N^2 ครั้ง

แต่ละสมาชิกในเมทริก $[W^{kn}]$ นั้นแสดงเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งหมุนตามเข็มนาฬิกาที่มีมุมเฟส $2p\pi/N$ ($p=0, 1, 2, \dots, (N-1)$)

และ

$$W^{kn} = W^{(kn \bmod N)} \quad 3.20$$

โดย $kn \bmod N$ หมายถึง เศษจากการหาร kn ด้วย

ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มี $N=8$ คำนี้นั้น

$$W = e^{-j2\pi/8} = \cos \frac{\pi}{4} - j \sin \frac{\pi}{4} \quad 3.21$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} W^0 &= -W^4 = 1 \\ W^1 &= -W^5 = (1/\sqrt{2} - j1/\sqrt{2}) \\ W^2 &= -W^6 = -j \\ W^3 &= -W^7 = -(1/\sqrt{2} + j1/\sqrt{2}) \end{aligned} \quad 3.22$$

เราอาจมองว่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแต่ละตัวหมุนไปโดยมีมุมเฟส $\pm 0^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ และ $\pm 135^\circ$ ตามลำดับจะสังเกตได้ว่า W^4 มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นกรหมุนที่ครบรอบ ดังนั้นสำหรับ kn ซึ่งมากกว่า 8 เราหาค่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยดังกล่าวได้โดยลบจำนวนที่เต็มรอบออกจาก kn ตัวอย่างเช่น $k=5$

และ $n=6$ คำนี้นั้น $kn=30$ และ จะได้ $W^{30} = W^{(30) \bmod 8} = W^6 = j$

สำหรับ $N=8$ จะได้ $[W^{kn}]$ ดังนี้

| | | | | | | | |
|---|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|----|-----------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | W | -j | W ³ | -1 | -W | j | -W ³ |
| 1 | -j | -1 | j | 1 | -j | -1 | j |
| 1 | W ³ | 1 | W | -1 | -W ³ | -j | -W |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| 1 | -W | -j | -W ³ | -1 | W | j | W ³ |
| 1 | j | -1 | -j | 1 | j | -1 | -j |
| 1 | -W ³ | j | -W | -1 | W ³ | -j | W |

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า $[W^m]$ กรณี $N = 8$

จากสมการเมตริกจะเห็นชัดว่าส่วนดีซี (DC component : $X(f_0)$) ของสเปกตรัมความถี่ ได้จากการรวมค่าจากการสุ่มในโดเมนเวลาทุกค่า แล้วหาผลรวมคิ่งกล่าวด้วยจำนวนข้อมูลที่ได้อจากการสุ่มค่า ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการสุ่มในโดเมนเวลานั้นเอง

ในแถวถัดลงมาค่าจากการสุ่มแต่ละค่าจะถูกถ่วงน้ำหนักโดยเวกเตอร์ที่มีมุมต่างกันซึ่งขึ้นกับลำดับของแถว นั้น ๆ ดังนั้นสำหรับ $X(f)$ แต่ละเวกเตอร์ที่นำมาถ่วงน้ำหนักค่าจากการสุ่มจะมีมุมต่างกัน $-(1/N)2\pi$ และสำหรับ $X(f)$ แต่ละเวกเตอร์จะมีมุมต่างกัน $-(2/N)2\pi$

3.5 การแปลงฟูรีเยร์เร็ว (Fast Fourier Transform หรือ FFT)

โดยทั่วไปการคำนวณ DFT สำหรับสัญญาณเข้าที่ยาว N ลำดับนั้น คอมพิวเตอร์จะต้องทำการคูณจำนวนเชิงซ้อนถึง $N \times N$ ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก $N(N-1)$ ครั้ง ซึ่งโดยทั่วไปคอมพิวเตอร์จะทำการบวกได้ง่ายและเร็วกว่าการคูณมากคิ่งนั้นอาจกล่าวได้ว่า ความเร็วในการคำนวณ DFT ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งการคูณเป็นสำคัญ

เราจะกล่าวถึงวิธีการซึ่งสามารถลดจำนวนครั้งของการการคูณลงได้เหลือ $N \log_2 N$ ครั้ง หรือจำนวนคร้ดล ไปถึง $N / (\log_2 N)$ เท่า ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า การแปลงฟูรีเยร์เร็ว (Fast Fourier Transform หรือ FFT)

3.5.1 การแปลงฟูรีเยร์แบบฐานสอง (Radix 2 FFT)

3.5.1.1 หลักการเบื้องต้นของ FFT

เพื่อความสะดวกเราอาจละพจน์ $1/N$ ในการคำนวณ DFT ดังนั้นการแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วยสำหรับ ลำดับ $x(m)$ ที่ยาว N จุด ที่นิยามคือ

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot W^{mk} \quad 3.23$$

โดยที่ $k, m = 0, 1, \dots, N-1$ และจำนวนเชิงซ้อน $W = \exp(-j2\pi/N)$ และ $X(k)$ เป็นสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ตามลำดับ

เราสามารถเขียนสมการ (3.23) ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้เป็น

$$\{X\} = \{A\} \cdot \{x\} \quad 3.24a$$

โดยที่ $\{X\}$ และ $\{x\}$ เป็นเวกเตอร์แนวตั้ง (column vector) ที่ประกอบด้วยสมาชิก $X(k)$ และ $x(m)$ ตามลำดับจำนวน N ลำดับ และ $\{A\}$ เป็นเมทริกซ์จัตุรัส (square matrix) ขนาด $N \times N$ ที่มีสมาชิกเป็นจำนวนเชิงซ้อน W^{mk} เช่นถ้าพิจารณากรณีที่ $N = 4$ เราสามารถเขียนแยกออกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ x(3) \end{bmatrix} \quad 3.24b$$

แต่เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นคาบของ W คือ

$$W^{mk} = W^{[mk \bmod N]} \quad 3.25$$

สมการ (3.24b) อาจเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & W^0 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ x(3) \end{bmatrix} \quad 3.26$$



คุณสมบัติความเป็นคาบทำให้เราต้องแยกตัวประกอบของเมตริกซ์ ออกเป็นเมตริกซ์ย่อยหลายเมตริกซ์คู่กัน และ สมาชิกภายในเมตริกซ์ย่อยให้มีค่าเป็นศูนย์มากที่สุด วิธีการแยกตัวประกอบนี้จะไม่กระทำโดยตรงจาก แต่จะมีการสลับตำแหน่งหรือจัดกลุ่มของเมตริกซ์ด้วยวิธีการกลับมิต (bit reversal) และเมตริกซ์หลังจัดการสลับแฉแล้วนำมาแยกตัวประกอบอีกครั้ง

วิธีการแยกตัวประกอบอาจทำได้โดยวิธีการใช้ตัวเลขฐานสอง โดยการแทนดรรชนี k และ m ของสมการ (3.23) ด้วยเลขฐานสอง กรณีที่ ดรรชนี k และ m จะมีค่าได้เพียง 0,1,2, และ 3 เท่านั้น ดังนั้น

$$k = (k_p, k_o) \quad , \quad m = (m_p, m_o) \tag{3.27}$$

โดยที่ k_p, k_o, m_p และ m_o เป็นเลขโดดที่มีค่าแค่ 0 และ 1 เท่านั้น ดังนี้

$$k = 2k_p k_o \quad , \quad m = 2m_p m_o \tag{3.28}$$

แทนค่า และ ลงในสมการ (3.23)

$$X(k_p, k_o) = x(m_p, m_o) W^{2m_p + m_o} W^{(2k_p + k_o)m_o} \tag{3.29}$$

โดยคุณสมบัติความเป็นคาบของ W และ $W^{4mk_1} = 1$ ดังนั้นสมการ (3.29) ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} X(k_p, k_o) &= \sum_{m_o=0}^1 \left\{ \sum_{m_p=0}^1 x(m_p, m_o) W^{(2m_p k_o)} \right\} W^{(2k_p + k_o)m_o} \\ &= \sum_{m_o=0}^1 \{ x(k_o, m_o) W^{(2k_p + k_o)m_o} \} \end{aligned} \tag{3.30a}$$

โดยสมมติให้ตัวแปร เป็นการคำนวณระหว่างกลาง ผลของสมการ (3.30a) เขียนเป็นเมตริกซ์ใหม่ ๆ ได้เป็น

$$\begin{matrix} (k_1, k_0) \\ \begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(1,0) \\ x(0,1) \\ x(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^0 \end{bmatrix} \begin{matrix} (m_1, m_0) \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(0,1) \\ x(1,0) \\ x(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{3.30b}$$

ซึ่งมีผลกัทรระหว่างกลาง และ ผลกัทร เป็น

$$\begin{matrix} (k_0, k_0) \\ \begin{bmatrix} x_1(0,0) \\ x_1(0,1) \\ x_1(1,0) \\ x_1(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{matrix} (m_1, m_0) \\ \begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(0,1) \\ x(1,0) \\ x(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{3.31a}$$

และค่า DFT ของสัญญาณเป็น

$$\begin{matrix} (k_0, k_0) \\ \begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(1,0) \\ x(0,1) \\ x(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^0 \end{bmatrix} \begin{matrix} (m_1, m_0) \\ \begin{bmatrix} x_1(0,0) \\ x_1(0,1) \\ x_1(1,0) \\ x_1(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad 3.31b$$

จะเห็นได้ว่าจากผลการแยกตัวประกอบของ A ได้ว่า สมาชิกตามแนวอนของตัวประกอบเมตริกซ์ จะมีเพียง 2 ตัวเท่านั้นที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ และในสองตัวนี้จะมีสมาชิกหนึ่งตัวมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ในขณะที่อีกตัวจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งเราต้องการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง $N \log_2 N = 8$ ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก 8 ครั้ง ในขณะที่การคำนวณปกติใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อน 16 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อน 12 ครั้ง

เรายังสามารถลดจำนวนการคูณลงได้อีก จากการคำนวณสัญญาณระหว่างกลาง $x_1(0,0)$ และ $x_1(0,1)$ ซึ่ง

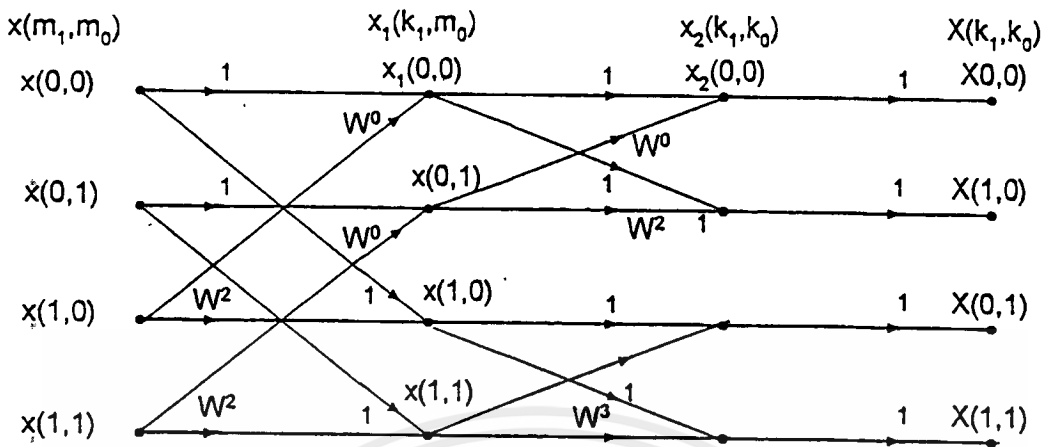
$$x_1(0,0) = x(0,0) + W^0 x(1,0) = x(0,0) + W^0 x(1,0)$$

3.32

และ
$$x_1(1,0) = x(0,0) + W^2 x(1,0) = x(0,0) - W^0 x(1,0)$$

เนื่องจากคุณสมบัติของจำนวนเชิงซ้อน $W^2 = -W^0$ ทำให้การคำนวณ $x_1(0,1)$ ต้องการการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ซึ่งทำได้โดยการคำนวณพจน์ $W^0 x(1,0)$ ก่อนแล้วนำไปบวกและลบกับพจน์ $x(0,0)$ เพื่อให้ได้ลำดับ $x_1(0,0)$ และ $x_1(1,0)$ ตามลำดับ

เราอาจแสดงวิธีการคำนวณ FFT โดยแสดงเป็นกราฟการไหล ดังรูป 3.2 โดยหัวลูกศรชี้ทิศทางการคำนวณ ส่วนอักษรกำกับเป็นค่าตัวคูณค่าของสัญญาณที่ต้นลูกศรนั้น และที่ บัพ หรือ ปม (Node) เป็นการรวมหรือบวกกันของสัญญาณ ส่วน $x_1(k_0, m_0)$ แทนการคำนวณระหว่างกลางและ $X(k_0, k_0)$ เป็นค่า DFT ของลำดับสัญญาณ



รูปที่ 3.2 กราฟการไหลแสดงถึงวิธีการคำนวณตามสมการ 3.31

3.5.1.2 ขั้นตอนการลดทอนทางเวลา

วิธีการที่เสนอมานี้ จะเป็นการจัดกลุ่มลำดับสัญญาณในโดเมนเวลา $x(m)$ ที่มีขนาด N จุด ออกเป็นสองอันดับสัญญาณที่มีความยาว $N/2$ จุดเท่ากัน โดยเรียกลำดับสัญญาณคู่และลำดับสัญญาณคี่ โดยที่ลำดับสัญญาณคู่เกิดจากการเอาลำดับสัญญาณในตำแหน่งเลขคู่มาเรียงกัน ที่เหลือเป็นลำดับสัญญาณคี่ ดังนั้นถ้าเราให้ $x_e(m)$ เป็นลำดับคู่ และ ลำดับคี่เป็น $x_o(m)$ เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} x_e(m) &= x(2m) \quad ; \quad m = 0, 1, \dots, (N/2) - 1 \\ x_o(m) &= x(2m + 1) \quad ; \quad m = 0, 1, \dots, (N/2) - 1 \end{aligned} \tag{3.33}$$

และถ้าเราให้ W_N แทน W ของลำดับ ที่ยาว N จุด ทำให้การคำนวณการแปลง DFT ของลำดับสัญญาณ $x(m)$ ที่ยาว N จุดเขียนได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{m=0}^{N-1} x_e(m) (W_N)^{km} + \sum_{m=0}^{N-1} x_o(m) (W_N)^{km} \\ &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x(2m) (W_N)^{2mk} + \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x(2m+1) (W_N)^{(2m+1)k} \end{aligned} \tag{3.34}$$

โดยที่ $(W_N)^2 = W_{N/2}$ ซึ่งหมายถึงค่า W ของลำดับซึ่งยาว $N/2$ ดังนั้นจะเขียนใหม่เป็น

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{m=0}^{N/2-1} x_e(m) (W_{N/2})^{km} + (W_N)^k \sum_{m=0}^{N/2-1} x_o(m) (W_{N/2})^{km} \\ X(k) &= X_1(k) + (W_N)^k X_2(k) \end{aligned} \tag{3.35}$$

โดยที่ $X_1(k)$ และ $X_2(k)$ ผลการแปลง DFT ขนาด $N/2$ จุดของลำดับ $x_e(m)$ และ $x_o(m)$ ตามลำดับ สมการที่ (3.35) แสดงให้เห็นว่าการคำนวณ DFT ขนาด N จุดนั้นสามารถแบ่งการคำนวณย่อยออกเป็น การคำนวณ DFT ขนาด $N/2$ จุด สองอันดับได้ และข้อสำคัญคือ จะทำให้การคูณจำนวนเชิงซ้อนลดลงไปประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยหลักการเดียวกันนี้ทำให้เรายังสามารถแบ่งทอนลำดับ $x_e(m)$ และ $x_o(m)$ ออกเป็นลำดับคู่และลำดับคี่ได้อีก จนในที่สุดเหลือเพียงลำดับขนาด 2 จุด หรืออาจกล่าวได้ว่า การคำนวณ DFT ขนาด N จุด ทำได้โดยการแปลง DFT ขนาด 2 จุด จำนวน $N/2$ ภาคด้วยกัน ข้อสังเกตคือการขอเพื่อแบ่งลำดับ $x(n)$ ออกเป็นที่ละครึ่งจนเหลือการคำนวณ DFT ขนาด 2 จุด นี้ สำหรับสัญญาณ N ลำดับ จะทำการแบ่งได้ $\log_2 N$ ครั้ง (ดังรูป 3.4)

การนำ DFT ขนาด 2 จุด จำนวน $N/2$ ภาคนี้มาประกอบกันเพื่อให้ได้การคำนวณ DFT ขนาด N จุดนั้น จะต้องมีหลักเกณฑ์ในการทำเพื่อไม่ให้ค่าที่ได้ผิดพลาดไป ดังนั้นเราต้องทำการนิยามสมการ (3.35) สำหรับ $k > N/2$ ด้วยซึ่งทำได้โดยการเขียน

$$\begin{aligned} X(k) &= X_1(k) + (W_N)^k X_2(k) & ; 0 \leq k \leq (N/2)-1 & \quad 3.36 \\ &= X_1(k - N/2) + (W_N)^k X_2(k - N/2) & ; N/2 \leq k \leq N-1 \end{aligned}$$

พจน์ $(W_N)^k$ ในสมการ 3.36 เรียกว่าตัวประกอบหมุน (twiddle factor) ซึ่งมีความสำคัญในการนำ DFT ขนาด 2 จุด หรือ DFT ขนาด $N/2$ จุดมาประกอบกันเป็น DFT ขนาด N จุด ได้เหมือนเดิม และจากความสัมพันธ์ $(W_N)^{k-N/2} = -(W_N)^k$ เราจะได้

$$X(k) = X_1(k) + (W_N)^k X_2(k) \quad ; 0 \leq k \leq (N/2)-1 \quad 3.37a$$

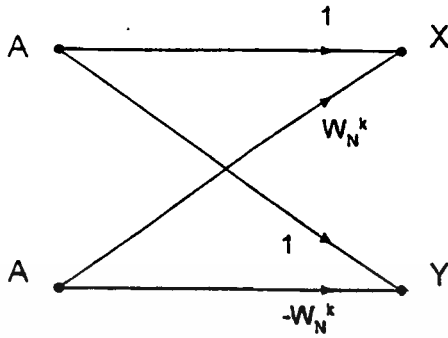
$$= X_1(k - N/2) - (W_N)^{k-N/2} X_2(k - N/2) \quad ; N/2 \leq k \leq N-1 \quad 3.38b$$

ตามสมการ 3.37 ทำให้เราทราบว่าในการคำนวณหา DFT ของลำดับคู่หนึ่ง จะประกอบด้วยลำดับ $X(k)$ ในสมการ 3.37a และลำดับ $X(k)$ ในสมการ 3.37b ซึ่งจะห่างออกไปจากลำดับ $X(k)$ ในสมการ 3.37a ไป $N/2$ จุดนั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น จากผลอันนี้เราจะนำไปสร้างหน่วยความจำที่มีชื่อว่าหน่วย ความจำผีเสื้อ (butterfly unit) โดยหน่วยคำนวณนี้ (อาจอยู่ในรูปแบบของวงจรหรือ โปรแกรม) มีข้อมูลเข้าสองข้อมูลคือ A และ B และให้ข้อมูลออกเป็น X และ Y เป็น

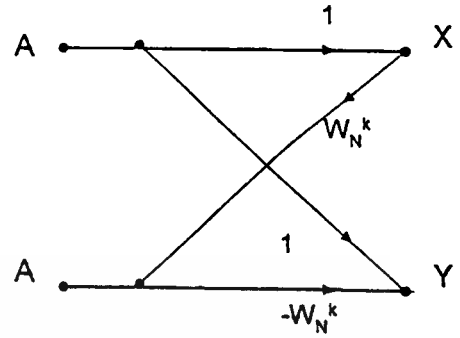
$$X = A + (W_N)^k \cdot B$$

$$Y = A - (W_N)^k \cdot B$$

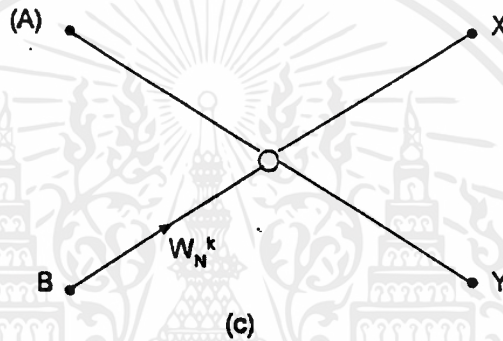
3.38



(a)



(b)

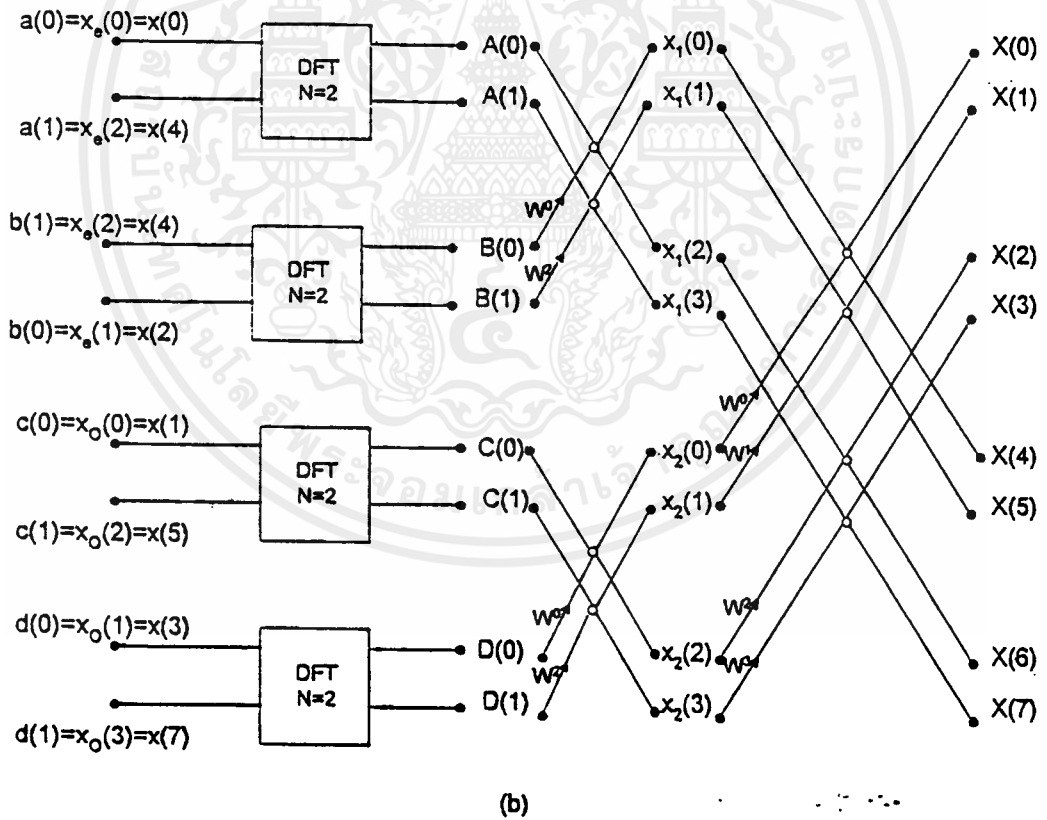
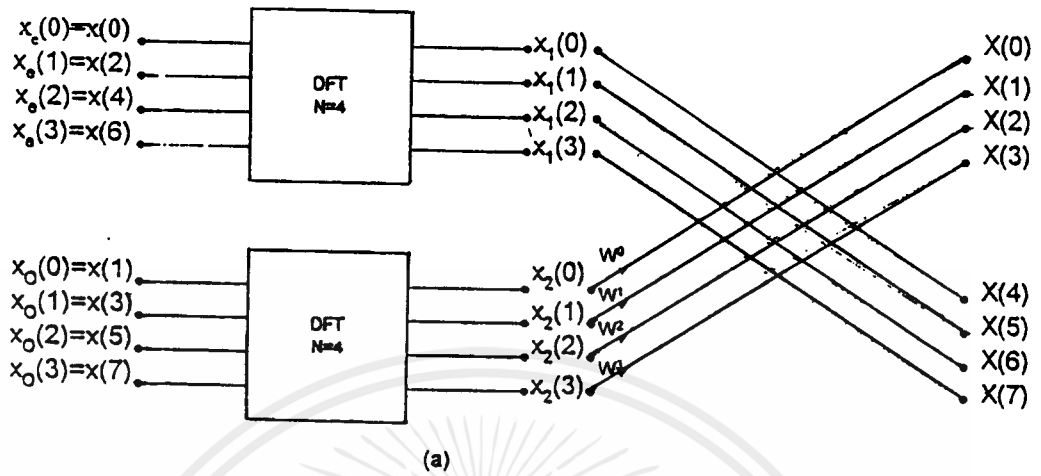


(c)

รูปที่ 3.3 หน่วยძისეისของการคำนวณตามขั้นตอนวิธีลดทอนทางเวลา

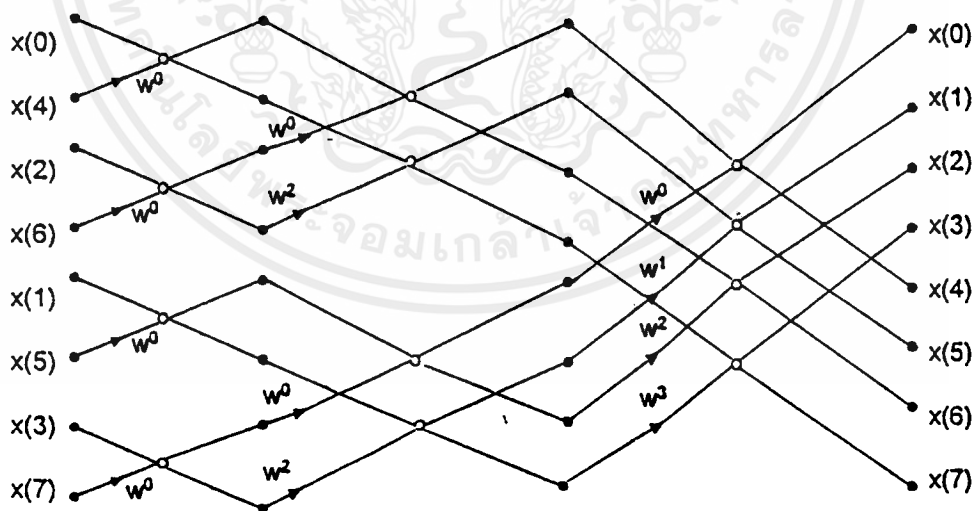
โดยที่การทำงานของหน่วยძისეის แทนได้ด้วยกราฟการไหล ดังแสดงไว้ในรูป 3.3(a) 3.3(b) หรือ 3.3(c)

โดยในรูปที่ 3.4 แสดงการคำนวณ DFT แบบ 8 จุด



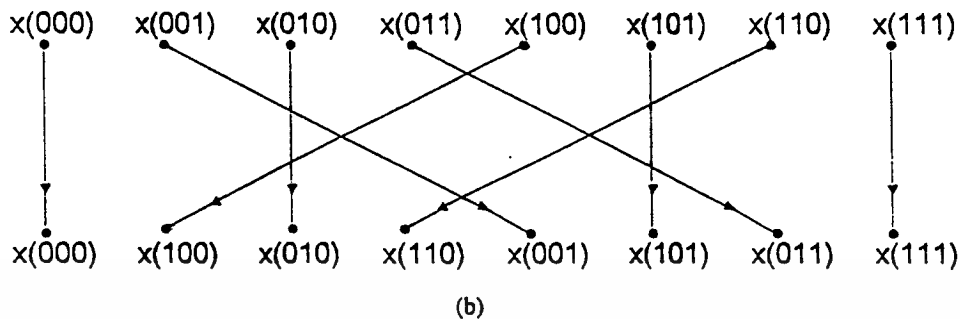
รูปที่ 3.4 (a) และ (b) แสดงขั้นตอนแบบ การลดทอนทางเวลา สำหรับ DFT แบบ 8 จุด

ตามรูป 3.5(a) ลำดับสัญญาณเข้า $x(n)$ ไม่ได้ถูกจัดเรียงอย่างต่อเนื่อง หรือ ตามธรรมชาติแต่ไม่ถูก สลับตำแหน่งกันอย่างมีหลักเกณฑ์ คือการสลับตำแหน่ง หรือสลับอันดับ กันนี้จะเป็นไปตามวิธีการที่เรียกว่า การผันกลับบิต นั่นคือถ้าเราแทนครรรชนี n ของลำดับ $x(n)$ ด้วยเลขฐานสองโดยที่จำนวนบิตต้องเพียงพอที่จะแทนค่า N ได้ เช่น ในกรณี $N=8$ ที่ต้องแทนกันด้วยเลขฐานสอง 3 บิต จากนั้นการจัดลำดับ $x(n)$ ใหม่จะได้จากการผันกลับบิตของเลขฐานสองที่แทนครรรชนี n ดังรูป 3.5(b) คือ $x(001)$ จะถูกแทนด้วย $x(100)$ และ $x(110)$ และ $x(110)$ ถูกแทนด้วย $x(011x)$ เป็นต้น เนื่องจากครรรชนี n เป็นครรรชนีใน โดเมนเวลา และวิธีการของ FFT แบบนี้เป็นการลดทอนเวลาทางการคำนวณโดยการ สับ หรือ ตัดทอน ลำดับในโดเมนเวลา หรือ $x(n)$ ออกเป็นกลุ่มย่อยโดยแต่ละกลุ่มประกอบด้วยลำดับ $x(n)$ เพียงสองลำดับที่เป็น ปมคู่ กัน การจัดกลุ่มนี้คล้ายกับเป็นการสุ่มตัวอย่างลำดับเดิมอีกครั้งหนึ่ง ด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่างที่ต่ำกว่า และถ้าหากเราถือว่าแต่ละกลุ่มข้อมูลใหม่ที่จัดทำขึ้นมา ต่างเป็นลำดับ ข้อมูลชุดหนึ่งแล้ว ก็เท่ากับว่าเราได้ตัดทอนลำดับในโดเมนเวลาลงไปเป็นกลุ่มลำดับข้อมูลย่อยหลายลำดับ ดังนั้นจึงเรียกรูปแบบนี้ว่า การลดทอนทวนเวลา ซึ่งแสดงแผนภาพลำดับวิธีการของ การลดทอนทวนเวลา ได้ดังรูป 3.5.1.5 โดยที่ DFT ขนาด N จุดเดิมถูกแบ่งออกเป็น DFT ขนาด $N/2$ จุดจำนวน 2 ภาคนำมาวมกันโดยใช้ตัวประกอบการหมุน และลำดับนี้จะทำจนกระทั่งผลลำดับสุดท้ายเป็นการแปลง DFT ขนาด 2 จุด โดยที่การนำเอา DFT ขนาด $N/2$ จุดมาประกอบกัน มีวิธีการที่ขึ้นอยู่กับวิธีการจัดเรียงตัวของตัวประกอบการหมุน



(a)

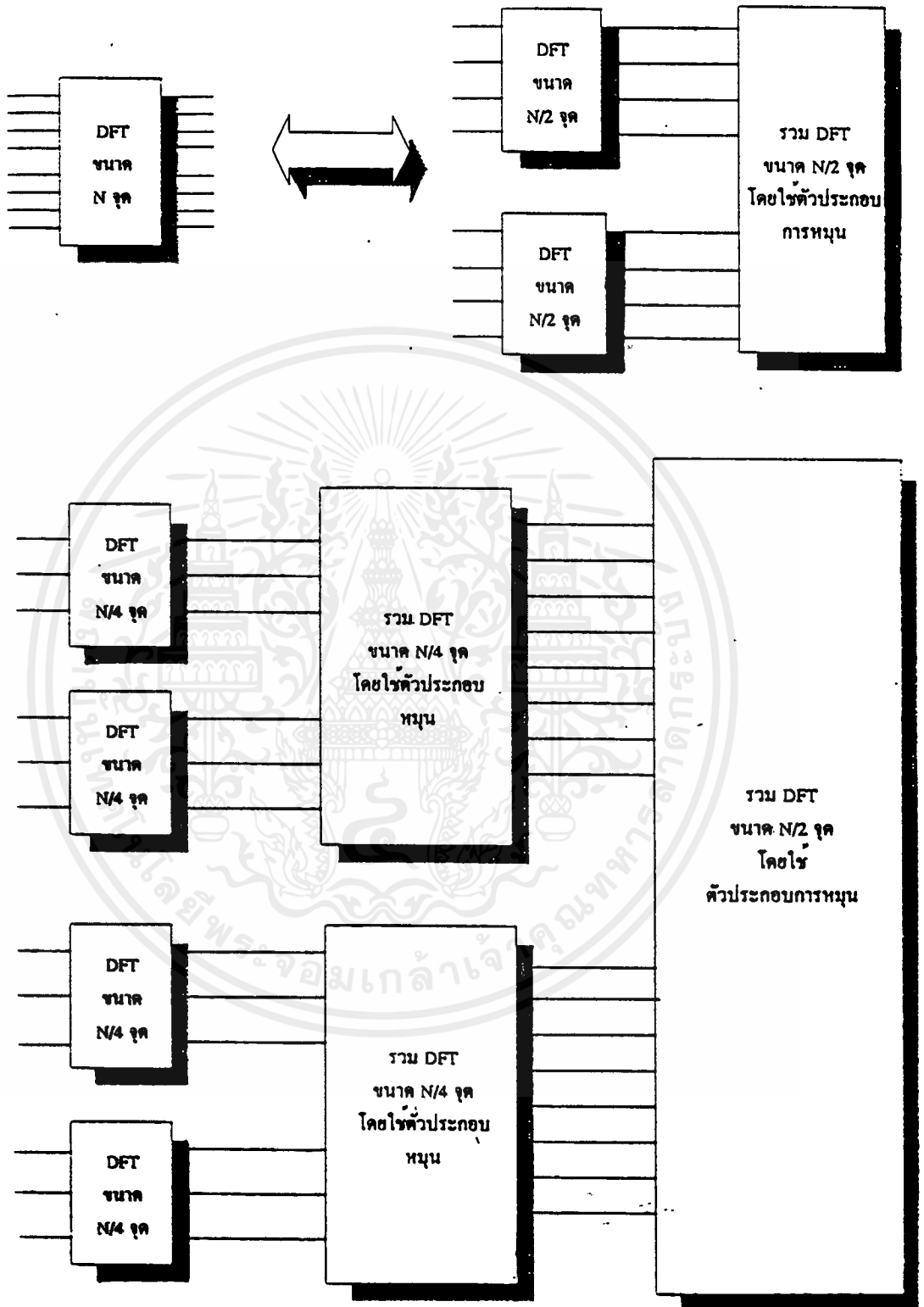
รูปที่ 3.5(a) กราฟการไหลสัญญาณแสดงการคำนวณตามรูป 3.4



รูปที่ 3.5 (b) แสดงการสลับตำแหน่งของลำดับ $x(n)$ ด้วยการผันกลับบิต

3.5.1.3 การลดทอนทางเวลาโดยวิธีการซ้ำที่

คุณสมบัติที่เป็นข้อดีบางประการของการแปลงฟูรีเยร์ ตามรูป 3.5(a) โดยทั่วไปแล้ว อาจกล่าวได้ว่าการคำนวณการแปลง DFT นั้นแท้จริงแล้วก็คือ การนำลำดับจำนวนเชิงซ้อนที่มีอยู่ N ลำดับ มาทำการแปลงเป็นจำนวนเชิงซ้อนอีกกลุ่มหนึ่งที่มีอยู่ N ลำดับเช่นกัน โดยการใช้ FFT การแปลงเช่นนี้จะกระทำ $\log_2 N$ ขั้นตอนด้วยกัน ดังนั้นตามรูป 3.5(a) ซึ่ง $N=8$ ควรต้องมีหน่วยความจำ ($\log_2 N$) หรือ 3 แถวลำดับ (array) ด้วยกันสำหรับเก็บข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณ โดยที่ แถวลำดับแรกไว้เก็บลำดับข้อมูล $x(n)$ สองแถวลำดับ $x_1(k)$ และแถวลำดับสุดท้ายสำหรับผลลัพธ์ $X(k)$ โดยการคำนวณจะประกอบด้วยหน่วยสี่เหลี่ยม ซึ่งลักษณะการคำนวณของหน่วยสี่เหลี่ยมนี้ หากเรามีหน่วยความจำต่างหากไว้สำหรับเก็บค่าผลคูณของจำนวนเชิงซ้อน $(W_N)^k$ B ผลลัพธ์ X กับ Y ที่คำนวณสามารถเก็บแทนที่ไว้ในหน่วยความจำที่เก็บลำดับข้อมูลเข้า A และ B ได้ (ดังรูป 3.3) โดยลักษณะการทำเช่นนี้จะเห็นว่า ตามรูป 3.5(a) ผลลัพธ์การคำนวณทางขวามือสามารถบรรจุแทนที่ในหน่วยความจำทางด้านซ้ายมือ ได้โดยไม่มีผลต่อการคำนวณส่วนอื่น ๆ ซึ่งเรียกว่าเป็น การคำนวณแบบซ้ำที่ (in place) ซึ่งมีข้อดีคือใช้หน่วยความจำเพียงหนึ่งแถวลำดับ หรือต้องการหน่วยความจำสำหรับเก็บจำนวนเชิงซ้อนเพียง $N+1$ ค่าเท่านั้น วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับข้อมูลยาวมาก โดยการคำนวณจะไม่เปลืองเนื้อที่หน่วยความจำ ข้อดีอีกประการคือ ตัวประกอบหมุน $(W_N)^k$ นั้นจะถูกเรียงอย่างเป็นลำดับคือจากกำลังน้อยไปสู่กำลังมาก จึงทำให้การเขียนโปรแกรม หรือสร้างวงจรทำได้ง่ายกว่า แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ว่าลำดับ $x(n)$ จะต้องมีการสลับตำแหน่งกันตาม วิธีการผันกลับบิต จึงต้องมีโปรแกรมหรือวงจรเพิ่มเติม



รูปที่ 3.6 ภาพรวมแสดงขั้นตอนวิธีการ DFT ขนาด N จุด แบบลดทอนทางเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.4 การแปลงฟูรีเยร์ชนิดลดทอนทางความถี่

(Decimation-in-Frequency หรือ DIF)

ลำดับการคำนวณ FFT ซึ่งใช้กันมากและประยุกต์ใช้ในโครงสร้างนี้คือ การลดทอนทางความถี่ ซึ่งมีหลักการคล้ายคลึงกับ การลดทอนทางเวลา โดยที่การลดทอนทางความถี่จะแบ่งลำดับโดเมนเวลา $x(m)$ ออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน โดยการแบ่งครึ่งซึ่งทำได้โดย ถ้าให้ $x_E(m)$ และ $x_O(m)$ แทนลำดับสัญญาณที่ได้จากการแบ่งครึ่งนี้

$$\begin{aligned}x_E(m) &= x(m) && ; m=0,1,\dots,(N/2) - 1 \\x_O(m) &= x(m+N/2) && ; m=0,1,\dots,(N/2) - 1\end{aligned}\quad 3.39$$

เพราะฉะนั้นการคำนวณ DFT ขนาด จุด ของ $x(n)$ สามารถเขียนแยกได้สองส่วนคือ

$$\begin{aligned}X(k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x(m)(W_N)^{mk} + \sum_{m=N/2}^{N-1} x(m)(W_N)^{mk} \\&= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_E(m)(W_N)^{mk} + \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_O(m)(W_N)^{(m+N/2)k} \\X(k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_E(m)(W_N)^{mk} + (W_N)^{Nk/2} \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_O(m)(W_N)^{mk}\end{aligned}\quad 3.40$$

เพราะว่าพจน์ $(W_N)^{Nk/2} = \exp(-j\pi k) = (-1)^k$ จึงเขียนได้เป็น

$$X(k) = \sum_{m=0}^{(N/2)-1} [x_E(m) + (-1)^k \cdot x_O(m + N/2)](W_N)^{mk}\quad 3.41$$

และถ้าเราแยกกรณี k ออกเป็นเลขคู่และคี่ เพราะฉะนั้น $X(2k)$ และ $X(2k+1)$ จะแทน DFT จะแทนส่วนของเลขคู่และเลขคี่ตามลำดับหรือ

$$\begin{aligned}X(2k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} [x_E(m) + x_O(m)](W_N)^{2mk} \\&= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} f(m)(W_{N/2})^{mk}\end{aligned}\quad 3.42$$

และ

$$\begin{aligned} X(2k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} [x_E(m) + x_O(m)] (W_N)^{2mk} \\ &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} f(m) (W_{N/2})^{mk} \end{aligned} \quad 3.43$$

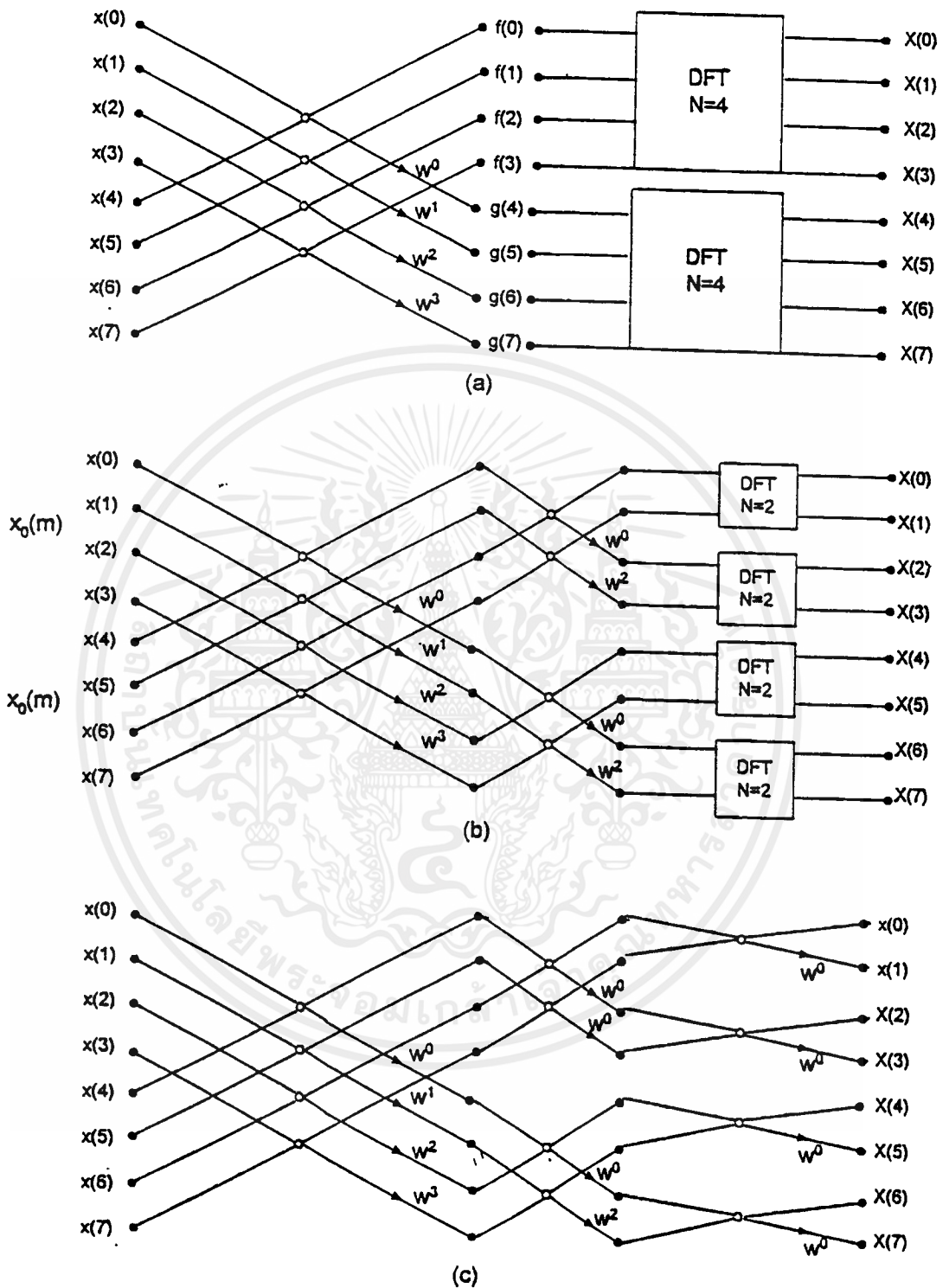
จากผลของ (3.42) และ (3.43) แสดงว่าการคำนวณ DFT ขนาด N จุด ด้วยวิธีนี้จะทำได้โดย ในเบื้องแรกจากลำดับ $x(m)$ เราทำการแบ่งครึ่งออกเป็น 2 ลำดับ ดังสมการ (3.39) แล้วนำมาสร้างเป็นลำดับอันใหม่ที่ยาว $N/2$ จุด 2 ลำดับ โดยสมมติให้ลำดับใหม่นี้ชื่อ $f(m)$ และ $g(m)$ ลำดับคู่นี้ สามารถสร้างได้โดยใช้สมการ

$$\begin{aligned} f(m) &= x_E(m) + x_O(m) \quad ; m=0, 1, \dots, (M/2) - 1 \\ g(m) &= [x_E(m) - x_O(m)] \cdot (W_N)^{mk} \end{aligned} \quad 3.44$$

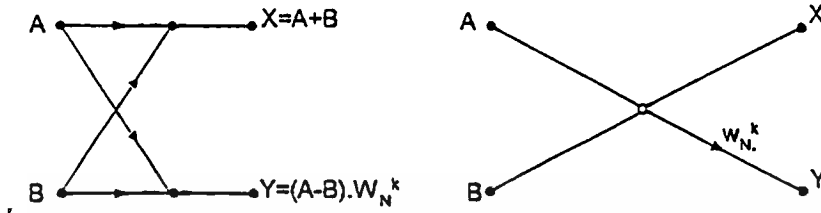
และจากลำดับยาว $N/2$ จุดในสมการ (3.44) เราก็นำไปคำนวณหา DFT ขนาด $N/2$ จุด โดยใช้ (3.42) และ (3.43) เพราะฉะนั้น โดยรวมแล้วจะเห็นว่า การคำนวณ DFT ขนาด N จุด ได้ถูกแบ่งเป็นการคำนวณ DFT ขนาด $N/2$ จุดสองภาคด้วยกัน

จะเห็นว่าเหมือนกับในการลดทอนทางเวลา การแบ่งการคำนวณย่อยออกเป็น DFT ขนาด $N/2$ จุดนี้สามารถแบ่งย่อยออกไปได้เรื่อยๆ จนในที่สุดเหลือการคำนวณขนาด 2 จุด ตัวอย่างที่แสดงการคำนวณ โดยใช้กราฟการไหลกรณี $N=8$ แสดงไว้ในรูป 3.7 โดยในรูปแสดงการแบ่งลำดับย่อยออกตามลำดับนั้น จนเหลือการคำนวณ DFT ขนาด 2 จุด และการแบ่งย่อยทำได้ 3 ครั้ง หรือ $\log_2 8$ และจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อนจะประมาณ $N \log_2 N$ เช่นเดียวกัน

ข้อแตกต่างระหว่างสองวิธีขั้นตอนการคำนวณทั้งสองวิธีคือ ประการแรก การลดทอนทางเวลา $x(n)$ จะเรียงตามธรรมชาติ และ $X(k)$ เรียงตามธรรมชาติ ส่วนการลดทอนทางความถี่จะตรงข้ามคือ $x(n)$ จะเรียงตามธรรมชาติ และ $X(k)$ จะถูกเรียงสลับแบบผันกลับบิต ประการที่สองหน่วยสี่เหลี่ยมของการลดทอนทางความถี่ต่างไปจากการลดทอนทางเวลาคือเพราะได้จากการเอาลำดับ $x_E(m)$ และ $x_O(m)$ มาบวกและลบกันก่อนแล้วจึงทำการคูณด้วยจำนวนเชิงซ้อน $(W_N)^k$ หน่วยคำนวณสี่เหลี่ยมของการลดทอนทางความถี่ แสดงดังรูป 3.8



รูปที่ 3.7 แสดงลำดับขั้นตอนวิธีการของ FFT ชนิดการลดทอนทางความถี่



รูปที่ 3.8 แสดงการคำนวณของ หน่วยสี่เหลี่ยม ของขั้นตอนวิธีชนิดลดทอนทางความถี่



บทที่ 4

หน่วยลดทอนสัญญาณ

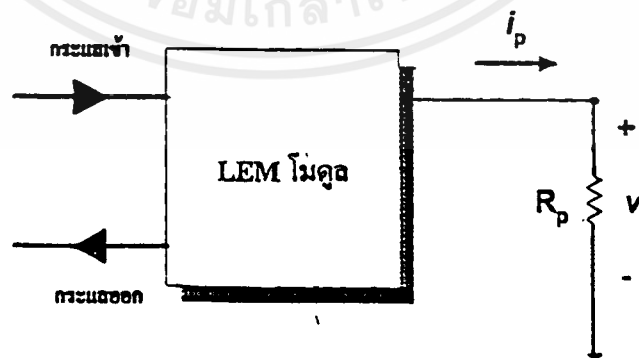
4.1 บทนำ

ข้อสำคัญประการหนึ่งในการวัดสัญญาณฮาร์มอนิกคือเราไม่สามารถวัดขนาดและรูปร่างสัญญาณเข้ามาคำนวณขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกได้โดยตรง เนื่องจากจะต้องนำรูปคลื่นกระแสมาทำการคำนวณโดยอาศัย การประมวลผลเชิงตัวเลข (DSP ; Digital Signal Processing) ผ่านการประมวลผล TMS320C26 ซึ่งก่อนทำการประมวลผลลักษณะรูปคลื่นซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก (Analog) จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลโดย TLC32040 ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งอยู่ในการ์ด DSP อยู่แล้ว สัญญาณอนาล็อกนี้จะเป็นสัญญาณที่อยู่ในช่วง ± 3 โวลต์ ดังนั้น จึงจะต้องลดทอนสัญญาณเข้าอยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไม่เกิน ± 3 โวลต์ โดยที่หลังการลดทอนสัญญาณลักษณะรูปคลื่น (wave form) ต้องมีผิดเพี้ยน (distortion) น้อยที่สุด

โดยความจำเป็นอันนี้จึงเลือกใช้ LEM โมดูลซึ่งเป็นตัวแปลงกระแสโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall effect) โดยการทำงานจะคล้ายกับหม้อแปลงกระแสโดยทั่วไปคือให้กระแสออกทางด้านทุติยภูมิแต่มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่า

4.2 การแปลงสัญญาณกระแสให้เป็นสัญญาณแรงดัน

กระแสที่ออกจาก LEM โมดูลจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันค่าไม่เกิน ± 3 โวลต์ โดยให้กระแสผ่านความต้านทานค่าคงที่ค่าหนึ่งแล้วนำแรงดันตกคร่อมมาใช้



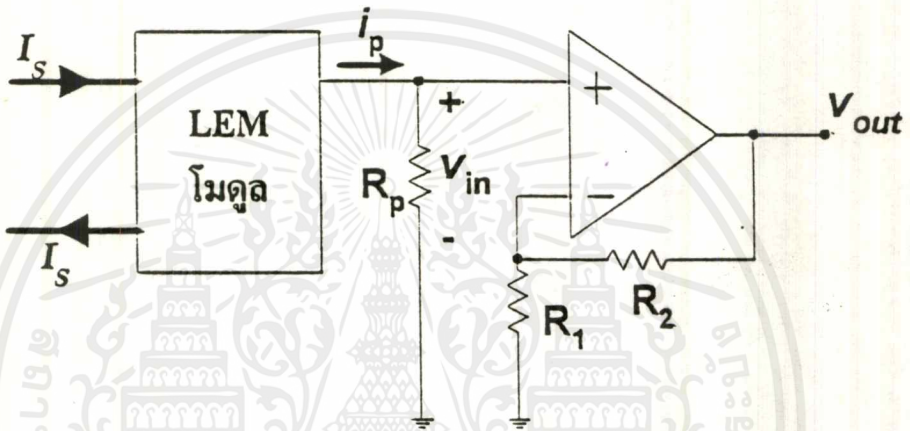
รูปที่ 4.1 แสดงการแปลงสัญญาณกระแสจาก LEM โมดูลให้เป็นสัญญาณแรงดันซึ่งแรงดันตกคร่อม R_p หาได้จาก

$$v = i_p R_p$$

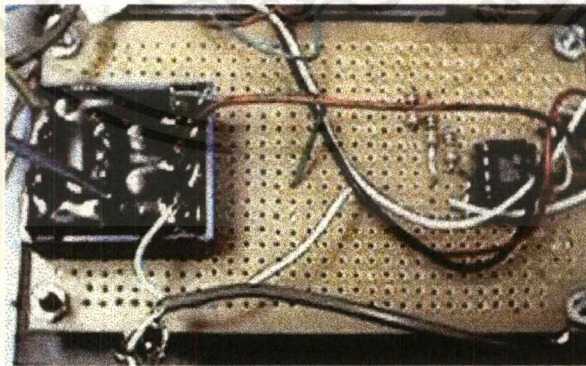
4.1

แต่อย่างไรก็ตามการนำแรงดันตกคร่อม R_p ป้อนการ์ด DSP โดยตรงนั้นอาจมีผลให้การวัดผิดเพี้ยนได้เนื่องจากการคั้งกระแสของการ์ด DSP (ถึงแม้จะมีค่าน้อยแต่สามารถหลีกเลี่ยงได้)

ดังนั้นจะใช้วงจร นอน-อินเวอร์ตติง (non-inverting) มาขึ้นกลางโดยใช้ออปแอมป์ LF351 ซึ่งเป็นออปแอมป์ที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ได้สูง (4 Mhz) ซึ่งใช้ได้ในช่วงการใช้งานสำหรับสัญญาณในการวัดสัญญาณฮาร์มอนิกไม่เกินลำดับที่ 35 คือ ที่ความถี่ $35 \times 50 = 1750$ Hz หรือ 1.75 Khz



รูปที่ 4.2 แสดงการใช้วงจร นอน อินเวอร์ตติง (non-inverting) มาขึ้นกลางระหว่างสัญญาณแรงดันจาก LEM โมดูล กับ สัญญาณเข้า การ์ด DSP



รูปที่ 4.3 ภาพแสดง LEM โมดูลที่ต่อเข้ากับนอน-อินเวอร์ตติง

จากวงจรรูปที่ 4.2 จะได้

$$v_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_{in} \quad 4.2$$

โดยเลือกใช้ $R_1 = R_2 = 5 \text{ K}\Omega$

เราจะได้ $v_{out} = 2 \cdot v_{in}$ และเนื่องจาก v_{out} เป็นสัญญาณที่จะต้องป้อนเข้าการ์ด DSP ซึ่งจำกัดขนาดแรงดันสูงสุดไม่เกิน ± 3 โวลต์ ดังนั้น v_{in} ต้องมีขนาดไม่เกิน ± 1.5 โวลต์ เนื่องจาก LEM โมดูลที่ใช้เป็นแบบ LA25 NP ซึ่งทนกระแสได้ 25 แอมแปร์ ดังนั้นจะทนกระแสสูงสุดได้ $25 \times 2 = 35.4$ แอมแปร์ หรือประมาณ 36 แอมแปร์

โดยเลือกใช้อัตราส่วน (turn ratio) เป็น 1000/1 ดังนั้น

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{36}{1000} \text{ A} \\ &= 36 \text{ mA} \end{aligned}$$

จากสมการ (4.1) จะสามารถคำนวณ R_p ได้

แต่เนื่องจาก $v = v_{in}$ ดังนั้น

$$R_p = \frac{v}{i_p} \Omega \quad 4.3$$

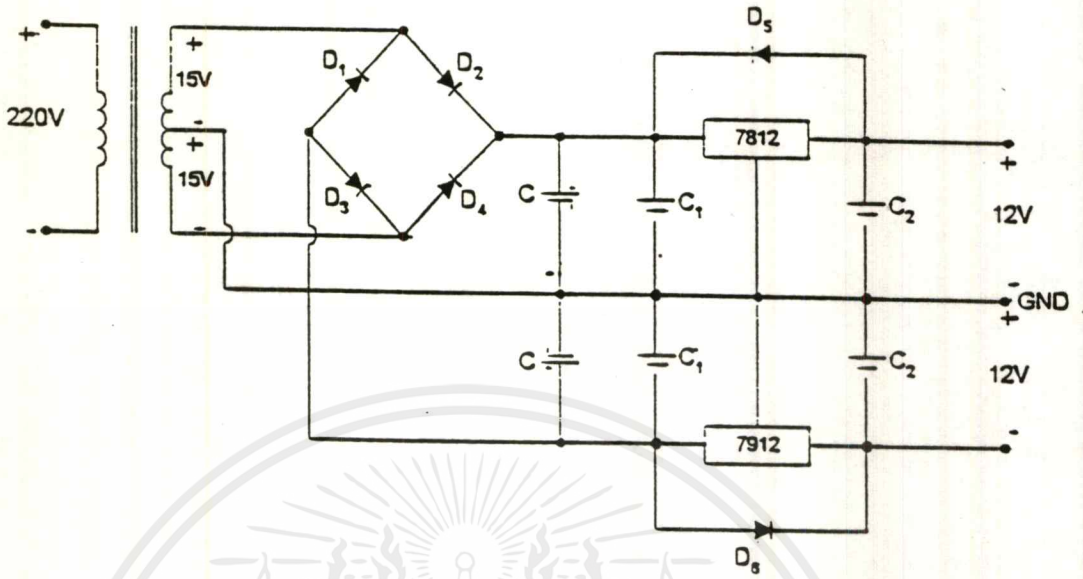
$$\text{หาค่า } R_p = 1.5/36 \times 10^3 \Omega$$

$$= 41.7 \Omega$$

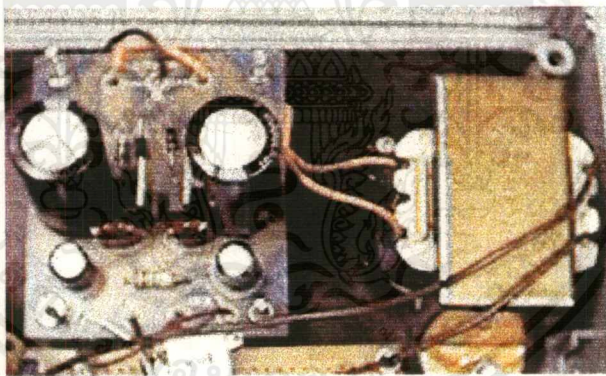
ดังนั้นเลือกใช้ $R_p = 40 \Omega$

4.3 วงจรสร้างไฟเลี้ยงออปแอมป์ และ LEM โมดูล ± 12 โวลต์

โดยการจ่ายไฟสลับ 220 โวลต์ ผ่านหม้อแปลง ผ่านวงจรบริดจ์เรกติฟายแบบเต็มคลื่นผ่านฟิลเตอร์ แล้วทำให้เรียบด้วยไอซีเรกกูเลตคังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 วงจรจ่ายไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์



รูปที่ 4.5 แสดงภาพภาคจ่ายไฟของเครื่องลดทอนสัญญาณ

ใช้ไอซีเรกกูเลต MC7812 และ MC7912

4.3.1 ขนาดของหม้อแปลง

คำนวณ V_{ac} ที่ได้จาก

$$V_{ac} = \left(\frac{V_o + V_{reg} + V_{rect} + V_{ripple}}{0.92} \right) \times \frac{V_{norm}}{V_{min}} \times \frac{1}{2} \tag{4.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_o = ค่าแรงดันไฟตรงที่ผ่านการเรกกูเลตแล้ว

V_{reg} = แรงดันที่ตกคร่อมไอซีเรกกูเลต ซึ่งมีค่าประมาณ 3 โวลต์ สำหรับไอซีเรกกูเลตเบอร์ 78XX และ 79XX

V_{rect} = ค่าแรงดันคัทอิน (cutin voltage) ที่ตกคร่อมไดโอด ซึ่งประมาณ 1.1 โวลต์

V_{ripple} = ค่าแรงดันที่ไม่เรียบสูงสุด (peak ripple voltage) ที่ผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ (C filter) ซึ่งมีค่าประมาณน้อยกว่า 1 โวลต์

V_{Nom} = ค่าแรงดันไฟสลับที่จ่ายให้วงจรในภาวะปกติ ใช้ 220 โวลต์

V_{min} = ค่าแรงดันไฟสลับที่จ่ายวงจรในภาวะผิดปกติ เช่น ไฟตก เป็น 200 โวลต์

0.92 = ค่าประสิทธิภาพการเรกติฟาย (Rectifier efficiency)

ดังนั้นจะได้

$$V_{ac} = \left(\frac{12 + 3 + 1.1 + 0.5}{0.92} \right) \times \frac{220}{200} \times \frac{1}{2}$$

$$= 4.0 \text{ V}$$

ใช้ V_{ac} 15 โวลต์ในการใช้งาน

เนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้เป็นแบบมีแท็ปกลาง (center tap) ดังนั้นพิกัดหม้อแปลงที่ใช้คือ 220/30 โวลต์

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟตรง } I_{dc} \text{ ที่ต้องใช้} &= \text{กระแสจ่ายออปแอมป์} + \text{กระแสจ่าย LEM โมดูล} \\ &= 1.8 \text{ mA} + 25 \text{ mA} \\ &= 26.8 \text{ mA} \end{aligned}$$

เนื่องจากเป็นวงจรบริดจ์เรกติฟายแบบเต็มคลื่นดังนั้น

$$I_{ac} = 1.65 I_{dc} \quad 4.5$$

$$\text{ดังนั้นจะคำนวณ } I_{ac} = 1.65 \times 26.8 = 44.2 \text{ mA}$$

$$\text{เพื่อค่าไว้เป็น } I_{ac} = 100 \text{ mA}$$

$$\text{ดังนั้นขนาดหม้อแปลงเป็น } 0.1 \times 30 = 3 \text{ VA}$$

ดังนั้นใช้หม้อแปลงขนาดใหญ่กว่า 3 VA

4.3.2 ขนาดตัวเก็บประจุ

ค่า C_1 และ C_2 สำหรับ 7812 และ 9712 ดูได้จากเอกสารประกอบ (data sheet) ใช้

$$C1 = 0.22 \mu\text{F} \text{ และ } C2 = 0.1 \mu\text{F}$$

สำหรับค่าตัวเก็บประจุสำหรับฟิลเตอร์คำนวณได้จาก

$$C = \frac{I_{dc}}{2fV_{r(p-p)}} \quad 4.6$$

เมื่อ $f = 50 \text{ Hz}$

หรืออาจคำนวณได้จาก

$$C = \frac{I_{dc}}{2\sqrt{3} f R_L r} \quad 4.7$$

เมื่อ $f = 100 \text{ Hz}$ $r =$ ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่เรียบ (percent ripple)

และ
$$R_L = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad 4.3$$

ดังนั้นคำนวณหาค่า C ที่ใช้ได้อย่างน้อยเท่ากับ $\frac{1}{2\sqrt{3} \times 100 \times (\frac{12}{0.027}) \times 0.01} = 650 \mu\text{F}$

ในที่นี้ใช้ $C = 2000 \mu\text{F}$

4.3.3 ขนาดไดโอดที่ใช้

ในวงจรเรกติฟายแบบเต็มคลื่น ไดโอดต้องทนแรงดันด้านกลับสูงสุด (PIV: Peak Invert Voltage) ได้อย่างน้อย 2 เท่าของค่าสูงสุดของแรงดันด้านทุติยภูมิเทียบกับแท่งปกกลาง คือ

$PIV > 2V_m$ แต่เพื่อความปลอดภัยใช้อย่างน้อย 3 เท่า $PIV > 3V_m$

เนื่องจากแรงดันเทียบแท่งปกกลางด้านทุติยภูมิเป็น 15 โวลต์

ดังนั้น

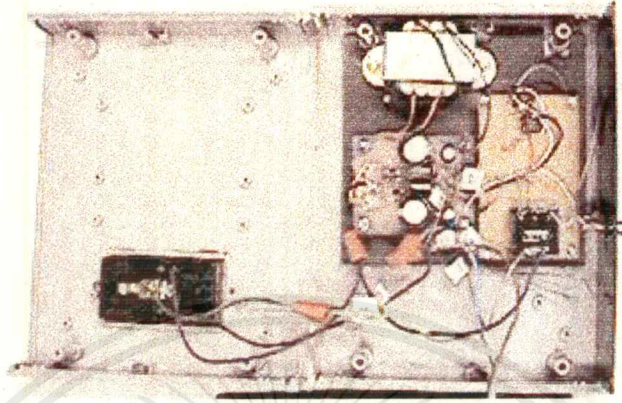
$$V_m = 5 \times \sqrt{2} = 21.2 \text{ โวลต์}$$

นั่นคือ

$$PIV > 3 \times 21.2 = 63.4 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้นเลือกใช้ไดโอดเบอร์ 1N4002 ซึ่งมี $PIV = 100 \text{ โวลต์}$

ไดโอด D_5 และ D_6 ใช้สำหรับป้องกันการคายประจุจาก C_2 และ C_3 ผ่านไอซีเรกทูลเกต 7812 และ 7912 เบอร์ของ D_5 และ D_6 ดูได้จากเอกสารประกอบ (data sheet) ซึ่งได้ $D_5 = D_6$ เป็น 1N4001



รูปที่ 4.6 แสดงภายในของเครื่องลดทอนสัญญาณ



รูปที่ 4.7 แสดงภายนอกของเครื่องลดทอนสัญญาณ

บทที่ 5

ขั้นตอนการประมวลสัญญาณสารมอนิก สำหรับ TMS320C50

5.1 บทนำ

โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่รับเข้ามาทางด้านอินพุตของ อนุภาคอินเตอร์เฟซเซอร์กิต (Analog Interface Circuit) ได้แบ่งโปรแกรมภาษาแอสเซมบลี ออกเป็น 2 โปรแกรมด้วยกัน ดังนี้คือ

1. OSCILLO.ASM โดยจะแสดงผลทางออสซิลโลสโคป (Oscilloscope Display)
2. LCD.ASM โดยจะแสดงผลทาง LCD โมดูล (LCD Module display) และส่งสัญญาณออกเพื่อไปควบคุม

ในโปรแกรมของการแสดงผลทางออสซิลโลสโคปนั้น เป็นการแสดงผลข้อมูลเป็นสัญญาณอนุภาค ออกทางออสซิลโลสโคป เป็นลักษณะของสเปกตรัมของความถี่ต่างๆ ส่วนในโปรแกรมของการแสดงผลทาง LCD โมดูล เป็นการแสดงผลเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งเป็นการแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์สารมอนิกลำดับที่ 2 ถึง 13 รวมทั้งค่า THD ออกทาง LCD โมดูล

5.2 ขั้นตอนในการประมวลผลของโปรแกรมหลัก (Main Program)

ขั้นตอนที่ 1

กำหนดโหมดของการประมวลผล และการแสดงผล ซึ่งสามารถกำหนดได้ 2 โหมด ดังนี้คือ

1. โหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป
เลือกใช้โปรแกรมที่ชื่อ OSCILLO.ASM
2. โหมดการแสดงผลทาง LCD โมดูล
เลือกใช้โปรแกรมที่ชื่อ LCD.ASM

ขั้นตอนที่ 2

กำหนดค่าเริ่มต้นในการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด ทางสาย RS232 ซีเรียลพอร์ท ซึ่งกำหนดให้เป็นการรับส่งข้อมูลแบบ 16 บิต และมีขาสัญญาณ FSX (Frame Synchronize Serial port) เป็นขาสัญญาณควบคุมการรับส่งข้อมูลและกำหนดอัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling Frequency) ของอนุภาคอินเตอร์เฟซ เซอร์กิต

โดยกำหนดให้ทั้งโปรแกรม OSCILLO.ASM และ LCD.ASM มีอัตราการสุ่มข้อมูลเท่ากับ 2,560 Hz

ขั้นตอนที่ 3

กำหนดจำนวนจุดของการสุ่มข้อมูลเป็น 1024 จุด ซึ่งเป็นค่าขนาดของการคำนวณ โปรแกรม FFT และเซตค่าตำแหน่งบัพเฟออร์ของข้อมูลอินพุทที่รับเข้ามา และบัพเฟออร์ของข้อมูลที่จะส่งออกออสซิลโลสโคป

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณโปรแกรม FFT ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณได้ ดังรูปที่ 5.1 โดยทำการเปลี่ยนข้อมูลในแกนเวลา เป็นค่าในแกนความถี่ ซึ่งจะได้ค่าจริงและค่าจินตภาพออกมา

ขั้นตอนที่ 5

ในโปรแกรม OSCILLO.ASM จะหาขนาดของผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 4 โดยทำการหาค่าลอการิทึมฐาน 2 เพื่อใช้ในการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป ส่วนในโหมดของการแสดงผลทาง LCD โมดูล จะทำการหาขนาดแอมพลิจูด ของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ และเก็บผลลัพธ์ที่ได้ใน คาค่า อาร์เรย์ เช่นเคิม

ขั้นตอนที่ 6

ทำการค้นกลับปิดข้อมูลใน ตำแหน่งจริงและเก็บ ในตำแหน่งจินตภาพ ของคาค่า อาร์เรย์

ขั้นตอนที่ 7

ในโปรแกรม OSCILLO.ASM จะส่งข้อมูลเอาท์พุท ที่ได้ออกไปแสดงผลที่ออสซิลโลสโคป ส่วนในโหมดของการแสดงผลทาง LCD โมดูล จะนำค่าข้อมูลใน ตำแหน่งที่เก็บค่าฮาร์มอนิกที่ทำการคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าความถี่มูลฐานและแล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ THD และส่งผลไปแสดงทาง LCD โมดูล รวมทั้งส่งสัญญาณดิจิตอลออกเมื่อค่าเปอร์เซ็นต์ THD สูงเกินที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 8

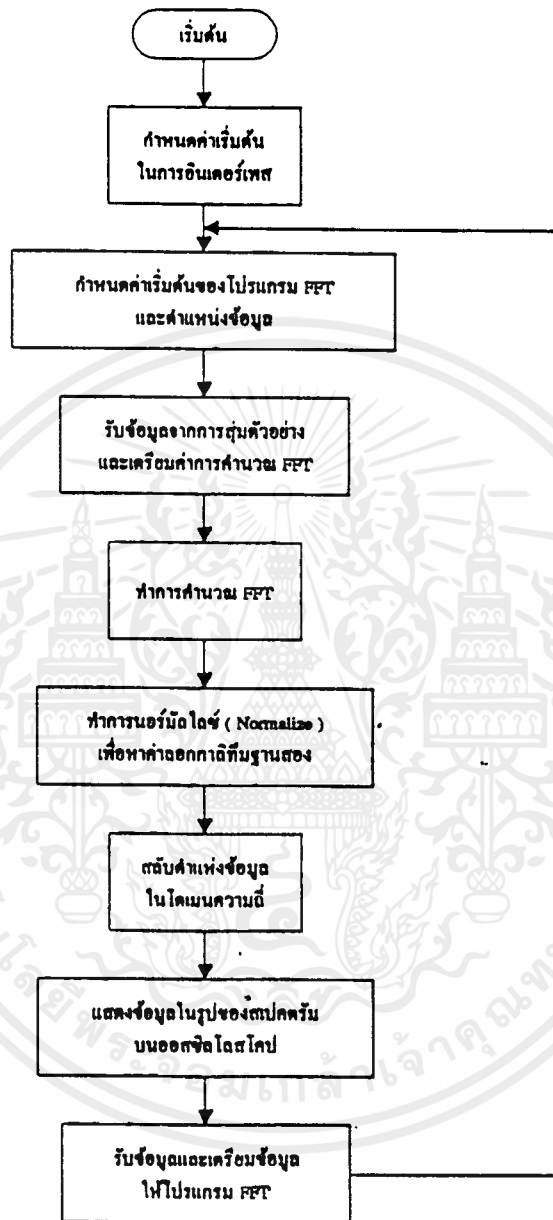
รอให้ข้อมูลอินพุทที่รับเข้ามาและเก็บในบัพเฟออร์เต็ม และเตรียมข้อมูล โดยคูณค่าข้อมูลอินพุท ด้วยค่า ตัวประกอบการหมุน เพื่อเป็นข้อมูลให้โปรแกรม FFT

ขั้นตอนที่ 9

ทำลูปของโปรแกรม โดยกลับไปทำที่ขั้นตอนที่ 3 อีกต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 5.1

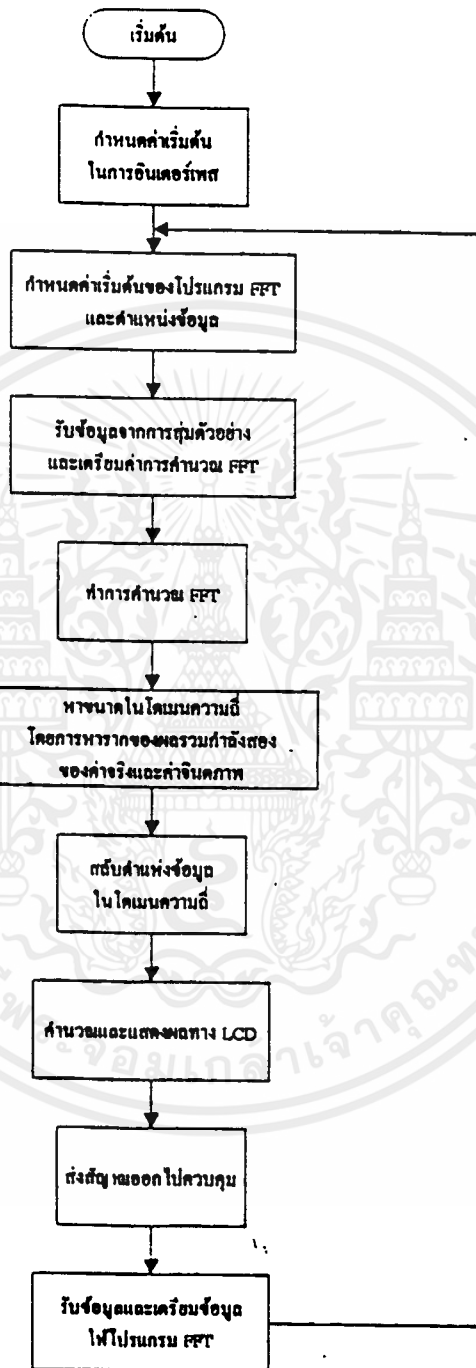
5.3 ขั้นตอนในการคำนวณโปรแกรม FFT

1. กำหนดขนาด FFT เพื่อบอกให้โปรแกรมทราบว่า จะให้ทำการประมวลผลกี่จุด ในที่นี้จะเป็น 1024 จุด สำหรับโปรแกรมทั้งสอง
2. ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดย AR1 และ AR2 เป็นรีจิสเตอร์ที่เก็บตำแหน่งแอดเดรสของ data array ส่วน AR3 เก็บแอดเดรสของตัวประกอบการหมุน และ AR4 เป็นตัวนับสำหรับการประมวลผล
3. ทำบัตเตอร์ฟลาย (Butterfly) ข้อมูลในตำแหน่งจริงและตำแหน่งจินตภาพ และคูณค่าตัวประกอบการหมุน นำผลที่ได้เก็บใน data array
4. ทำการหาขนาดของข้อมูลโดยถ้าเป็นโหมคการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป จะหาค่าลอการิทึมฐานสอง และโหมคการแสดงผลทาง LCD โมดูล จะทำการหาค่าแอมพลิจูด โดยการถอดรหัสข้อมูล
5. ทำการค้นกลับบิต
6. ตรวจสอบข้อมูลอินพุตอินพุตที่รับเข้ามาเต็มหรือไม่ ถ้ายังไม่เต็มให้รับข้อมูลอินพุตต่อไป ถ้าเต็มแล้วให้ทำการคูณค่าข้อมูลด้วย ค่าตัวประกอบการหมุน และกำหนดค่าเริ่มต้นและตำแหน่งของการเก็บข้อมูลชุดใหม่ให้โปรแกรม FFT



รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม OSCILLO.ASM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม LCD.ASM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ขั้นตอนการประมวลผลเพื่อแสดงผลบน LCD โมดูล

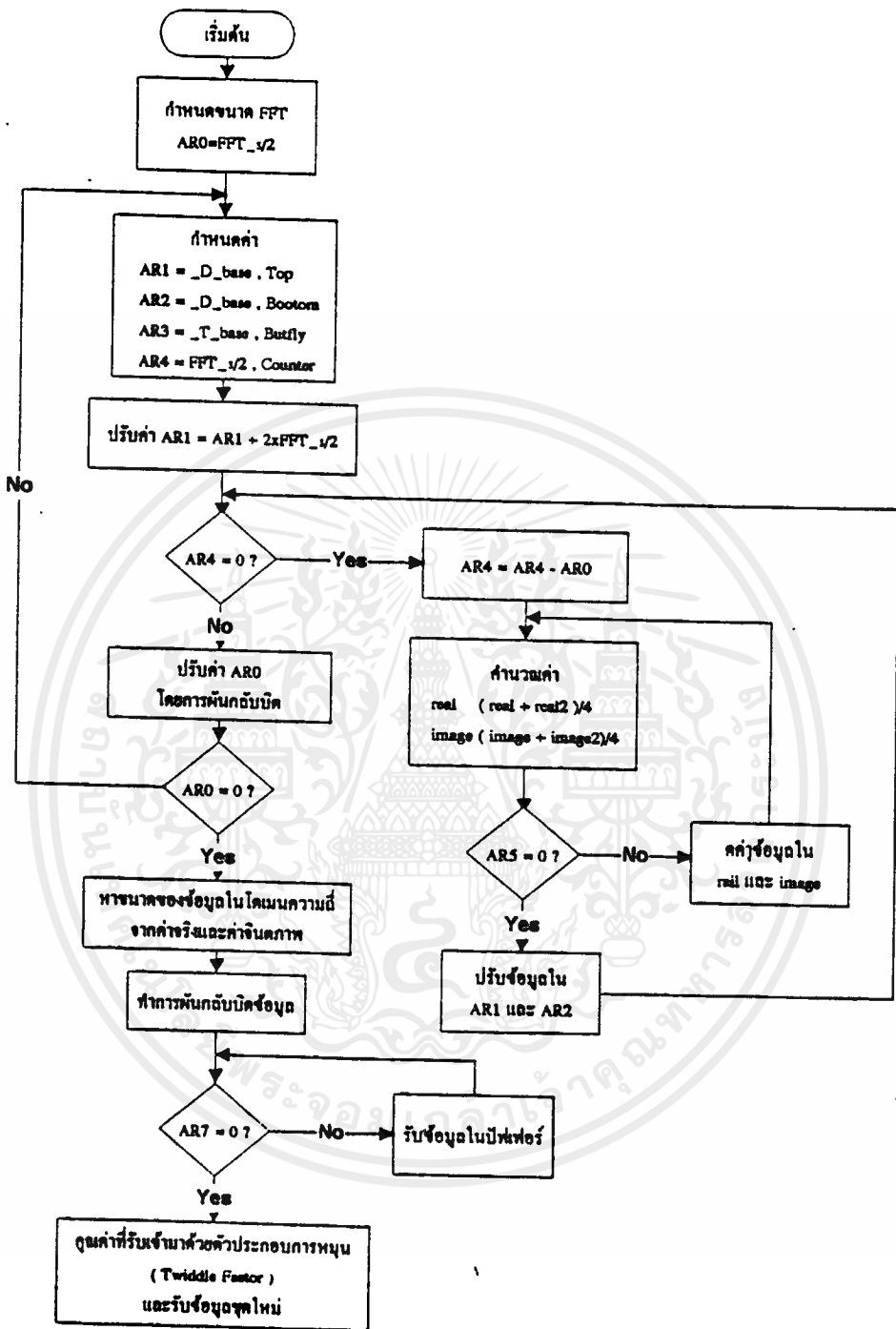
การประมวลผลจะเรียกโปรแกรมย่อยดังต่อไปนี้

1. %HARMONIC จะคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกตั้งแต่ 2 ถึง 13
2. %THD เมื่อได้ค่าจาก %HARMONIC ก็จะนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ THD ได้จาก

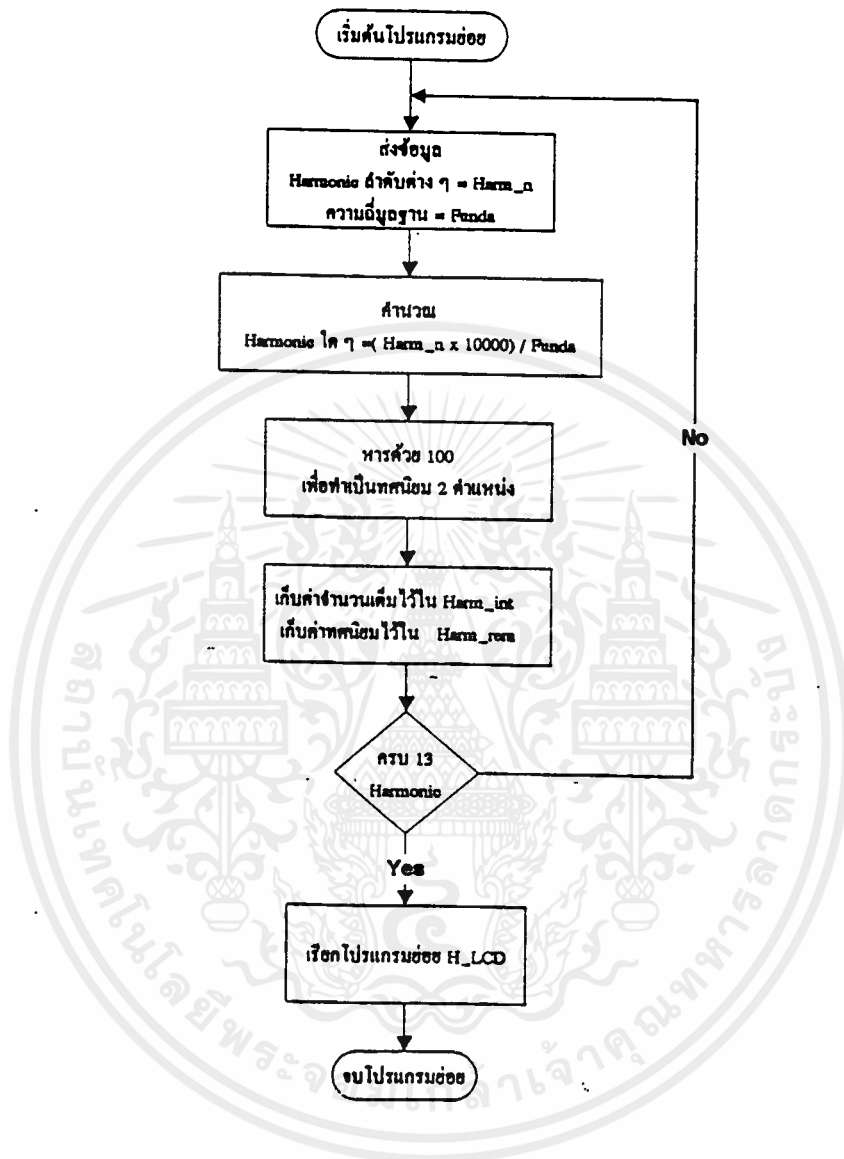
$$\text{สูตร \%THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_{13}^2}}{I_1} \text{ แล้วเก็บค่าไว้ใน \%THD_INT และ}$$

%THD_REM

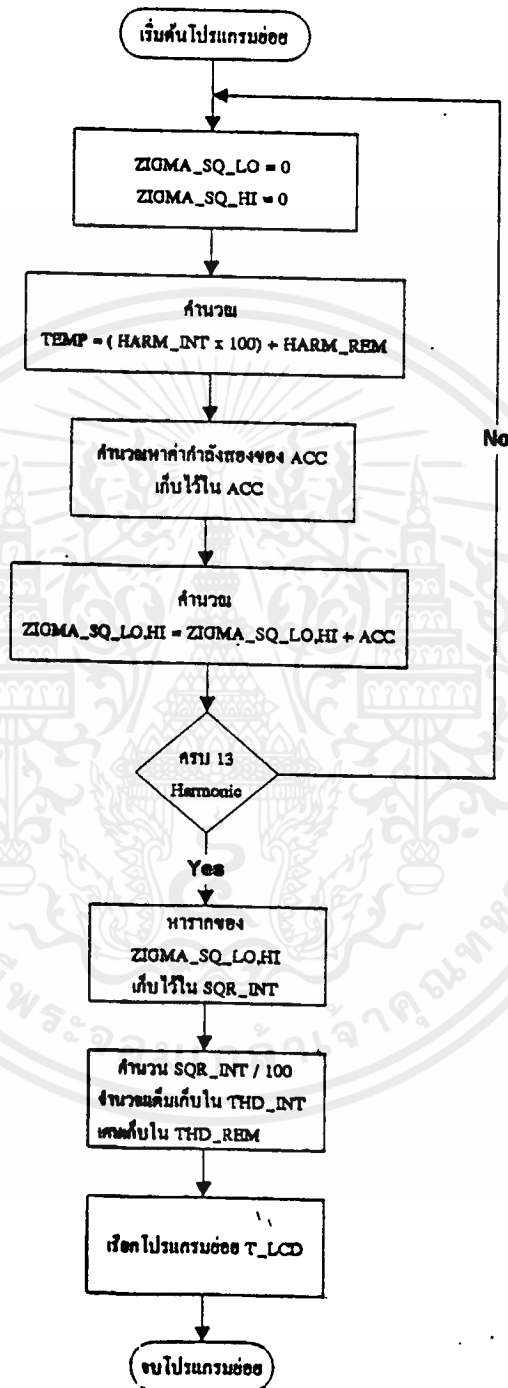
3. HAR_LCD จะนำค่าจาก %HARMONIC มาแสดงผลบน LCD โดยจะแสดงที่ละ 2 แถวคู่กันคือฮาร์โมนิกที่ 2 กับฮาร์โมนิกที่ 3 และฮาร์โมนิกที่ 4 กับฮาร์โมนิกที่ 5 ไปเรื่อยๆจนถึง ฮาร์โมนิกที่ 12 กับฮาร์โมนิกที่ 13
4. THD_LCD จะนำค่าใน %THD มาแสดงบน LCD โดยมีหลักการเช่นเดียวกับ HAR_LCD โดยจะแสดงผลต่อจากฮาร์โมนิกที่ 12 กับฮาร์โมนิกที่ 13
5. LED เป็นการแสดงสัญญาณควบคุมที่จะส่งออกจากบอร์ด



รูปที่ 5.3 แสดงแผนภาพขั้นตอน (flow chart) การคำนวณ FFT ของหน่วยประมวลผล

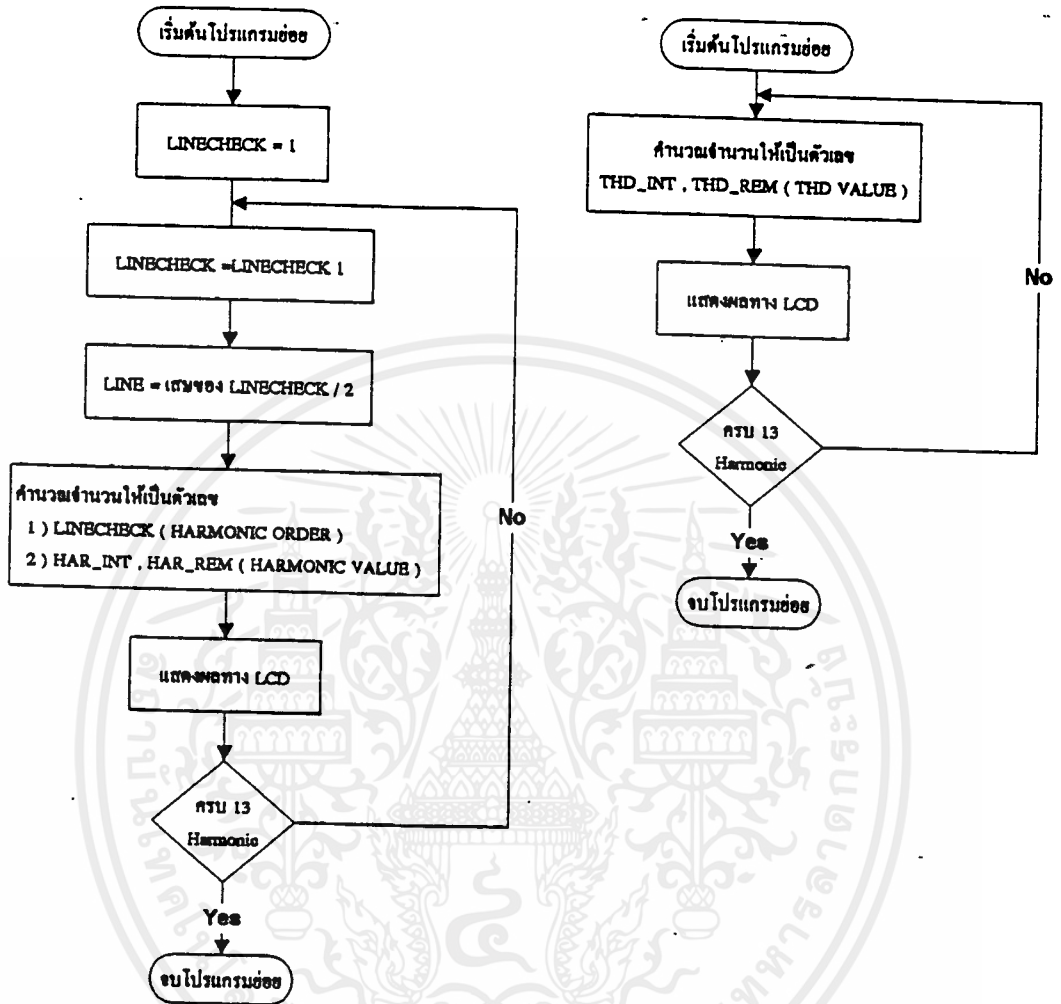


รูปที่ 5.4 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย %HARMONICS

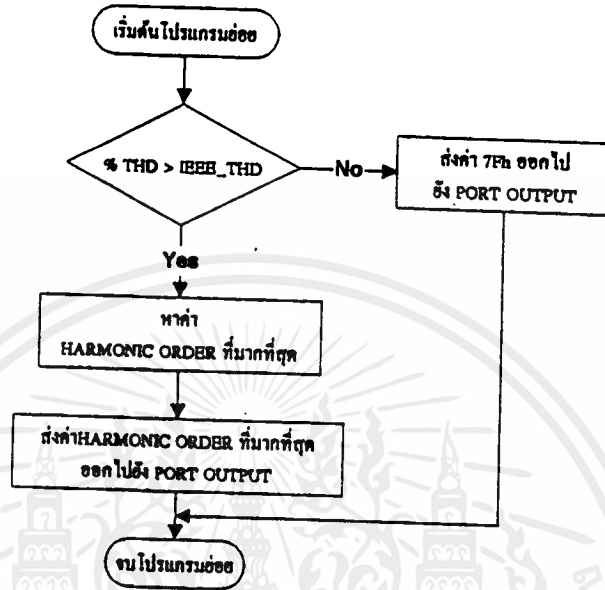


รูปที่ 5.5 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย %THD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมย่อย H_LCD และ T_LCD



รูปที่ 5.7 แสดงขั้นตอนการทำงานของกรรงตั้งสัญญาณความถี่

บทที่ 6

การแสดงผลสัญญาณและการส่งสัญญาณควบคุม

6.1 การใช้ LCD ในการแสดงผล

ในการใช้ LCD เป็นเครื่องมือในการแสดงผล เนื่องจากสามารถแสดงผลเป็นตัวอักษร และตัวเลขหรือแสดงเป็นกราฟฟิกได้ แต่ในโครงการนี้เราใช้การแสดงผลเป็นตัวเลขและตัวอักษร เท่านั้นหรือที่เรียกว่า DOT MATRIX LCD โดยตัว LCD นั้นกินกระแสต่ำ สามารถต่อใช้งานกับ ระบบไมโครโปรเซสเซอร์ได้ง่ายและสะดวกสำหรับการเขียนโปรแกรม รวมทั้งมีจำหน่ายกันอย่างกว้างขวาง และมีราคาที่เหมาะสม

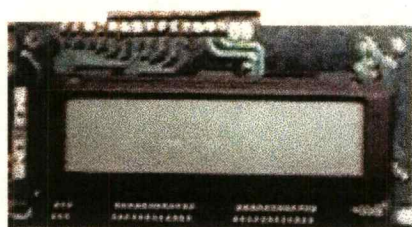
6.1.1 คุณสมบัติของ DOT MATRIX LCD โมดูล

1. มีให้เลือกหลายรุ่นตามการใช้งาน โดยมีจำนวนตัวอักษรและบรรทัดแตกต่างกันไป แต่ในโปรเจกนี้เราเลือกใช้งานรุ่น DMC162 แบบ 16 ตัวอักษร 2 แถว
2. ตัวอักษรแสดงด้วย DOT MATRIX ขนาด 5*8 DOT
3. สามารถต่อเข้ากับระบบไมโครโปรเซสเซอร์ได้ 2 ลักษณะ คือแบบ MEMORY MAP (20 PIN LCD BUS) และแบบผ่าน พอร์ต ในโครงการนี้เราเลือกใช้ ไอซี เบอร์ 74LS374 ต่อเข้ากับ DATA BUS เพื่อต่อให้เป็น พอร์ตข้อมูล ทำให้ข้อมูลที่ส่งจาก ไมโครโปรเซสเซอร์สามารถค้าง ข้อมูลในการแสดงผลได้
4. การใช้งานง่ายและสะดวก ระบบไมโครโปรเซสเซอร์เพียงแค่ส่งข้อมูลให้กับ LCD โมดูลเท่านั้น ข้อความก็จะปรากฏบนแผงแสดงผล และจะคงค้างไว้ตลอด ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาหลัก ของระบบไมโครโปรเซสเซอร์
5. มีคำสั่งพิเศษสำหรับอำนวยความสะดวกมากมาย เช่น CLEAR DISPLAY, HOME CURSOR, ON OFF CURSOR, BLINK CHARACTER และอื่นๆ อีกมากมาย
6. สามารถแสดงผลเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษและตัวเลขได้ 160 ตัว และสัญลักษณ์พิเศษ อีก 32 ตัว รวมทั้งสามารถกำหนดอักษรที่ออกแบบเองได้อีก 8 ตัว
7. กินกระแสต่ำ และมีน้ำหนักเบา รวมทั้งทำงานได้ด้วยไฟเลี้ยงระดับ 5 โวลต์ เท่านั้น

6.1.2 ขาสัญญาณของ LCD โมดูล

| ขา (PIN) | สัญลักษณ์ (SYMBOL) | ระดับสัญญาณ (LEVEL) | หน้าที่ (FUNCTION) |
|----------|-----------------------|------------------------|---|
| 1 | Vss | ----- | 0 V GND |
| 2 | Vcc | ----- | +5 V POWER SUPPLY |
| 3 | Vee | ----- | +V FOR LIQUID CRYSTAL DRIVE |
| 4 | RS | H/L | REGISTER SELECT H:DATA INPUT L:INSTRUCTION |
| 5 | R/W | H/L | INPUT |
| 6 | E | H | H:DATA READ L:DATA WRITE |
| 7 | DB08 | H/L | ENABLE SIGNAL (L---->H) |
| 8 | DB1 | H/L | DATA BUS BIT 0 |
| 9 | DB2 | H/L | DATA BUS BIT 1 |
| 10 | DB3 | H/L | DATA BUS BIT 2 |
| 11 | DB4 | H/L | DATA BUS BIT 3 |
| 12 | DB5 | H/L | DATA BUS BIT 4 |
| 13 | DB6 | H/L | DATA BUS BIT 5 |
| 14 | DB7 | H/L | DATA BUS BIT 6 DATA BUS BIT 7 |

ตารางที่ 6.1 แสดงขาสัญญาณต่าง ๆ ของ LCD โมดูล



รูปที่ 6.1 แสดงจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.3 หลักการในการเขียนข้อมูลให้ LCD โมดูล

1. การเขียนข้อมูลให้กับ LCD โมดูล จะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ คำสั่ง (INSTRUCTION) และ ข้อมูล (DATA) โดยจะกำหนดด้วยขาสัญญาณ RS คือถ้า $RS = 0$ จะหมายถึงตั้งสัญญาณควบคุม (INSTRUCTION) หรืออ่านค่า FLAG สภาพการทำงานของ LCD โมดูล และถ้า $RS = 1$ จะหมายถึงการเขียนหรืออ่าน DATA กับ โมดูล

2. หลักการในการเขียนข้อมูลให้ LCD โมดูล นี้ คือเมื่อมีการเขียนข้อมูลไปแล้ว ตัว LCD โมดูล จะต้องใช้เวลาในการทำงานชั่วขณะหนึ่ง (ตามค่า EXECUTE TIME) ซึ่งระบบ ไมโครโปรเซสเซอร์สามารถตรวจสอบได้จาก BUSY FLAG และถ้าเรียบร้อยแล้วจึงจะสามารถเขียนข้อมูลอันต่อไปได้ ในกรณีที่การต่อวงจรเป็นแบบ I/O พอร์ต คือ ไม่สามารถอ่านข้อมูลย้อนกลับได้ ระบบไมโครโปรเซสเซอร์จะต้องใช้วิธีการหน่วงเวลาแทน

3. การเขียนข้อมูลให้กับ LCD โมดูล นี้ สามารถทำได้ทั้งแบบ 8 บิต และ 4 บิต โดยกรณี 4 บิต จะใช้สายสัญญาณข้อมูล เพียง 4 เส้น คือ DB4-DB7 ซึ่งใช้สำหรับระบบไมโครโปรเซสเซอร์แบบ 4 บิต หรือเพื่อการประหยัดสาย ในการเขียนข้อมูลจะกระทำเหมือน 8 บิต เพียงแต่ให้เขียน 2 ครั้ง คือ DB4-DB7 ก่อน แล้วตามด้วย DB0-DB3 และจะต้องกำหนดคุณสมบัติตามค่า DL ในคำสั่ง FUNCTION SET ด้วย

4. DDRAM (DISPLAY DATA RAM) คือหน่วยความจำภายในตัว LCD โมดูล ที่เป็น บัฟเฟอร์ (BUFFER) ของข้อมูล โดยถ้าเขียนรหัส ASCII ใด ๆ ลงไปในหน่วยความจำนี้ ก็จะปรากฏเป็นตัวอักษรที่แสดงแสดงทันที

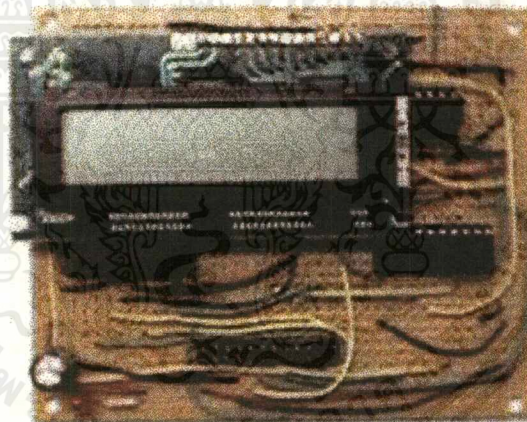
5. CGRAM (CHARACTER GENERATOR RAM) คือหน่วยความจำภายในตัว LCD โมดูล สำหรับเก็บภาพตัวอักษรที่ผู้ใช้สามารถสร้างเองได้ (8 ตัว) โดยจะอ้าง แอดเดรส (ADDRESS) ได้ทั้งหมด 64 ไบท์ (BYTE) คือ 8 ตัวอักษรคูณกับ 8 แถว (ROW)

6.1.4 การต่อ LCD โมดูล เข้ากับ TMS320C50

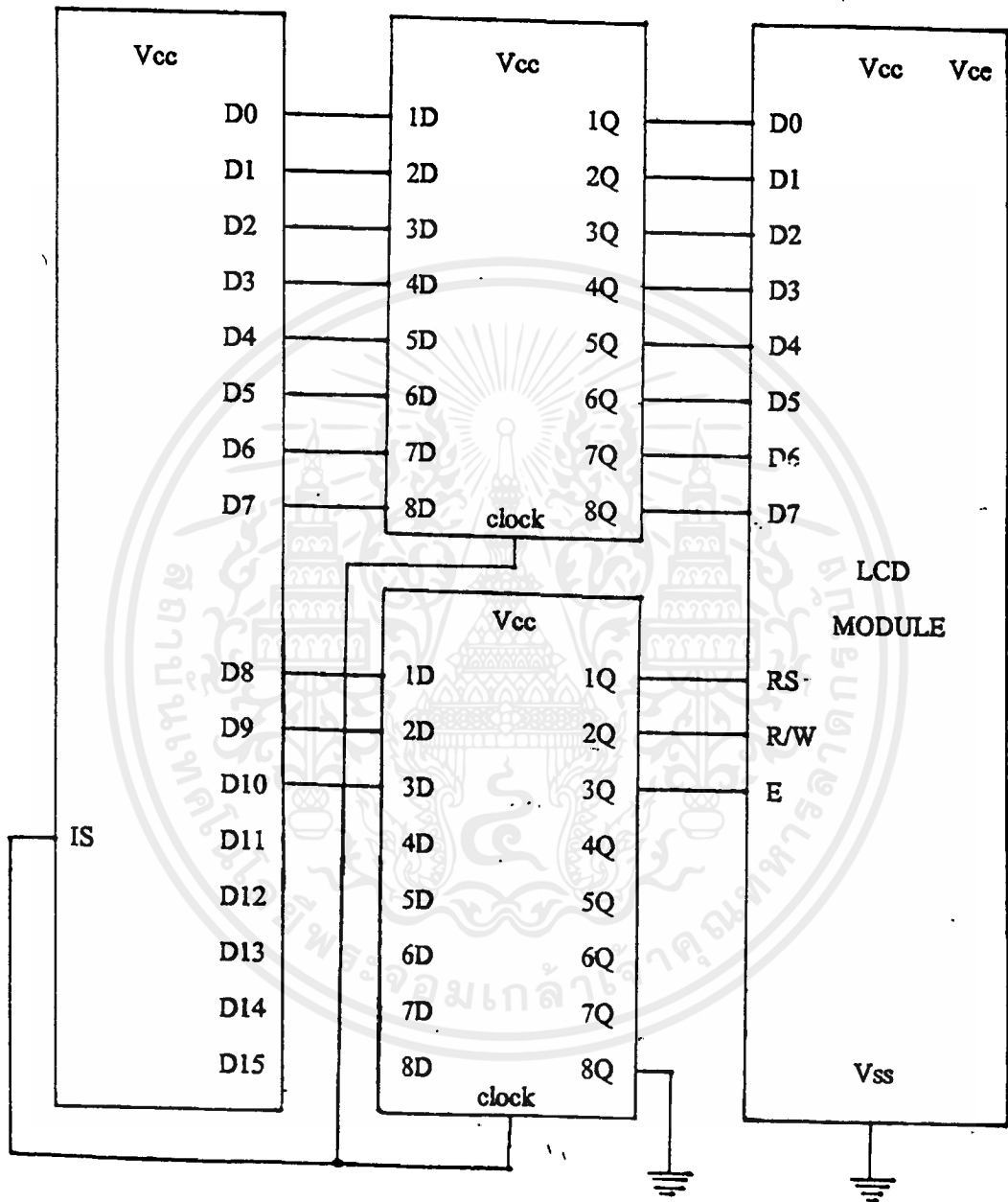
จากแผนภาพการต่อ LCD โมดูล เข้ากับ TMS320C50 อธิบายได้ดังนี้

1. บัสข้อมูล(DATA BUS) ของ TMS320C50 จำนวน 16 เส้นคือ DB0-DB10 จะต่อเข้ากับ ไอซี เบอร์ 74LS374 ซึ่งเป็นพอร์ตขนาด 8 บิต เราใช้จำนวน 2 ตัวเพื่อทำให้ บัสข้อมูล ขนาด 16 บิต เป็นพอร์ตขนาด 16 บิต ส่วนสัญญาณแรงดัน 5 โวลท์ ได้จากขา Vcc ของตัวไมโครโปรเซสเซอร์ และขา GROUND และขา OUTPUT CONTROL ต่อเข้ากับขา GND ของตัวไมโครโปรเซสเซอร์ เช่นเดียวกัน ส่วนขา CLK ของ ไอซี จะต่อเข้ากับ OUTPUT ของขา IS (I/O SPACE SELECT) ของ TMS320C50

2. ขาสัญญาณอินพุตของ LCD โมดูล จำนวน 10 บิต ถูกต่อเข้ากับขาเอาต์พุตของ ไอซี เบอร์ 74LS374 เพื่อเป็นขาสัญญาณในการติดต่อกับ LCD โมดูล



รูปที่ 6.2 แสดงหน่วยแสดงผล LCD ที่สมบูรณ์



รูปที่ 6.3 แสดงวงจรการต่อหน่วยแสดงผล LCD เข้ากับ TMS320C50 DSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การส่งสัญญาณควบคุม

นอกจากจะทำการวัดและแสดงผลทาง LCD แล้ว เครื่องวัดฮาร์โมนิกส์นี้ยังสามารถส่งสัญญาณออกไปควบคุมเครื่องกรองฮาร์โมนิกส์ได้อีกด้วย โดยจะส่งสัญญาณออกมา 5 เส้น โดยเส้นแรก (1 บิต) จะเป็นการควบคุมให้เครื่องกรองรู้ว่าควรจะทำกรองหรือเปล่า โดยเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ THD ที่คำนวณได้ว่ามากกว่าที่ตั้งไว้หรือไม่ (ค่าที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานของ IEEE 519) โดยจะมีสถานะเป็น 1 เมื่อต้องกรองฮาร์โมนิกส์ (ค่าเปอร์เซ็นต์ THD เกิน) และเป็น 0 (ถ้าค่าเปอร์เซ็นต์ THD ต่ำ) ส่วนอีก 4 เส้นที่เหลือจะเป็นข้อมูล 4 บิต ซึ่งจะแสดงค่าได้ 16 สถานะ โดยแต่ละสถานะจะมีความหมายถึงลำดับฮาร์โมนิกส์ที่จะต้องกรองแต่ละลำดับ (2 ถึง 13) โดยเลือกจากลำดับที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์สูงที่สุดในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์ THD สูงเกินไป ออกมาส่งสัญญาณ โดยเครื่องกรองฮาร์โมนิกส์จะต้องเข้าใจรหัสนี้อย่างถูกต้องด้วย

| สัญญาณ | ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ ต้องกรอง | สัญญาณ | ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่ ต้องกรอง |
|--------|---------------------------------|--------|---------------------------------|
| 0000 | - | 1000 | 9 |
| 0001 | 2 | 1001 | 10 |
| 0010 | 3 | 1010 | 11 |
| 0011 | 4 | 1011 | 12 |
| 0100 | 5 | 1100 | 13 |
| 0101 | 6 | 1101 | - |
| 0110 | 7 | 1110 | - |
| 0111 | 8 | 1111 | - |

ตารางที่ 6.2 แสดงความหมายของแต่ละสัญญาณ

บทที่ 7

ขั้นตอนการใช้งานอุปกรณ์ทั้งหมด

7.1 การเขียนคำสั่งและนำคำสั่งไปใช้

7.1.1 การเขียนและแก้ไขคำสั่งจะต้องทำเมื่อไฟล์อยู่ในรูปของภาษาแอสเซมบลีเท่านั้น (*.asm)

7.1.2 การเขียนและแก้ไขคำสั่งสามารถทำได้โดยใช้ text editor ทั่วๆ ไป

7.1.3 เมื่อได้คำสั่งที่สมบูรณ์แล้วจะต้องทำการคอมไพล์ก่อน โดยใช้โปรแกรม dsk5a.exe เมื่อคอมไพล์แล้วจะได้ไฟล์เพิ่มขึ้นโดยจะมีชื่อเหมือนเดิมแต่นามสกุลจะเป็น .dsk เช่นจะคอมไพล์ไฟล์ชื่อ test.asm จะทำได้โดยนำ test.asm เข้าไปไว้ใน directory ที่มีโปรแกรม dsk5a.exe อยู่ แล้วเข้าไปใน directory นั้น แล้วพิมพ์ dsk5a test.asm หรือ dsk5a test.asm -l แล้วจะได้ไฟล์ดังต่อไปนี้ test.asm , test.dsk , และถ้าใส่ -l ไว้หลังชื่อไฟล์ตอนคอมไพล์จะได้ test.lst อีกหนึ่งไฟล์ ประโยชน์ของไฟล์นามสกุล lst คือ เมื่อเรา edit ไฟล์ที่มีนามสกุลนั้น เราจะเห็นรายละเอียดของจุดที่ทำให้เกิด error ขณะคอมไพล์ได้

7.1.4 การจะนำไฟล์ที่คอมไพล์แล้วไป run บนบอร์ด DSK จะใช้โปรแกรมชื่อ dsk5l.exe เช่นจะ run คำสั่งชื่อ test.dsk ก็นำ test.dsk เข้าไปไว้ใน directory ที่มีโปรแกรม dsk5l.exe อยู่ แล้วเข้าไปใน directory นั้น พิมพ์ dsk5l test.dsk บอร์ด DSK ก็จะเริ่มทำงานตามคำสั่งนั้น (ตรวจสอบพอร์ตสื่อสารที่ใช้ด้วยว่าตรงกับที่ตั้งค่าไว้ ดูวิธีตั้งค่าที่ หน้า 2-8 ในคู่มือการใช้ TMS320C50 DSK)

7.1.5 ในกรณีที่คำสั่งอยู่ในระหว่างการพัฒนา เราอาจใช้โปรแกรม dsk5d.exe ในการ run คำสั่งได้ด้วย โดย dsk5d.exe จะมีความสามารถเหนือ dsk5l.exe คือเราจะสามารถเห็นขั้นตอนการทำงานของไฟล์ที่เราจะ run ได้ตลอดทุกขั้นตอน แต่จะมีวิธีการใช้งานที่ต่างกับ dsk5l.exe อยู่พอสมควร (ตรวจสอบพอร์ตสื่อสารที่ใช้ด้วยว่าตรงกับที่ตั้งค่าไว้)

7.2 การต่อสายต่างๆเข้าด้วยกัน

7.2.1 บอร์ด DSK มีจุดต่อสายต่างๆ ดังนี้

1. สัญญาณออกแบบอนาลอก จะใช้เสียบสาย coaxial ป้อนเข้าออสซิลโลสโคป
2. สัญญาณเข้าแบบอนาลอก ใช้เสียบสาย coaxial รับสัญญาณจากเครื่องลดทอนสัญญาณ
3. พอร์ตสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์ ใช้เสียบกับสาย RS-232 DB-9 เข้ากับพอร์ตอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์
4. จูครับไฟเลี้ยง ใช้ต่อกับแหล่งจ่ายไฟขนาด 9 VAC 250 mA.
5. ต่อสายแพรจากจัมเปอร์ 2 ของบอร์ดเข้าสู่จัมเปอร์ของหน่วย LCD โดยต้องเสียบให้ขา 1 ของบอร์ดตรงกับขา 1 ของหน่วย LCD ต้องเข้าใจขั้วของสายแพรให้ถูกต้อง
6. ต่อสายจากขาที่ 22 ในจัมเปอร์ 5 เข้าขา clock ของหน่วย LCD

7.2.2 ตัวลดทอนสัญญาณมีจุดต่อสายต่างๆ ดังนี้

1. เติร์ปไฟฟ้า เอาไว้ใช้เสียบกับโหนดที่จะวัดฮาร์โมนิกส์
2. ปลั๊กไฟ ใช้เสียบเข้ากับไฟบ้านเพื่อจ่ายไฟให้กับโหนดและชุดลดทอนสัญญาณภายใน
3. ขั้วออกแบบ RCA เป็นรูปคลื่นกระแสที่ถูกลดทอนลงแล้ว ใช้เสียบกับบอร์ด DSK ตามข้อที่ 2.1.2

เมื่อทำครบทุกขั้นตอนตามที่กล่าวมาทั้งหมดแล้วนั้น อุปกรณ์วัดฮาร์โมนิกส์ก็จะสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง

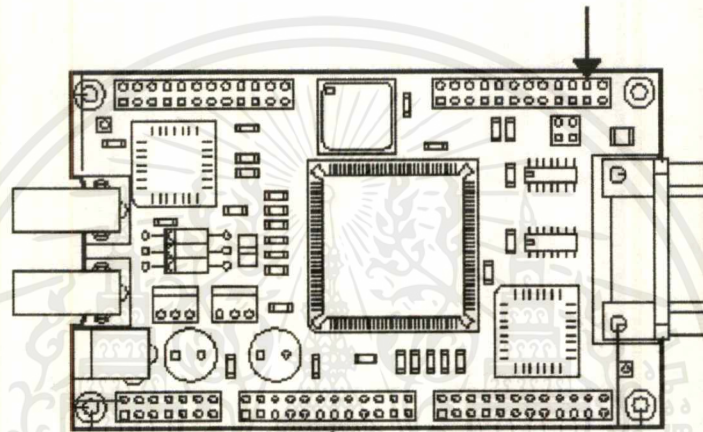
โดยสรุปแล้วไฟล์ที่จะต้องใช้ในการพัฒนาและ run คำสั่งมีทั้งหมดดังนี้ (โดยสมมติว่าจะใช้ชื่อคำสั่งว่า test)

1. dsk5a.exe
2. dsk5l.exe
3. dsk5d.exe
4. test.asm (เขียนขึ้นมาเอง)
5. test.dsk (ได้มาจากการคอมไพล์)
6. test.lst (ได้มาจากการคอมไพล์ โดยมีเครื่องหมาย -l ตามหลัง)

ส่วนอุปกรณ์ที่จะต้องใช้มีดังนี้

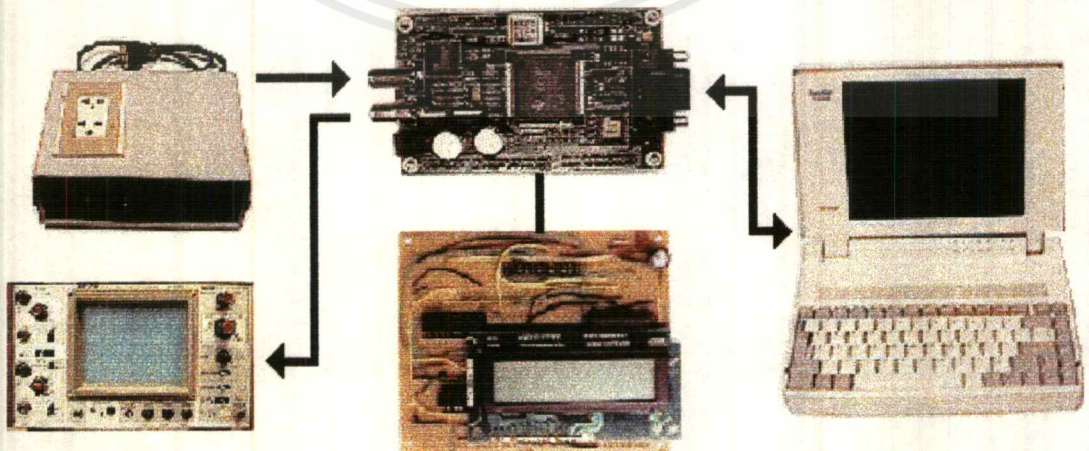
1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. บอร์ด DSK พร้อมหน่วยแสดงผล LCD
3. เครื่องลดทอนสัญญาณ

ขาที่ 22 ของจัมเปอร์ 5



จัมเปอร์ 2

รูปที่ 7.1 แสดงจุดต่อสายต่างๆบน TMS320C50 DSK



รูปที่ 7.2 แสดงการต่ออุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

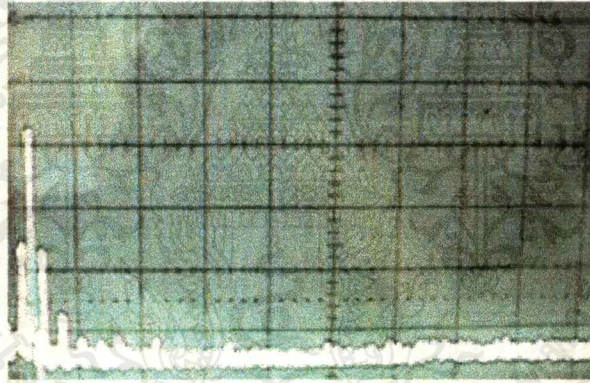
บทที่ 8

ผลการทดลอง

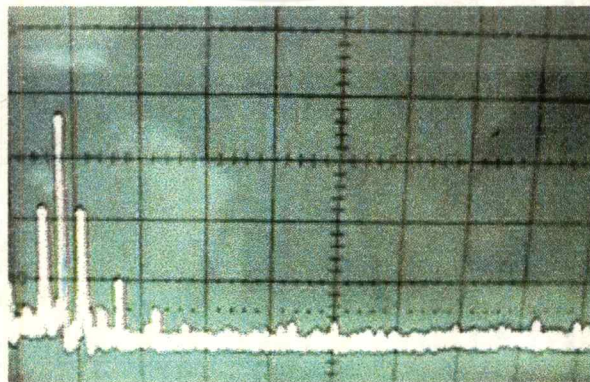
8.1 ผลการทดลองของโปรแกรม OSCILLO.ASM

โปรแกรมนี้เป็นการใช้ TMS320C50 DSK ประมวลผลฮาร์โมนิกส์และส่งสัญญาณอนาล็อกออกสู่ออสซิลโลสโคปให้เป็นเสมือนเครื่องเสปคตรัมอนาไลเซอร์ ค่าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปเป็นค่าที่แสดงโดยการหาค่าลอการิทึมของขนาดความถี่ของสัญญาณเสปคตรัมที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรม FFT จุดประสงค์เพื่อให้่ายในการแสดงผลและสามารถดูลักษณะสัญญาณได้ละเอียดมากขึ้น

8.1.1 การทดลองโดยป้อนสัญญาณไซน์จากเครื่องฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ โดยจะทดลองที่ความถี่ 500 Hz และ 1kHz



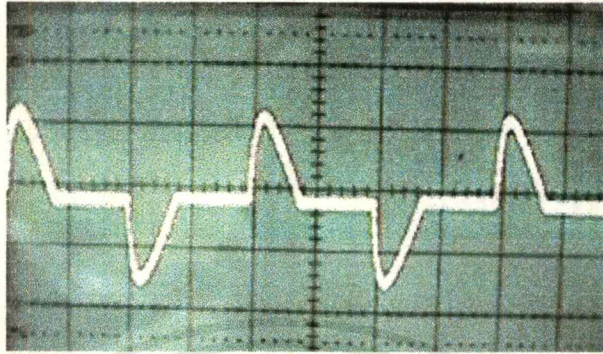
รูปที่ 8.1 แสดงเสปคตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปของสัญญาณไซน์ความถี่ 500 Hz



รูปที่ 8.2 แสดงเสปคตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปของสัญญาณไซน์ความถี่ 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

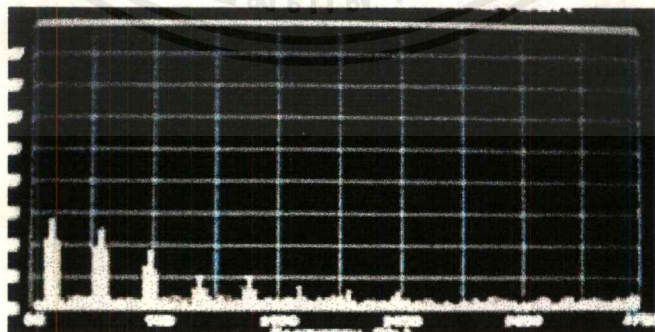
8.1.2 การทดลองโดยป้อนกระแสไฟฟ้าจากโหลดเครื่องไฟฟ้าโดยผ่านเครื่องลดทอนสัญญาณ



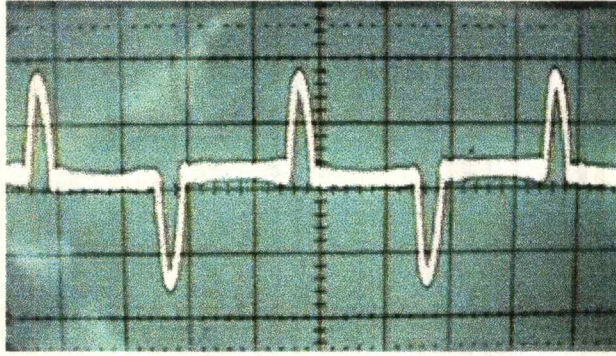
รูปที่ 8.3 แสดงสัญญาณกระแสของโหลดฮาโลเจนที่รับไฟจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์



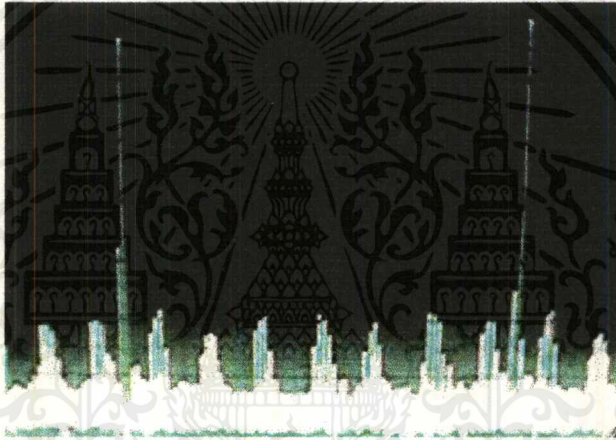
รูปที่ 8.4 แสดงสเปกตรัมของกระแสของโหลดฮาโลเจนที่รับไฟจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์
โดยวัดจากออสซิลโลสโคป



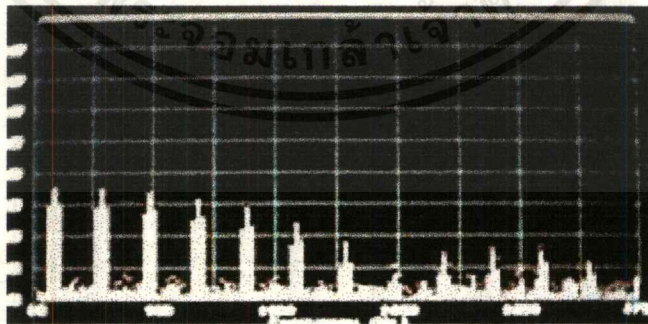
รูปที่ 8.5 แสดงสเปกตรัมของกระแสของโหลดฮาโลเจนที่รับไฟจากหม้อแปลงอิเล็กทรอนิกส์
โดยวัดจากสเปกตรัมทรานส์อนาไลเซอร์



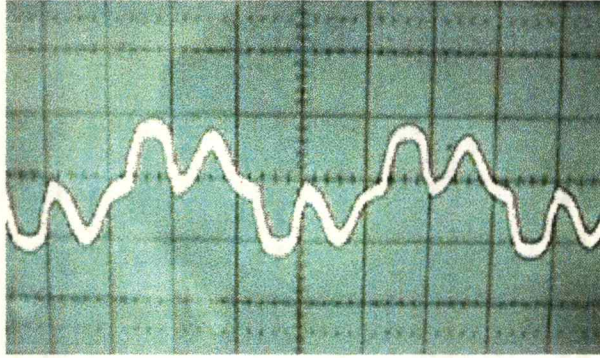
รูปที่ 8.6 แสดงสัญญาณกระแสของเครื่องออสซิลโลสโคป



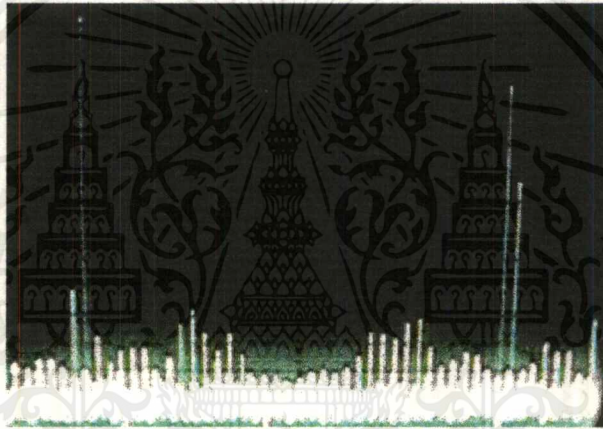
รูปที่ 8.7 แสดงสถาปัตยกรรมของของกระแสของเครื่องออสซิลโลสโคปโดยวัดจากออสซิลโลสโคป



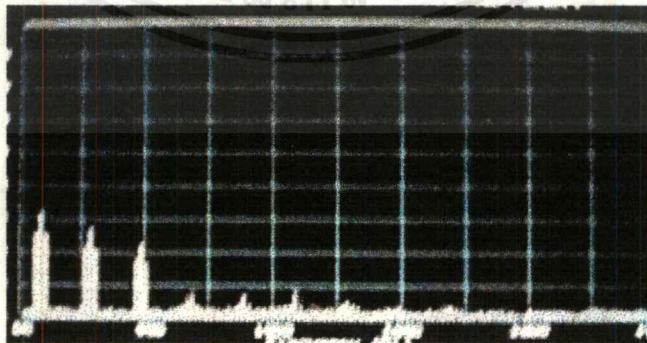
รูปที่ 8.8 แสดงสถาปัตยกรรมของกระแสของเครื่องออสซิลโลสโคปที่โดยวัดจาก
สถาปัตยกรรมโมนาไลเซอ์



รูปที่ 8.9 แสดงสัญญาณกระแสของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่อผ่านหม้อแปลงแบบแกนเหล็ก



รูปที่ 8.10 แสดงเสปกตรัมของกระแสของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่อผ่านหม้อแปลงแบบแกนเหล็ก
โดยวัดจากออสซิลโลสโคป



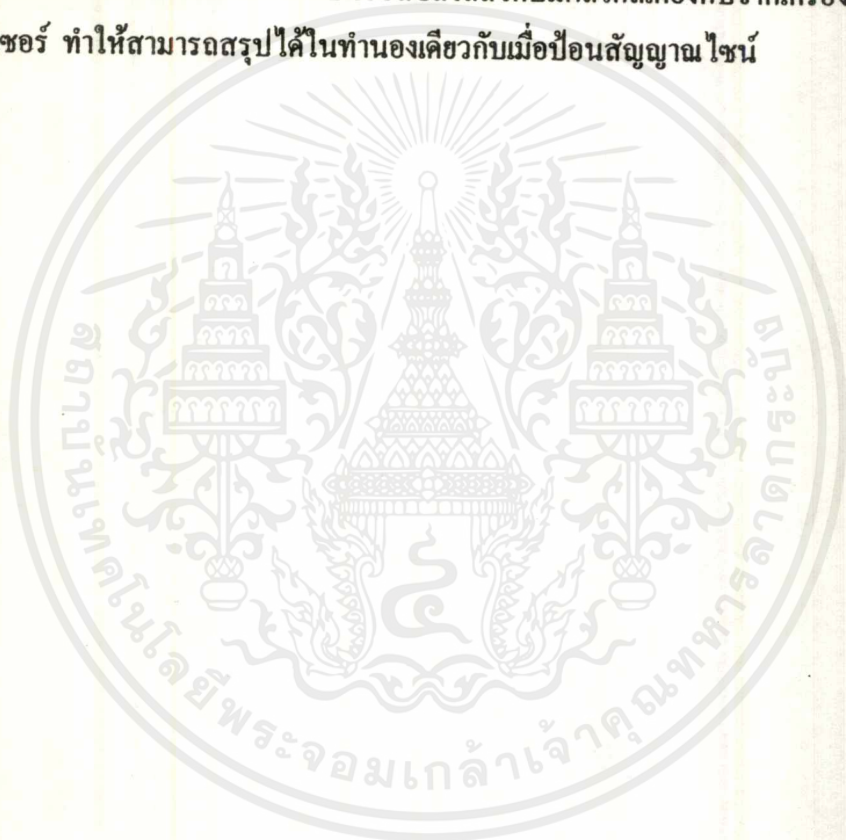
รูปที่ 8.11 แสดงเสปกตรัมของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่อผ่านหม้อแปลงแบบแกนเหล็ก
โดยวัดจากเสปกตรัมตรัมอนาลิเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.1.3 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 8.1 และ 8.2 จะเห็นว่าในการป้อนสัญญาณอินพุทไซน์ที่ความถี่ต่างๆเมื่อทำการปรับความถี่ของสัญญาณอินพุทเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าขดคลื่นที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดจะมีการเคลื่อนไปทางด้านขวา ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อทำการป้อนสัญญาณไซน์ที่ค่าความถี่ต่างๆ สัญญาณเสปกตรัมที่ความถี่นั้นจะมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถสรุปได้ในขั้นต้นว่าโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ความถี่ต่างๆได้ตามความจริง

และจากรูปที่ 8.4 กับ 8.5 หรือ 8.7 กับ 8.8 หรือ 8.10 กับ 8.11 จะเห็นว่าด้วยโปรแกรมเดียวกันนี้จะได้แถบเสปกตรัมของความถี่บนออสซิลโลสโคปมีผลใกล้เคียงกับจากเครื่องเสปกตรัมอนาลิเซอร์ ทำให้สามารถสรุปได้ในทำนองเดียวกับเมื่อป้อนสัญญาณไซน์



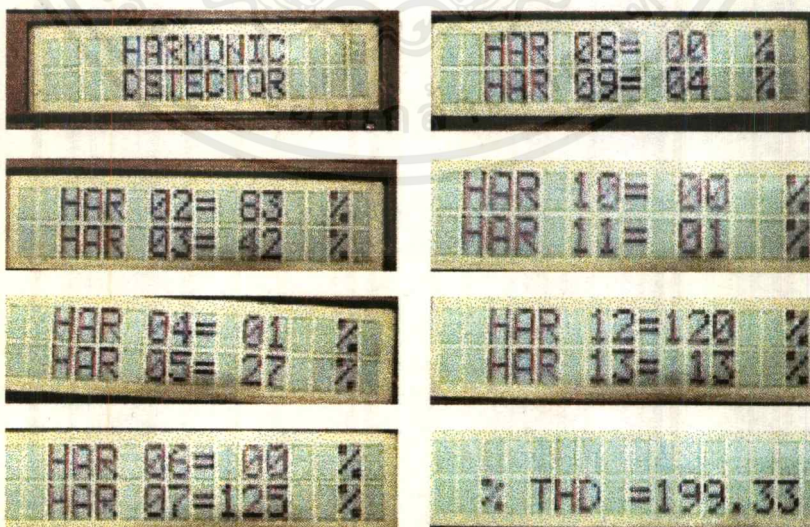
8.2 การทดลองการคำนวณในส่วนของโปรแกรม LCD.ASM

การทดลองนี้จะสมมติค่าขนาดของกระแสที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ตั้งแต่ความถี่หลักมูล ไปจนถึงฮาร์มอนิกที่ 13 เพื่อจะทดลองคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกและค่า THD โดยจะเปรียบเทียบผลกับการคำนวณโดยใช้สมการเดียวกัน (IEEE 519) กับภาษาเทอร์โบปาสคาล โดยการคำนวณจะใช้สมการจากบทที่ 2 หน้า 9

ผลการคำนวณ โดยภาษาเทอร์โบปาสคาลเป็นดังนี้

| | | | |
|---------------|-----------|-------------|-----------|
| FUNDAMENTAL | = | 120.000 | A |
| HARMONIC 2 = | 83.333 % | AMPLITUDE = | 100.000 A |
| HARMONIC 3 = | 42.500 % | AMPLITUDE = | 51.000 A |
| HARMONIC 4 = | 1.667 % | AMPLITUDE = | 2.000 A |
| HARMONIC 5 = | 27.500 % | AMPLITUDE = | 33.000 A |
| HARMONIC 6 = | 0.833 % | AMPLITUDE = | 1.000 A |
| HARMONIC 7 = | 125.000 % | AMPLITUDE = | 150.000 A |
| HARMONIC 8 = | 0.833 % | AMPLITUDE = | 1.000 A |
| HARMONIC 9 = | 4.167 % | AMPLITUDE = | 5.000 A |
| HARMONIC 10 = | 0.833 % | AMPLITUDE = | 1.000 A |
| HARMONIC 11 = | 1.667 % | AMPLITUDE = | 2.000 A |
| HARMONIC 12 = | 120.000 % | AMPLITUDE = | 144.000 A |
| HARMONIC 13 = | 13.333 % | AMPLITUDE = | 16.000 A |
| THD | = | 199.336 | % |

* หมายเหตุ ค่า amplitude นี้เป็นค่าที่สมมติขึ้นทั้งสิ้น เพื่อทดลองการคำนวณ



รูปที่ 8.12 แสดงผลการคำนวณจาก TMS320C50 โดยแสดงผลออกทาง LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าผลการคำนวณฮาร์มอนิกส์ที่ได้จาก TMS320C50 มีผลลัพธ์ถูกต้องตรงกับผลที่ได้จากการใช้ภาษาเทอร์โบปาสคาล การคำนวณของโปรแกรมย่อยใน LCD.ASM นี้จะมีค่าความผิดพลาดประมาณ 0.1 - 0.2 % อันเป็นผลมาจากการตัดทอนนิยมนำตำแหน่งที่สามออกไป

จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมย่อยนี้สามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกส์และเปอร์เซ็นต์ THD และแสดงผลออกทาง LCD ได้อย่างถูกต้อง



8.3 การทดลองวัดค่าฮาร์มอนิกของโหลดจริงโดยใช้โปรแกรม LCD.ASM

8.3.1 การทดลองด้วยการต่อโหลดดังต่อไปนี้พร้อมๆกัน

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ 2 เครื่อง
2. เครื่อง UPS ขนาด 500 VA
3. จอมอนิเตอร์ 2 ชุด
4. เครื่องซักกระดาดทรายไฟฟ้า

| ฮาร์มอนิกที่ | ผลการบันทึกค่าโดย TMS320C50 DSK ครั้งที่ | | | | | ค่าเฉลี่ย | ค่าจาก SATEC |
|--------------|--|-------|-------|-------|-------|-----------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 2 | 5 | 2 | 3 | 8 | 2 | 4.00 | 0.6 |
| 3 | 42 | 46 | 42 | 44 | 44 | 43.60 | 42.75 |
| 4 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1.00 | 0.65 |
| 5 | 33 | 31 | 34 | 33 | 30 | 32.20 | 32.69 |
| 6 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1.60 | 0.74 |
| 7 | 21 | 19 | 22 | 25 | 23 | 22.00 | 23.01 |
| 8 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0 | 1.20 | 0.18 |
| 9 | 12 | 15 | 13 | 15 | 12 | 13.40 | 12.44 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1.40 | 0.56 |
| 11 | 4 | 5 | 5 | 5 | 2 | 4.20 | 4.20 |
| 12 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.20 | 0.18 |
| 13 | 3 | 3 | 1 | 0 | 3 | 2.00 | 2.85 |
| THD | 60.14 | 62.60 | 60.62 | 64.33 | 60.46 | 61.63 | 60.80 |

ตารางที่ 8.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าฮาร์มอนิกระหว่าง TMS320C50 DSK กับ เครื่องฮาร์มอนิกสอนาไลเซอร์ของ SATEC

8.3.2 การทดลองด้วยการต่อโหลดดังต่อไปนี้พร้อมๆกัน

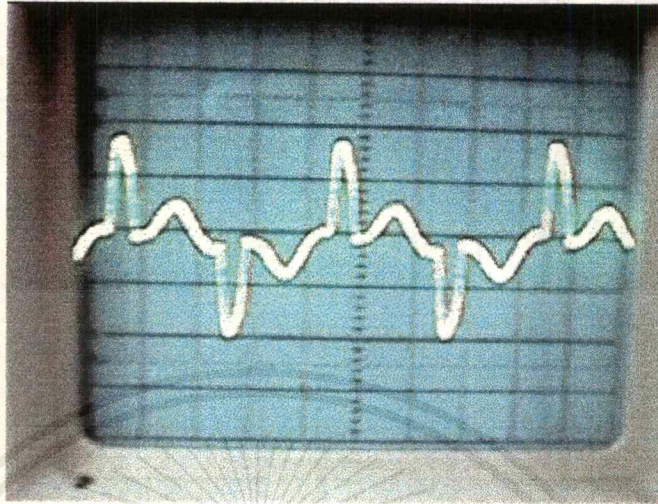
1.เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ 2 เครื่อง

2.เครื่อง UPS ขนาด 500 VA

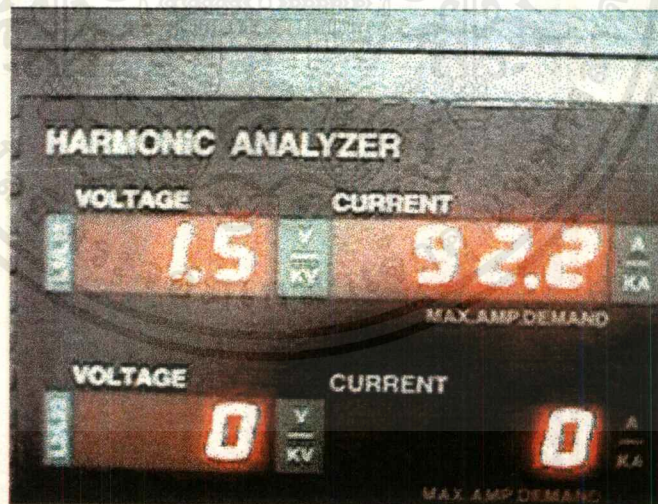
3.จอมอนิเตอร์ 2 ชุด

| ฮาร์ดมอณิกส์ที่ | ผลการบันทึกค่าโดย TMS320C50 DSK ครั้งที่ | | | | | ค่าเฉลี่ย | ค่าจาก SATEC |
|-----------------|--|-------|-------|-------|-----|-----------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| 2 | 2 | 3 | 2 | 9 | 2 | 3.60 | 0.60 |
| 3 | 54 | 61 | 66 | 71 | 82 | 64.00 | 67.84 |
| 4 | 4 | 2 | 5 | 9 | 4 | 4.80 | 1.02 |
| 5 | 45 | 48 | 52 | 46 | 45 | 47.20 | 48.91 |
| 6 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1.80 | 1.74 |
| 7 | 32 | 28 | 33 | 37 | 22 | 30.40 | 32.45 |
| 8 | 2 | 0 | 4 | 6 | 2 | 2.80 | 0.66 |
| 9 | 17 | 13 | 20 | 22 | 23 | 19.00 | 17.6 |
| 10 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1.60 | 0.18 |
| 11 | 4 | 5 | 8 | 6 | 12 | 7.00 | 5.46 |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1.00 | 0.54 |
| 13 | 2 | 4 | 2 | 4 | 6 | 1.60 | 5.58 |
| THD | 80.64 | 84.89 | 93.92 | 97.41 | 102 | 91.77 | 92.70 |

ตารางที่ 8.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าฮาร์ดมอณิกส์ระหว่าง TMS320C50 DSK กับ เครื่องฮาร์ดมอณิกส์อนาลิเซอร์ของ SATEC



รูปที่ 8.13 แสดงรูปสัญญาณกระแสของ การทดลอง 8.3.2



รูปที่ 8.14 แสดงภาพถ่ายจากเครื่องฮาร์โมนิกสโตนาลิเซอร์ของ SATEC

8.3.3 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 8.3.1 และ 8.3.2 จะเห็นได้ว่าค่าฮาร์มอนิกส์ต่างๆที่บอร์ด TMS320C50 DSK คำนวณได้เมื่อทำการเฉลี่ยแล้วจะมีค่าใกล้เคียงกับที่วัด โดยใช้เครื่องฮาร์มอนิกส์อนาลิเซอร์ มาก

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอุปกรณ์วัดฮาร์มอนิกส์ที่สร้างขึ้นมานี้สามารถวัดค่าฮาร์มอนิกส์จาก โหลดจริงได้อย่างเที่ยงตรงตามจุดประสงค์

หมายเหตุ: เครื่องฮาร์มอนิกส์อนาลิเซอร์ SATEC จะนำผลลัพธ์ 8 ครั้งไปทำการเฉลี่ยก่อน ที่จะแสดงผล ส่วนบอร์ด TMS320C50 DSK จะทำการแสดงผลทุกครั้งที่ทำกรคำนวณเสร็จ



บทที่ 9

ปัญหาและแนวทางการพัฒนาต่อ

9.1 ปัญหาในการทำงานของเครื่องวัดฮาร์โมนิกส์

9.1.1 เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงหรือเริ่มเดินเครื่องใหม่ๆจะต้องรอประมาณ 4 รอบ การแสดงผล ค่าถึงจะเที่ยงตรง

สาเหตุ : เนื่องจากขณะมีการเปลี่ยนแปลงโหลด ค่ากระแสยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว แต่ด้วยความไวในการรับค่าของบอร์ดทำให้บอร์ดจะคำนวณค่าเหล่านั้นไปด้วย อีกทั้งถึงแม้ว่าค่ากระแสจะเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วก็ตาม ค่าฮาร์โมนิกส์ก็จะมีการแกว่งอยู่ตลอดเวลา
แนวทางการแก้ไข : ควรจะให้มีการเฉลี่ยค่าที่คำนวณได้ก่อนแล้วจึงแสดงผล โดยอาจจะเฉลี่ยทุกๆ 5-8 ค่า

9.1.2 บอร์ดจะแฮงค์เมื่อทำการวัด โดยไม่มีโหลด

สาเหตุ : เป็นข้อผิดพลาดของโปรแกรม LCD.ASM จากสมการหน้าที่ 9 บทที่ 2 จะเห็นว่า ถ้าไม่มีโหลด ค่า I_1 ซึ่งเป็นตัวหารจะเป็น 0 ซึ่งจะทำให้เกิดการผิดพลาด (error) ในโปรแกรม

แนวทางการแก้ไข : อาจแก้โปรแกรมให้ทำการตรวจสอบค่าความถี่หลักมูล (I_1) ก่อน ถ้ามีค่าเป็น 0 ก็ไม่ต้องทำการคำนวณ และส่งข้อความเตือนไปที่จอ LCD ถ้าไม่เป็น 0 จึงทำการคำนวณตามปกติ

9.1.3 เมื่อเริ่มเดินเครื่องเมื่อโหลดมีขนาดเล็กๆ (ไม่ถึง 2-3 A.) ผลลัพธ์จะไม่เที่ยงตรง

สาเหตุ : อาจเกิดจากเครื่องลดทอนสัญญาณทำการลดขนาดกระแสลงมากเกินไป ทำให้เมื่อแปลงเป็นแรงดันโดยออปแอมป์แล้วจะมีขนาดเล็กเกินไป

แนวทางการแก้ไข : พิจารณาปรับปรุงหน่วยลดทอนสัญญาณใหม่ (ราบละเอียดอยู่ที่หัวข้อ 9.2.1)

9.1.4 เครื่องแฮงค์โดยไม่ทราบสาเหตุบ่อยๆ

สาเหตุ : เป็นบั๊ก (bug) ของโปรแกรมที่เขียนขึ้น

แนวทางการแก้ไข : พยายามหาจุดผิดพลาดของการเขียนโปรแกรมดู

9.1.5 บางครั้งหลอด LED แสดงค่าไม่ตรงกับความเป็นจริง

สาเหตุ : ไม่ทราบ (เมื่อลองการทำงานโดยสมมติค่าเข้าไปใน DISPLAY.ASM จะให้ค่าออกมาถูกต้อง)

แนวทางการแก้ไข : ไม่ทราบ

หมายเหตุ สาเหตุของข้อผิดพลาดและแนวทางการแก้ไขเหล่านี้เป็นเพียงข้อสันนิษฐานเท่านั้น

9.2 แนวทางการพัฒนาเครื่องให้สามารถใช้งานได้ดีขึ้น

9.2.1 หน่วยคลคทอนสัญญาณควรปรับปรุงให้ใช้งานร่วมกับ CT ได้ โดย CT ต้องตอบสนองต่อความถี่สูงถึงที่บอร์ดจะวัดได้ดี แต่ต้องให้เอาต์พุตที่ป้อนเข้าบอร์ดอยู่ในรูปโวลเตจที่มีขนาดไม่เกิน 3 โวลต์

9.2.2 ควรทำตัวเครื่องให้เรียบร้อยสวยงามทนทานและกะทัดรัด เช่นทำแผ่นวงจรพิมพ์ถาวรสำหรับหน่วยแสดงผล ติดตั้งครีบบระบายความร้อนตามจุดที่จำเป็นและลงกล่องให้เรียบร้อยกะทัดรัด

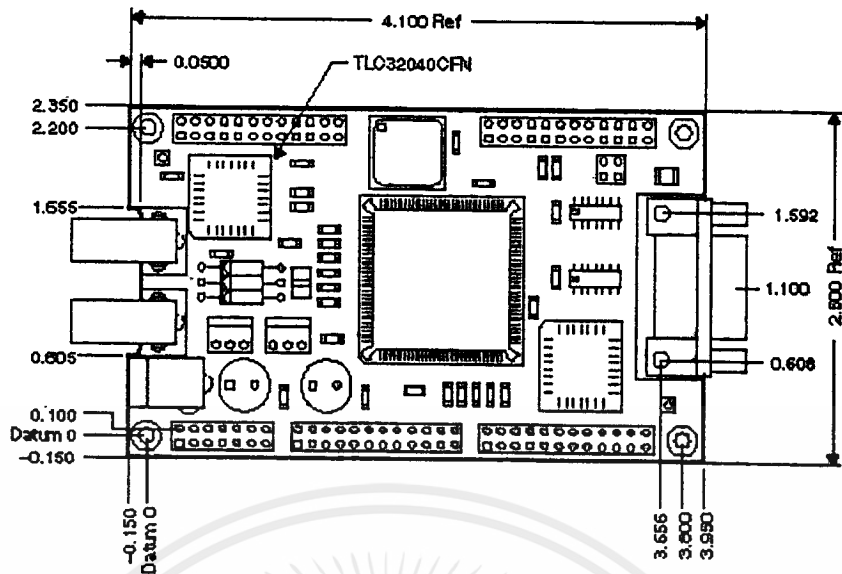
9.2.3 ควรทำให้บอร์ดสามารถทำงานได้ด้วยตนเองไม่ต้องอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ในการโหลดคำสั่ง โดยการใช้ EPROM บันทึกโปรแกรมเอาไว้ แต่จะต้องทำหลังจากโปรแกรมสมบูรณ์ปราศจากปัญหาใดๆแล้วเท่านั้น

9.2.4 ควรเพิ่มขีดความสามารถให้สามารถคำนวณฮาร์โมนิกส์ได้ถึงอันดับสูงที่ขึ้นอีกเท่าที่บอร์ดจะสามารถทำได้

9.2.5 เนื่องจากการแสดงผลในลักษณะนี้ จะทำให้ใช้เวลานานกว่าจะแสดงผลได้ครบทุกค่า ดังนั้นจึงควรลดการแสดงผลทางจอ LCD ให้เหลือเฉพาะค่า THD เท่านั้น แต่ควรจะมีสวิทช์ให้กดต่างหากเมื่อต้องการดูค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ได้ด้วย

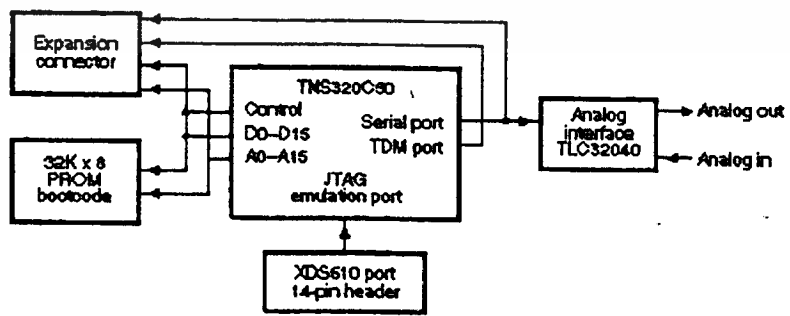


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพแสดงขนาดของบอร์ด TMS320C50 DSK โดยแสดงหน่วยเป็นนิ้ว
ลักษณะและคุณสมบัติโดยทั่วไปของ TMS320C50 DSK

1. ใช้หน่วยประมวลผลทางดิจิทัลเบอร์ TMS320C50
2. ใช้เวลาในการปฏิบัติคำสั่งต่างๆเพียง 50 นาโนวินาที หรือเทียบเท่ากับ 20 ล้านคำสั่งต่อหนึ่งวินาที
3. มี PROM (Programmable Read Only Memory) 8 บิท ขนาด 32 KB
4. มีวงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิทัล และดิจิทัลเป็นอนาลอก (TLC32040) ในตัว
5. มีขั้วต่อแบบ RCA สำหรับรับสัญญาณอนาลอกเข้าและออกอย่างละหนึ่งขั้ว เพื่อต่อกับอุปกรณ์อนาลอก เช่น ลำโพงหรือ ไมโครโฟน
6. มีจุดต่ออีมูเลเตอร์ (emulator connector) เบอร์ XDS510
7. สามารถรองรับข้อมูลเข้าหรือส่งข้อมูลออกได้ เพื่อให้สามารถพัฒนาให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ภายนอกได้



แผนผังแสดงการทำงานของ TMS320C50 DSK

ลักษณะและคุณสมบัติโดยทั่วไปของ TLC32040

1. เป็นวงจรที่ใช้แปลงสัญญาณอนาลอกจากภายนอกให้เป็นดิจิทัลเพื่อส่งข้อมูลให้ TMS320C50 และแปลงสัญญาณดิจิทัลจาก TMS320C50 ให้เป็นอนาลอกเพื่อส่งสัญญาณออกภายนอก ชิป TLC32040 นี้ประกอบรวมอยู่บนวงจรเดียวกับ TMS320C50 DSK

1. จำนวนบิตสูงสุดในการแปลงข้อมูลเท่ากับ 14 บิต
2. ปรับอัตราการสุ่มข้อมูลได้สูงสุดถึง 19200 ตัวอย่างต่อวินาที
3. มีวงจรกรองแบบแบนด์พาส (band-pass) ที่ขาเข้า และแบบ โลว์พาส (low-pass) ที่ขาออก
4. มีจุดเชื่อมต่อเข้ากับหน่วยประมวลผลทางดิจิทัล

ลักษณะและคุณสมบัติโดยทั่วไปของ TMS320C50

1. ปฏิบัติคำสั่งได้มากถึง 20 ล้านคำสั่งต่อ 1 วินาที
2. สามารถใช้คำสั่งร่วมกับหน่วยประมวลผลเบอร์ C1X และ C2X ได้ทุกรุ่น
3. มีหน่วยความจำ RAM ขนาด 16 บิต ทั้งหมด 9 KB
4. มีหน่วยความจำ ROM ขนาด 16 บิต ทั้งหมด 2 KB
5. มีหน่วยความจำ RAM ชนิดเขียนและอ่านได้ในเวลาเดียวกัน ขนาด 16 บิต 1056 Byte
6. สามารถติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกได้มากถึง 224 KB
7. มีอะริทเมติก โลจิกยูนิท (ALU) แอ็คคิวมูเลเตอร์ (ACC) และ แอ็คคิวมูเลเตอร์ บัฟเฟอร์ขนาด 32 บิต
8. มีหน่วยตรรกะแบบขนาน (Parallel Logic Unit) ขนาด 16 บิต
9. มีตัวคูณแบบขนานขนาด 16 x 16 บิต และให้ผลลัพธ์เป็น 32 บิตได้
10. ทำการคูณในช่วงเพียงหนึ่งลูกคลื่น
11. มีรีจิสเตอร์ช่วย 8 ตัว พร้อมหน่วยคำนวณสำหรับการอ้างอิงตำแหน่งข้อมูลแบบโดยอ้อมโดยเฉพาะ
12. มีรีจิสเตอร์สำหรับเก็บค่าขณะรีจิสเตอร์หลักถูกอินเตอร์รัป 11 ตัว
13. มีฮาร์ดแวร์แอสติก 8 ระดับ
14. สามารถเลื่อนตำแหน่งข้อมูลได้ 0 ถึง 16 บิต
15. มีบัฟเฟอร์สำหรับใช้แทนการอ้างหน่วยความจำแบบวน (Circular Addressing)
16. สามารถให้ทำคำสั่งซ้ำได้เป็นทีละคำสั่งหรือเป็นบล็อก

17. มีพอร์ต (port) อนุกรมแบบสื่อสารสองทางพร้อมสัญญาณควบคุม ใช้ติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกได้
18. มีพอร์ตอนุกรมชนิด ทีดีเอ (time-division multiple access)
19. มีเครื่องนับเวลาสำหรับทำการ เริ่มต้น หยุด หรือรีเซ็ตคำสั่ง
20. มีพอร์ตแบบขนานขนาด 64 K ซึ่ง 16 K จะเป็นชนิดเม โมรีแมป (memory-mapped)
21. มีหน่วยพักการทำงานที่สามารถโปรแกรมได้ 16 ตัว
22. อ้างอิงหน่วยความจำแบบดัชนีได้
23. สามารถให้นาฬิกาทำงานแบบหารด้วยหนึ่งได้
24. มีนาฬิกาในตัว



| Symbol | Name |
|--------------|--|
| A15-A0 | Address bus |
| ACC(32) | Accumulator |
| ACOB(32) | Accumulator buffer |
| ACCH | Accumulator high byte |
| ACCL | Accumulator low byte |
| ALU(32) | Arithmetic logic unit |
| ARO-AR7 | Auxiliary registers |
| ARAU | Auxiliary register arithmetic unit |
| ARB(3) | Auxiliary register buffer bits |
| ARCR | Auxiliary register compare register |
| ARP(3) | Auxiliary register pointer bits |
| BMAR | Block move address register |
| BRAF(1) | Block repeat active flag bit |
| BRCR | Block repeat counter register |
| C | Carry bit |
| CALU | Central arithmetic logic unit |
| CBCR(2) | Circular buffer control register |
| CBER1, CBER2 | Circular buffer end registers |
| CBSR1, CCSR2 | Circular buffer start registers |
| CNF | Configuration control bit |
| COMPARE | Compare of program address |
| D15-D0 | Data bus |
| DATA BUS | Data bus |
| DBMR | Dynamic bit manipulation register |
| dma(7) | Data memory address (immediate register) |
| DP(3) | Data memory page pointer bits |

ตารางสรุปรายการฮาร์ดแวร์จากภาพโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Symbol | Name |
|------------------------|---|
| DRB | Direct data memory address bus |
| GREG | Global memory allocation register |
| HM(1) | Hold mode bit |
| IFR | Interrupt flag register |
| IMR | Interrupt mask register |
| INDX | Index register |
| INTM(1) | Interrupt mode bit |
| IPTR(5) | Interrupt vector pointer bits |
| IREG | Instruction register |
| MOS | Microcall stack |
| MP/MC | Microprocessor/microcomputer bit |
| MULTIPLIER | Multiplier |
| MUX | Multiplexer |
| NDX(1) | Enable extra index register bit |
| OV(1) | Overflow bit |
| OVLY(1) | RAM overlay bit |
| OVM(1) | Overflow mode bit |
| P-SCALER (-6, 0, 1, 4) | Product shifter |
| PAER | Block repeat program address end register |
| PASR | Block repeat program address start register |
| PC | Program counter |
| PFC | Prefetch counter |
| PLU | Parallel logic unit |
| PM(2) | Product shifter mode bits |
| PMST | Processor mode status register |
| POSTSCALER(0-7) | Accumulator postscaling shifter |

ตารางสรุปรายการฮาร์ดแวร์จากภาพโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Symbol | Name |
|---------------------------------|--|
| PREG(32) | Product register |
| PRESCALER, SFL(0-16), SFR(0-16) | Prescaling shifters |
| PROGRAM BUS | Program bus |
| RAM(1) | Program RAM enable bit |
| RPTC | Repeat counter register |
| ST0, ST1 | Status registers |
| STACK | Stack |
| SXM(1) | Sign-extension mode bit |
| TC(1) | Test/control bit |
| TREG0 | Temporary register (multiplicand) |
| TREG1(5) | Temporary register (dynamic shift count) |
| TREG2(4) | Temporary register (bit pointer in dynamic bit test) |
| TRM(1) | Enable multiple temporary registers bit |
| XF(1) | External flag pin status bit |

ตารางสรุปรายการฮาร์ดแวร์จากภาพโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม (ต่อ)

โครงสร้างหลักของหน่วยประมวลผลประกอบด้วยบัสสองบัสหลัก คือ โปรแกรมบัสและ คาดำบัส โปรแกรมบัสจะลำเลียงคำสั่งและตัวโอเปอร์เรนด์จากโปรแกรมเมโมรี คาดำบัสจะลำเลียงข้อมูลอื่นๆ เช่นข้อมูลจากออลดูและรีจิสเตอร์ช่วยจนถึงคาดำเมโมรี ทั้งสองบัสนี้สามารถลำเลียงข้อมูลจากคาดำเมโมรีภายในและโปรแกรมเมโมรีภายในหรือภายนอกไปยังหน่วยคูณข้อมูล เพื่อให้สามารถทำการคูณได้ภายในลูกคลื่นเดียว

จากโครงสร้างเช่นนี้ ทำให้หน่วยประมวลผล CSX นี้มีการทำงานที่ซัดหยุ่นมาก สามารถประมวลผลข้อมูลพร้อมทั้งคำนวณทางคณิตศาสตร์ได้พร้อมๆกัน ภายในลูกคลื่นเดียว

หน่วยประมวลผลกลาง

มีส่วนประกอบดังนี้

1. หน่วยคำนวณกลาง (Central Arithmetic Logic Unit)
2. หน่วยตรรกะแบบขนาน (Parallel Logic Unit)
3. รีจิสเตอร์ช่วยของหน่วยคำนวณกลาง (Auxillary Registers Arithmetic Unit)
4. รีจิสเตอร์แบบเมโมรีแมป
5. ตัวควบคุมโปรแกรม (Program Controller)

หน่วยคำนวณกลาง หน่วยประมวลผลกลางจะใช้หน่วยคำนวณกลางในการทำทูลส์คอมพลีเมนต์ (2's complement) โดยหน่วยคำนวณกลางประกอบด้วย

1. วงจรคูณขนาด 16*16 บิต
2. หน่วยคำนวณขนาด (ALU) 32 บิต
3. แอคคิวมูเลเตอร์ขนาด 32 บิต
4. ที่พักข้อมูลสำหรับแอกคิวมูเลเตอร์ ขนาด 32 บิต
5. ตัวเลื่อนตำแหน่งบิตของข้อมูลที่ขาออกจากแอกคิวมูเลเตอร์และรีจิสเตอร์ที่เก็บผลลัพธ์

หน่วยตรรกะแบบขนาน จะประมวลข้อมูลทีละอย่างเป็นอิสระจากหน่วยประมวลผลกลาง แต่จะทำงานขนานกัน หน่วยตรรกะแบบขนานนี้สามารถสังเคราะห์ รีเซ็ต ทดสอบ หรือกลับค่าข้อมูลในรีจิสเตอร์บิตสถานะ รีจิสเตอร์ควบคุมหรือรีจิสเตอร์ข้อมูลต่างๆ ไป หน่วยตรรกะแบบขนานจะมีเส้นทางข้อมูลต่างหากให้กับหน่วยความจำ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าในแอกคิวมูเลเตอร์ ผลที่ได้จากหน่วยตรรกะแบบขนานจะส่งกลับไปที่หน่วยความจำเดิมที่ส่งค่ามา

รีจิสเตอร์ช่วยของหน่วยคำนวณกลาง จะมีหน่วยคำนวณขนาด 16 บิตที่จะคำนวณการอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำแบบโดยอ้อม โดยใช้ข้อมูลจากรีจิสเตอร์ช่วย รีจิสเตอร์อินเด็กซ์ (index register) และรีจิสเตอร์เปรียบเทียบ (auxillary register compare register) รีจิสเตอร์ช่วยของหน่วยคำนวณกลางสามารถใช้อินเด็กซ์ของรีจิสเตอร์ช่วยได้โดยอัตโนมัติในขณะที่ตำแหน่งของหน่วยความจำที่เก็บข้อมูลได้รับการระบุ ผลก็คือการเข้าถึงข้อมูลไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยคำนวณกลางสำหรับการปรับแต่งตำแหน่งข้อมูลให้เหมาะสม ดังนั้นหน่วยคำนวณกลางจึงว่างสำหรับทำงานอื่นขนานกันไป

รีจิสเตอร์แบบเมโมรีแมป บอร์ด CSX มีรีจิสเตอร์ 96 ตัวที่ถูกแมป (mapped) ไปในหน้าที่ 0 ของพื้นที่หน่วยความจำ หน่วยประมวลผล CSX ทุกตัว มีรีจิสเตอร์ของหน่วยประมวลผลกลางอยู่ 28 ตัว และรีจิสเตอร์สำหรับพอร์ตอินพุท (input) และเอาต์พุท (output) 16 ตัว แต่จำนวนรีจิสเตอร์สำหรับอุปกรณ์ต่อพ่วงจะต่างกันไป เนื่องจากรีจิสเตอร์แบบเมโมรีแมปเป็นส่วนหนึ่งในพื้นที่เก็บข้อมูล มันจึงสามารถถูกเขียนหรืออ่านด้วยวิธีการเดียวกับหน่วยความจำข้อมูลอื่นๆ รีจิสเตอร์แบบเมโมรีแมปจะใช้สำหรับการอ้างอิงหน่วยความจำโดยอ้อม การเก็บข้อมูลชั่วคราว

สถานะหน่วยประมวลผลกลาง หรือเก็บจำนวนเต็มที่ประมวลผลมาจากรีจิสเตอร์ช่วยของหน่วย
คำนวณกลาง

ตัวควบคุมโปรแกรม จะประกอบด้วยวงจรที่จะถอดรหัสคำสั่ง การบริหาร ไปป์ไลน์ (pipe
line) ของหน่วยประมวลผลกลาง เก็บสถานะการทำงานของหน่วยประมวลผลกลาง ลักษณะ โครง
สร้างที่ขนานกันไปของบอร์ด C50 ทำให้สามารถทำการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับหน่วยความจำได้
ถึง 3 งานพร้อมๆกัน ณ จังหวะการทำงานใดๆ

ตัวควบคุมโปรแกรมจะประกอบด้วย

โปรแกรมเคานเตอร์ (program counter)

รีจิสเตอร์บอกสถานะ (status register)

รีจิสเตอร์ควบคุม (control register)

ฮาร์ดแวร์สแต็ค (hardware stack)

หน่วยตั้งค่าตำแหน่งหน่วยความจำ (address generator logic)

รีจิสเตอร์คำสั่ง (instruction register)

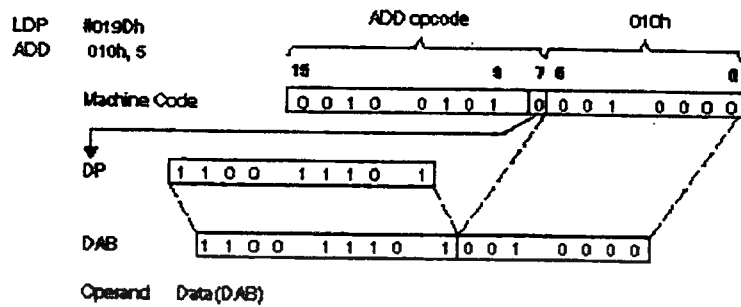
หน่วยความจำบนบอร์ด

บอร์ด C50 DSK มีหน่วยความจำบนบอร์ดดังนี้

โปรแกรมรอม (program ROM) บนบอร์ด C50 จะมีรอมชนิดที่เขียนได้ขนาด 16 บิตอยู่ที่
2 kB หน่วยความจำนี้ใช้สำหรับโหลดโปรแกรมจากหน่วยความจำภายนอกเข้าสู่หน่วยความจำบน
บอร์ดซึ่งทำงานเร็วกว่า หรือเข้าสู่แรม (RAM) ภายนอก

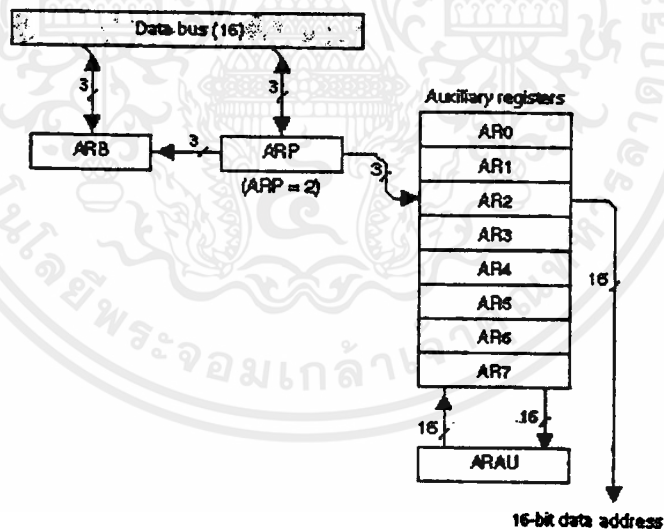
หน่วยความจำแบบคู่อัดแอ็คเซสสำหรับข้อมูลและคำสั่ง (data & program dual access
RAM) บอร์ด C50 จะมีหน่วยความจำชนิดนี้อยู่ 16×1056 ไบต์ หน่วยความจำนี้จะแบ่งเป็น 3
บล็อก โดยจะสามารถปรับได้ คือบล็อก B0 ขนาด 512 ไบต์ บล็อก B1 ขนาด 512 ไบต์ และบล็อก
B2 32 ไบต์ หน่วยความจำชนิดนี้มีหน้าที่หลักคือการเก็บค่าข้อมูล แต่ถ้าหากจำเป็นก็สามารถใช้เก็บ
โปรแกรมได้ด้วย สำหรับบล็อกที่ B1 และ B2 จะใช้เป็นหน่วยความจำข้อมูลเท่านั้น ส่วนบล็อก B0
สามารถเลือกให้เป็นหน่วยความจำโปรแกรมได้ด้วย หน่วยความจำชนิดนี้ทำให้บอร์ด C50 ทำงาน
ได้เร็วขึ้นเพราะการเขียนหรืออ่านข้อมูลสามารถทำพร้อมกันได้ ในจังหวะการทำงานเดียวกัน

ข้อมูลหน้าโคหนดหนึ่งจาก 512 หน้า ส่วนอีก 7 บิตจะชี้ไปยังเวิร์ด (word) โคเวิร์ดหนึ่งจาก 128 เวิร์ดในหน้านั้น



รูปแสดงการอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำโดยตรง

การอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำโดยอ้อม รีจิสเตอร์ช่วยทั้ง 8 ตัวจะเป็นตัวช่วยในการอ้างอิงหน่วยความจำแบบนี้ ในการอ้างอิงหน่วยความจำแบบนี้ ตำแหน่งใดก็ตามในข้อมูลขนาด 64k เวิร์ดสามารถเข้าถึงได้จากข้อมูล 16 บิตของรีจิสเตอร์ช่วย



รูปแสดงการอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำโดยอ้อม

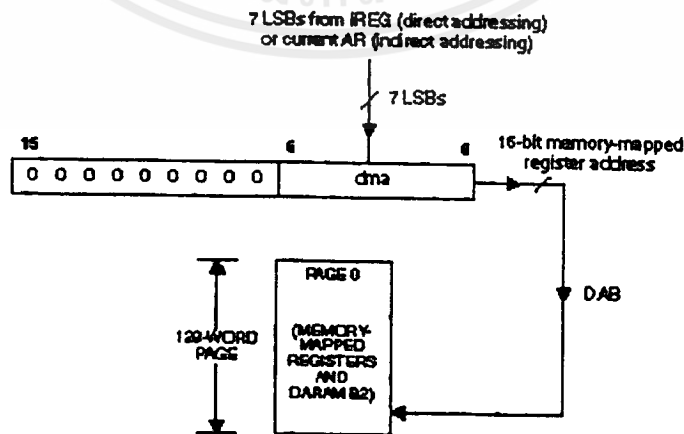
การอ้างอิงตำแหน่งหน่วยความจำแบบอิมมีเดีย (immediate addressing) ในการอ้างอิง การอ้างอิงตำแหน่งหน่วยความจำแบบนี้ ข้อมูลที่นำไปใช้งานจะใส่ไว้กับชุดคำสั่งเลย ไม่ต้องไป ค้างมาจากที่อื่น บอร์ด CS0 มีทั้งคำสั่งขนาด 1 เวิร์ดและ 2 เวิร์ด

| Short Immediate (1-Word) | | | Long Immediate (2-Word) | |
|--------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|------|
| 8-Bit Constant | 9-Bit Constant | 13-Bit Constant | 16-Bit Constant | |
| ADD | LDP | MPY | ADD | OR |
| ADRK | | | AND | RPT |
| LACL | | | APL | RPTZ |
| LAR | | | OPL | SPLK |
| RPT | | | LACC | SUB |
| SBRK | | | LAR | XOR |
| SUB | | | MPY | XPL |
| | | | OPL | |

ตารางแสดงคำสั่งที่สามารถใช้การอ้างอิงตำแหน่งหน่วยความจำแบบอิมมีเดียได้

การอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำแบบเดดิเคตริจิสเตอร์ (dedicate-register addressing) การอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำแบบนี้มีลักษณะเหมือนการอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความ จำแบบอิมมีเดีย ยกเว้นตำแหน่งของข้อมูลจะมาจากรีจิสเตอร์แบบเมโมรีแมปในหน่วยประมวล ผลกลาง ข้อดีก็คือข้อมูลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขณะที่ทำการปฏิบัติโปรแกรมอยู่

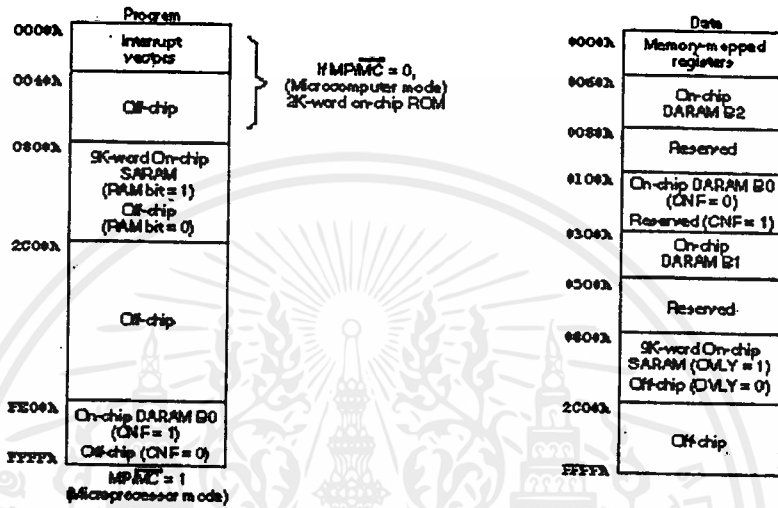
การการอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำแบบเมโมรีแมป ด้วยวิธีการนี้เราสามารถปรับ เปลี่ยนเมโมรีแมปรีจิสเตอร์โดยไม่มีผลต่อตัวชี้หน้าข้อมูล การอ้างอิงวิธีนี้ทำงานคล้ายการอ้างอิง โดยตรง ยกเว้น 9 บิตบนจะถูกตั้งให้มีสถานะเป็น 0 แทนที่จะถูกโหลดด้วยค่าจากตัวชี้ตำแหน่ง ทำ ให้เราสามารถอ้างอิงตำแหน่งของเมโมรีแมปรีจิสเตอร์ของข้อมูลหน้า 0 ได้โดยตรงโดยไม่ต้องมี การเปลี่ยนหัวของตัวชี้ตำแหน่งหรือรีจิสเตอร์ช่วย



รูปแสดงการอ้างอิงตำแหน่งของหน่วยความจำแบบเมโมรีแมป

การระบุตำแหน่งแบบวน ชั้นตอนการคำนวณหลายอย่าง เช่น การหมุนเวียนหรือแบบที่ สัมพันธ์ สามารถใช้ที่פקข้อมูลแบบวนในหน่วยความจำเพื่อเป็นหน้าค่าที่เลื่อนได้ซึ่งบรรจุข้อมูล ล่าสุดจากการประมวลผล บอร์ด C50 รองรับการวนของตัวพักข้อมูลที่เกิดขึ้นพร้อมกันได้โดย อาศัยรีจิสเตอร์ช่วย

ขนาดของหน่วยความจำ.



รูปแสดงผังหน่วยความจำของบอร์ด C50

| Bit values | | | ROM | SARAM | DARAM Bx | Off-Chip |
|------------|-----|-------|------------|------------|-------------|-------------------------|
| CNF | RAM | MP/MC | (2K-words) | (9K-words) | (512-words) | |
| 0 | 0 | 0 | 0000-07FF | Off-chip | Off-chip | 0800-FFFF |
| 0 | 0 | 1 | Off-chip | Off-chip | Off-chip | 0000-FFFF |
| 0 | 1 | 0 | 0000-07FF | 0800-2BFF | Off-chip | 2C00-FFFF |
| 0 | 1 | 1 | Off-chip | 0800-2BFF | Off-chip | 0000-07FF, 2C00-FFFF |
| 1 | 0 | 0 | 0000-07FF | Off-chip | FE00-FFFF | 0800-FDFF |
| 1 | 0 | 1 | Off-chip | Off-chip | FE00-FFFF | 0000-FDFF |
| 1 | 1 | 0 | 0000-07FF | 0800-2BFF | FE00-FFFF | 2C00-FDFF |
| 1 | 1 | 1 | Off-chip | 0800-2BFF | FE00-FFFF | 0000-07FF, 2C00-FDFF |

ตารางแสดงการจัดหน่วยความจำโปรแกรมของบอร์ด C50

| Bit values | | Registers | DARAM B2 | DARAM Bx | DARAM B1 | SARAM | Off-Chip |
|------------|------|------------|------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| CNF | ONLY | (9K-words) | (32-words) | (512-words) | (512-words) | (9K-words) | |
| 0 | 0 | 0000-005F | 0060-007F | 0100-02FF | 0300-04FF | Off-chip | 0800-FFFF |
| 0 | 1 | 0000-006F | 0060-007F | 0100-02FF | 0300-04FF | 0800-2BFF | 2C00-FFFF |
| 1 | 0 | 0000-005F | 0060-007F | Reserved | 0300-04FF | Off-chip | 0800-FFFF |
| 1 | 1 | 0000-006F | 0060-007F | Reserved | 0300-04FF | 0800-2BFF | 2C00-FFFF |

ตารางแสดงการจัดหน่วยความจำข้อมูลบนบอร์ด C50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;-----;
; OSCILLO.ASM
; ADVISER SIRIWAT   POTHIWATCHAKOON   ;
; ADVISEE WIRATORN  RUKSVANICHPONGS 36014408 ;
;   WIROTE   CHAMBOONROD   36014410   ;
;   WEERAPHAN KUNTHACHOTE   36014423   ;

```

```

    .mmregs
FFT_S   .set 1024
FFT_S-1 .set 1023
FFT_S/2 .set 512
(FFT_S/2)-1 .set 511

```

```

;-----;
TA .set 31 ; Auxin ---+ +--- Loopback
RA .set 31 ; Synch --+ || +- BP Filter
TAp .set 1 ; | | | |
RAp .set 1 ; +-----+
TB .set 63 ;|00 00 G1 G0 | SY AX LB BP|
RB .set 63 ; +-----+
AIC_CMD .set 080h ; GAIN
    .ds 0f00h
TEMP .word 0 ;location of TEMPorary storage
ACCU_lo .word 0 ;
ACCU_hi .word 0 ;
STAT1 .word 0 ;STAT1 storage
;-----;

```

```

    .ps 080ah
    B RINT ;0A; Serial port receive interrupt RINT
    B XINT ;0C; Serial port transmit interrupt XINT

```

* TMS32C05X INITIALIZATION *
* This routine initializes the C5x registers, internal RAM

```
.ps 0a00h
.entry
start setc INTM      ; Disable interrupts
ldp #0              ; Set data page pointer
spk #830h,PMST     ; 9K on-chip RAM as Data, No ROM
lacl #0            ; Set Wait State Control Register
samm CWSR         ; for 0 waits in pgm & data memory
samm PDWSR       ;
*
* initialize and reset serial port
*
spk #20h,TCR
spk #1,PRD
mar *_AR0
lacl #08h         ; set FSM bit for FSX/FSR per frame
samm spc         ; Configure for 16 bit mode with
lacl #0C8h       ; external CLKX, reset tx and rx
samm spc
lamm drr         ; clear first int
lacc #0080h
sach dxr         ; clear first int
sacL GREG        ; Pulse AIC reset by setting it low
lar AR0,#0FFFFh
rpt #10000       ; and taking it high after 1000 cycles
lacc *,0,AR0     ; (.5ms at 50ns)
sach GREG
setc SXM
setc OVM
;-----
lar AR7,#0       ;Buffer initially filled
call AIC_SET     ; DO NOT CHANGE DP WITHOUT RESTORING IT!
lacl #010h      ; RINT
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

samm IMR      ;
ldp #TEMP
FFT:  lar  AR0,#FFT_S/2  ;
      mar  *,AR0          ;start FFT with AR0=FFTSize
new_stg: lar  AR1,#_D_base  ;AR1 is the TOP BFLY address
        lar  AR2,#_D_base  ;AR2 is the BOT BFLY address
        lar  AR3,#_T_base+1 ;AR3 is the TWiddle pointer
        lar  AR4,#FFT_S/2  ;AR4 counts DFT blocks
        b   n_DFT2,*,AR1   ;
DFT:  mar  *BR0+,AR5      ;complete circular buffer for TW's
      lar  AR5,#1         ;set up DFT loop with *BR0+/BANZ
      mar  *BR0+,AR1      ;using 1 cuts *BR0+ loop in half!
      ;-----
      ; AR1=Top AR2=Bottom AR3=Twiddle
      ;-----
BFLY: lacc  *,14,AR2      ;(imag1+imag2)/4
      add  *,14,AR1      ;
      sach *,+1,AR2      ;store TOP imag
      sub  *,15          ;(imag1-imag2)/2
      sach *,+1,AR1      ;store BOT imag
      lacc *,14,AR2      ;(real1+real2)/4
      add  *,14,AR1      ;
      sach *,+1,AR2      ;store TOP real
      sub  *,15          ;(real1-real2)/2
      sach *,1,AR5       ;store BOT real
      benz OK,*BR0+,AR3  ;If at DFT end quit early
      ;-----
      mar  *,+AR2        ;clean up TW base (xxx0000+1)
      mar  *+            ;modify BOTom DATA pointer
      mar  *0+          ;
      mar  *0+,AR1      ;
n_DFT2: mar  *0+        ;modify the TOP pointer
        mar  *0+,AR4    ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

banz DFT,*0-,AR3 ;dec DFT block count AR4 by OFFset
mar *,AR0 ;
mar *BR0+ ;
banz new_stg,* ;if OFFset was 1, now cleared
b endFFT ;
;-----
OK ltr *,AR2 ;TREG=TWR *NOTE* Twiddles are Q15
mpy *- ;PREG=REAL*TWR
ltr *,AR3 ;TREG=IMAG ACCU=REAL*TWR
mpy * ;PREG=IMAG*TWI AR2=R AR3=I
ltr *,AR2 ;TREG=TWI ACCU=REAL*TWR-IMAG*TWI
mpy * ;PREG=REAL*TWI
sach *,1 ;
ltr *,AR3 ;TREG=IMAG ACCU=REAL*TWI
mpy *BR0+,AR2 ;PREG=IMAG*TWR
apac ; ACCU=IMAG*TWR+REAL*TWI
sach *,1 ;
b BFLY,*,AR1 ;
;-----
endFFT: mar *,AR2 ;Transform REAL & IMAG to log magnitude
lar AR2,#_D_base ;AR3=FFT data pointer
lar AR3,#FFT_S-1 ;AR5=FFT loop counter
more_MAG sqra *+ ;PREG=IMAG^2
ltr * ;TREG=REAL ACCU=IMAG^2
mpy *,AR1 ;PREG=REAL^2
apac ;ACCU=REAL^2+IMAG^2
lar AR1,#31 ;NORMALize the accumulator
rpt #30 ;use for other types of conversion
norm *- ;
nop
nop
;; banz sig_NZ,*,AR2 ;if zero must return 0
mar *,AR2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

bcnd sig_NZ,NEQ ;if zero must return 0
lar AR1,#0 ;
sig_NZ sach *,2 ;clear explicit 1.0 from mantissa
lacl * ;load into accumulator and
and #0FF80h ;; clear LSB's for AIC
sar AR1,* ;append the exponent (AR5)
add *,16 ;
xor #020h,15 ;change to 2's compliment
rpt #3 ;jam result to top of ACCU
sfl ;
sach *+,7,AR3 ;
banz more_MAG,*-,AR2 ;keep going until all done
;-----
BITREV: lar AR0,#FFT_S ;Now perform Output bit reversal
lar AR1,#_D_base ;by moving the magnitude, which
lar AR2,#_D_base+1 ;is in the REAL slots, into the
lar AR3,#1022 ;IMAG slots of the FFT data array
more_BR: lacc *+ ;load the magnitude
mar *+,AR1 ;
sacl *BR0+,0,AR3 ;move it to an open IMAG slot
banz more_BR,*-,AR2 ;more data to move?
NOP
NOP
;-----
MOVE_IO: mar *,AR7 ;wait until buffer is full
banz MOVE_IO,*-,AR2 ;(AR7 is decremented by ISR)
lar AR3,#_D_base ;AR3=FFT data pointer
lar AR4,#_B_base ;AR4=BUFF data pointer
lar AR5,#(FFT_S/2)-1 ;AR5=FFT loop counter
lar AR6,#_B_base ;AR6=ISR BUFF data pointer
lacc #07ffCh ;send synch when BUFF is full
samm DXR ;
rpt #00800h ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

nop          ;
lar  AR2,#_T_base+1 ;AR2=WIN data pointer
lar  AR7,#FFT_S-1  ;AR7=ISR BUFF loop counter
;-----
lar  AR0,#FFT_S/2  ; Use twiddle table for raised
more_IO: lacc #04000h,1 ; cosine window
add  *BR0+,0,AR4   ;
sfr          ;
sacL TEMP        ;
lt  TEMP          ;TREG=WIN
mpy  *,AR3        ;PREG=IN*WIN
lacL *,AR4        ;ACCU=magnitude (put in Buffer)
sacL *+,0,AR3     ;
sach *+          ;IMAG=0
pac          ;
sach *+,1,AR5     ;REAL=IN (windowed buffer)
clrc INTM        ;1st BUFF posn clr so enable INT's
banz more_IO,*-,AR2 ;
lar  AR5,#(FFT_S/2)-1 ;AR5=FFT loop counter
more_IO2: lacc #04000h,1 ; cosine window
add  *BR0-,0,AR4   ;
sfr          ;
sacL TEMP        ;
lt  TEMP          ;TREG=IN
mpy  *,AR3        ;PREG=IN*WIN
lacL *,AR4        ;ACCU=magnitude (put in Buffer)
sacL *+,0,AR3     ;
sach *+          ;IMAG=0
pac          ;
sach *+,1,AR5     ;REAL=IN (windowed buffer)
banz more_IO2,*-,AR2 ;
b  FFT          ;
;-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XINT rete

RINT: ;Recover the ARP from ARB (MON26 only)

mar *,AR7 ;AR6 = current buffer position

banz more_buf,*-,AR6 ;if buffer is full RET w/o EINT

lar AR7,#0 ;

lamm DRR ;***** added in to reset the SPI *****

reti ;

more_buf;

lacc * ;

or #1

samm DXR ;

lamm DRR ;

sac1 #+ ;store data from DRR

rete ;

AIC_SET: lacl #020h

samm IMR ;XMIT interrupt

lacc #AIC_CMD,2 ;

add #07h ;

call AIC_2nd ;

;

lacc #TB,9 ;

add #RB,2 ;

add #02h ;

call AIC_2nd ;

;

lacc #TA,9 ;

add #RA,2 ;

call AIC_2nd ;

;

ret ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

AIC_2nd:      ;
sach DXR      ;
clrc INTM     ;;
idle         ;
add #6,15     ;0000 0000 0000 0011 XXXXX XXXXX XXXXX XXXXX b
sach DXR      ;
; clrc INTM   ;;Unlike C2x, IDLE does NOT eint's!
idle         ;ACCU_hi requests 2nd XMIT
samm DXR      ;
; clrc INTM   ;;
idle         ;ACCU_lo sets up registers
laci #0       ;
samm DXR      ;make sure the word got sent
; clrc INTM   ;;
idle         ;
setc INTM
ret          ;

```

```
.ds 01000h
```

```
.listoff
```

```
.include "dsk_twid.asm" ;NOTE: Internal RAM block B2 is used
```

```
.liston
```

```

;-----;
; HARMONICS DETECTOR USING TMS320C50 DSK ;
;-----;
; ;
; ADVISER SIRIWAT POTHIWATCHAKOON ;
; ADVISEE WIRATORN RUKSVANICHPONGS 36014408 ;
; WIROTE CHAMBOONROD 36014410 ;
; WEERAPHAN KUNTHACHOTE 36014423 ;
;-----;

```

```

;-----;
; MODIFY IEEE_THD ;
;-----;

```

```

Isc/Im_1 .SET 1 ; 0 < Isc/Im < 20 ;
Isc/Im_2 .SET 0 ; 20 < Isc/Im < 50 ;
Isc/Im_3 .SET 0 ; 50 < Isc/Im < 100 ;
Isc/Im_4 .SET 0 ; 100 < Isc/Im < 1000 ;
Isc/Im_5 .SET 0 ; 1000 < Isc/Im ;
;-----;

```

```

mmregs
FFT_S .set 1024
FFT_S-1 .set 1023
FFT_S/2 .set 512
(FFT_S/2)-1 .set 511

```

```

;-----;
TA .set 31 ; Auxin —+ +— Loopback
RA .set 31 ; Synch —+ | | +— BP Filter
TAp .set 1 ; | | | |
RAp .set 1 ; +-----+-----+
TB .set 63 ;|00 00 G1 G0| SY AX LB BP|
RB .set 63 ;+-----+-----+

```

```

AIC_CMD .set 080h      ; GAIN
        .ds 0f00h

TEMP   .word 0          ;location of TEMPorary storage
ACCU_lo .word 0        ;
ACCU_hi .word 0        ;
STAT1  .word 0        ;STAT1 storage
;-----

```

```

.ps 080ah
B   RINT    ;0A; Serial port receive interrupt RINT
B   XINT    ;0C; Serial port transmit interrupt XINT

```

*** TMS32C05X INITIALIZATION ***

*** This routine initializes the C5x registers, internal RAM ***

```

.ps 0a00h
.entry
start setc INTM      ; Disable interrupts
ldp  #0              ; Set data page pointer
splk #830h,PMST     ; 9K on-chip RAM as Data, No ROM

lacl #0              ; Set Wait State Control Register
samm CWSR           ; for 0 waits in pgm & data memory
samm PDWSR          ;

```

* initialize and reset serial port

*

```

splk #20h,TCR
splk #1,PRD
mar  *,AR0

lacl #08h           ; set FSM bit for FSX/FSR per frame
samm spc            ; Configure for 16 bit mode with
lacl #0C8h         ; external CLKX, reset tx and rx
samm spc

```

```

lamm drr      ; clear first int
lacc #0080h
sach dxr      ; clear first int
sac1 GREG     ; Pulse AIC reset by setting it low
lar AR0,#0FFFFh
rpt #10000    ; and taking it high after 1000 cycles
lacc *,0,AR0  ; (.5ms at 50ns)
sach GREG
setc SXM
setc OVM
;-----
lar AR7,#0    ;Buffer initialy filled
call AIC_SET  ; DO NOT CHANGE DP WITHOUT RESTORING IT!
lacl #010h   ; RINT
samm IMR     ;
;
ldp #TEMP
FFT: lar AR0,#FFT_S/2 ;
mar *,AR0    ;start FFT with AR0=FFTSize
new_stg: lar AR1,#_D_base ;AR1 is the TOP BFLY address
lar AR2,#_D_base ;AR2 is the BOT BFLY address
lar AR3,#_T_base+1 ;AR3 is the Twiddle pointer
lar AR4,#FFT_S/2 ;AR4 counts DFT blocks
b n_DFT2,*,AR1 ;
DFT: mar *BR0+,AR5 ;complete circular buffer for TW's
lar AR5,#1    ;set up DFT loop with *BR0+/BANZ
mar *BR0+,AR1 ;using l cuts *BR0+ loop in half
;-----
; AR1=Top AR2=Bottom AR3=Twiddle
;-----
BFLY: lacc *,14,AR2 ;(imag1+imag2)/4
add *,14,AR1 ;
sach *+,1,AR2 ;store TOP imag

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

sub *,15 ;(imag1-imag2)/2
sach *+,1,AR1 ;store BOT imag
lacc *,14,AR2 ;(real1+real2)/4
add *,14,AR1 ;
sach *+,1,AR2 ;store TOP real
sub *,15 ;(real1-real2)/2
sach *,1,AR5 ;store BOT real
banz OK,*BR0+,AR3 ;If at DFT end quit early
;-----
mar *+,AR2 ;clean up TW base (xxx0000+1)
mar *+ ;modify BOTom DATA pointer
mar *0+ ;
mar *0+,AR1 ;
n_DFT2: mar *0+ ;modify the TOP pointer
mar *0+,AR4 ;
banz DFT,*0-,AR3 ;dec DFT block count AR4 by OFFSET
mar *,AR0 ;
mar *BR0+ ;
banz new_stg,* ;if OFFSET was 1, now cleared
b endFFT ;
;-----
OK lt *-,AR2 ;TREG=TWR *NOTE* Twiddles are Q15
mpy *- ;PREG=REAL*TWR
ltp *+,AR3 ;TREG=IMAG ACCU=REAL*TWR
mpy * ;PREG=IMAG*TWI AR2=R AR3=I
lts *+,AR2 ;TREG=TWI ACCU=REAL*TWR-IMAG*TWI
mpy * ;PREG=REAL*TWI
sach *-,1 ;
ltp *,AR3 ;TREG=IMAG ACCU=REAL*TWI
mpy *BR0+,AR2 ;PREG=IMAG*TWR
apac ; ACCU=IMAG*TWR+REAL*TWI
sach *+,1 ;
b BFLY,*+,AR1 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;-----
endFFT: mar *,AR2 ;Transform REAL & IMAG to log magnitude
lar AR2,#_D_base ;AR3=FFT data pointer
lar AR3,#FFT_S-1 ;AR5=FFT loop counter
more_MAG sqra *+ ;PREG=IMAG^2
ltp * ;TREG=REAL ACCU=IMAG^2

```

```

mpy *,AR2
apac
mainr: ldp #82
sach ACCH
sac1 ACCL
lacc #0
loop_r: sac1 GUESS
lacc ACCH,16
add ACCL
lt GUESS
mpyu GUESS
spac
bcnd buri,gt
bcnd meong,eq
lacc GUESS
sub #1
sac1 GUESS
b meong
buri: lacc GUESS
add #1
b loop_r
meong: lacc GUESS
sac1 *+,0,AR3
banz more_MAG,*-,AR2

```



ldp #0

BITREV: lar AR0,#FFT_S ;Now perform Output bit reversal

lar AR1,#_D_base ;by moving the magnitude, which

lar AR2,#_D_base+1 ;is in the REAL slots, into the

lar AR3,#FFT_S-1 ;IMAG slots of the FFT data array

more_BR: lacc *+ ;load the magnitude

mar *+,AR1 ;

sac1 *BR0+,0,AR3 ;move it to an open IMAG slot

banz more_BR,*-,AR2 ;more data to move?

CALL DISPLAY

MOVE_IO: mar *+,AR7 ;wait until buffer is full

banz MOVE_IO,*-,AR2 ;(AR7 is decremented by ISR)

lar AR3,#_D_base ;AR3=FFT data pointer

lar AR4,#_B_base ;AR4=BUFF data pointer

lar AR5,#(FFT_S/2)-1 ;AR5=FFT loop counter

lar AR6,#_B_base ;AR6=ISR BUFF data pointer

lacc #07ffCh ;send synch when BUFF is full

samm DXR ;

rpt #00800h ;

nop ;

lar AR2,#_T_base+1 ;AR2=WIN data pointer

lar AR7,#FFT_S-1 ;AR7=ISR BUFF loop counter

;

lar AR0,#FFT_S/2 ; Use twiddle table for raised

```

NOP
NOP
more_IO: lacc #04000h,1 ; cosine window
add *BR0+,0,AR4 ;
sfr ;
sac1 TEMP ;
lt TEMP ;TREG=WIN
mpy *,AR3 ;PREG=IN*WIN
lac1 *,AR4 ;ACCU=magnitude (put in Buffer)
sac1 *+,0,AR3 ;
sach *+ ;IMAG=0
pac ;
sach *+,1,AR5 ;REAL=IN (windowed buffer)
clrc INTM ;1st BUFF posn clr so enable INT's
banz more_IO,*-,AR2 ;
lar AR5,#(FFT_S/2)-1 ;AR5=FFT loop counter
more_IO2 lacc #04000h,1 ; cosine window
add *BR0-,0,AR4 ;
sfr ;
sac1 TEMP ;
lt TEMP ;TREG=IN
mpy *,AR3 ;PREG=IN*WIN
lac1 *,AR4 ;ACCU=magnitude (put in Buffer)
sac1 *+,0,AR3 ;
sach *+ ;IMAG=0
pac ;
sach *+,1,AR5 ;REAL=IN (windowed buffer)
banz more_IO2,*-,AR2 ;
b FFT ;
;-----
XINT rete
;-----
RINT: ;Recover the ARP from ARB (MON26 only)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

mar  *,AR7      ;AR6 = current buffer position
banz more_buf,*-,AR6 ;if buffer is full RET w/o EINT
lar  AR7,#0     ;
lamm DRR        ;***** added in to reset the SPI *****
reti          ;
more_buf;
lacc *         ;
or   #1
samm DXR       ;
lamm DRR       ;
sac1 *+        ;store data from DRR
rete          ;

```

```

AIC_SET: lacl #020h
samm IMR      ;XMIT interrupt
; lacc #AIC_CMD,2 ;
lacc #40h
add #03h      ;
call AIC_2nd  ;
;-----
lacc #TB,9    ;
add #RB,2     ;
add #02h      ;
call AIC_2nd  ;
;-----
lacc #TA,9    ;
add #RA,2     ;
call AIC_2nd  ;
;-----
ret          ;

```

```

AIC_2nd:      ;
sach DXR     ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    clr INTM      ;
    idle         ;
    add #6,15    ;0000 0000 0000 0011 XXXX XXXX XXXX XXXX b
    sach DXR     ;
;   clr INTM     ;Unlike C2x, IDLE does NOT eint's!
    idle        ;ACCU_hi requests 2nd XMIT
    samm DXR    ;
;   clr INTM     ;
    idle        ;ACCU_lo sets up registers
    lacl #0     ;
    samm DXR    ;make sure the word got sent
;   clr INTM     ;
    idle        ;
    setc INTM   ;
    ret         ;
;
.include "lcd5x.asm"
.ds 01000h
.liston
.include "dsk_twid.asm"
.liston

```


%HARM2_INT .SET 35 ; Address 2923h ; NOT CHANGE
 %HARM3_INT .SET 36 ; Address 2924h ; NOT CHANGE
 %HARM4_INT .SET 37 ; Address 2925h ; NOT CHANGE
 %HARM5_INT .SET 38 ; Address 2926h ; NOT CHANGE
 %HARM6_INT .SET 39 ; Address 2927h ; NOT CHANGE
 %HARM7_INT .SET 40 ; Address 2928h ; NOT CHANGE
 %HARM8_INT .SET 41 ; Address 2929h ; NOT CHANGE
 %HARM9_INT .SET 42 ; Address 292Ah ; NOT CHANGE
 %HARM10_INT .SET 43 ; Address 292Bh ; NOT CHANGE
 %HARM11_INT .SET 44 ; Address 292Ch ; NOT CHANGE
 %HARM12_INT .SET 45 ; Address 292Dh ; NOT CHANGE
 %HARM13_INT .SET 46 ; Address 292Eh ; NOT CHANGE
 ;
 %HARM2_REM .SET 50 ; Address 2932h ; NOT CHANGE
 %HARM3_REM .SET 51 ; Address 2933h ; NOT CHANGE
 %HARM4_REM .SET 52 ; Address 2934h ; NOT CHANGE
 %HARM5_REM .SET 53 ; Address 2935h ; NOT CHANGE
 %HARM6_REM .SET 54 ; Address 2936h ; NOT CHANGE
 %HARM7_REM .SET 55 ; Address 2937h ; NOT CHANGE
 %HARM8_REM .SET 56 ; Address 2938h ; NOT CHANGE
 %HARM9_REM .SET 57 ; Address 2939h ; NOT CHANGE
 %HARM10_REM .SET 58 ; Address 293Ah ; NOT CHANGE
 %HARM11_REM .SET 59 ; Address 293Bh ; NOT CHANGE
 %HARM12_REM .SET 60 ; Address 293Ch ; NOT CHANGE
 %HARM13_REM .SET 61 ; Address 293Dh ; NOT CHANGE
 ;
 ZIGMA_SQ_LO .SET 65 ; Address 2941h ;
 ZIGMA_SQ_HI .SET 66 ; Address 2942h ;
 %THD_INT .SET 67 ; Address 2943h ;
 %THD_REM .SET 68 ; Address 2944h ;
 LINECHECK .SET 69 ; Address 2945h ;
 ;
 PO_TEMP .SET 70 ; Address 2946h ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P1_TEMP .SET 71 ; Address 2947h ;
 P2_TEMP .SET 72 ; Address 2948h ;

 MAX_HAR .SET 73 ; Address 2949h ;
 MAX_VAL .SET 74 ; Address 294Ah ;
 DATA_OUT .SET 75 ; Address 294Bh ;
 LINE .SET 76 ; Address 294Ch ;
 %HAR_INT .SET 77 ; Address 294Dh ;
 %HAR_REM .SET 78 ; Address 294Eh ;

 H_ORDER_1 .SET 99 ; Address 2963h ; NOT CHANGE
 H_ORDER_2 .SET 100 ; Address 2964h ; NOT CHANGE

 L1P0 .SET 102 ; Address 2966h ; NOT CHANGE
 L1P1 .SET 103 ; Address 2967h ; NOT CHANGE
 L1P2 .SET 104 ; Address 2968h ; NOT CHANGE
 L1P3 .SET 106 ; Address 296Ah ; NOT CHANGE
 L1P4 .SET 107 ; Address 296Bh ; NOT CHANGE

 THD_I_0 .SET 118 ; Address 2976h ; NOT CHANGE
 THD_I_1 .SET 119 ; Address 2977h ; NOT CHANGE
 THD_I_2 .SET 120 ; Address 2978h ; NOT CHANGE
 THD_R_1 .SET 122 ; Address 297Ah ; NOT CHANGE
 THD_R_2 .SET 123 ; Address 297Bh ; NOT CHANGE

 ;
 ;

DISPLAY:

LAR AR3 ,#12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกวนนำไปใช้

```

LAR AR2 ,#2913h
LAR AR1 ,#1028h
MAR * ,AR1
READ: LACC *
      ADRK #28h
      MAR * ,AR2
      SACL *+ ,0 ,AR3
      BANZ READ ,*-,AR1

```

```

LDP #82 ; START DATA AT Address 2900h
CLRC SXM ; DISABLE SIGN EXTENSION

CALL %HARMONIC ; CALCULATE % HARMONICS
CALL %THD ; CALCULATE % THD
CALL INI_LCD ; INITIAL LCD
CALL HAR_LCD ; SHOW % HARMONICS
CALL THD_LCD ; SHOW % THD
CALL OUTPUT ; OUT SIGNAL TO PORT

END_D: SETC SXM
      LDP #0
      RET ; END OF DISPLAY

%HARMONIC: LAR AR1 ,#2914h ; START HARMONIC 2
          LAR AR2 ,#2923h ; START % HARMONIC 2 PART INTEGER
          LAR AR3 ,#2932h ; START % HARMONIC 2 PART REMAINDER
LOAD_%H: MAR * ,AR1 ;\
          LACC *+ ;> HARM_N :=HAR AT ADDRESS IN AR1
          SACL HARM_N ;/
          CALL CALCULATION ; GOTO SUBPROGRAM CALCULATION
          MAR * ,AR2 ;\

```

```

LACC INTEGER    ;>%HARMONIC PART INTEGER :=INTEGER
SACL *+        ;/
MAR * ,AR3     ;\
LACC REMAINDER ;>%HARMONIC PART REMAIN :=REMAINDER
SACL *+        ;/
SAR AR1 ,TMP1  ;\
LACC TMP1      ;|
SUB #11        ;> GOTO LOAD UNTIL ADDRESS = 291Fh
SUB #2914h ,0  ;| (AR1 > (2914h+Bh) GO OUT OF LOOP
BCND LOAD_%H ,LEQ ;/
RET           ; RETURN TO DISPLAY

```

CALCULATION:

```

; LACC FUNDA
; SUB HARM_N
; BCND END_D ,LEQ
LACC #10000    ;\
SACL TMP1     ;|
LT TMP1       ;> ACCU := HARM*10000
MPYU HARM_N   ;|
PAC           ;/
MAR * ,AR0
LAR AR0 ,#00h

```

```

PRE_DIV: SUB FUNDA
ADRK #1
BCND PRE_DIV ,GEQ
SBRK #1
SAR AR0 ,INTEGER
LACC INTEGER  ;INTEGER := (ACC) / FUNDA
SUB #100      ;(NOT CALCULATE REMAIN )
BCND REMAIN,LT ; IF INTEGER < 100 GOTO REMAIN
NOT_REMAIN: LACC #100 ; IF INTEGER > 100
SACL B       ; INTEGER := INTEGER/100

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LACC INTEGER ;
RPT #15 ; OUTPUT = INTEGER.REMAINDER
SUBC B ; NO SIGN ( A & B > 0 )
SACL INTEGER
SACH REMAINDER
RET ; END

REMAIN: LACC INTEGER ;|
SACL REMAINDER ; \ REMAIN := INTEGER
LACC #0 ; / INTEGER := 00
SACL INTEGER ;|
RET ; END CALCULATION

%THD: LACC #0 ; \
SACL ZIGMA_SQ_LO ; > INITIAL ZIGMA_SQUARG
SACH ZIGMA_SQ_HI ; /
LAR AR4 ,#2923h ; START
LAR AR5 ,#2932h ; START
ZIGMA: LACC #100 ; \
SACL TMP1 ; |
LT TMP1 ; | REMAINDER TO INTEGER
MAR * ,AR4 ; >
MPYU *+ ,AR5 ; | BY ( INTEGER x 100 ) + REMAINDER
PAC ; |
ADD *+ ; /
SACL TMP1 ; SQUARE AND FIND ZIGMA
SQRS TMP1 ; INPUT = ACC [(INTEGER x 100)+REMAINDER]
PAC ; OUTPUT= ZIGMA_SQ
ADD ZIGMA_SQ_LO
ADD ZIGMA_SQ_HI , 16
SACL ZIGMA_SQ_LO
SACH ZIGMA_SQ_HI
SAR AR4 ,TMP1 ; \
LACC TMP1 ; |

```

```

SUB #11 ; > GOTO ZIGMA UNTIL ADDRESS = 292Eh
SUB #2923h,0 ; |
BCND ZIGMA ,LEQ ;/
ROOT: LACC #0 ; START FIND SQUARE ROOT ( 32 BIT )
LOOPS: SACL SQR_INT ; INPUT = ZIGMA_SQ_LO & HI
LACC ZIGMA_SQ_HI ,16 ; OUTPUT = SQR_INT
ADD ZIGMA_SQ_LO
LT SQR_INT
MPYU SQR_INT
SPAC
BCND NOT_END ,GT
BCND DIV_100 ,EQ ; END OF SQUARE ROOT AND GOTO DIV_100
LACC SQR_INT
SUB #1
SACL SQR_INT
B DIV_100 ; END OF SQUARE ROOT AND GOTO DIV_100
NOT_END: LACC SQR_INT
ADD #1
B LOOPS
DIV_100: SUB #100 ; DIVIDE BY 100
BCND 100_REMAIN ,LT ; INPUT = ACC ( SQ_ROOT )
NOT_100_REM: LACC #100 ; OUTPUT=%THD_INT & REM
SACL TMP1
LACC SQR_INT
RPT #15
SUBC TMP1
SACL %THD_INT
SACH %THD_REM
B END_DIV
100_REMAIN: LACC SQR_INT
SACL %THD_REM
LACC #0
SACL %THD_INT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

END_DIV: RET ; END OF THD

INI: LAR AR1 ,#0A00h

CALL DELAY

LACC #01h

CALL LCDWI

LACC #02h

CALL LCDWI

LACC #06h

CALL LCDWI

LACC #0Eh

CALL LCDWI

LACC #38h

CALL LCDWI

RET

INI_LCD: CALL INI

LAR AR0 ,#29A0h

CALL LCDLD_L1

LAR AR0 ,#29B0h

CALL LCDLD_L2

LAR AR1 ,#0A000h

CALL DELAY

RET ; END OF INI_LCD GOTO DISPLAY

HAR_LCD: LACC #1 ; INITIAL LINECHECK = 1

SACL LINECHECK

LAR AR3 ,#2923h

```

LAR AR4 ,#2932h
LOAD_H_LCD: LACC #1 ;|
ADD LINECHECK ;> INCREASE LINECHECK
SACL LINECHECK ;|
MAR * ,AR3
LACC *+
SACL %HAR_INT
MAR * ,AR4
LACC *+
SACL %HAR_REM
CALL DIGIT
SAR AR3 ,TMP1
LACC TMP1
SUB #11
SUB #2923h,0
BCND LOAD_H_LCD ,LEQ
RET ; END OF HAR_LCD RETURN TO DISPLAY
DIGIT: LACC #2 ; INPUT=LINECHECK, %HARM_INT & REM
SACL TMP1 ; OUTPUT = DISPLAY LCD
LACC LINECHECK ; IF REMAINDER OF LINECHECK/2
RPT #15 ; = 0 GOTO LINE 1
SUBC TMP1 ; NOT = 0 GOTO LINE 2
SACL LINE
LACC %HAR_INT ; LINE & THD_LCD ARE SIMILAR
SACL TMP1
CALL THREE_DIGIT
LACC P0_TEMP
SACL LIP0
LACC P1_TEMP
SACL LIP1
LACC P2_TEMP
SACL LIP2
LACC %HAR_REM

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SACL TMP1
CALL TWO_DIGIT
LACC P1_TEMP
SACL LIP3
LACC P2_TEMP
SACL LIP4
CALL H_LCD
RET      ;END LINE RETURN HAR_LCD

```

```

H_LCD:  LACC LINECHECK

```

```

SACL TMP1
CALL TWO_DIGIT
LACC P1_TEMP
SACL H_ORDER_1
LACC P2_TEMP
SACL H_ORDER_2
LAR  AR0 ,#295Fh
LACC LINE
BCND LOAD_L1 ,EQ
CALL LCDLD_L2
B'   END_LCD

```

```

LOAD_L1: CALL LCDLD_L1

```

```
RET
```

```
END_LCD: LAR  AR1 ,#0A000h
```

```
CALL DELAY
```

```
RET      ;END OF H_LCD GOTO HAR_LCD
```

```
THD_LCD:  LACC %THD_INT
```

```
SACL TMP1
```

```
CALL THREE_DIGIT
```

```
LACC P0_TEMP
```

```
SACL THD_I_0
```

```
LACC P1_TEMP
```

```

SACL THD_I_1
LACC P2_TEMP
SACL THD_I_2
LACC %THD_REM
SACL TMP1
CALL TWO_DIGIT
LACC P1_TEMP
SACL THD_R_1
LACC P2_TEMP
SACL THD_R_2
CALL T_LCD
RET      ; END OF THD_LCD RETURN TO DISPLAY

```

```

T_LCD:  CALL INI
        LAR  AR0 ,#296Fh
        CALL LCDLD_L2
        LAR  AR1 ,#0A000h
        CALL DELAY
        RET      ; END OF T_LCD GOTO THD_LCD

```

```

THREE_DIGIT: LACC  TMP1      ; CONVERT NUMBER IN TMP1 TO 3 DIGIT
            SUB   #100      ; INPUT = TMP1
            BCND  DIGIT_0 ,LT ; OUTPUT = 3 DIGIT
            LACC  #100      ; DIGIT 1 = P0_TEMP
            SACL  B        ; DIGIT 2 = P1_TEMP
            LACC  TMP1      ; DIGIT 3 = P2_TEMP
            RPT  #15
            SUBC  B
            SACL  P0_TEMP
            LACC  #100
            SACL  B
            LT   B
            MPYU P0_TEMP

```

```

PAÇ
SACL A
LACC TMP1
SUB A
SACL TMP1
LACC P0_TEMP
ADD #30h
SACL P0_TEMP
TWO_DIGIT: LACC TMP1 ; INPUT = TMP1
SUB #10 ; OUTPUT = P1_TEMP , P2_TEMP
BCND FAA , GT ; GOTO FAA IF ACC > 10
BCND F10 , EQ ; GOTO F10 IF ACC = 10
LACC TMP1
ADD #30h
SACL P2_TEMP
LACC #30h
SACL P1_TEMP
RET ; TETURN TO DIGIT_LCD
F10: LACC #30h
SACL P2_TEMP
LACC #31h
SACL P1_TEMP
RET ; TETURN TO DIGIT_LCD
FAA: LACC #10
SACL B
LACC TMP1
RPT #15
SUBC B
SACL P1_TEMP
SACH P2_TEMP
LACL P1_TEMP
ADD #30h
SACL P1_TEMP

```

LACC P2_TEMP

ADD #30h

SACL P2_TEMP

RET ; END OF 3 DIGIT AND 2 DIGIT

DIGIT_0: LACC #20h ; IF DIGIT 1 = 0 , SHOW SPACE ON LCD

SACL P0_TEMP

LACC TMP1

B TWO_DIGIT

DELAY: MAR * ,AR1

RPT #255

NOP

SBRK #1

BANZ DELAY

RET ; END OF DELAY

LCDWI: SACL TMP1

OUT TMP1 ,PA1

ADD #0400h ,0

SACL TMP1

OUT TMP1 ,PA1

LAR AR1 ,#0A00h

CALL DELAY

SUB #400h ,0

SACL TMP1

OUT TMP1 ,PA1

LAR AR1 ,#0A00h

CALL DELAY

RET ; END OF LCDWI

LCDWD: ADD #0100h ,0

SACL TMP1

OUT TMP1 ,PA1

```

ADD #0400h, 0
SACL TMP1
OUT TMP1 , PA1
LAR AR1 , #0A00h
CALL DELAY
SUB #0400h, 0
SACL TMP1
OUT TMP1 , PA1
LAR AR1 , #0A00h
CALL DELAY
RET ; END OF LCDWD

```

```

LCDLD_L1: LACC #080h
CALL WRITEADD
RET ; END OF LCDLD

```

```

LCDLD_L2: LACC #0C0h
CALL WRITEADD
RET ; END OF LCDLD

```

```

WRITEADD: CALL LCDWI
LAR AR2 , #15
MAR * , AR0
GO_OUT: LACC *+
CALL LCDWD
MAR * , AR2
BANZ GO_OUT , *- , AR0
RET ; RETURN TO LCDWI

```

```

OUTPUT: LACC %THD_INT
SUB IEEE_THD
BCND LESS , LT

```

```

FIND_MAX: LAR AR0 , #2923h
LAR AR1 , #2923h

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SPLK #0 ,TMP1
LOAD_M:  LACC TMP1
        MAR * ,AR0
        LACC *
        CRGT
        ADRK #1
        SACL TMP1
        MAR * ,AR1
        ADRK #1
        SAR AR1 ,A
        LACC A
        SUB #11
        SUB #2923h ,0
        BCND LOAD_M ,LEQ
FIND:   LACB
        SACL MAX_VAL
        LAR AR0 ,#2923h
        LAR AR1 ,#2
RETURN: MAR * ,AR0
        LACC *+
        SUB MAX_VAL
        BCND END_FIND ,EQ
        MAR * ,AR1
        ADRK #1
        B RETURN
END_FIND: SAR AR1 ,MAX_HAR
        LACC MAX_HAR ,11
        OR #8000h
        SACL DATA_OUT
        OUT DATA_OUT ,PA2
        RET ; END OF LED PART %THD > IEEE THD
LESS:   LACC #7800h
        SACL DATA_OUT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUT DATA_OUT , PA2

RET ; END OF LED PART %THD < IEEE THD

-----;

; HAR_00=000.00_%_ ;

-----;

.ds 295Fh ;

.data ;

.word 48h ; Address 295Fh

.word 41h ; Address 2960h

.word 52h ; Address 2961h

.word 20h ; Address 2962h

.word 30h ; Address 2963h

.word 30h ; Address 2964h

.word 3Dh ; Address 2965h

.word 30h ; Address 2966h

.word 30h ; Address 2967h

.word 30h ; Address 2968h

.word 2Eh ; Address 2969h

.word 30h ; Address 296Ah

.word 30h ; Address 296Bh

.word 20h ; Address 296Ch

.word 25h ; Address 296Dh

.word 20h ; Address 296Eh

-----;

; %_THD_=000.00_%_ ;

-----;

.ds 296Fh ;

.data ;

.word 25h ; Address 296Fh

.word 20h ; Address 2970h

.word 54h ; Address 2971h

.word 48h ; Address 2972h

.word 44h ; Address 2973h

.word 20h ; Address 2974h
.word 3Dh ; Address 2975h
.word 30h ; Address 2976h
.word 30h ; Address 2977h
.word 30h ; Address 2978h
.word 2Eh ; Address 2979h
.word 30h ; Address 297Ah
.word 30h ; Address 297Bh
.word 20h ; Address 297Ch
.word 25h ; Address 297Dh
.word 20h ; Address 297Eh

;

; —HARMONIC— ;

;

.ds 29A0h ;
.data ;
.word 20h ; Address 29A0h
.word 20h ; Address 29A1h
.word 20h ; Address 29A2h
.word 20h ; Address 29A3h
.word 48h ; Address 29A4h
.word 41h ; Address 29A5h
.word 52h ; Address 29A6h
.word 4Dh ; Address 29A7h
.word 4Fh ; Address 29A8h
.word 4Eh ; Address 29A9h
.word 49h ; Address 29AAh
.word 43h ; Address 29ABh
.word 20h ; Address 29ACh
.word 20h ; Address 29ADh
.word 20h ; Address 29AEh
.word 20h ; Address 29AFh

;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

; ---DETECTOR--- ;

;

```
.ds 29B0h ;  
.data ;  
.word 20h ; Address 29B0h  
.word 20h ; Address 29B1h  
.word 20h ; Address 29B2h  
.word 20h ; Address 29B3h  
.word 44h ; Address 29B4h  
.word 45h ; Address 29B5h  
.word 54h ; Address 29B6h  
.word 45h ; Address 29B7h  
.word 43h ; Address 29B8h  
.word 54h ; Address 29B9h  
.word 4Fh ; Address 29BAh  
.word 52h ; Address 29BBh  
.word 20h ; Address 29BCh  
.word 20h ; Address 29BDh  
.word 20h ; Address 29BEh  
.word 20h ; Address 29BFh
```

;

```
.ds 2901h ;  
.data ;
```

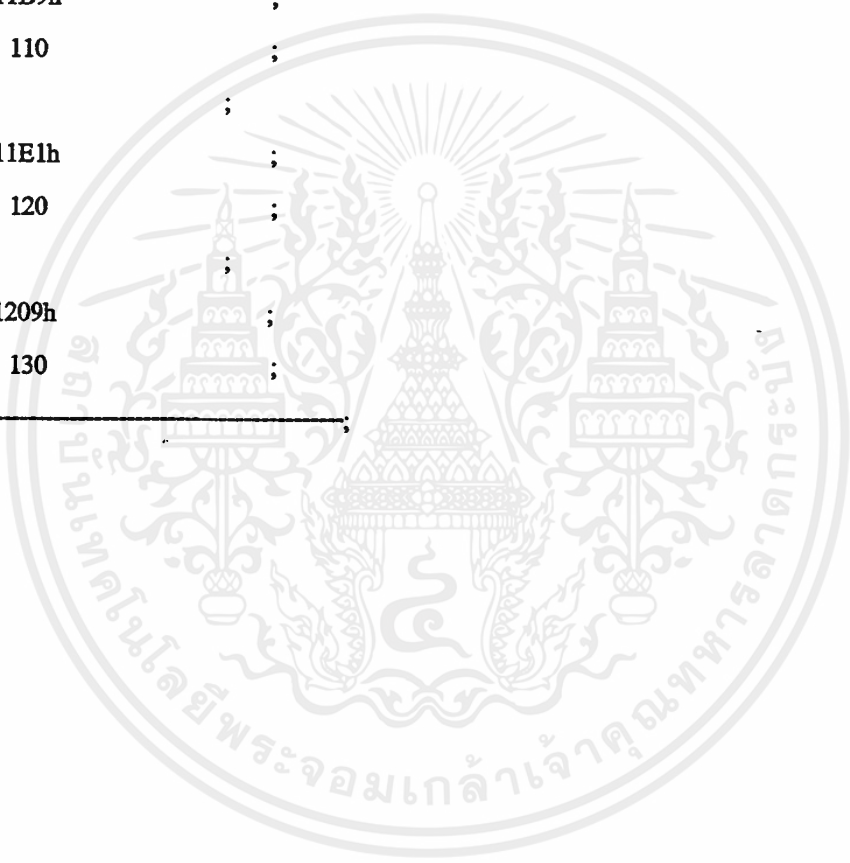
```
.IF Isc/Im_1 ;  
IEEE_THD .WORD 5 ;  
.ENDIF ;
```

```
.IF Isc/Im_2 ;  
IEEE_THD .WORD 8 ;  
.ENDIF ;
```

```
.IF Isc/Im_3 ;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

; ;
; .ds 1141h ;
; .word 80 ;
; ;
; .ds 1169h ;
; .word 90 ;
; ;
; .ds 1191h ;
; .word 100 ;
; ;
; .ds 11B9h ;
; .word 110 ;
; ;
; .ds 11E1h ;
; .word 120 ;
; ;
; .ds 1209h ;
; .word 130 ;



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

General Description

The LF351 is a low cost high speed JFET input operational amplifier with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). The device requires a low supply current and yet maintains a large gain bandwidth product and a fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF351 is pin compatible with the standard LM741 and uses the same offset voltage adjustment circuitry. This feature allows designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM741 designs.

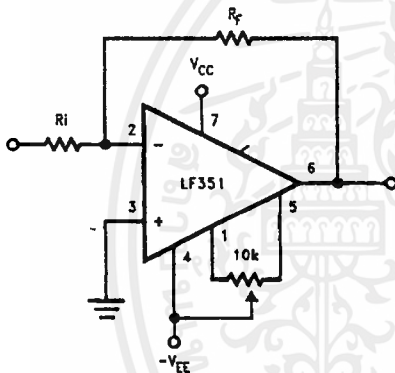
The LF351 may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample-and-hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The device has low noise and offset voltage drift, but for applications where these requirements are critical, the LF356 is recommended. If maximum supply

current is important, however, the LF351 is the better choice.

Features

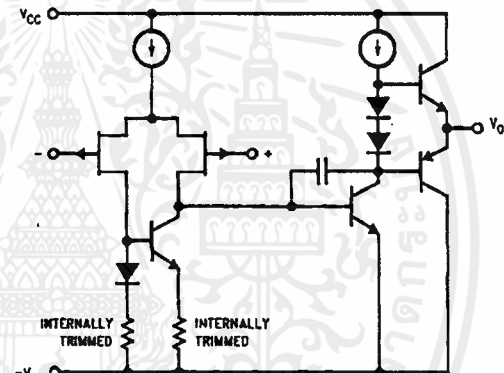
- Internally trimmed offset voltage 10 mV
- Low input bias current 50 pA
- Low input noise voltage 25 nV/√Hz
- Low input noise current 0.01 pA/√Hz
- Wide gain bandwidth 4 MHz
- High slew rate 13 V/μs
- Low supply current 1.8 mA
- High input impedance 10¹²Ω
- Low total harmonic distortion $A_V = 10$, $R_L = 10k$, $V_O = 20$ Vp-p, $BW = 20$ Hz–20 kHz < 0.02%
- Low 1/f noise corner 50 Hz
- Fast settling time to 0.01% 2 μs

Typical Connection



TL/H/5648-11

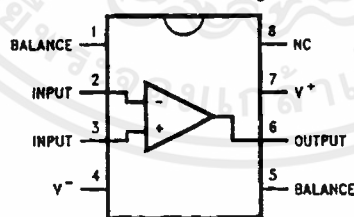
Simplified Schematic



TL/H/5648-12

Connection Diagrams

Dual-In-Line Package



TL/H/5648-13

Order Number LF351M or LF351N
See NS Package Number M08A or N08E

Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

| | |
|-----------------------------------|-----------------|
| Supply Voltage | ±18V |
| Power Dissipation (Notes 1 and 6) | 670 mW |
| Operating Temperature Range | 0°C to +70°C |
| T _J (MAX) | 115°C |
| Differential Input Voltage | ±30V |
| Input Voltage Range (Note 2) | ±15V |
| Output Short Circuit Duration | Continuous |
| Storage Temperature Range | -65°C to +150°C |
| Lead Temp. (Soldering, 10 sec.) | |
| Metal Can | 300°C |
| DIP | 260°C |

θ_{JA}

| | |
|-----------|---------|
| N Package | 120°C/W |
| M Package | TBD |

Soldering Information

| | |
|-----------------------|-------|
| Dual-In-Line Package | |
| Soldering (10 sec.) | 260°C |
| Small Outline Package | |
| Vapor Phase (60 sec.) | 215°C |
| Infrared (15 sec.) | 220°C |

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

ESD rating to be determined.

DC Electrical Characteristics (Note 3)

| Symbol | Parameter | Conditions | LF351 | | | Units |
|--------------------------|---|--|----------|------------------|----------|------------------|
| | | | Min | Typ | Max | |
| V _{OS} | Input Offset Voltage | R _S = 10 k Ω , T _A = 25°C Over Temperature | | 5 | 10 13 | mV mV |
| $\Delta V_{OS}/\Delta T$ | Average \dot{T}_C of Input Offset Voltage | R _S = 10 k Ω | | 10 | | $\mu V/^\circ C$ |
| I _{OS} | Input Offset Current | T _J = 25°C, (Notes 3, 4) T _J \leq 70°C | | 25 | 100 4 | pA nA |
| I _B | Input Bias Current | T _J = 25°C, (Notes 3, 4) T _J \leq $\pm 70^\circ C$ | | 50 | 200 8 | pA nA |
| R _{IN} | Input Resistance | T _J = 25°C | | 10 ¹² | | Ω |
| A _{VOL} | Large Signal Voltage Gain | V _S = $\pm 15V$, T _A = 25°C V _O = $\pm 10V$, R _L = 2 k Ω Over Temperature | 25 15 | 100 | | V/mV V/mV |
| V _O | Output Voltage Swing | V _S = $\pm 15V$, R _L = 10 k Ω | ± 12 | ± 13.5 | | V |
| V _{CM} | Input Common-Mode Voltage Range | V _S = $\pm 15V$ | ± 11 | +15 -12 | | V V |
| CMRR | Common-Mode Rejection Ratio | R _S \leq 10 k Ω | 70 | 100 | | dB |
| PSRR | Supply Voltage Rejection Ratio | (Note 5) | 70 | 100 | | dB |
| I _S | Supply Current | | | 1.8 | 3.4 | mA |

AC Electrical Characteristics (Note 3)

| Symbol | Parameter | Conditions | LF351 | | | Units |
|--------|--------------------------------|---|-------|------|-----|-----------------|
| | | | Min | Typ | Max | |
| SR | Slew Rate | $V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$ | | 13 | | V/ μs |
| GBW | Gain Bandwidth Product | $V_S = \pm 15V, T_A = 25^\circ C$ | | 4 | | MHz |
| e_n | Equivalent Input Noise Voltage | $T_A = 25^\circ C, R_S = 100\Omega, f = 1000\text{ Hz}$ | | 25 | | nV/ \sqrt{Hz} |
| i_n | Equivalent Input Noise Current | $T_J = 25^\circ C, f = 1000\text{ Hz}$ | | 0.01 | | pA/ \sqrt{Hz} |

Note 1: For operating at elevated temperature, the device must be derated based on the thermal resistance, θ_{JA} .

Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

Note 3: These specifications apply for $V_S = \pm 15V$ and $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$. V_{OS} , I_B and I_{OS} are measured at $V_{CM} = 0$.

Note 4: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every $10^\circ C$ increase in the junction temperature, T_J . Due to the limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P_D . $T_J = T_A + \theta_{JA} P_D$ where θ_{JA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

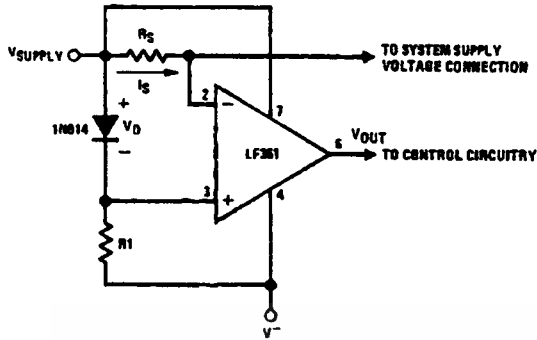
Note 5: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice. From $\pm 15V$ to $\pm 5V$.

Note 6: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.



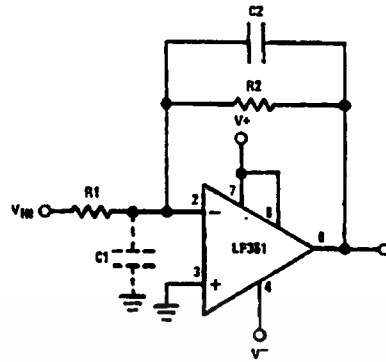
Typical Applications

Supply Current Indicator/Limiter



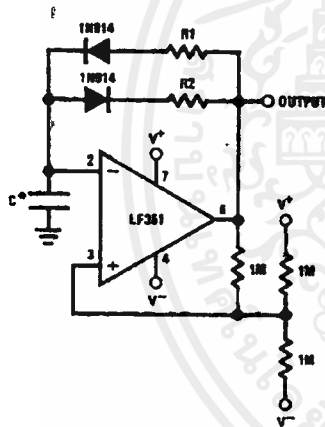
* V_{OUT} switches high when $R_S I_S > V_D$

Hi- Z_{IN} Inverting Amplifier



Parasitic input capacitance $C1 \approx (3 \text{ pF for LF351 plus any additional layout capacitance})$ interacts with feedback elements and creates undesirable high frequency pole. To compensate, add $C2$ such that: $R2C2 \approx R1C1$.

Ultra-Low (or High) Duty Cycle Pulse Generator



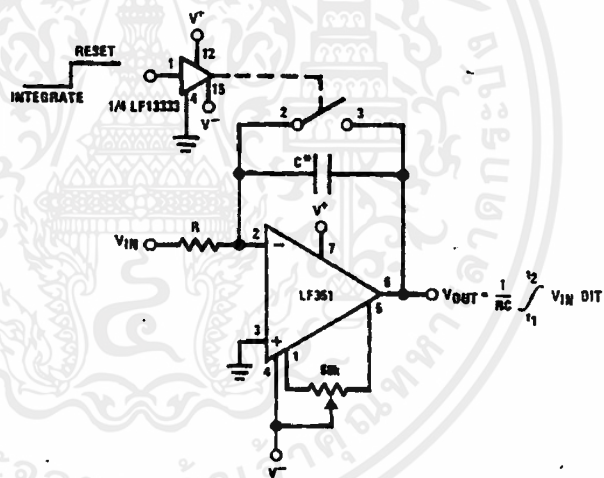
* $OUTPUT \text{ HIGH} \approx R1C \ln \frac{4.8 - 2V_S}{4.8 - V_S}$

* $OUTPUT \text{ LOW} \approx R2C \ln \frac{2V_S - 7.8}{V_S - 7.8}$

where $V_S = V^+ + |V^-|$

* low leakage capacitor

Long Time Integrator

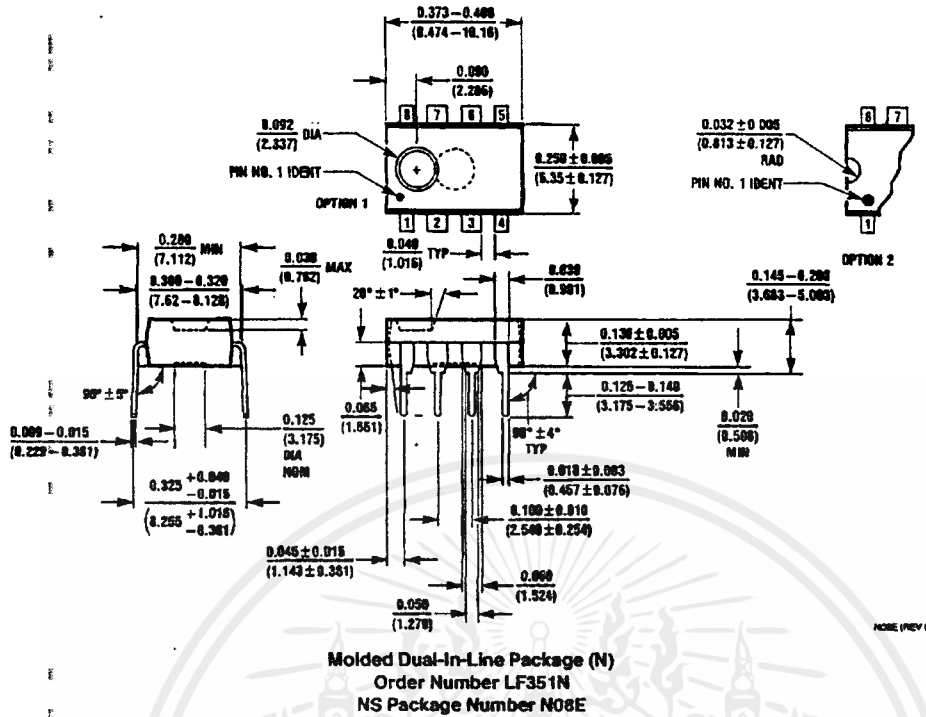


* Low leakage capacitor

* 50k pot used for less sensitive V_{OS} adjust

TU/H/5648-10

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)



LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



National Semiconductor Corporation
 1111 West Bardin Road
 Arlington, TX 76017
 Tel: (800) 272-9859
 Fax: (800) 737-7018

National Semiconductor Europe
 Fax: (+49) 0-180-530 65 88
 Email: cnjwpe@tevm2.nsc.com
 Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 65 85
 English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
 Français Tel: (+49) 0-180-532 83 58
 Italiano Tel: (+49) 0-180-534 16 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
 13th Floor, Straight Block,
 Ocean Centre, 5 Canton Rd.
 Tsimshatsui, Kowloon
 Hong Kong
 Tel: (852) 2737-1800
 Fax: (852) 2736-9900

National Semiconductor Japan Ltd.
 Tel: 81-043-296-2209
 Fax: 81-043-296-2408

LM140A/LM140/LM340A/LM340/LM7800C Series 3-Terminal Positive Regulators

General Description

The LM140A/LM140/LM340A/LM340/LM7800C monolithic 3-terminal positive voltage regulators employ internal current-limiting, thermal shutdown and safe-area compensation, making them essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1.0A output current. They are intended as fixed voltage regulators in a wide range of applications including local (on-card) regulation for elimination of noise and distribution problems associated with single-point regulation. In addition to use as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable output voltages and currents.

Considerable effort was expended to make the entire series of regulators easy to use and minimize the number of external components. It is not necessary to bypass the output, although this does improve transient response. Input bypassing is needed only if the regulator is located far from the filter capacitor of the power supply.

The 5V, 12V, and 15V regulator options are available in the steel TO-3 power package. The LM340A/LM340/LM7800C series is available in the TO-220 plastic power package, and the LM7805 and LM7812 are also available in the surface-mount TO-263 package.

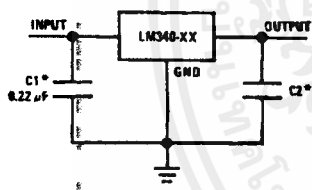
Features

- Complete specifications at 1A load
- Output voltage tolerances of $\pm 2\%$ at $T_j = 25^\circ\text{C}$ and $\pm 4\%$ over the temperature range (LM140A/LM340A)
- Line regulation of 0.01% of V_{OUT}/V of ΔV_{IN} at 1A load (LM140A/LM340A)
- Load regulation of 0.3% of V_{OUT}/A (LM140A/LM340A)
- Internal thermal overload protection
- Internal short-circuit current limit
- Output transistor safe area protection
- P+ Product Enhancement tested

| Device | Output Voltages | Packages |
|--------------|-------------------------|---|
| LM140A/LM140 | 5, 12, 15 | TO-3 (K) |
| LM340A/LM340 | 5, 12, 15 | TO-3 (K), TO-220 (T) |
| LM7800C | 5, 6, 8, 12, 15, 18, 24 | TO-220 (T), TO-263 (S) (5V and 12V only) |

Typical Applications

Fixed Output Regulator

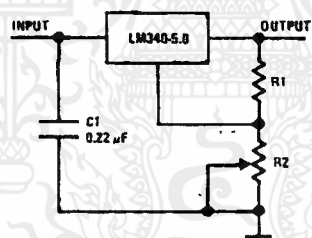


TL/H/7781-1

*Required if the regulator is located far from the power supply filter.

**Although no output capacitor is needed for stability, it does help transient response. (If needed, use 0.1 μF, ceramic disc).

Adjustable Output Regulator



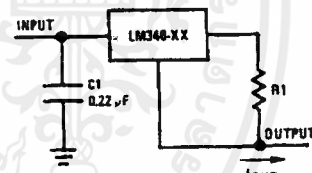
TL/H/7781-2

$$V_{OUT} = 5V + (5V/R1 + I_Q) R2$$

$$5V/R1 > 3 I_Q$$

$$\text{load regulation } (L_r) \approx [(R1 + R2)/R1] (L_r \text{ of LM340-5})$$

Current Regulator



TL/H/7781-3

$$I_{OUT} = \frac{V2-3}{R1} + I_Q$$

$$\Delta I_Q = 1.3 \text{ mA over line and load changes.}$$

LM140A/LM140/LM340A/LM340/LM7800C Series 3-Terminal Positive Regulators

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM340/LM7800C

Electrical Characteristics (Note 4) $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

| Symbol | Output Voltage | | 5V | | | 12V | | | 15V | | | Units | |
|--|--|---|---|---|------|------|------|------|-------|------|----------------------------|-------|----|
| | Input Voltage (unless otherwise noted) | | 10V | | | 19V | | | 23V | | | | |
| | Parameter | Conditions | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | | |
| V_O | Output Voltage | $T_J = 25^\circ\text{C}, 5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$ | 4.8 | 5 | 5.2 | 11.5 | 12 | 12.5 | 14.4 | 15 | 15.6 | V | |
| | | $P_D \leq 15\text{ W}, 5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$ $V_{\text{MIN}} \leq V_{\text{IN}} \leq V_{\text{MAX}}$ | 4.75 | | 5.25 | 11.4 | | 12.6 | 14.25 | | 15.75 | V | |
| ΔV_O | Line Regulation | $I_O = 500\text{ mA}$ | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | | 3 | 50 | | 4 | 120 | | 4 | 150 | mV |
| | | | ΔV_{IN} | | | | | | | | | | V |
| | | $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ | ΔV_{IN} | | | 50 | | | 120 | | | 150 | mV |
| | | | ΔV_{IN} | | | | | | | | | | V |
| | | $I_O \leq 1\text{ A}$ | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | | | 50 | | | 120 | | | 150 | mV |
| | | | ΔV_{IN} | | | | | | | | | | V |
| $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ | ΔV_{IN} | | | 25 | | | 60 | | | 75 | mV | | |
| | ΔV_{IN} | | | | | | | | | | V | | |
| ΔV_O | Load Regulation | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ | | 10 | 50 | | 12 | 120 | | 12 | 150 | mV |
| | | | $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$ | | | 25 | | | 60 | | | 75 | mV |
| | | $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}, 0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ | | | 50 | | | 120 | | | 150 | mV | |
| I_O | Quiescent Current | $I_O \leq 1\text{ A}$ | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | | | 8 | | 8 | | | 8 | mA | |
| | | | | | | 8.5 | | 8.5 | | | 8.5 | mA | |
| ΔI_O | Quiescent Current Change | $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$ | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_O \leq 1\text{ A}$ | | | 0.5 | | 0.6 | | | 0.5 | mA | |
| | | | | $\Delta V_{\text{IN}} \leq V_{\text{IN}} \leq V_{\text{MAX}}$ | | | 1.0 | | 1.0 | | | 1.0 | mA |
| | | $I_O \leq 500\text{ mA}, 0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ | $\Delta V_{\text{IN}} \leq V_{\text{IN}} \leq V_{\text{MAX}}$ | | | 1.0 | | 1.0 | | | | 1.0 | mA |
| | | | $\Delta V_{\text{IN}} \leq V_{\text{IN}} \leq V_{\text{MAX}}$ | | | | | | | | | | V |
| V_{IN} | Output Noise Voltage | $T_A = 25^\circ\text{C}, 10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ | | 40 | | | 75 | | | 90 | μV | | |
| $\frac{\Delta V_{\text{IN}}}{\Delta V_{\text{OUT}}}$ | Ripple Rejection | $f = 120\text{ Hz}$ | $I_O \leq 1\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}$ or $I_O \leq 500\text{ mA},$ $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$ | | 62 | 80 | | 55 | 72 | | 54 | 70 | dB |
| | | | | | 62 | | | 55 | | | 54 | | dB |
| | | | | $V_{\text{MIN}} \leq V_{\text{IN}} \leq V_{\text{MAX}}$ | | | | | | | | | |
| R_O | Dropout Voltage | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_O = 1\text{ A}$ | | 2.0 | | | 2.0 | | | 2.0 | V | | |
| | Output Resistance | $f = 1\text{ kHz}$ | | 8 | | | 18 | | | 19 | $\text{m}\Omega$ | | |
| | Short-Circuit Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | | 2.1 | | | 1.5 | | | 1.2 | A | | |
| | Peak Output Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | | 2.4 | | | 2.4 | | | 2.4 | A | | |
| | Average TC of V_{OUT} | $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}, I_O = 5\text{ mA}$ | | -0.6 | | | -1.5 | | | -1.8 | $\text{mV}/^\circ\text{C}$ | | |
| V_{IN} | Input Voltage Required to Maintain Line Regulation | $T_J = 25^\circ\text{C}, I_O \leq 1\text{ A}$ | | 7.5 | | | 14.6 | | | 17.7 | V | | |

Note 1: Absolute Maximum Ratings are limits beyond which damage to the device may occur. Operating Conditions are conditions under which the device functions but the specifications might not be guaranteed. For guaranteed specifications and test conditions see the Electrical Characteristics.

Note 2: The maximum allowable power dissipation at any ambient temperature is a function of the maximum junction temperature for operation ($T_{\text{JMAX}} = 125^\circ\text{C}$ or 150°C), the junction-to-ambient thermal resistance (θ_{JA}), and the ambient temperature (T_A). $P_{\text{DMAX}} = (T_{\text{JMAX}} - T_A)/\theta_{\text{JA}}$. If this dissipation is exceeded, the die temperature will rise above T_{JMAX} and the electrical specifications do not apply. If the die temperature rises above 150°C , the device will go into thermal shutdown. For the TO-3 package (K, KC), the junction-to-ambient thermal resistance (θ_{JA}) is $39^\circ\text{C}/\text{W}$. When using a heatsink, θ_{JA} is the sum of the $4^\circ\text{C}/\text{W}$ junction-to-case thermal resistance (θ_{JC}) of the TO-3 package and the case-to-ambient thermal resistance of the heatsink. For the TO-220 package (T), θ_{JA} is $54^\circ\text{C}/\text{W}$ and θ_{JC} is $4^\circ\text{C}/\text{W}$.

If the TO-263 package is used, the thermal resistance can be reduced by increasing the PC board copper area thermally connected to the package: Using 0.5 square inches of copper area, θ_{JA} is $50^\circ\text{C}/\text{W}$; with 1 square inch of copper area, θ_{JA} is $37^\circ\text{C}/\text{W}$; and with 1.6 or more inches of copper area, θ_{JA} is $32^\circ\text{C}/\text{W}$.

Note 3: ESD rating is based on the human body model, 100 pF discharged through 1.5 k Ω .

Note 4: All characteristics are measured with a 0.22 μF capacitor from input to ground and a 0.1 μF capacitor from output to ground. All characteristics except noise voltage and ripple rejection ratio are measured using pulse techniques ($t_w \leq 10\text{ ms}$, duty cycle $\leq 5\%$). Output voltage changes due to changes in internal temperature must be taken into account separately.

Note 5: A military RETS specification is available on request. At the time of printing, the military RETS specifications for the LM140AK-5.0/883, LM140AK-12/883, and LM140AK-15/883 complied with the min and max limits for the respective versions of the LM140A. At the time of printing, the military RETS specifications for the LM140K-5.0/883, LM140K-12/883, and LM140K-15/883 complied with the min and max limits for the respective versions of the LM140. The LM140H/883, LM140K/883, and LM140AK/883 may also be procured as a Standard Military Drawing.

LM7818C

Electrical Characteristics

$0^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +150^{\circ}\text{C}$, $V_I = 27\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$, unless otherwise specified

| Symbol | Parameter | Conditions (Note 4) | LM7818C | | | Units |
|-------------------------|---|---|---------------------------------------|------|------|------------------------------|
| | | | Min | Typ | Max | |
| V_O | Output Voltage | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | 17.3 | 18.0 | 18.7 | V |
| ΔV_O | Line Regulation | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 15 | 360 | mV |
| | | $21\text{V} \leq V_I \leq 33\text{V}$ | | | | |
| | | | | 5.0 | 180 | |
| ΔV_O | Load Regulation | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 12 | 360 | mV |
| | | $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ | | | | |
| | | | | 4.0 | 180 | |
| V_O | Output Voltage | $22\text{V} \leq V_I \leq 33\text{V}$, $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P \leq 15\text{ W}$ | 17.1 | | 18.9 | V |
| I_O | Quiescent Current | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 4.5 | 8.0 | mA |
| ΔI_O | Quiescent Current Change | With Line | | | 1.0 | mA |
| | | With Load | $22\text{V} \leq V_I \leq 33\text{V}$ | | | |
| | | $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ | | | 0.5 | |
| V_N | Noise | $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ | | 110 | | μV |
| $\Delta V_I/\Delta V_O$ | Ripple Rejection | $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 350\text{ mA}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | 53 | 69 | | dB |
| V_{DO} | Dropout Voltage | $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 2.0 | | V |
| R_O | Output Resistance | $f = 1.0\text{ kHz}$ | | 22 | | $\text{m}\Omega$ |
| I_{OS} | Output Short Circuit Current | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$, $V_I = 35\text{V}$ | | 0.20 | | A |
| I_{PK} | Peak Output Current | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 2.1 | | A |
| $\Delta V_O/\Delta T$ | Average Temperature Coefficient of Output Voltage | $I_O = 5.0\text{ mA}$ | | 1.0 | | $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ |

LM7824C

Electrical Characteristics

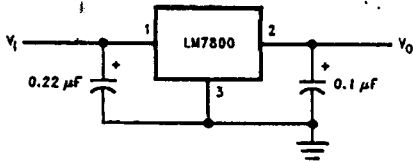
$0^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq +150^{\circ}\text{C}$, $V_I = 33\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\ \mu\text{F}$, $C_O = 0.1\ \mu\text{F}$, unless otherwise specified

| Symbol | Parameter | Conditions (Note 4) | LM7824C | | | Units |
|-------------------------|---|---|---------------------------------------|------|------|------------------------------|
| | | | Min | Typ | Max | |
| V_O | Output Voltage | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | 23.0 | 24.0 | 25.0 | V |
| ΔV_O | Line Regulation | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 18 | 480 | mV |
| | | $27\text{V} \leq V_I \leq 38\text{V}$ | | | | |
| | | | | 6.0 | 240 | |
| ΔV_O | Load Regulation | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 12 | 480 | mV |
| | | $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ | | | | |
| | | | | 4.0 | 240 | |
| V_O | Output Voltage | $28\text{V} \leq V_I \leq 38\text{V}$, $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P \leq 15\text{ W}$ | 22.8 | | 25.2 | V |
| I_O | Quiescent Current | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 4.8 | 8.0 | mA |
| ΔI_O | Quiescent Current Change | With Line | | | 1.0 | mA |
| | | With Load | $28\text{V} \leq V_I \leq 38\text{V}$ | | | |
| | | $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ | | | 0.5 | |
| V_N | Noise | $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$ | | 170 | | μV |
| $\Delta V_I/\Delta V_O$ | Ripple Rejection | $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 350\text{ mA}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | 50 | 66 | | dB |
| V_{DO} | Dropout Voltage | $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 2.0 | | V |
| R_O | Output Resistance | $f = 1.0\text{ kHz}$ | | 28 | | $\text{m}\Omega$ |
| I_{OS} | Output Short Circuit Current | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$, $V_I = 35\text{V}$ | | 0.15 | | A |
| I_{PK} | Peak Output Current | $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ | | 2.1 | | A |
| $\Delta V_O/\Delta T$ | Average Temperature Coefficient of Output Voltage | $I_O = 5.0\text{ mA}$ | | 1.5 | | $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ |

Note 4: All characteristics are measured with a $0.22\ \mu\text{F}$ capacitor from input to ground and a $0.1\ \mu\text{F}$ capacitor from output to ground. All characteristics except noise voltage and ripple rejection ratio are measured using pulse techniques ($I_w > 10\text{ mA}$, duty cycle $\leq 5\%$). Output voltage changes due to changes in internal temperature must be taken into account separately.

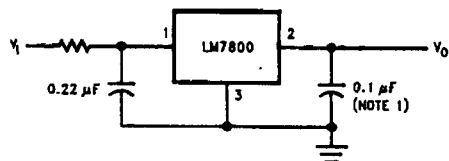
Typical Applications

Fixed Output Regulator



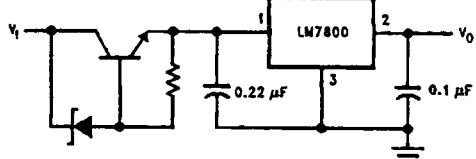
TL/H/7781-13

High Input Voltage Circuits



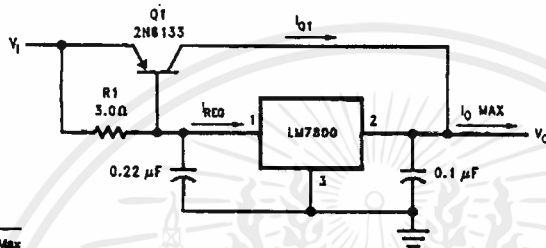
TL/H/7781-14

Note 1: Bypass capacitors are recommended for optimum stability and transient response, and should be located as close as possible to the regulator.



TL/H/7781-15

High Current Voltage Regulator

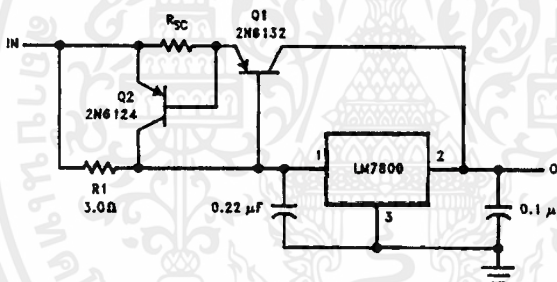


$$\beta(Q1) \geq \frac{I_{O \text{ Max}}}{I_{REG \text{ Max}}}$$

$$R1 = \frac{0.9}{I_{REG}} \frac{\beta(Q1) V_{BE(Q1)}}{I_{REG \text{ Max}} (\beta + 1) - I_{O \text{ Max}}}$$

TL/H/7781-16

High Output Current, Short Circuit Protected

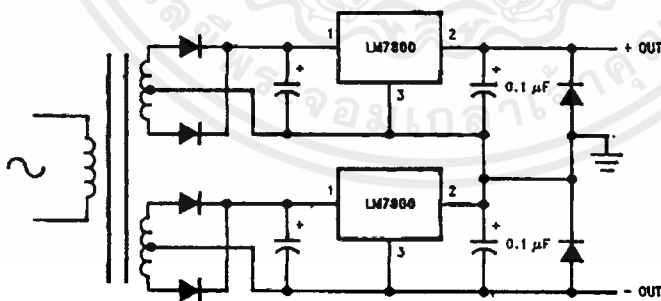


$$R_{SC} = \frac{0.6}{I_{OC}}$$

$$R1 = \frac{\beta V_{BE(Q1)}}{I_{REG \text{ Max}} (\beta + 1) - I_{O \text{ Max}}}$$

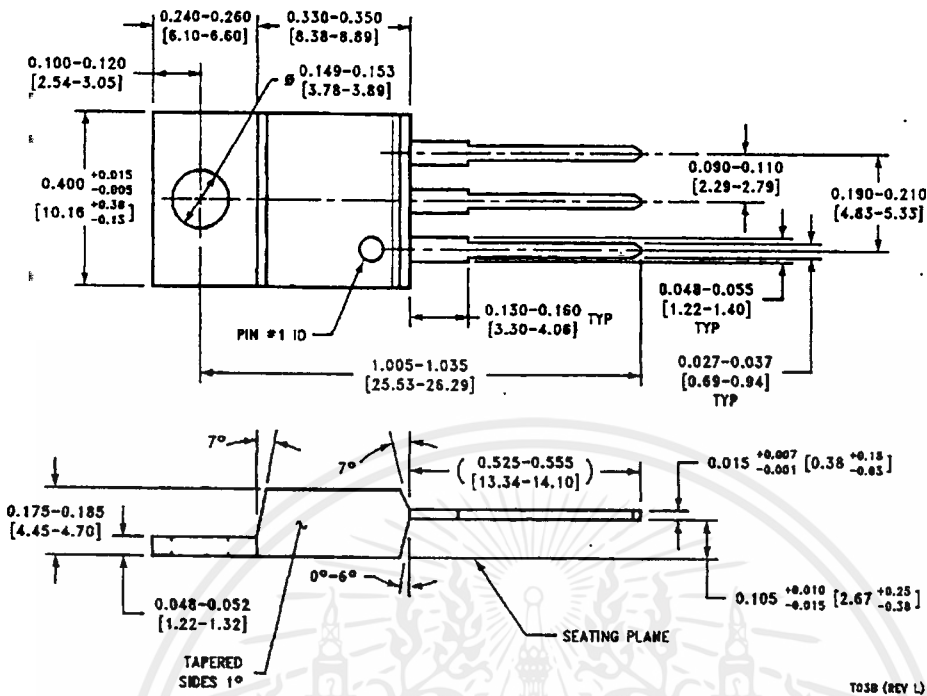
TL/H/7781-17

Positive and Negative Regulator



TL/H/7781-18

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)



TO-220 Power Package (T)
 Order Number LM340AT/LM340T-5.0, LM340AT/LM340T-12, LM340AT/LM340T-15,
 LM7805CT, LM7812CT, LM7815CT, LM7806CT, LM7808CT, LM7818CT or LM7824CT
 NS Package Number T03B

T03B (REV L)

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



National Semiconductor Corporation
 1111 West Garden Road
 Arlington, TX 78017
 Tel: 1(800) 272-9959
 Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
 Fax: (+49) 0-180-530 85 88
 Email: cnrjw@sem2.nsc.com
 Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
 English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
 France Tel: (+49) 0-180-532 93 58
 Italian Tel: (+49) 0-180-534 18 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
 13th Floor, Straight Block,
 Ocean Centre, 5 Canton Rd.
 Tsimshatsui, Kowloon
 Hong Kong
 Tel: (852) 2737-1800
 Fax: (852) 2738-6990

National Semiconductor Japan Ltd.
 Tel: 81-043-299-2309
 Fax: 81-043-299-2408

LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

General Description

The LM79XX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of -5V, -8V, -12V, and -15V. These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79XX series is packaged in the TO-220 power package and is capable of supplying 1.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting, safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79XX series allows output voltage to be easily boosted above the preset value with a resistor divider. The low quiescent current drain of

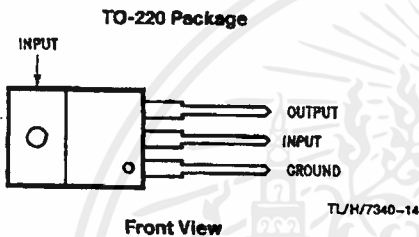
these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

For applications requiring other voltages, see LM137 data sheet.

Features

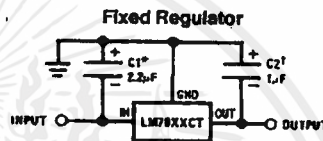
- Thermal, short circuit and safe area protection
- High ripple rejection
- 1.5A output current
- 4% tolerance on preset output voltage

Connection Diagrams



Order Number LM7905CT, LM7912CT or LM7915CT
See NS Package Number TO3B

Typical Applications



*Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum. 25 μ F aluminum electrolytic may be substituted.

†Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum. 25 μ F aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100 μ F, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Input Voltage
 $(V_o = -5V)$ -25V
 $(V_o = -12V \text{ and } -15V)$ -35V

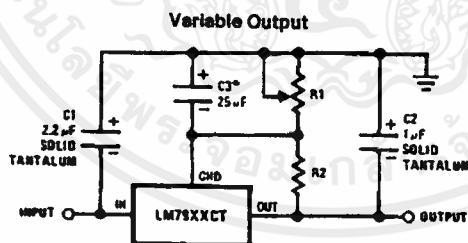
Input-Output Differential
 $(V_o = -5V)$ 25V
 $(V_o = -12V \text{ and } -15V)$ 30V
 Power Dissipation (Note 2) Internally Limited
 Operating Junction Temperature Range 0°C to +125°C
 Storage Temperature Range -65°C to +150°C
 Lead Temperature (Soldering, 10 sec.) 230°C

Electrical Characteristics

Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500 \text{ mA}$, $C_{IN} = 2.2 \mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1 \mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation $\leq 1.5\text{W}$.

| Part Number | | LM7905C | | | Units | | |
|--|---|--|---|-------------------------------|-------|----------------------------|----|
| Output Voltage | | -5V | | | | | |
| Input Voltage (unless otherwise specified) | | -10V | | | | | |
| Symbol | Parameter | Conditions | Min | Typ | Max | | |
| V_o | Output Voltage | $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1 \text{ A}$, $P \leq 15\text{W}$ | -4.8 | -5.0 | -5.2 | V | |
| | | | -4.75 | | -5.25 | V | |
| | | | ($-20 \leq V_{IN} \leq -7$) | | | | V |
| ΔV_o | Line Regulation | $T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 3) | | 8 | 50 | mV | |
| | | | ($-25 \leq V_{IN} \leq -7$) | | | | V |
| | | | | 2 | 15 | mV | |
| ($-12 \leq V_{IN} \leq -8$) | | | | V | | | |
| ΔV_o | Load Regulation | $T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 3) $5 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1.5 \text{ A}$ $250 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 750 \text{ mA}$ | | 15 | 100 | mV | |
| | | | | 5 | 50 | mV | |
| I_q | Quiescent Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | | 1 | 2 | mA | |
| ΔI_q | Quiescent Current Change | With Line | | | 0.5 | mA | |
| | | | With Load, $5 \text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1 \text{ A}$ | ($-25 \leq V_{IN} \leq -7$) | | | V |
| V_n | Output Noise Voltage | $T_A = 25^\circ\text{C}$, $10 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$ | | 125 | | μV | |
| | | | Ripple Rejection | $f = 120 \text{ Hz}$ | 54 | 66 | dB |
| | | | ($-18 \leq V_{IN} \leq -8$) | | | V | |
| | Dropout Voltage | $T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{OUT} = 1 \text{ A}$ | | 1.1 | | V | |
| I_{OMAX} | Peak Output Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | | 2.2 | | A | |
| | Average Temperature Coefficient of Output Voltage | $I_{OUT} = 5 \text{ mA}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$ | | 0.4 | | $\text{mV}/^\circ\text{C}$ | |

Typical Applications (Continued)



*Improves transient response and ripple rejection. Do not increase beyond 50 μF .

TU/H/7340-2

$$V_{OUT} = V_{SET} \left(\frac{R1 + R2}{R2} \right)$$

Select R2 as follows:
 LM7905CT 300 Ω
 LM7912CT 750 Ω
 LM7915CT 1k

Electrical Characteristics (Continued) Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500\text{ mA}$, $C_{IN} = 2.2\ \mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1\ \mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation = 1.5W.

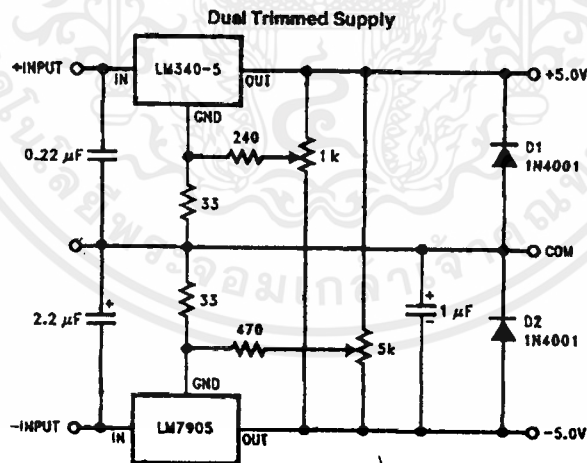
| Part Number | | | LM7912C | | | LM7915C | | | Units |
|--|---|--|--------------------------------|---------------------|-------|--------------------------------|-------|----------------------------|-------|
| Output Voltage | | | -12V | | | -15V | | | |
| Input Voltage (unless otherwise specified) | | | -19V | | | -23V | | | |
| Symbol | Parameter | Conditions | Min | Typ | Max | Min | Typ | Max | |
| V_O | Output Voltage | $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{ A}$, $P \leq 15\text{ W}$ | -11.5 | -12.0 | -12.5 | -14.4 | -15.0 | -15.6 | |
| | | | -11.4 | | -12.6 | -14.25 | | -15.75 | |
| | | | $(-27 \leq V_{IN} \leq -14.5)$ | | | $(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$ | | | |
| ΔV_O | Line Regulation | $T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 3) | 5 | 80 | | 5 | 100 | mV | |
| | | | $(-30 \leq V_{IN} \leq -14.5)$ | | | $(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$ | | | V |
| | | | 3 | 30 | | 3 | 50 | mV | |
| | | | $(-22 \leq V_{IN} \leq -16)$ | | | $(-26 \leq V_{IN} \leq -20)$ | | | V |
| ΔV_O | Load Regulation | $T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 3) $5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1.5\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 750\text{ mA}$ | 15 | 200 | | 15 | 200 | mV | |
| | | | 5 | 75 | | 5 | 75 | mV | |
| I_Q | Quiescent Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | 1.5 | 3 | | 1.5 | 3 | mA | |
| ΔI_Q | Quiescent Current Change | With Line With Load, $5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{ A}$ | | 0.5 | | | 0.5 | mA | |
| | | | $(-30 \leq V_{IN} \leq -14.5)$ | | | $(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$ | | | |
| | | | | 0.5 | | | 0.5 | mA | |
| V_n | Output Noise Voltage | $T_A = 25^\circ\text{C}$, $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ Hz}$ | 300 | | | 375 | | μV | |
| | | | Ripple Rejection | $f = 120\text{ Hz}$ | 54 | 70 | 54 | 70 | dB |
| | | | $(-25 \leq V_{IN} \leq -15)$ | | | $(-30 \leq V_{IN} \leq -17.5)$ | | | |
| | Dropout Voltage | $T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{OUT} = 1\text{ A}$ | 1.1 | | | 1.1 | | V | |
| I_{OMAX} | Peak Output Current | $T_J = 25^\circ\text{C}$ | 2.2 | | | 2.2 | | A | |
| | Average Temperature Coefficient of Output Voltage | $I_{OUT} = 5\text{ mA}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$ | -0.8 | | | -1.0 | | $\text{mV}/^\circ\text{C}$ | |

Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is intended to be functional, but do not guarantee Specific Performance limits. For guaranteed specifications and test conditions, see the Electrical Characteristics.

Note 2: Refer to Typical Performance Characteristics and Design Considerations for details.

Note 3: Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account.

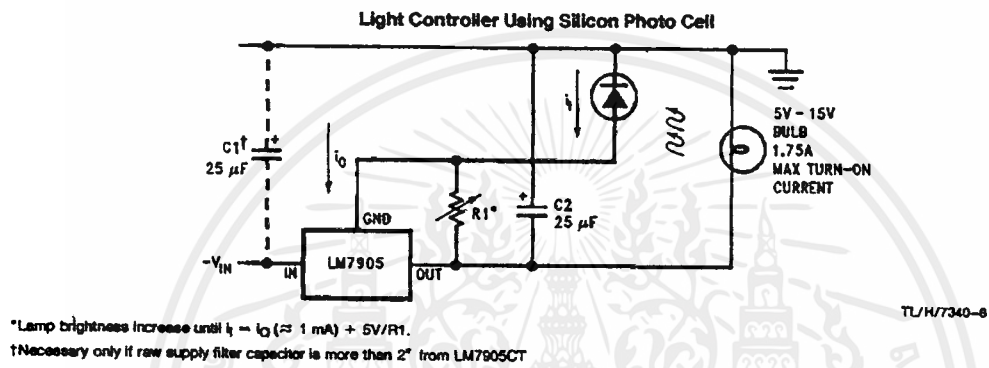
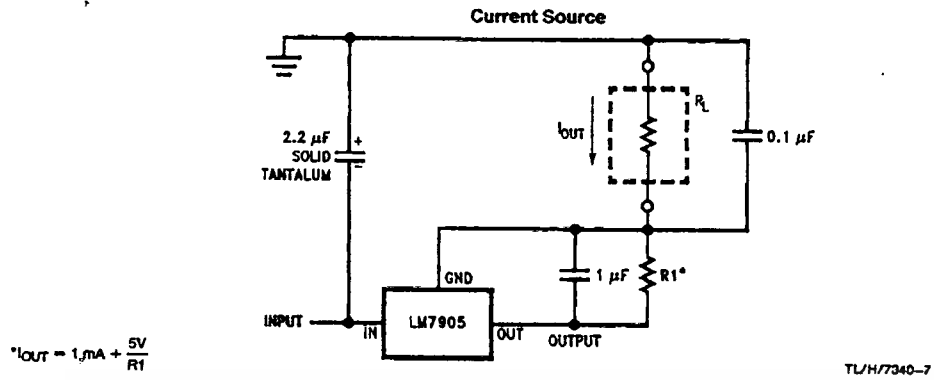
Typical Applications (Continued)



TL797340-4

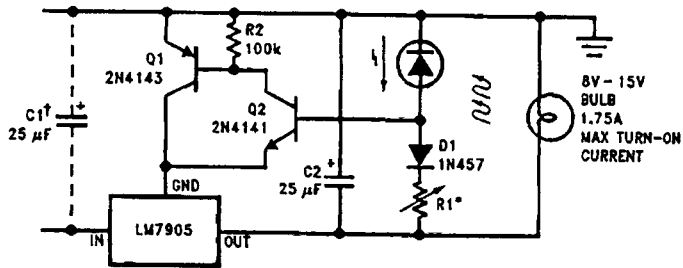
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)



Typical Applications (Continued)

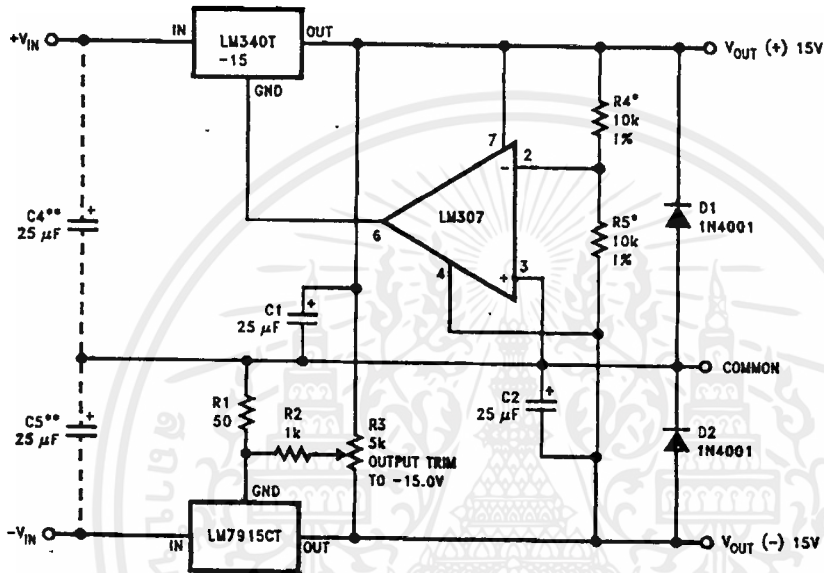
High-Sensitivity Light Controller



*Lamp brightness increases until $I_L = 5V/R1$ (I_L can be set as low as 1 μA)
 †Necessary only if raw supply filter capacitor is more than 2" from LM7905

TL/H/7340-0

± 15V, 1 Amp Tracking Regulators



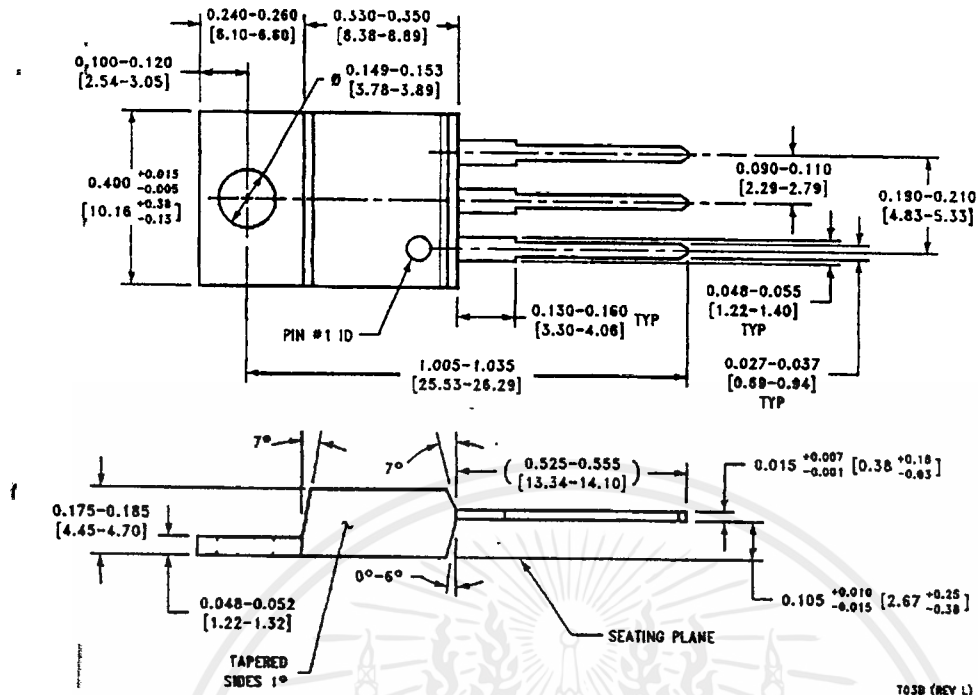
| | (- 15) | (+ 15) |
|--|-------------------|-------------------|
| Load Regulation at $\Delta I_L = 1A$ | 40 mV | 2 mV |
| Output Ripple, $C_{IN} = 3000 \mu F, I_L = 1A$ | 100 μV_{rms} | 100 μV_{rms} |
| Temperature Stability | 50 mV | 50 mV |
| Output Noise 10 Hz $\leq f \leq 10$ kHz | 150 μV_{rms} | 150 μV_{rms} |

*Resistor tolerance of R4 and R5 determine matching of (+) and (-) outputs.

**Necessary only if raw supply filter capacitors are more than 3" from regulators.

TL/H/7340-1

Physical Dimensions inches (millimeters)



TO-220 Outline Package (T)
 Order Number LM7905CT, LM7912CT or LM7915CT
 NS Package Number T03B

T03B (REV L)

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform, when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.



National Semiconductor Corporation
 1111 West Bardin Road
 Arlington, TX 76017
 Tel: 1(800) 272-9999
 Fax: 1(800) 737-7018

National Semiconductor Europe
 Fax: (+49) 0-180-530 65 66
 Email: cnrjpe@sem2.nsc.com
 Deutsch Tel: (+49) 0-180-530 85 85
 English Tel: (+49) 0-180-532 78 32
 Française Tel: (+49) 0-180-532 93 58
 Italiano Tel: (+49) 0-180-534 18 80

National Semiconductor Hong Kong Ltd.
 13th Floor, Straits Block,
 Ocean Centre, 5 Canton Rd.
 Tsimshatsui, Kowloon
 Hong Kong
 Tel: (852) 2737-1800
 Fax: (852) 2738-9880

National Semiconductor Japan Ltd.
 Tel: 81-043-298-2309
 Fax: 81-043-298-2409

DM54LS373/DM74LS373, DM54LS374/DM74LS374 TRI-STATE® Octal D-Type Transparent Latches and Edge-Triggered Flip-Flops

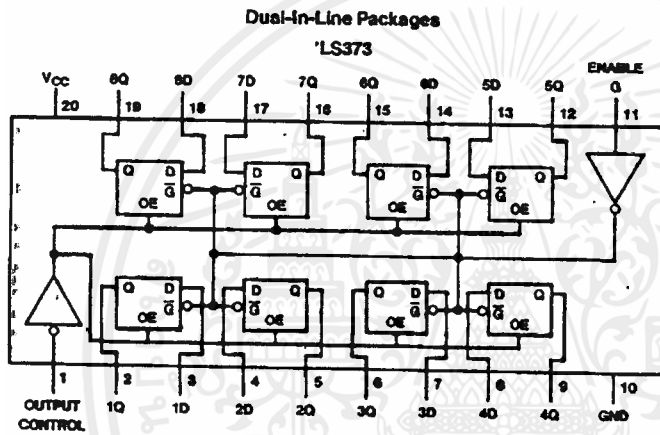
General Description

These 8-bit registers feature totem-pole TRI-STATE outputs designed specifically for driving highly-capacitive or relatively low-impedance loads. The high-impedance state and increased high-logic level drive provide these registers with the capability of being connected directly to and driving the bus lines in a bus-organized system without need for interface or pull-up components. They are particularly attractive for implementing buffer registers, I/O ports, bidirectional bus drivers, and working registers. (Continued)

Features

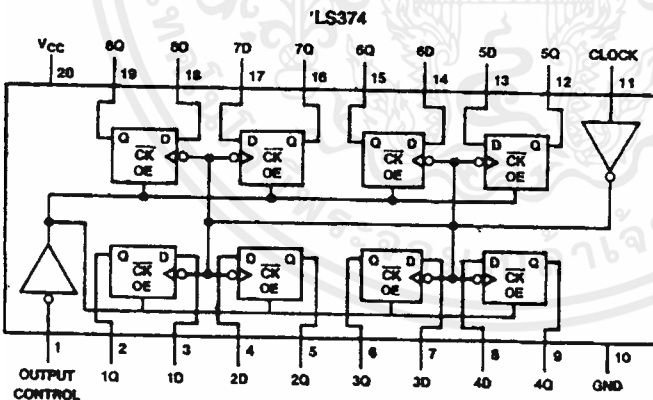
- Choice of 8 latches or 8 D-type flip-flops in a single package
- TRI-STATE bus-driving outputs
- Full parallel-access for loading
- Buffered control inputs
- P-N-P inputs reduce D-C loading on data lines

Connection Diagrams



Order Number
DM54LS373J,
DM54LS373W,
DM74LS373N or
DM74LS373WM
See NS Package Number
J20A, M20B, N20A or
W20A

TL/F/6431-1



Order Number
DM54LS374J,
DM54LS374W,
DM74LS374WM or
DM74LS374N
See NS Package Number
J20A, M20B, N20A or
W20A

TL/F/6431-2

TRI-STATE® is a registered trademark of National Semiconductor Corp.

DM54LS373/DM74LS373, DM54LS374/DM74LS374
TRI-STATE Octal D-Type Transparent Latches and Edge-Triggered Flip-Flops

General Description (Continued)

The eight latches of the DM54/74LS373 are transparent D-type latches meaning that while the enable (G) is high the Q outputs will follow the data (D) inputs. When the enable is taken low the output will be latched at the level of the data that was set up.

The eight flip-flops of the DM54/74LS374 are edge-triggered D-type flip flops. On the positive transition of the clock, the Q outputs will be set to the logic states that were set up at the D inputs.

A buffered output control input can be used to place the eight outputs in either a normal logic state (high or low logic levels) or a high-impedance state. In the high-impedance state the outputs neither load nor drive the bus lines significantly.

The output control does not affect the internal operation of the latches or flip-flops. That is, the old data can be retained or new data can be entered even while the outputs are off.

Function Tables

DM54/74LS373

| Output Control | Enable G | D | Output |
|----------------|----------|---|----------------|
| L | H | H | H |
| L | H | L | L |
| L | L | X | Q ₀ |
| H | X | X | Z |

DM54/74LS374

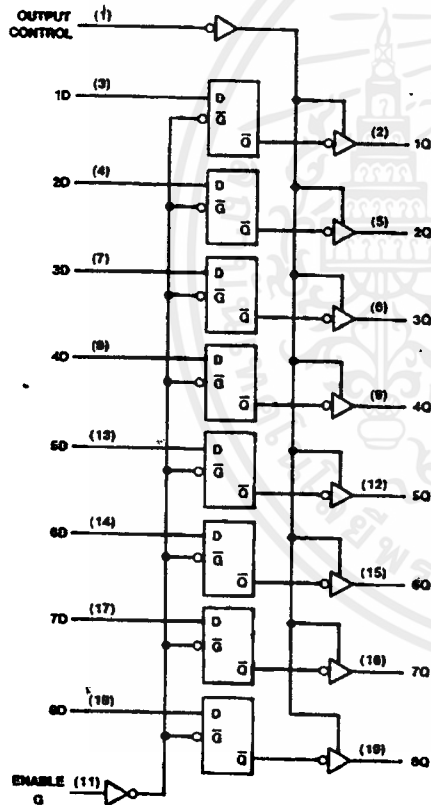
| Output Control | Clock | D | Output |
|----------------|-------|---|----------------|
| L | ↑ | H | H |
| L | ↑ | L | L |
| L | L | X | Q ₀ |
| H | X | X | Z |

H = High Level (Steady State), L = Low Level (Steady State), X = Don't Care
 ↑ = Transition from low-to-high level, Z = High Impedance State
 Q₀ = The level of the output before steady-state input conditions were established.

Logic Diagrams

DM54/74LS373

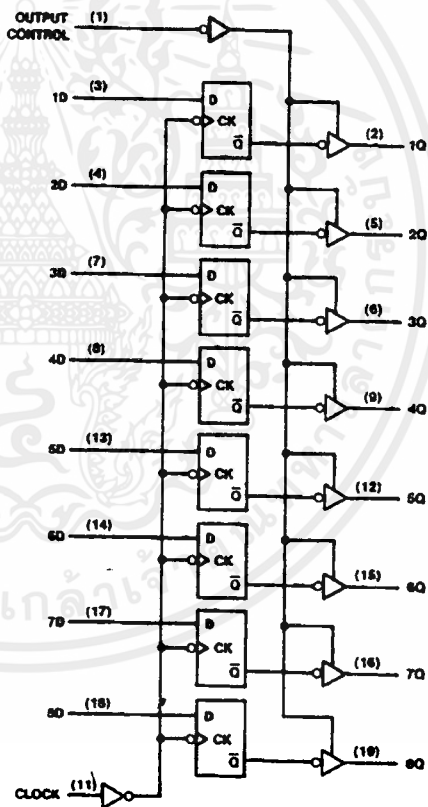
Transparent Latches



TL/F/6431-3

DM54/74LS374

Positive-Edge-Triggered Flip-Flops



TL/F/6431-4

'LS374 Electrical Characteristics

over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

| Symbol | Parameter | Conditions | Min | Typ (Note 1) | Max | Units | |
|-----------|---|--|---|--------------|------|---------------|---|
| V_I | Input Clamp Voltage | $V_{CC} = \text{Min}, I_I = -18 \text{ mA}$ | | | -1.5 | V | |
| V_{OH} | High Level Output Voltage | $V_{CC} = \text{Min}$ $I_{OH} = \text{Max}$ $V_{IL} = \text{Max}$ $V_{IH} = \text{Min}$ | DM54 | 2.4 | 3.4 | V | |
| | | | DM74 | 2.4 | 3.1 | | |
| V_{OL} | Low Level Output Voltage | $V_{CC} = \text{Min}$ $I_{OL} = \text{Max}$ $V_{IL} = \text{Max}$ $V_{IH} = \text{Min}$ | DM54 | | 0.25 | 0.4 | V |
| | | | DM74 | | 0.35 | 0.5 | |
| | | | $I_{OL} = 12 \text{ mA}$ $V_{CC} = \text{Min}$ | DM74 | | 0.25 | |
| I_I | Input Current @ Max Input Voltage | $V_{CC} = \text{Max}, V_I = 7\text{V}$ | | | 0.1 | mA | |
| I_{IH} | High Level Input Current | $V_{CC} = \text{Max}, V_I = 2.7\text{V}$ | | | 20 | μA | |
| I_{IL} | Low Level Input Current | $V_{CC} = \text{Max}, V_I = 0.4\text{V}$ | | | -0.4 | mA | |
| I_{OZH} | Off-State Output Current with High Level Output Voltage Applied | $V_{CC} = \text{Max}, V_O = 2.7\text{V}$ $V_{IH} = \text{Min}, V_{IL} = \text{Max}$ | | | 20 | μA | |
| I_{OZL} | Off-State Output Current with Low Level Output Voltage Applied | $V_{CC} = \text{Max}, V_O = 0.4\text{V}$ $V_{IH} = \text{Min}, V_{IL} = \text{Max}$ | | | -20 | μA | |
| I_{OS} | Short Circuit Output Current | $V_{CC} = \text{Max}$ (Note 2) | DM54 | -50 | -225 | mA | |
| | | | DM74 | -50 | -225 | | |
| I_{CC} | Supply Current | $V_{CC} = \text{Max}, D_n = \text{GND}, OC = 4.5\text{V}$ | | 27 | 45 | mA | |

'LS374 Switching Characteristics at $V_{CC} = 5\text{V}$ and $T_A = 25^\circ\text{C}$

(See Section 1 for Test Waveforms and Output Load)

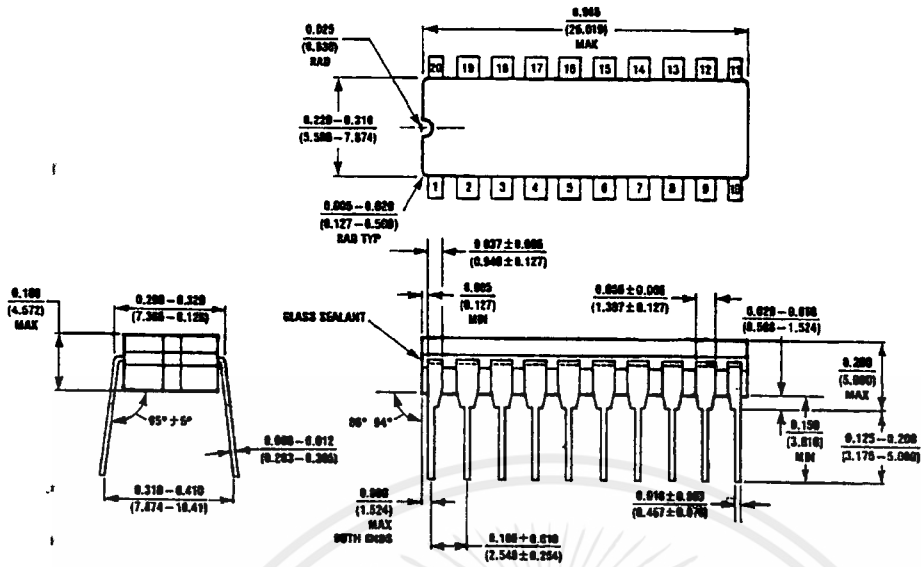
| Symbol | Parameter | $R_L = 667\Omega$ | | | | Units |
|-----------|---|-----------------------|-----|------------------------|-----|-------|
| | | $C_L = 45 \text{ pF}$ | | $C_L = 150 \text{ pF}$ | | |
| | | Min | Max | Min | Max | |
| f_{MAX} | Maximum Clock Frequency | 35 | | 20 | | MHz |
| t_{PLH} | Propagation Delay Time Low to High Level Output | | 28 | | 32 | ns |
| t_{PHL} | Propagation Delay Time High to Low Level Output | | 28 | | 38 | ns |
| t_{PZH} | Output Enable Time to High Level Output | | 28 | | 44 | ns |
| t_{PZL} | Output Enable Time to Low Level Output | | 28 | | 44 | ns |
| t_{PHZ} | Output Disable Time from High Level Output (Note 3) | | 20 | | | ns |
| t_{PLZ} | Output Disable Time from Low Level Output (Note 3) | | 25 | | | ns |

Note 1: All typicals are at $V_{CC} = 5\text{V}, T_A = 25^\circ\text{C}$.

Note 2: Not more than one output should be shorted at a time, and the duration should not exceed one second.

Note 3: $C_L = 5 \text{ pF}$.

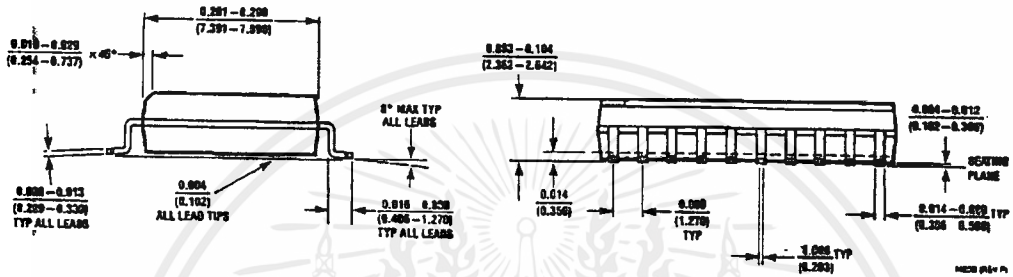
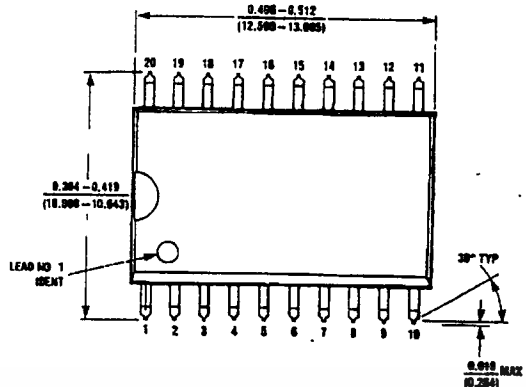
Physical Dimensions inches (millimeters)



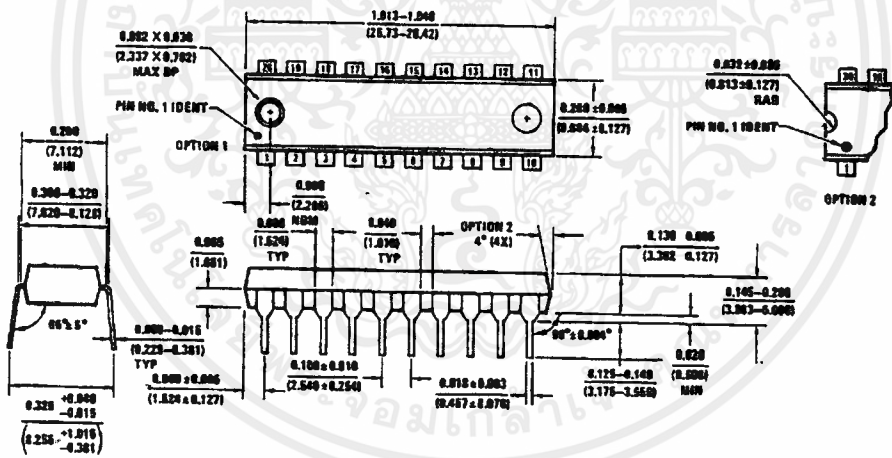
20-Lead Ceramic Dual-In-Line Package (J)
 Order Number DM54LS373J or DM54LS374J
 NS Package Number J20A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) (Continued)



20-Lead Wide Small Outline Molded Package (M)
 Order Number DM74LS373WM or DM74LS374WM
 NS Package Number M20B



20-Lead Molded Dual-In-Line Package (N)
 Order Number DM74LS373N and DM74LS374N
 NS Package Number N20A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่การณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Definition

The “ LEM Module LA 25-NP “ is a multi-range transducer. Based on the principle of magnetic compensation, it provides electronic measurement of DC, AC, pulsed currents and their combination with galvanic isolation.

Electrical Data

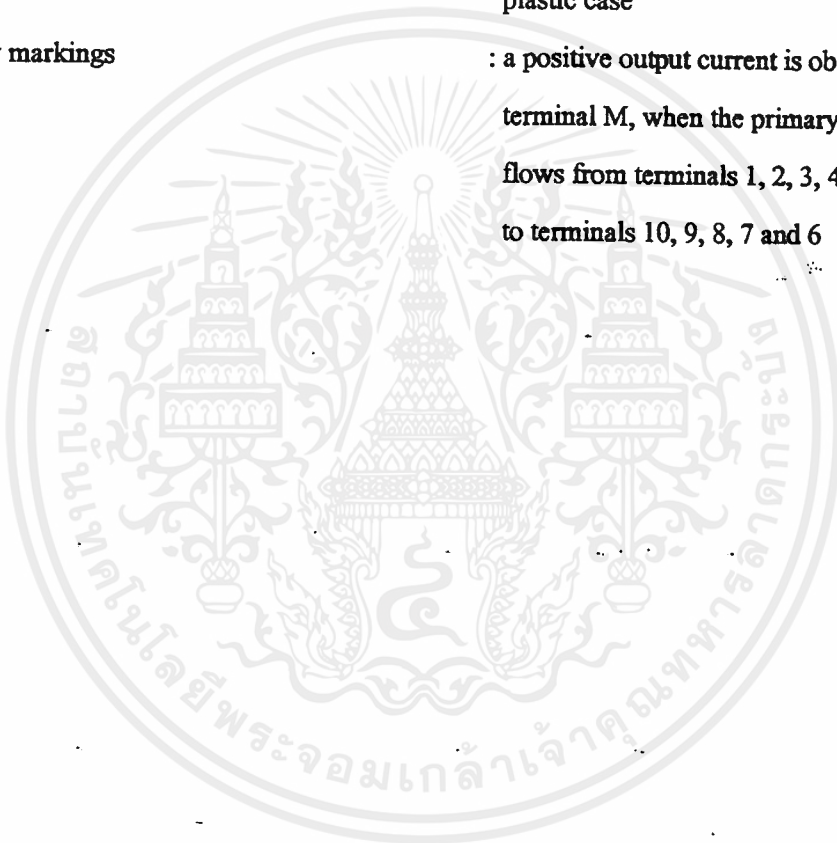
| | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| Norminal current I_n | : 25 A.t.t rema | |
| Measuring range | : 0 to +/- 36 A.t | |
| Measuring resistant | : $R_{m\min}$ | $R_{m\max}$ |
| with +/- 15 V | at +/- 25 A.t max. | : 100 ohm |
| | at +/- 36 A.t max. | : 100 ohm |
| | | 320 ohm |
| | | 190 ohm |
| Norminal analog output current | : 25 mA | |
| Turns ratio | : 1 - 2 - 3- 4 - 5 / 1000 | |
| Typical accuracy at +/- 25 °C | : +/- 0.5 % of I_n | |
| Supply voltage | : + and - 15 V.(+/- 15 %) | |
| Isolation | : between primary and secondary : | |
| | 2.5 kV rms/ 50 Hz / 1 min. | |

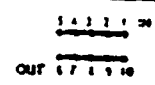
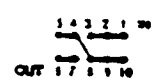



Accuracy - Dynamic performance

| | | |
|---------------------------------|--------------------------|-------------|
| | : Typical | Max. |
| Zero offset current at +25 °C* | : +/- 0.05 mA | +/- 0.15 mA |
| Residual current ** | | |
| after an overload of 3 x I_n | : +/- 0.05 mA | +/- 0.15 mA |
| Thermal drift of offset current | | |
| (between 0 °C to + 25 °C) | : +/- 0.06 mA | +/- 0.25 mA |
| (between + 25 °C to + 70 °C) | : +/- 0.1 mA | +/- 0.35 mA |
| Linearity | : better than +/- 0.2 % | |
| Respond time | : better than 1 μ s | |
| Bandwidth | : DC to 150 kHz (- dB) | |

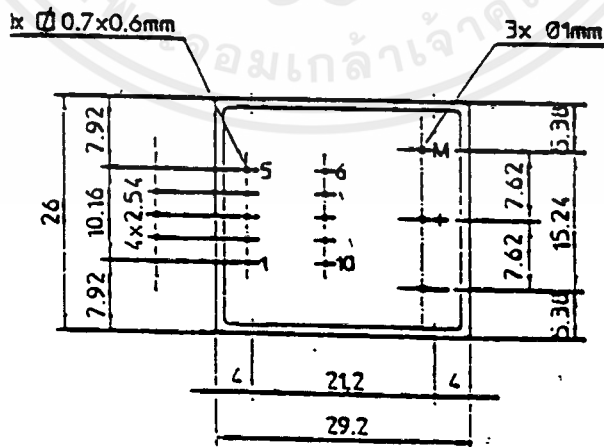
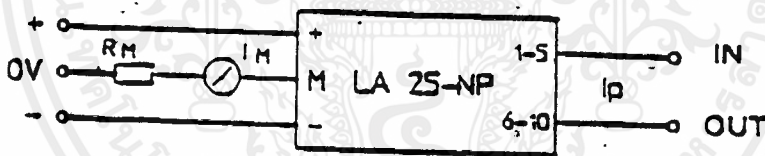
General data

| | |
|-------------------------------|---|
| Operating temperature | : 0 °C to + 70 °C |
| Storage temperature | : - 25 °C to + 85 °C |
| Current consumption | : 10 mA + output current |
| Secondary internal resistance | : 110 ohm (at + 70 °C) |
| Primary internal resistance | : < 1.25 mohm / turn |
| Isolation resistance | : > 1500 Mohm (at 500 V and + 25 °C) |
| Weight | : 22 g. |
| Package | : potted in insulated self-extinguishing plastic case |
| Polarity markings | : a positive output current is obtained on terminal M, when the primary current flows from terminals 1, 2, 3, 4, and 5 to terminals 10, 9, 8, 7 and 6 |

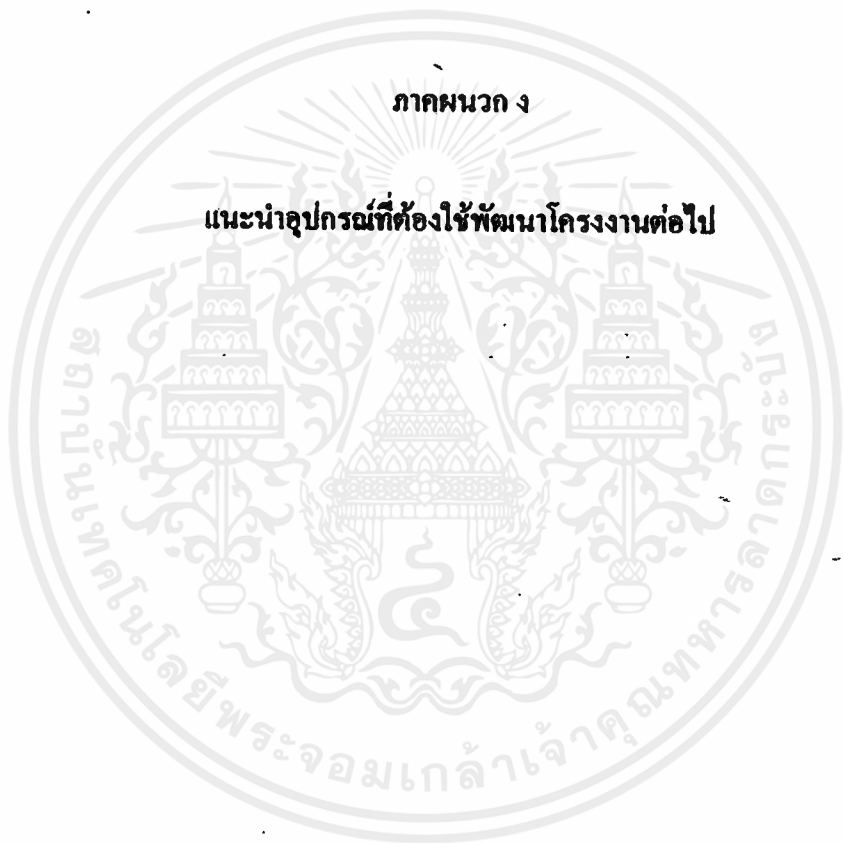


| Number of primary turns | Primary current | | Nominal output current I_2 (mA) | Turn ratio | Primary resistance (mOhm) | Primary insertion inductance (μ H) | Recommended connections |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|------------|---------------------------|---|---|
| | nominal I_1 (A) | maximum I_1 (A) | | | | | |
| 1 | 25 | 36 | 25 | 1/1000 | 0.3 | 0.023 |  |
| 2 | 12 | 18 | 24 | 2/1000 | 1.1 | 0.09 |  |
| 3 | 8 | 12 | 24 | 3/1000 | 2.5 | 0.21 |  |
| 4 | 6 | 9 | 24 | 4/1000 | 4.4 | 0.37 |  |
| 5 | 5 | 7 | 25 | 5/1000 | 6.3 | 0.58 |  |

Connection

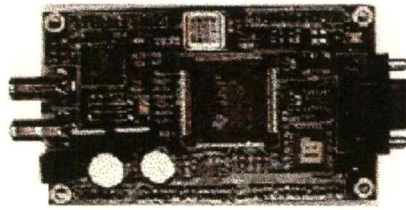


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

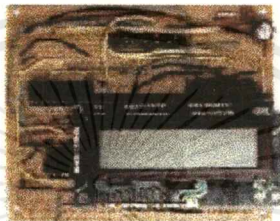


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บอร์ด TMS320C50 DSK พร้อมสาย RS232 DB-9 และภาคจ่ายไฟ



2. หน่วยแสดงผล LCD



3. เครื่องลดทอนสัญญาณ



4. โปรแกรมดังต่อไปนี้

DSK5A.EXE (version 1.02 เนื่องจากตัว 1.03 ใช้แล้วคอมพิวเตอร์ไม่ผ่าน)

DSK5D.EXE (version 1.03)

DSK5L.EXE (version 1.03)

5. ไฟล์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อปีการศึกษา 2539

OSCILLO.ASM

LCD.ASM

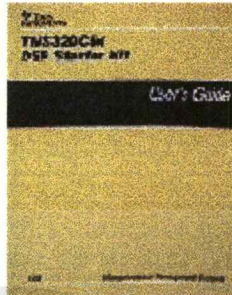
DISPLAY.ASM

TWIDDLE.ASM

6. เอกสารและแหล่งอ้างอิงข้อมูล

6.1 หนังสือ

TEXAS INSTRUMENTS TMS320C5X DSP STARTER KIT USER'S GUIDE



6.2 หนังสือ

TEXAS INSTRUMENTS TMS320C5X USER'S GUIDE



6.3 เครื่องข่ายอินเทอร์เน็ต

<http://www.national.com>

(เป็นแหล่งคำคำชี้ทของไอซี)

<http://www.ti.com>

(เป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญมาก)

6.4 โปรแกรม ADOBE ACROBAT READER (เพื่อใช้อ่านเอกสารที่รับมาเป็นไฟล์ จาก
เครือข่าย www.ti.com)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบุคคลต่อไปนี้ ผู้ซึ่งมีส่วนร่วมในการทำให้ปริญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง
ด้วยดี

- คุณพ่อ คุณแม่ ที่กรุณาสนับสนุนการศึกษาตลอดมา
- อาจารย์ศิริวัฒน์ โทษิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้แนวคิดในการทำโครงการนี้
- อาจารย์เกรียงศักดิ์ สุวรรณ โทษิศรี ผู้ที่ติดต่ออาจารย์เทอดศักดิ์ให้เรา
- อาจารย์เทอดศักดิ์ ลีวาทอง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือเราอย่าง
เต็มที่
- อาจารย์วัฒน์ อู่ชายโสม ผู้ซึ่งคอยให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆและช่วยพิสูจน์ว่าโปรเจก
เราทำงานถูกต้อง
- Mr. Hong Lye และ Mr. Lim Hong Swee ผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิค
- คุณสุรศักดิ์ รอดแก้ว และ คุณอุดม วงศ์ศิรินพคุณ
- เพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือ
- และทุกๆคนที่คอยช่วยเหลือในหลายๆด้าน
เช่นพี่เกดทำอาหาร พี่ปลาพิมพ์รายงาน พี่รุ่งโรจน์จัดหาอุปกรณ์ให้ พี่ปรีชาขับรถ
บุญรักษ์ชีร็อกซ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Texas Instrument, “TMS320C5x DSP Starter Kit User’s Guide”, Texas Instrument Incorporated, 1994
- [2] Texas Instrument, “TMS320C5x User’s Guide”, Texas Instrument Incorporated, 1994
- [3] EC&M Editors, “Practical Guide To Quality Power For Sensitive Equipment”, Intertec Electrical Group, 1993
- [4] สุรศักดิ์ รอดแก้ว, อุดม วงศ์ศรีนพคุณ, “อุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์”, “ปริชญานีพนธ์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538