

การสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล  
ที่สามารถปรับการเลื่อนเฟส

THE IMPLEMENTATION OF AN ADJUSTABLE PHASE  
DIGITAL SINE WAVE OSCILLATOR

สาวิตร์ กลันเนียม

SAWITREE KLUNIAM

วิทยานิพนธ์เสนอเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2270-3

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล  
ที่สามารถปรับการเลื่อนเฟส

THE IMPLEMENTATION OF AN ADJUSTABLE PHASE  
DIGITAL SINE WAVE OSCILLATOR

สาวิตรี กลั่นเอี่ยม

SAWITREE KLUNIUM

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61677  
วัน,เดือน,ปี..... 19 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2270-3

**THE IMPLEMENTATION OF AN ADJUSTABLE PHASE  
DIGITAL SINE WAVE OSCILLATOR**

**SAWITREE KLUNIUM**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

**ISBN 974-15-2270-3**

**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่สามารถปรับการเลื่อนเฟส |
| นักศึกษา                    | นางสาวสาวิตรี กลั่นเอี่ยม   |
| รหัสนักศึกษา                | 47061032  |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมโทรคมนาคม   |
| พ.ศ.                        | 2549  |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ   |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการใหม่ในการออกแบบโครงสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล ซึ่งหลักการที่นำเสนอนี้สามารถกำหนดการเลื่อนเฟสของสัญญาณได้ โดยสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมี 2 สัญญาณ คือ  $\cos(\omega_0 n)$  และ  $\cos(\omega_0 n + \phi)$  การออกแบบเริ่มจากการสร้างระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาที่มีผลตอบสนองทางอิมพัลส์เป็น  $\cos(\omega_0 n)$  ซึ่งระบบนี้จะมีโพล 1 คู่วางอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมหนึ่งหน่วยในลักษณะ Complex conjugate และมีซีโร 1 คู่ซึ่งซีโรตัวหนึ่งวางที่จุดกำเนิด ส่วนอีกตัวหนึ่งวางอยู่บนแกนเวลาจริง ในการเลื่อนเฟสของสัญญาณซายน์นั้นสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของซีโรที่วางอยู่บนแกนเวลาจริง ซึ่งผลการทดลองพบว่าการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์ตามหลักการที่นำเสนอสามารถเลื่อนเฟสได้อย่างถูกต้องและเมื่อทำการเปรียบเทียบกับหลักการสร้างสัญญาณซายน์แบบเปิดตาราง (Look up Table: LUT) พบว่าหลักการที่นำเสนอมีความผิดพลาดน้อยกว่าหลักการ LUT ในช่วงความถี่ต่ำ

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Thesis Title</b>   | The Implementation of an Adjustable Phase<br>Digital Sine Wave Oscillator |
| <b>Student</b>        | Miss Sawitree Klunium   |
| <b>Student ID</b>     | 47061032  |
| <b>Degree</b>         | Master of Engineering   |
| <b>Programme</b>      | Telecommunication Engineering   |
| <b>Year</b>           | 2006  |
| <b>Thesis Advisor</b> | Assoc.Prof.Dr.Kobchai Dejhan  |

## **ABSTRACT**

This thesis proposes a new design of digital sine wave generator which is widely used for instrumentation application. The proposed digital sine wave generator is able to define the phase shift of the output signal as  $\cos(\omega_0 n)$  and  $\cos(\omega_0 n + \phi)$ . This generator is implemented with the discrete time system which has impulse response as  $\cos(\omega_0 n)$  in a pair of conjugate complex poles and a pair of zeros at the origin and the real axis. The phase shift of sine wave is able to be carried out by changing the position of zero at the real axis. The experimental results have been shown that the proposed design of sine wave generator produces correct phase shift sine wave, compared to direct look up table (LUT). The designed sine wave generator gives less error than look up table, especially for low frequency range.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาแนะนำให้คำปรึกษา คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และให้ความเมตตาแก่ศิษย์ด้วยดีเสมอมา ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิเชฐ ม่วงนวล และ รศ.สมยศ จุณณะปิยะ กรรมการสอบหัวข้อ และโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.สุรพันธ์ ยิ้มมั่น และ อาจารย์พยุง เดชอยู่ ที่ได้ให้ความรู้ต่างมากมาย ให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆให้แก่ศิษย์

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่รู้จักสำหรับความเป็นมิตรและความช่วยเหลือต่างๆที่มีให้กันระหว่างศึกษาอยู่

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อนาวาโทสมศักดิ์ และคุณแม่ยุพา กลั่นเอี่ยม บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับลูกมาโดยตลอดรวมถึงเด็กชายสุพงศ์ธร กลั่นเอี่ยม น้องชายข้าพเจ้า อีกทั้งครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประ โยชนอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สาวิตรี กลั่นเอี่ยม

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | VIII |
| สารบัญรูป.....   | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                            | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                    | 1    |
| 1.3 สมมุติฐานการศึกษา.....   | 1    |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....                       | 2    |
| 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน..... | 2    |
| 1.6 ขอบเขตการวิจัย.....  | 2    |
| 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....  | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข.....                         | 4    |
| 2.1 สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....                              | 4    |
| 2.1.1 Unit sample sequence.....                                    | 5    |
| 2.1.2 Unit step sequence.....                                      | 5    |
| 2.1.3 Exponential sequence.....                                    | 5    |
| 2.1.4 Sinusoidal sequence.....                                     | 8    |
| 2.2 ลักษณะเฉพาะของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....                | 9    |
| 2.2.1 Energy signal และ Power signals.....                         | 9    |
| 2.2.2 Periodic signals และ Aperiodic signals.....                  | 9    |
| 2.2.3 Symmetric (even) และ Asymmetric (odd) signals.....           | 10   |

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.3     | การกระทำของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....  | 11 |
| 2.3.1   | การเลื่อนสัญญาณ.....  | 11 |
| 2.3.2   | การบวก การคูณ การสเกลสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง<br>(Adding, Multiplication and scaling of Discrete Time Signal)..... | 14 |
| 2.4     | ระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา.....   | 14 |
| 2.4.1   | ไดอะแกรมที่ใช้แสดงในระบบไม่ต่อเนื่อง<br>(Block Diagram Representation of Discrete-Time System) .....            | 15 |
| 2.4.2   | ชนิดของระบบแบบไม่ต่อเนื่อง .....  | 17 |
| 2.4.2.1 | ระบบแบบ Static .....  | 17 |
| 2.4.2.2 | ระบบแบบ Dynamic.....  | 17 |
| 2.4.2.3 | ระบบแปรตามเวลา.....   | 17 |
| 2.4.2.4 | ระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear and nonlinear system).....   | 18 |
| 2.4.2.5 | ระบบแบบ Causal และแบบ Noncausal .....   | 19 |
| 2.4.2.6 | ระบบแบบ Stable และระบบแบบ Unstable.....   | 19 |
| 2.4.3   | การเชื่อมต่อระบบแบบไม่ต่อเนื่อง<br>(Interconnection of Discrete-time System) .....                              | 19 |
| 2.5     | การวิเคราะห์ระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาแบบเชิงเส้นและแปรตามเวลา.....   | 21 |
| 2.5.1   | Convolution Sum.....  | 21 |
| 2.6     | โครงสร้างของระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา .....  | 24 |
| 2.6.1   | โครงสร้างของระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา<br>(Structures of the realization of linear time- invariant system).....  | 24 |
| 2.7     | ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง .....  | 27 |
| 2.8     | สมการผลต่างสี่บเนื่อง.....  | 30 |
| 2.9     | การแปลงแซด.....   | 31 |
| 2.10    | คุณสมบัติการแปลงแซด .....   | 35 |
| 2.10.1  | คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (Linearity Property) .....  | 35 |
| 2.10.2  | คุณสมบัติการเลื่อนเฟส (Shift Property) .....  | 35 |
| 2.10.3  | คุณสมบัติการประสาน (Convolution Property).....  | 36 |

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.11 การแปลงแซคในรูปเศษส่วน .....  | 38   |
| 2.11.1 โพลและซีโร (Pole and Zero).....   | 38   |
| 2.11.2 ลักษณะสัญญาณและการวางตำแหน่งของโพล.....   | 41   |
| 2.12 การแปลงแซคผกผัน.....  | 44   |
| 2.12.1 การแปลงแซคผกผันด้วยวิธีอนุกรมอนันต์.....  | 44   |
| 2.12.2 การแปลงแซคผกผันด้วยวิธีแยกเศษส่วนย่อย.....  | 45   |
| 2.12.3 การแปลงแซคผกผันด้วยวิธี Residue.....  | 48   |
| 2.13 ฟังก์ชันระบบของระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา .....  | 51   |
| 2.14 ผลตอบสนองทางเวลาของระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา .....                                       | 53   |
| 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซค.....   | 54   |
| <br>   |      |
| บทที่ 3 ตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล .....  | 55   |
| 3.1 ตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัลตามหลักการพื้นฐาน<br>(Digital Sinusoidal Oscillators) .....   | 55   |
| 3.2 ตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัลตามหลักการที่นำเสนอ .....                                     | 58   |
| 3.2.1 ตัวอย่างการออกแบบตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ตามหลักการที่นำเสนอ .....              | 62   |
| 3.3 การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์.....   | 67   |
| 3.3.1 การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส<br>(Phase Error Estimation) ..... | 67   |
| 3.3.2 ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion: THD).....                        | 70   |
| <br>   |      |
| บทที่ 4 ผลการออกแบบ .....  | 78   |
| 4.1 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการจำลองและการสร้างจริง.....                                 | 79   |
| 4.2 ผลการหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวม.....  | 184  |
| <br>   |      |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....  | 185  |

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| เอกสารอ้างอิง .....   | 186  |
| ภาคผนวก ก. บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 DSP Starter Kit ..... | 187  |
| ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....                 | 197  |
| ประวัติผู้เขียน .....   | 209  |

# สารบัญรูป

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แผนผังของระบบประมวลสัญญาณเชิงเลข.....  | 4    |
| 2.2 สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง.....  | 5    |
| 2.3 Unit sample sequence.....  | 6    |
| 2.4 Unit step sequence.....  | 6    |
| 2.5 Exponential sequences $x(n) = A\alpha^n$ .....   | 7    |
| 2.6 Sinusoidal sequence.....   | 8    |
| 2.7 Periodic signals sequence.....   | 10   |
| 2.8 Symmetric (even) sequence.....   | 10   |
| 2.9 Asymmetric (odd) sequence.....   | 11   |
| 2.10 สัญญาณ $x(n)$ ของกรณี 2.1.....  | 11   |
| 2.11 กราฟสัญญาณ $x(n-3)$ .....   | 12   |
| 2.12 กราฟสัญญาณ $x(n+2)$ .....   | 13   |
| 2.13 กราฟสัญญาณ $x(n)$ .....   | 13   |
| 2.14 กราฟสัญญาณ $x(-n)$ .....  | 13   |
| 2.15 กราฟสัญญาณ $x(-n+2)$ .....  | 13   |
| 2.16 ไคอะแกรมของระบบแบบไม่ต่อเนื่อง.....   | 14   |
| 2.17 ไคอะแกรมการบวกในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง.....  | 15   |
| 2.18 ไคอะแกรมตัวคูณคงที่ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง.....   | 15   |
| 2.19 ไคอะแกรมตัวคูณสัญญาณในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง.....  | 15   |
| 2.20 ไคอะแกรมตัวห้วงในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง.....   | 16   |
| 2.21 ไคอะแกรมตัวล้าหน้าในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง.....  | 16   |
| 2.22 ไคอะแกรมของระบบแบบไม่ต่อเนื่องตามสมการที่ 2.24.....   | 16   |
| 2.23 ไคอะแกรมของระบบแบบไม่ต่อเนื่องตามสมการที่ 2.25.....   | 17   |
| 2.24 ตัวอย่างระบบแบบไม่ต่อเนื่องที่แปรตามเวลาและไม่แปรตามเวลา.....   | 18   |
| 2.25 ระบบ $\tau$ เป็นระบบที่เชิงเส้นและระบบที่ไม่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับหลักการของ<br>Superposition จะเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้น..... | 19   |
| 2.26 การเชื่อมต่อระบบแบบไม่ต่อเนื่องแบบอนุกรม.....   | 19   |
| 2.27 การเชื่อมต่อระบบแบบไม่ต่อเนื่องแบบขนาน.....   | 20   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.28 คุณสมบัติการสลับที่ .....                                       | 22   |
| 2.29 คุณสมบัติการจัดกลุ่ม .....                                      | 22   |
| 2.30 คุณสมบัติการกระจาย .....  | 23   |
| 2.31 ผลตอบสนองทาง Impulse ของระบบแบบไม่ต่อเนื่อง .....               | 23   |
| 2.32 โครงสร้างของระบบเชิงเส้นแปรตามเวลา .....                        | 25   |
| 2.33 โครงสร้างแบบตรง I ของระบบไม่ต่อเนื่องแบบ Recursive .....        | 26   |
| 2.34 โครงสร้างแบบตรง II ของระบบไม่ต่อเนื่องแบบ Recursive .....       | 27   |
| 2.35 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเชิงอุปมาน .....                           | 28   |
| 2.36 สัญญาณสุ่มตัวอย่าง .....  | 28   |
| 2.37 สเปกตรัมของสัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง .....                       | 29   |
| 2.38 ROC ของ $X(z)$ ในกรณีที่ 2.9 .....                              | 34   |
| 2.39 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของระบบในกรณีที่ 2.12 .....              | 38   |
| 2.40 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของระบบในกรณีที่ 2.13 .....              | 39   |
| 2.41 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของกรณีที่ 2.14 .....                    | 40   |
| 2.42 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของกรณีที่ 2.15 .....                    | 40   |
| 2.43 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโพลกับลำดับสัญญาณ .....            | 42   |
| 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซด .....                | 54   |
| 3.1 ตำแหน่งของโพลบนระนาบแซดของตัวกำเนิดชายน้แบบดิจิตอล .....         | 55   |
| 3.2 โครงสร้างของตัวกำเนิดชายน้แบบตรง .....                           | 56   |
| 3.3 โครงสร้างของตัวกำเนิดชายน้แบบ Coupled-form .....                 | 56   |
| 3.4 การวางโพลและซีโร และผลตอบสนองทาง Impulse ของตัวกำเนิดชายน้ ..... | 58   |
| 3.5 ลำดับสัญญาณ ของ $\cos(\omega_0 n)$ .....                         | 58   |
| 3.6 ตำแหน่งการวางโพลและซีโร .....                                    | 59   |
| 3.7 ลำดับสัญญาณของ $\cos(\omega_0 n + \phi)$ .....                   | 60   |
| 3.8 ตำแหน่งการวางโพลและซีโร .....                                    | 60   |
| 3.9 โครงสร้างของตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบตรง .....                     | 61   |
| 3.10 แบบไม่ต่อเนื่องที่นำมาต่อลำดับกับโครงสร้างในรูปที่ 3.9 .....    | 61   |
| 3.11 โครงสร้างการต่อลำดับ .....                                      | 62   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.12 ตำแหน่งการหาค่าเฟสของสัญญาณไซน์.....   | 67   |
| 3.13 ค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีที่ 1 .....   | 68   |
| 3.14 ค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีที่ 2 .....   | 69   |
| 3.15 การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ .....   | 71   |
| 3.16 ข้อมูลของขนาดของฮาร์โมนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ที่วิเคราะห์ด้วย<br>เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์.....                                     | 71   |
| 4.1 Hardware และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด .....  | 78   |
| 4.2 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ .....  | 79   |
| 4.3 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ .....  | 79   |
| 4.4 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ .....  | 80   |
| 4.5 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 80   |
| 4.6 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 80   |
| 4.7 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 6 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 81   |
| 4.8 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 7 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 81   |
| 4.9 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 8 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 81   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.10 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ .....  | 82   |
| 4.11 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=10 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 82   |
| 4.12 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12\text{Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ .....   | 82   |
| 4.13 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 83   |
| 4.14 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 83   |
| 4.15 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 83   |
| 4.16 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 84   |
| 4.17 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 84   |
| 4.18 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 84   |
| 4.19 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 85   |
| 4.20 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 85   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.21 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 85   |
| 4.22 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 86   |
| 4.23 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ .....  | 86   |
| 4.24 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{6}$ ..... | 86   |
| 4.25 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = \frac{\pi}{6}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 87   |
| 4.26 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....   | 87   |
| 4.27 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....   | 88   |
| 4.28 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....   | 88   |
| 4.29 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....  | 88   |
| 4.30 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....  | 89   |
| 4.31 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 6 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....  | 89   |
| 4.32 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 7 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....  | 89   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.33 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=8 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....  | 90   |
| 4.34 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....  | 90   |
| 4.35 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=10 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 90   |
| 4.36 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 91   |
| 4.37 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ความถี่ $f=14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....    | 91   |
| 4.38 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 91   |
| 4.39 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 92   |
| 4.40 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 92   |
| 4.41 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 92   |
| 4.42 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 93   |
| 4.43 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 93   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.44 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....   | 93   |
| 4.45 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 45\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ ..... | 94   |
| 4.46 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50\text{Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....    | 94   |
| 4.47 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80\text{ Hz}$ , $f_s = 16\text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....    | 94   |
| 4.48 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100\text{ Hz}$ , $f_s = 16\text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{4}$ .....   | 95   |
| 4.49 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = \frac{\pi}{4}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 95   |
| 4.50 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1\text{ Hz}$ , $f_s = 500\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....   | 96   |
| 4.51 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=2\text{ Hz}$ , $f_s = 500\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....     | 96   |
| 4.52 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3\text{ Hz}$ , $f_s = 500\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....   | 96   |
| 4.53 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=4\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....    | 97   |
| 4.54 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....  | 97   |
| 4.55 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=6\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....    | 97   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.56 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 7 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....  | 98   |
| 4.57 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 8 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....  | 98   |
| 4.58 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 9 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....  | 98   |
| 4.59 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 10 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 99   |
| 4.60 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 12 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 99   |
| 4.61 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 99   |
| 4.62 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 100  |
| 4.63 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 100  |
| 4.64 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 100  |
| 4.65 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 101  |
| 4.66 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 101  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.67 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 101  |
| 4.68 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 102  |
| 4.69 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 102  |
| 4.70 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50\text{Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....   | 102  |
| 4.71 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ .....  | 103  |
| 4.72 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{3}$ ..... | 103  |
| 4.73 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = \frac{\pi}{3}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 103  |
| 4.74 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....   | 104  |
| 4.75 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....   | 104  |
| 4.76 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....   | 104  |
| 4.77 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 105  |
| 4.78 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=5 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 105  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.79 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=6 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 105  |
| 4.80 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=7 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 106  |
| 4.81 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=8 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 106  |
| 4.82 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 106  |
| 4.83 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=10 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ ..... | 107  |
| 4.84 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ ..... | 107  |
| 4.85 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ ..... | 107  |
| 4.86 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ ..... | 108  |
| 4.87 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ ..... | 108  |
| 4.88 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ ..... | 108  |
| 4.89 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ ..... | 109  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.90 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 109  |
| 4.91 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 109  |
| 4.92 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 110  |
| 4.93 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 110  |
| 4.94 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 110  |
| 4.95 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....   | 111  |
| 4.96 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{\pi}{2}$ .....  | 111  |
| 4.97 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = \frac{\pi}{2}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....   | 111  |
| 4.98 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....   | 112  |
| 4.99 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....   | 112  |
| 4.100 การจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....    | 112  |
| 4.101 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ ..... | 113  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.102 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=5\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ .....  | 113  |
| 4.103 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=6\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ .....  | 113  |
| 4.104 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=7\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ .....  | 114  |
| 4.105 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=8\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ .....  | 114  |
| 4.106 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ .....  | 114  |
| 4.107 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=10\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ ..... | 115  |
| 4.108 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ ..... | 115  |
| 4.109 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ ..... | 115  |
| 4.110 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ ..... | 116  |
| 4.111 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ ..... | 116  |
| 4.112 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20\text{ Hz}$ , $f_s=5000\text{ Hz}$ , $\phi=\frac{2\pi}{3}$ ..... | 116  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.113 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....  | 117  |
| 4.114 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f= 30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ ..... | 117  |
| 4.115 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....  | 117  |
| 4.116 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....  | 118  |
| 4.117 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f= 45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ ..... | 118  |
| 4.118 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50\text{Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....    | 118  |
| 4.119 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....   | 119  |
| 4.120 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{2\pi}{3}$ .....  | 119  |
| 4.121 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = \frac{2\pi}{3}$ ณ ความถี่ใดๆ.....   | 119  |
| 4.122 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f= 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....   | 120  |
| 4.123 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....    | 120  |
| 4.124 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f= 3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....   | 120  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.125 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=4\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....  | 121  |
| 4.126 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=5\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....  | 121  |
| 4.127 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=6\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....  | 121  |
| 4.128 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=7\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....  | 122  |
| 4.129 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=8\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....  | 122  |
| 4.130 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....  | 122  |
| 4.131 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=10\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 123  |
| 4.132 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 123  |
| 4.133 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 123  |
| 4.134 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 124  |
| 4.135 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 124  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.136 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 124  |
| 4.137 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 125  |
| 4.138 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 125  |
| 4.139 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 125  |
| 4.140 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 126  |
| 4.141 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 126  |
| 4.142 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 126  |
| 4.143 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ .....  | 127  |
| 4.144 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ..... | 127  |
| 4.145 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = \frac{3\pi}{4}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 127  |
| 4.146 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \pi$ .....              | 128  |
| 4.147 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบคิจิตอล<br>ที่ความถี่ $f = 2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = \pi$ .....              | 128  |



## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.162 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \pi$ .....           | 133  |
| 4.163 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \pi$ .....           | 133  |
| 4.164 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \pi$ .....           | 134  |
| 4.165 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \pi$ .....           | 134  |
| 4.166 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = \pi$ .....           | 134  |
| 4.167 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \pi$ .....            | 135  |
| 4.168 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = \pi$ .....           | 135  |
| 4.169 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = \pi$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 135  |
| 4.170 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 136  |
| 4.171 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 136  |
| 4.172 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 136  |
| 4.173 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 137  |
| 4.174 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 137  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.175 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=6\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 137  |
| 4.176 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=7\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 138  |
| 4.177 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=8\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 138  |
| 4.178 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 138  |
| 4.179 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=10\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 139  |
| 4.180 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 139  |
| 4.181 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 139  |
| 4.182 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 140  |
| 4.183 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 140  |
| 4.184 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 140  |
| 4.185 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 141  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.186 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 141  |
| 4.187 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 141  |
| 4.188 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 142  |
| 4.189 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 142  |
| 4.190 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 142  |
| 4.191 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ .....  | 143  |
| 4.192 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ..... | 143  |
| 4.193 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = -\frac{\pi}{6}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 143  |
| 4.194 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....   | 144  |
| 4.195 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....   | 144  |
| 4.196 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....   | 144  |
| 4.197 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....  | 145  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.198 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....  | 145  |
| 4.199 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 6 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....  | 145  |
| 4.200 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 7 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....  | 146  |
| 4.201 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 8 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....  | 146  |
| 4.202 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 9 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....  | 146  |
| 4.203 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 10 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 147  |
| 4.204 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 12 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 147  |
| 4.205 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 147  |
| 4.206 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 148  |
| 4.207 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 148  |
| 4.208 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 148  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.209 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....   | 149  |
| 4.210 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 149  |
| 4.211 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....   | 149  |
| 4.212 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....   | 150  |
| 4.213 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ..... | 150  |
| 4.214 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50\text{Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....     | 150  |
| 4.215 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....    | 151  |
| 4.216 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{4}$ .....   | 151  |
| 4.217 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = -\frac{\pi}{4}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 151  |
| 4.218 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....   | 152  |
| 4.219 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....     | 152  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.220 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....   | 152  |
| 4.221 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....  | 153  |
| 4.222 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....  | 153  |
| 4.223 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 6 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....  | 153  |
| 4.224 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 7 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....  | 154  |
| 4.225 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 8 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....  | 154  |
| 4.226 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 9 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....  | 154  |
| 4.227 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 10 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 155  |
| 4.228 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 12 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 155  |
| 4.229 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 155  |
| 4.230 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 156  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.231 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 156  |
| 4.232 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 156  |
| 4.233 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 157  |
| 4.234 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 157  |
| 4.235 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 157  |
| 4.236 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 158  |
| 4.237 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 158  |
| 4.238 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 158  |
| 4.239 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ .....  | 159  |
| 4.240 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ..... | 159  |
| 4.241 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = -\frac{\pi}{3}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 159  |
| 4.242 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=1 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....   | 160  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.243 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=2 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....   | 160  |
| 4.244 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=3 \text{ Hz}$ , $f_s = 500 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....   | 160  |
| 4.245 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=4 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....  | 161  |
| 4.246 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=5 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....  | 161  |
| 4.247 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=6 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....  | 161  |
| 4.248 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=7 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....  | 162  |
| 4.249 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=8 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....  | 162  |
| 4.250 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....  | 162  |
| 4.251 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=10 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 163  |
| 4.252 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 163  |
| 4.253 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 163  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.254 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 164  |
| 4.255 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 164  |
| 4.256 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 164  |
| 4.257 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 165  |
| 4.258 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 165  |
| 4.259 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 165  |
| 4.260 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 166  |
| 4.261 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 166  |
| 4.262 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 166  |
| 4.263 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ .....  | 167  |
| 4.264 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ..... | 167  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.265 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = -\frac{\pi}{2}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....   | 167  |
| 4.266 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1 \text{ Hz}, f_s = 500 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....   | 168  |
| 4.267 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 2 \text{ Hz}, f_s = 500 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....   | 168  |
| 4.268 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3 \text{ Hz}, f_s = 500 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....   | 168  |
| 4.269 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 4 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....  | 169  |
| 4.270 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....  | 169  |
| 4.271 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 6 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....  | 169  |
| 4.272 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 7 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....  | 170  |
| 4.273 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 8 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....  | 170  |
| 4.274 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 9 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....  | 170  |
| 4.275 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 10 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 171  |
| 4.276 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 12 \text{ Hz}, f_s = 5000 \text{ Hz}, \phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 171  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.277 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 171  |
| 4.278 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 172  |
| 4.279 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 172  |
| 4.280 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 172  |
| 4.281 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 173  |
| 4.282 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=30 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 173  |
| 4.283 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 173  |
| 4.284 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 174  |
| 4.285 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=45 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 174  |
| 4.286 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50 \text{ Hz}$ , $f_s = 5000 \text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ..... | 174  |
| 4.287 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80 \text{ Hz}$ , $f_s = 16 \text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....  | 175  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.288 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100\text{ Hz}$ , $f_s = 16\text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ .....   | 175  |
| 4.289 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = -\frac{2\pi}{3}$ ณ. ความถี่ใดๆ.....   | 175  |
| 4.290 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 1\text{ Hz}$ , $f_s = 500\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....   | 176  |
| 4.291 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=2\text{ Hz}$ , $f_s = 500\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....     | 176  |
| 4.292 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 3\text{ Hz}$ , $f_s = 500\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....   | 176  |
| 4.293 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=4\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....    | 177  |
| 4.294 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 5\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....  | 177  |
| 4.295 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=6\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....    | 177  |
| 4.296 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 7\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....  | 178  |
| 4.297 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=8\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....    | 178  |
| 4.298 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=9\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ .....    | 178  |
| 4.299 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f = 10\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 179  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.300 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=12\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 179  |
| 4.301 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=14\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 179  |
| 4.302 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=16\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 180  |
| 4.303 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=18\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 180  |
| 4.304 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=20\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 180  |
| 4.305 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=25\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 181  |
| 4.306 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=30\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 181  |
| 4.307 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=35\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 181  |
| 4.308 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=40\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 182  |
| 4.309 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=45\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 182  |
| 4.310 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=50\text{ Hz}$ , $f_s = 5000\text{ Hz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 182  |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.311 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=80\text{ Hz}$ , $f_s = 16\text{ kHz}$ , .....                           | 183  |
| 4.312 ผลการจำลองและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล<br>ที่ความถี่ $f=100\text{ Hz}$ , $f_s = 16\text{ kHz}$ , $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ..... | 183  |
| 4.313 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส $\phi = -\frac{3\pi}{4}$ ณ. ความถี่ใดๆ .....  | 183  |
| 4.314 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัญญาณไซน์ที่ต้องการเลื่อน<br>กับค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวม .....  | 184  |
| 4.315 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม .....   | 184  |
| ก.1 ฮาร์ดแวร์ของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit .....  | 188  |
| ก.2 บล็อกไดอะแกรมของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit .....  | 189  |
| ก.3 การจัดแบ่งหน่วยความจำในโหมด Microcomputer/Boot Loader<br>ของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit.....   | 190  |
| ก.4 ฟังก์ชันไดอะแกรมของชิป TLC32040 .....  | 191  |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แสดงผลของการแปลงแซด .....   | 37   |
| 2.2 สัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซด .....  | 54   |
| 3.1 ขนาดของฮาร์มอนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณซายน์ที่ความถี่ $f=1\text{Hz}, f_s = 500\text{Hz}$ .....   | 72   |
| 3.2 ขนาดของฮาร์มอนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณซายน์ที่ความถี่ $f=3\text{Hz}, f_s = 500\text{Hz}$ .....   | 73   |
| 3.3 ขนาดของฮาร์มอนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณซายน์ที่ความถี่ $f=12\text{Hz}, f_s = 5\text{kHz}$ .....   | 74   |
| 3.4 ขนาดของฮาร์มอนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณซายน์ที่ความถี่ $f=45\text{Hz}, f_s = 5\text{kHz}$ .....   | 75   |
| 3.5 ขนาดของฮาร์มอนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณซายน์ที่ความถี่ $f=80\text{Hz}, f_s = 16\text{kHz}$ .....  | 76   |
| 3.6 ขนาดของฮาร์มอนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณซายน์ที่ความถี่ $f=100\text{Hz}, f_s = 16\text{kHz}$ ..... | 77   |
| ก.1 แสดงค่ารีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่า.....  | 196  |

# บทที่ 1

## ตัวกำเนิดสัญญาณไซน์

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สัญญาณไซน์แบบดิจิทัลเกิดจากผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของระบบแบบไม่ต่อเนื่องที่มีโพล 1 คู่วางบนเส้นรอบวงของวงกลมรีสมิหนึ่งหน่วยในลักษณะ Complex conjugate ซึ่งโครงสร้างของระบบแบบไม่ต่อเนื่องที่มีผลตอบสนองทางอิมพัลส์เป็นสัญญาณไซน์มี 2 ลักษณะ [1, 2, 3, 4] ด้วยกันคือ 1. โครงสร้างแบบตรง (Direct form) เป็นโครงสร้างที่มีเอาต์พุตเดียวโดยมีผลตอบสนองทางอิมพัลส์เป็น  $\sin(\omega_0 n)$  หรือ  $\cos(\omega_0 n)$  2. โครงสร้างแบบ Coupled-form เป็นโครงสร้างที่มีสองเอาต์พุต และจะมีผลตอบสนองทางอิมพัลส์เป็น  $\sin(\omega_0 n)$  และ  $\cos(\omega_0 n)$  ซึ่งเมื่อพิจารณาผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของระบบแบบไม่ต่อเนื่องทั้งสองโครงสร้างจะเห็นได้ว่าไม่สามารถสร้างสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟสตามต้องการได้ โดยโครงสร้างแบบตรงเป็นระบบที่มีเพียงเอาต์พุตเดียวจึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบการเลื่อนเฟสได้ ส่วนโครงสร้างแบบ Coupled-form เป็นระบบที่มีสองเอาต์พุต แต่จากคุณสมบัติของการจัดโครงสร้างทำให้เอาต์พุตทั้งสองของระบบมีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  โดยเอาต์พุตหนึ่งมีลักษณะสัญญาณเป็น  $\sin(\omega_0 n)$  ส่วนอีกเอาต์พุตหนึ่งจะมีลักษณะสัญญาณเป็น  $\cos(\omega_0 n)$

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังการศึกษาการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัลที่สามารถกำหนดการเลื่อนเฟสได้ทุกตำแหน่งตามที่ต้องการ และศึกษาการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของผลการทดลอง เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับสัญญาณไซน์แบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนเฟสที่สร้างด้วยหลักการเปิดตาราง (Look up Table: LUT)

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานบางอย่างมีความจำเป็นในการใช้ตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่สามารถกำหนดการเลื่อนเฟสได้ทุกตำแหน่งตามที่ต้องการ เช่น งานทางด้านการควบคุมอุปกรณ์ Power electronics (Motor, Heater) และ โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานทางด้านการวัด Impedance [5, 6, 7] เป็นต้น ซึ่งการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ตามหลักการ LUT [8] ไม่สามารถทำการเลื่อนเฟสของสัญญาณตามที่ต้องการได้ เนื่องจากข้อมูลมีลักษณะเป็นแบบขั้น (Step)

ดังนั้นจึงนำเสนอหลักการในการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น ด้วยวิธีการออกแบบโครงสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัลที่สามารถกำหนดการเลื่อนเฟสของสัญญาณได้ โดยการออกแบบจะใช้ระบบแบบไม่ต่อเนื่องที่มีผลตอบสนองทางอิมพัลส์เป็น  $\cos(\omega_0 n)$  ต่อลำดับ (Cascade) กับระบบแบบไม่ต่อเนื่องอีกระบบหนึ่งเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งซีโรที่อยู่บนแกนเวลาจริง ซึ่งการทำลักษณะนี้จะทำให้ผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของระบบแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะสัญญาณเป็น  $\cos(\omega_0 n + \phi)$

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการออกแบบตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัลใช้คุณสมบัติของการวางโพลและซีโรบนระนาบแซด (z-plane) มาสร้างเป็นระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา ซึ่งผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาก็คือสัญญาณซายน์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณซายน์ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการวางซีโรของระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลานั้นเอง

#### 1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

การสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัลด้วยวิธีเปิดตารางไม่สามารถกำหนดการเลื่อนเฟสของสัญญาณให้เป็นไปตามต้องการได้ เนื่องจากการเก็บข้อมูลสัญญาณซายน์มีลักษณะเป็นแบบขั้น (Step) ส่วนหลักการที่นำเสนอสามารถกำเนิดสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟสได้ทุกจุดในช่วง  $0$  ถึง  $2\pi$

#### 1.6 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการออกแบบและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัลที่สามารถปรับการเลื่อนเฟสได้ รวมถึงการคำนวณหาค่าความผิดพลาด (Phase Error Estimation) การคำนวณหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวม (Mean Square Error: MSE) [9] ของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส อีกทั้งทำการคำนวณหาค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณซายน์ (Total Harmonic Distortion: THD) [10] ซึ่งการจำลองการออกแบบตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัลที่สามารถเลื่อนเฟสได้นั้นทำได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB และทำการสร้างสัญญาณจริงด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 [11]

## 1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งจะประกอบด้วยทฤษฎีการประมวลผล สัญญาณเชิงเลข การวิเคราะห์ระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา และการแปลงแซด

บทที่ 3 กล่าวถึงการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบพื้นฐาน การออกแบบและการสร้าง ตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัลที่สามารถปรับการเลื่อนเฟสได้ตามหลักการที่นำเสนอ การคำนวณหาค่าความผิดพลาด การคำนวณหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวมของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟสและการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์

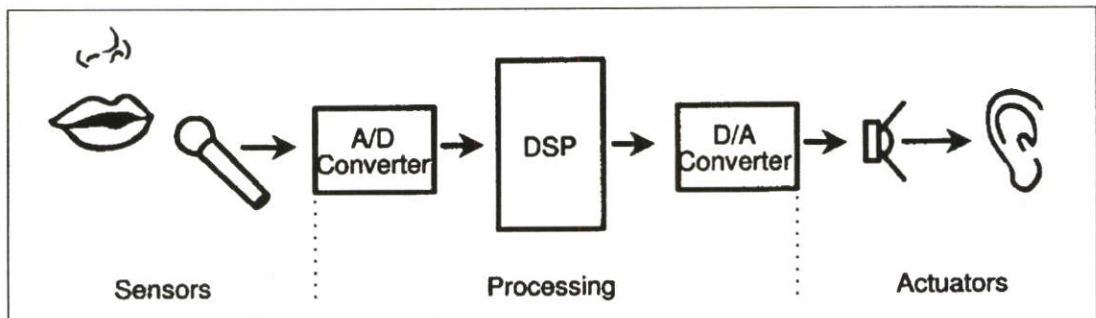
บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบและสร้างสัญญาณจริง รวมถึงกราฟ แสดงค่าความผิดพลาด ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวมของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส และ ความผิดพลาดฮาร์มอนิกสร่วม

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณเชิงเลข

ระบบประมวลผลสัญญาณเชิงเลขประกอบด้วยตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter A/D) ตัวประมวลผล (Processor) ตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (Digital to Analog Converter D/A) ระบบประมวลผลสัญญาณเชิงเลขมีแผนผังแสดงดังรูปที่ 2.1

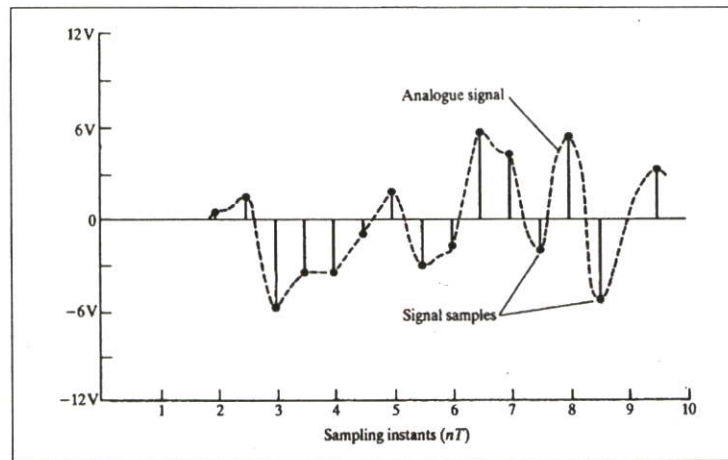


รูปที่ 2.1 แผนผังของระบบประมวลผลสัญญาณเชิงเลข

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าสัญญาณอนาลอกจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วย A/D สัญญาณดิจิทัลจะถูกคำนวณโดยตัวประมวลผล และผลที่ได้จากการประมวลผลจะถูกส่ง D/A เพื่อแปลงกลับให้เป็นสัญญาณอนาลอกต่อไป

#### 2.1 สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา [1, 2]

สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 โดยจะเห็นว่าสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องก็คือสัญญาณค่าหนึ่ง ณ เวลาหนึ่งบนสัญญาณที่ต่อเนื่องแต่จะมีระยะเวลาห่างที่เท่ากันในแต่ละจุด เรียกระยะเวลาห่างที่เท่ากันนี้ว่า Sampling time, Sampling rate หรือ Sampling periods สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถเรียกเป็นลำดับสัญญาณ (Sequence signal) ก็ได้ และสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ได้หลายรูปแบบดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 สัญญาณต่อเนื่องและสัญญาณไม่ต่อเนื่อง

- เขียนในรูปของฟังก์ชัน (Functional representation)

$$x(n) = \begin{cases} 1, & n = 1, 3 \\ 4, & n = 2, 4 \\ 0, & n > 4 \end{cases} \quad (2.1)$$

- เขียนในรูปการแจกแจง (Tabular representation)

|        |     |    |    |   |   |   |   |   |     |
|--------|-----|----|----|---|---|---|---|---|-----|
| $n$    | ... | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | ... |
| $x(n)$ | ... | 0  | 0  | 0 | 1 | 4 | 1 | 0 |     |

- เขียนในรูปลำดับ (Sequence representation)

$$x(n) = \{\dots, 0, 0, 1, \underset{\uparrow}{4}, 1, 0, 0, \dots\} \quad (2.2)$$

$$x(n) = \{0, 1, \underset{\uparrow}{4}, 1, 0, 0, \dots\} \quad (2.3)$$

$$x(n) = \{3, -1, -2, \underset{\uparrow}{5}, 0, 4, -1\} \quad (2.4)$$

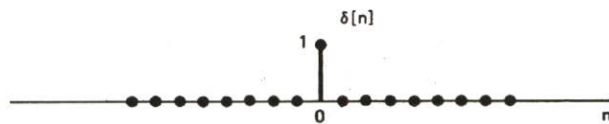
$$x(n) = \{0, \underset{\uparrow}{1}, 4, 1, \dots\} \quad (2.5)$$

สมการที่ 2.2 และ 2.3 เป็นลำดับแบบไม่มีจุดจบ (Infinite-duration signal or sequence) ส่วนสมการที่ 2.4 และ 2.5 เป็นลำดับแบบมีจุดจบ (Finite-duration signal or sequence)

### 2.1.1 Unit sample sequence

มีนิยามดังสมการที่ 2.6 และมีรูปสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.3

$$\delta(n) = \begin{cases} 0, n \neq 0 \\ 1, n = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

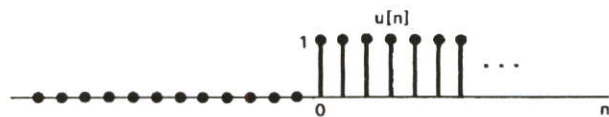


รูปที่ 2.3 Unit sample sequence

### 2.1.2 Unit step sequence

มีนิยามดังสมการที่ 2.7 และมีรูปสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.4

$$u(n) = \begin{cases} 0, n < 0 \\ 1, n \geq 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

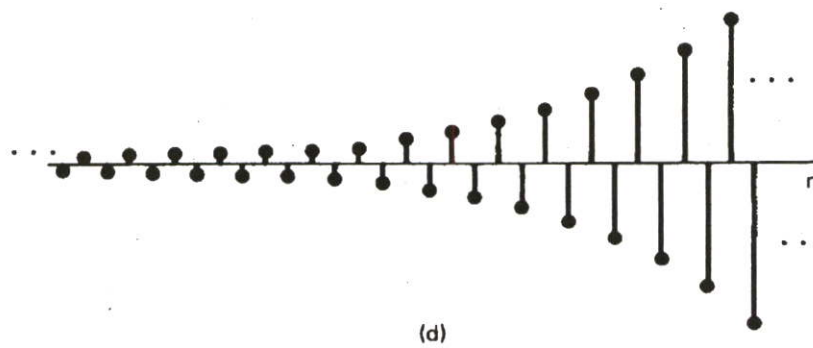
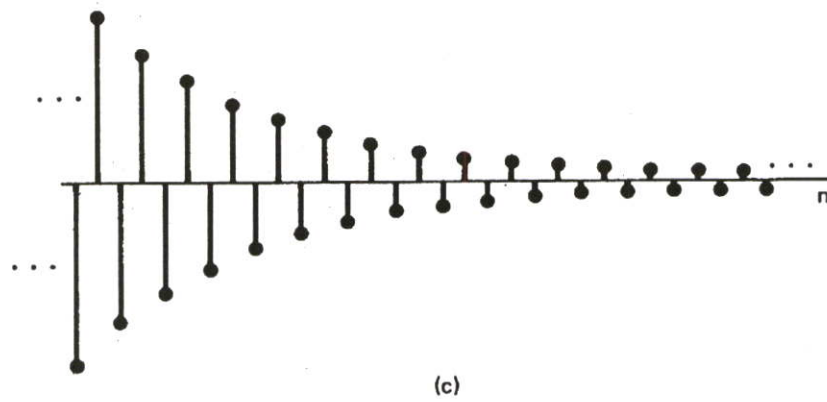
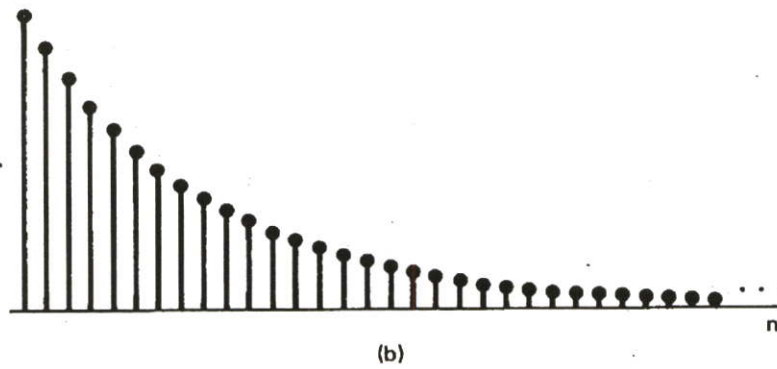
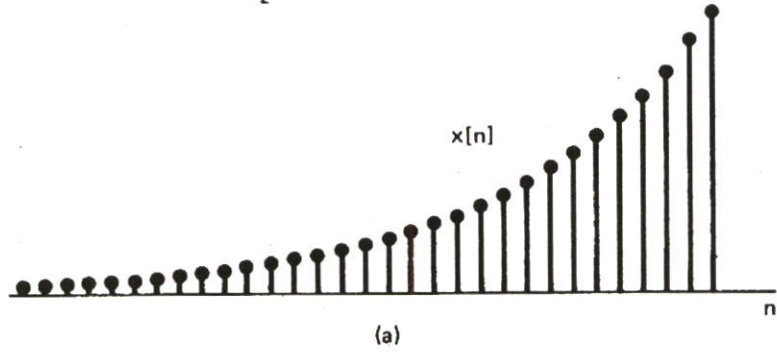


รูปที่ 2.4 Unit step sequence

### 2.1.3 Exponential sequences

มีนิยามดังสมการที่ 2.8 และมีรูปสัญลักษณ์ดังรูปที่ 2.5

$$x(n) = \alpha^n \quad (2.8)$$



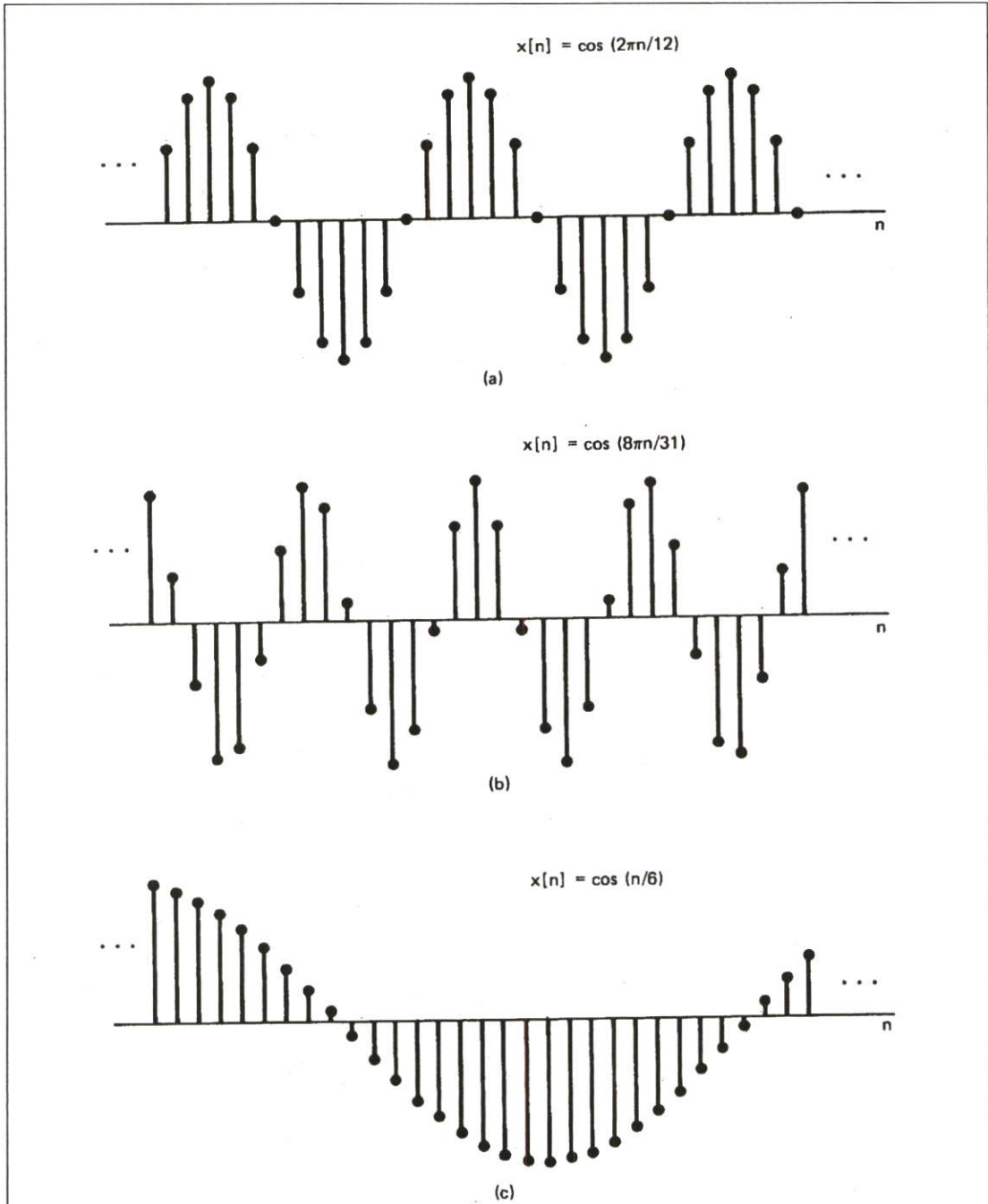
รูปที่ 2.5 Exponential sequences  $x(n) = A\alpha^n$

(a)  $\alpha > 1$ ; (b)  $0 < \alpha < 1$ ; (c)  $-1 < \alpha < 0$ ; (d)  $\alpha < -1$

### 2.1.4 Sinusoidal sequences

มีนิยามดังสมการที่ 2.9 และมีรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.6

$$x(n) = A \cos(\omega_0 n + \phi) \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.6 Sinusoidal sequences

## 2.2 ลักษณะเฉพาะของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา [1, 2]

### 2.2.1 Energy signal และ Power signals

Energy ของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง  $x(n)$  สามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \quad (2.10)$$

และ Power ของสัญญาณไม่ต่อเนื่อง  $x(n)$  สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.5 กำหนดให้  $n$  อยู่ในช่วง  $-N$  ถึง  $N$  ดังสมการที่ 2.12

$$E_N = \sum_{n=-N}^N |x(n)|^2 \quad (2.12)$$

แทนค่า  $E$  ลงในสมการที่ 2.12 และสมการที่ 2.6 จะได้ Power ดังสมการที่ 2.13

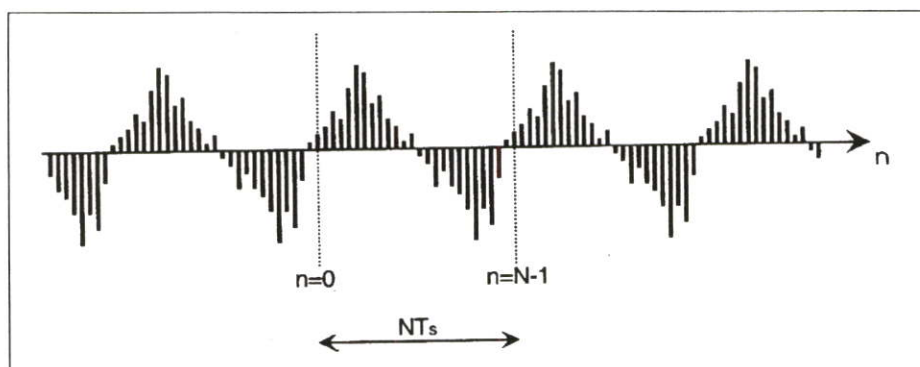
$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} E_N \quad (2.13)$$

### 2.2.2 Periodic signals และ Aperiodic signals

Periodic signals sequence เป็นสัญญาณที่มีคาบซ้ำมีนิยามดังสมการที่ 2.14 และแสดงสัญญาณไคดังรูปที่ 2.7

$$x(n+N) = x(n) \quad (2.14)$$

เมื่อ  $N$  คือ Fundamental period และลำดับที่ไม่เป็นดังสมการที่ 2.14 จะเป็นลำดับแบบ Aperiodic

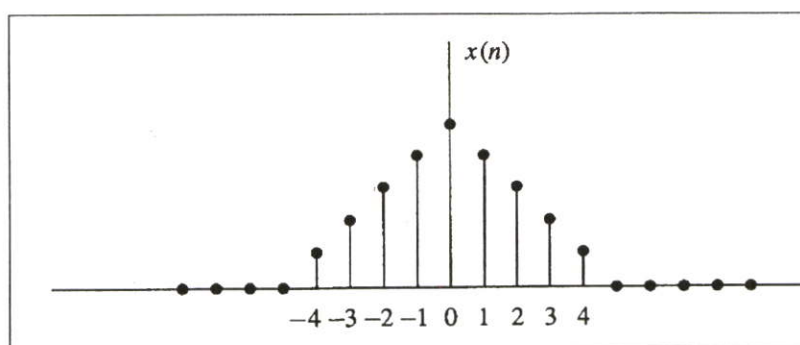


รูปที่ 2.7 Periodic signals sequence

### 2.2.3 Symmetric (even) และ Asymmetric (odd) signals

ลำดับสัญญาณที่สมมาตรกัน(Symmetric) มีนิยามดังสมการที่ 2.15 มีรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.8

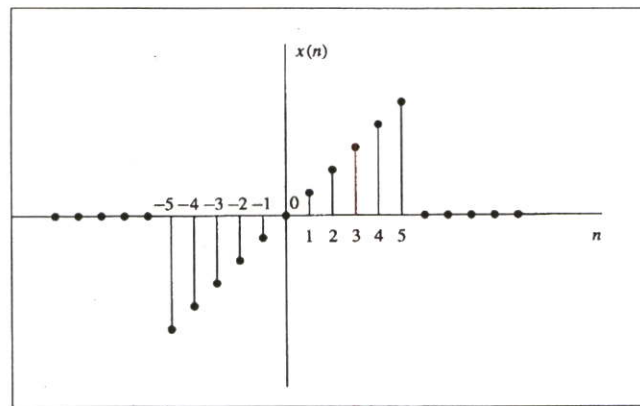
$$x(-n) = x(n) \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.8 Symmetric (even) sequence

ลำดับสัญญาณที่ไม่สมมาตรกัน(Asymmetric) มีนิยามดังสมการที่ 2.16 มีรูปสัญญาณดังรูปที่ 2.9

$$x(-n) = -x(n) \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.9 Asymmetric (odd) sequence

## 2.3 การกระทำของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา [1, 2]

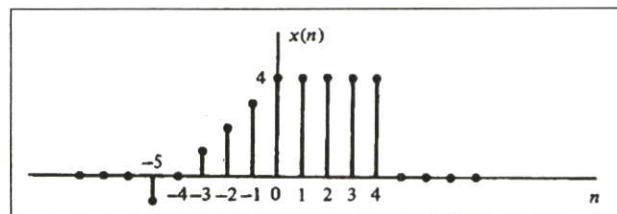
### 2.3.1 การเลื่อนสัญญาณ

อาจเรียกว่าการหน่วงสัญญาณก็ได้เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.17

$$y(n] = x(n - k) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $k$  เป็นจำนวนเต็ม (Integer)

เช่นกรณีที่ 2.1 กำหนดให้สัญญาณ  $x(n]$  แสดงดังในรูปที่ 2.10 หา (a)  $x(n-3]$  และ (b)  $x(n+2]$

รูปที่ 2.10 สัญญาณ  $x(n]$  ของกรณีที่ 2.1

วิธีการของกรณี (a)  $x(n-3]$  กำหนดให้  $y(n] = x(n-3]$

กรณี  $n = -6$

$$y(-6) = x(-6-3) = x(-9) = 0$$

กรณี  $n = -5$

$$y(-5) = x(-5-3) = x(-8) = 0$$

กรณี  $n = -4$

$$y(-4) = x(-4-3) = x(-7) = 0$$

กรณี  $n = -3$

$$y(-3) = x(-3-3) = x(-6) = 0$$

กรณี  $n = -2$

$$y(-2) = x(-2-3) = x(-5) = -1$$

กรณี  $n = -1$

$$y(-1) = x(-1-3) = x(-4) = 0$$

กรณี  $n = 0$

$$y(0) = x(0-3) = x(-3) = 1$$

กรณี  $n = 1$

$$y(1) = x(1-3) = x(-2) = 2$$

กรณี  $n = 2$

$$y(2) = x(2-3) = x(-1) = 3$$

กรณี  $n = 3$

$$y(3) = x(3-3) = x(0) = 4$$

กรณี  $n = 4$

$$y(4) = x(4-3) = x(1) = 4$$

กรณี  $n = 5$

$$y(5) = x(5-3) = x(2) = 4$$

กรณี  $n = 6$

$$y(6) = x(6-3) = x(3) = 4$$

กรณี  $n = 7$

$$y(7) = x(7-3) = x(4) = 4$$

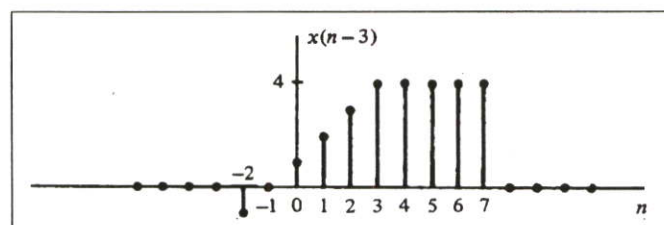
กรณี  $n = 8$

$$y(8) = x(8-3) = x(5) = 0$$

กรณี  $n = 9$

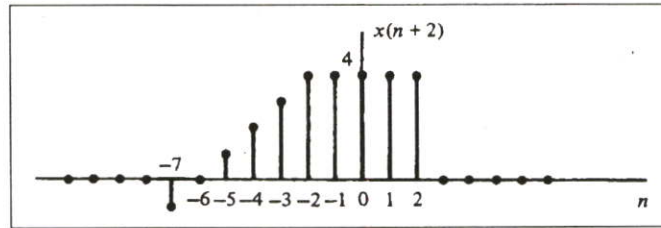
$$y(9) = x(9-3) = x(6) = 0$$

นำค่า  $y(n) = x(n-3)$  ไปเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟสัญญาณ  $x(n-3)$

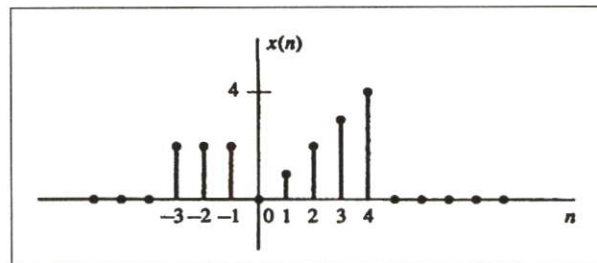
วิธีการกรณี (b)  $x(n+2)$  กำหนดให้  $y(n) = x(n+2)$  ในการหาค่าสามารถทำได้เช่นเดียวกับข้อ (a) และเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.12



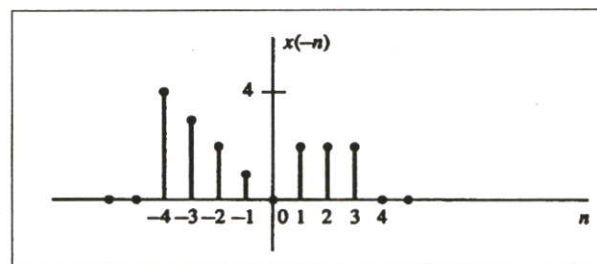
รูปที่ 2.12 กราฟสัญญาณ  $x(n+2)$

เช่นกรณีที่ 2.2 กำหนดให้สัญญาณ  $x(n)$  แสดงดังในรูปที่ 2.13 หา (a)  $x(-n)$  และ (b)  $x(-n+2)$

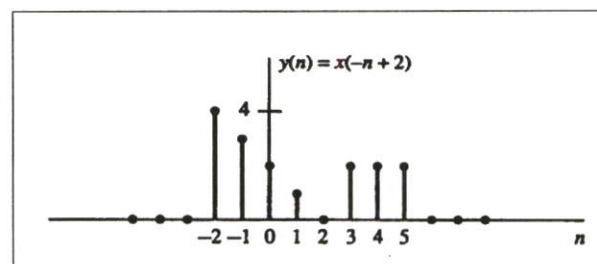
วิธีการ ทั้งข้อ (a) และ (b) มีวิธีการทำเหมือนกับกรณีที่ 2.1 และมีกราฟแสดงดังรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 กราฟสัญญาณ  $x(n)$



รูปที่ 2.14 กราฟสัญญาณ  $x(-n)$



รูปที่ 2.15 กราฟสัญญาณ  $x(-n+2)$

### 2.3.2 การบวก การคูณและการสเกลสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง (Adding, Multiplication, and Scaling of Discrete Time Signal)

- การบวกสัญญาณ 2 สัญญาณ หรือ  $k$  สัญญาณเข้าด้วยกัน แสดงได้ดังสมการที่ 2.18 และสมการที่ 2.19

$$y(n) = x_1(n) + x_2(n) \quad -\infty < n < \infty \quad (2.18)$$

$$y(n) = x_1(n) + x_2(n) + \dots + x_k(n) \quad -\infty < n < \infty \quad (2.19)$$

- การคูณสัญญาณ 2 สัญญาณ หรือ  $k$  สัญญาณเข้าด้วยกัน แสดงได้ดังสมการที่ 2.20 และสมการที่ 2.21

$$y(n) = x_1(n)x_2(n) \quad -\infty < n < \infty \quad (2.20)$$

$$y(n) = x_1(n)x_2(n)\dots x_k(n) \quad -\infty < n < \infty \quad (2.21)$$

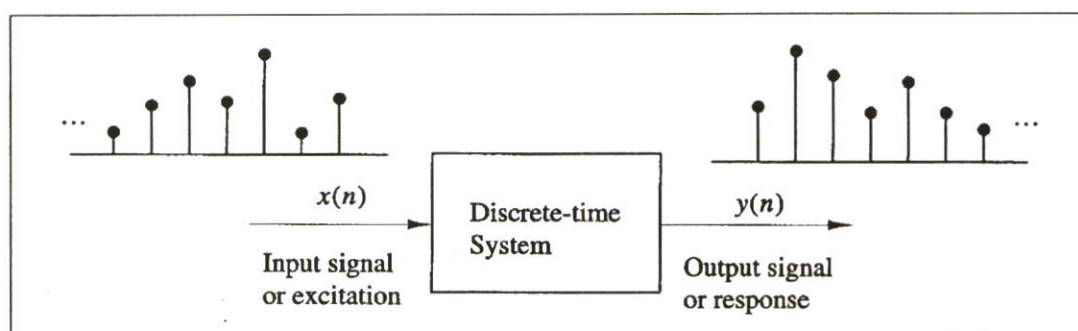
- การสเกลสัญญาณเป็นการปรับขนาดสัญญาณ กระทำได้โดยการคูณสัญญาณเข้ากับค่าคงที่ดังสมการที่ 2.22

$$y(n) = Ax(n) \quad -\infty < n < \infty \quad (2.22)$$

เมื่อ  $A$  เป็นค่าคงที่

## 2.4 ระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา [1, 2]

ระบบแบบไม่ต่อเนื่องมีไดอะแกรมดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ไดอะแกรมของระบบแบบไม่ต่อเนื่อง

เมื่อ  $x(n)$  เป็นสัญญาณอินพุตหรือ Excitation ของระบบแบบไม่ต่อเนื่อง  
 $y(n)$  เป็นสัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนองของระบบแบบไม่ต่อเนื่อง  
 จากรูปที่ 2.15 สามารถนิยามความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 2.23

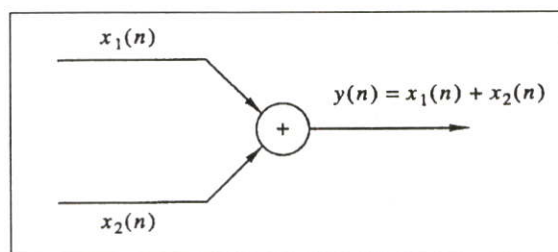
$$y(n) \equiv \tau[x(n)] \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\tau$  เป็นตัวกระทำ (Operator)

#### 2.4.1 ไคอะแกรมที่ใช้แสดงในระบบไม่ต่อเนื่อง (Block Diagram Representation of Discrete-Time Systems)

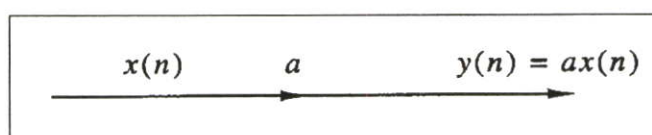
ในระบบแบบไม่ต่อเนื่องสามารถแทนได้ด้วยไคอะแกรมดังต่อไปนี้

- ตัวบวก (Adder) ใช้สำหรับบวกสัญญาณเข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.17



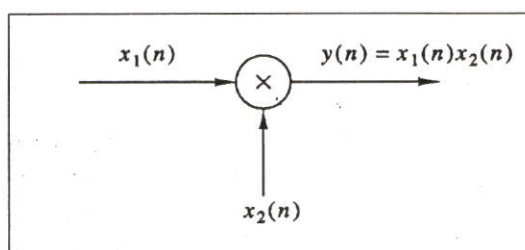
รูปที่ 2.17 ไคอะแกรมการบวกในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง

- ตัวคูณคงที่ (Constant multiplier) ใช้คูณค่าคงที่กับสัญญาณดังรูปที่ 2.18



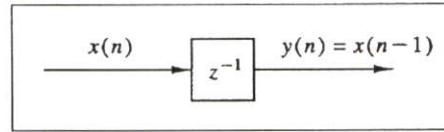
รูปที่ 2.18 ไคอะแกรมตัวคูณคงที่ในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง

- ตัวคูณสัญญาณ (Signal multiplier) ใช้สำหรับคูณสัญญาณเข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.19



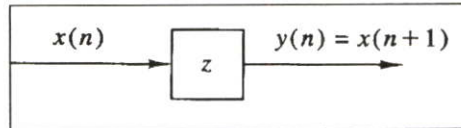
รูปที่ 2.19 ไคอะแกรมตัวคูณสัญญาณในระบบแบบไม่ต่อเนื่อง

- ตัวหน่วง (Delay element) ใช้สำหรับหน่วงสัญญาณดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ไคอะแกรมตัวหน่วงในระบบไม่ต่อเนื่อง

- ตัวล้ำหน้า (Advance element) ใช้สำหรับกำหนดค่าล่วงหน้าให้กับระบบดังรูปที่ 2.21

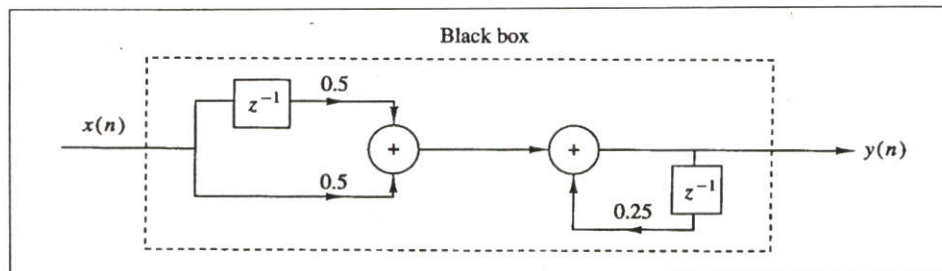


รูปที่ 2.21 ไคอะแกรมตัวล้ำหน้าในระบบไม่ต่อเนื่อง

เช่นกรณีที่ 2.3 ระบบแบบไม่ต่อเนื่องมีสมการเอาต์พุต ดังสมการที่ 2.24 จงเขียนไคอะแกรม

$$y(n] = \frac{1}{4} y[n-1] + \frac{1}{2} x[n] + \frac{1}{2} x[n-1] \quad (2.24)$$

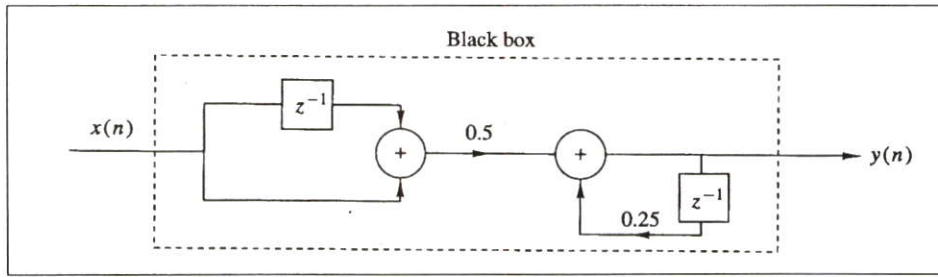
วิธีการ จากสมการที่ 2.24 สามารถนำมาเขียนไคอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ไคอะแกรมของระบบไม่ต่อเนื่องตามสมการที่ 2.24

และถ้านำสมการที่ 2.24 มาจัดใหม่ดังสมการที่ 2.25 สามารถเขียนไคอะแกรมได้ใหม่ดังรูปที่ 2.23

$$y[n] = \frac{1}{4} y[n-1] + \frac{1}{2} [x[n] + x[n-1]] \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.23 ไคอะแกรมของระบบไม่ต่อเนื่องตามสมการที่ 2.25

### 2.4.2 ชนิดของระบบแบบไม่ต่อเนื่อง

#### 2.4.2.1 ระบบแบบ Static

เป็นระบบที่ไม่มีหน่วยความจำ ซึ่งสมการของระบบแสดงได้ดังสมการที่ 2.26 และสมการที่ 2.27

$$y(n) = ax(n) \tag{2.26}$$

$$y(n) = nx(n) + bx^3(n) \tag{2.27}$$

#### 2.4.2.2 ระบบแบบ Dynamic

เป็นระบบที่มีหน่วยความจำซึ่งหมายถึงเป็นระบบที่สามารถบันทึกค่าอินพุตหรือเอาต์พุต ที่เวลาผ่านไป แล้ว สมการของระบบดังสมการที่ 2.28 – 2.30

$$y(n) = x(n) + 3x(n-1) \tag{2.28}$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^n x(n-k) \tag{2.29}$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{\infty} x(n-k) \tag{2.30}$$

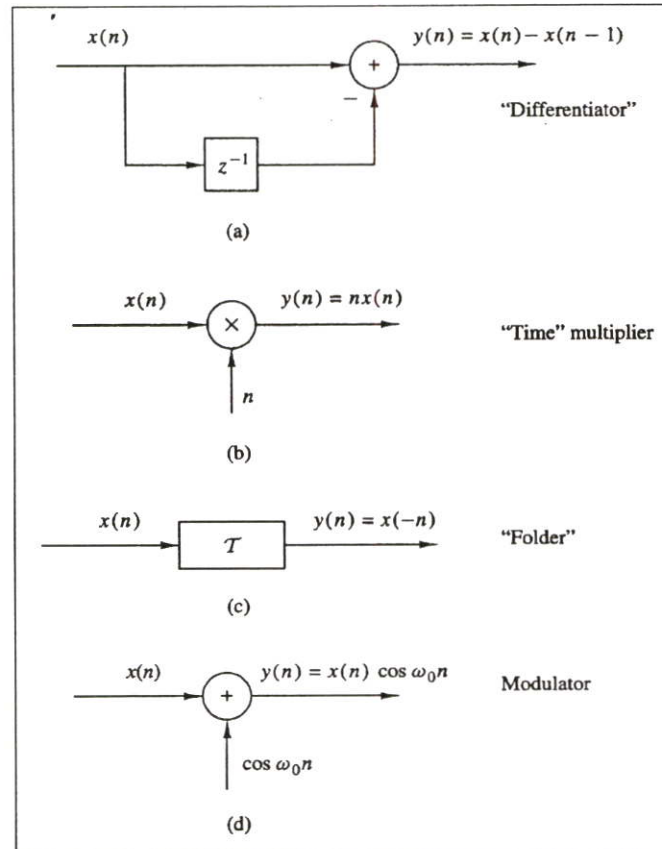
#### 2.4.2.3 ระบบแบบแปรตามเวลา (Time-invariant system)

กำหนดให้  $\tau$  เป็นระบบไม่ต่อเนื่อง  $x(n)$  เป็นอินพุตของระบบ  $y(n)$  เป็นเอาต์พุตของระบบ ดังสมการที่ 2.31 ถ้ามีการหน่วงอินพุตเป็น  $x(n-k)$  ถ้าเอาต์พุตที่ได้ถูกหน่วงไปเป็น  $y(n-k)$  เช่นเดียวกับอินพุตดังสมการที่ 2.32 สามารถสรุปได้ว่าระบบไม่ต่อเนื่อง  $\tau$  เป็นระบบไม่ต่อเนื่องที่แปรตามเวลา

$$x(n) \xrightarrow{\tau} y(n) \tag{2.31}$$

$$x(n-k) \xrightarrow{\tau} y(n-k) \tag{2.32}$$

และระบบที่อินพุตถูกหน่วงไป  $x(n-k)$  แต่ได้เอาต์พุตของระบบไม่เท่ากับ  $y(n-k)$  ระบบนั้นเป็นระบบที่ไม่แปรตามเวลา (Time-variant system หรือ Time-varying system) รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างระบบไม่ต่อเนื่องที่แปรตามเวลาและไม่แปรตามเวลา



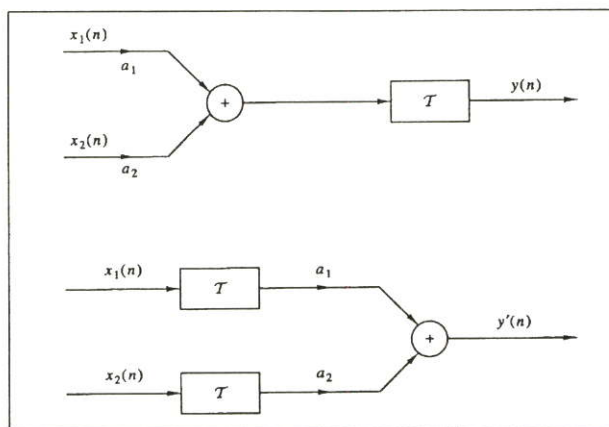
รูปที่ 2.24 ตัวอย่างระบบไม่ต่อเนื่องที่แปรตามเวลาและไม่แปรตามเวลา

(a) ระบบแปรตามเวลา (b) - (d) ระบบที่ไม่แปรตามเวลา

#### 2.4.2.4 ระบบแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (Linear and nonlinear systems)

ระบบไม่ต่อเนื่องแบบเชิงเส้นจะต้องมีคุณสมบัติสอดคล้องกับหลักการของ Superposition ดังสมการที่ 2.33 หรืออธิบายได้ดังรูปที่ 2.25

$$\tau[a_1x_1(n) + a_2x_2(n)] = a_1\tau[x_1(n)] + a_2\tau[x_2(n)] \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.25 ระบบ  $\tau$  เป็นระบบที่เชิงเส้นและระบบที่ไม่มีคุณสมบัติสอดคล้องกับหลักการของ Superposition จะเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้น

#### 2.4.2.5 ระบบแบบ Causal และแบบ Noncausal

ระบบแบบ Causal เป็นระบบที่สร้างได้จริงมีสมการของระบบดังสมการที่ 2.34

$$y(n) = F[x(n), x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-k), \dots, y(n-1), y(n-2), \dots, y(n-k)]$$

$$y(n) = 2x(n) + 4.5x(n-2) - 3y(n-1) + 0.5y(n-2) \quad (2.34)$$

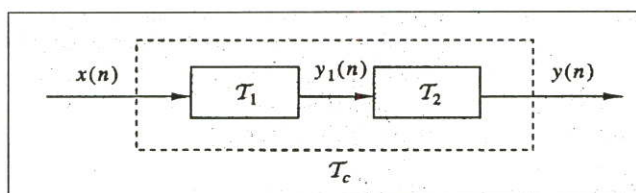
จะเห็นว่าระบบแบบ Causal จะประกอบด้วยเทอมอินพุตปัจจุบัน อินพุตในอดีตหรือเอาต์พุตในอดีตเท่านั้น ระบบที่ไม่เป็นดังสมการที่ 2.34 จะเป็นระบบแบบ Noncausal

#### 2.4.2.6 ระบบแบบ Stable และระบบแบบ Unstable

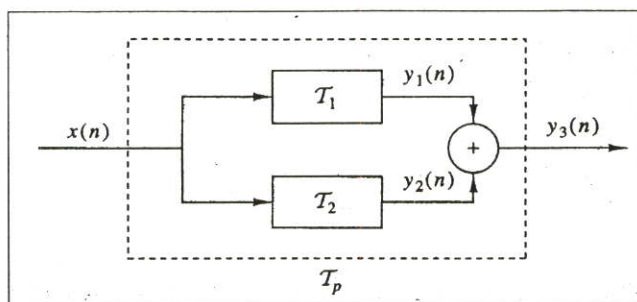
ระบบที่มีเอาต์พุตขึ้นอยู่กับอินพุตจะเป็นระบบแบบ Stable ส่วนระบบที่มีเอาต์พุตไม่ขึ้นอยู่กับอินพุตจะเป็นระบบแบบ Unstable

### 2.4.3 การเชื่อมต่อระบบไม่ต่อเนื่อง (Interconnection of Discrete-time Systems)

กระทำได้ 2 ลักษณะคือ การเชื่อมต่อระบบแบบอนุกรม (Cascade) ดังรูปที่ 2.26 และการเชื่อมต่อแบบขนาน (Parallel) ดังแสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 การเชื่อมต่อระบบไม่ต่อเนื่องแบบอนุกรม



รูปที่ 2.27 การเชื่อมต่อระบบไม่ต่อเนื่องแบบขนาน

ในการเชื่อมต่อระบบดังรูปที่ 2.26 เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.35 – 2.36

$$y_1(n) = \tau_1[x(n)] \quad (2.35)$$

$$y(n) = \tau_2[y_1(n)] \quad (2.36)$$

แทนสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.36 จะได้สมการ  $y(n)$  ดังสมการที่ 2.37

$$y(n) = \tau_2\{\tau_1[x(n)]\} \quad (2.37)$$

กำหนดให้  $\tau_c = \tau_1\tau_2$  จะได้  $y(n)$  ดังสมการที่ 2.38

$$y(n) = \tau_c[x(n)] \quad (2.38)$$

และถ้ามีการสลับที่ระบบ  $\tau_1$  กับ  $\tau_2$  ค่า  $y(n)$  จะเปลี่ยนแปลงไปดังนั้นจึงสรุปได้ว่า

$$\tau_1\tau_2 \neq \tau_2\tau_1 \quad (2.39)$$

นอกจากนี้ถ้าระบบ  $\tau_1$  และระบบ  $\tau_2$  เป็นระบบที่แปรตามเวลาก็จะได้  $\tau_1\tau_2$  หรือ  $\tau_c$  เป็นระบบที่แปรตามเวลาด้วยดังสมการที่ 2.40

$$x(n-k) \xrightarrow{\tau_1} y_1(n-k)$$

$$y_1(n-k) \xrightarrow{\tau_2} y(n-k)$$

$$x(n-k) \xrightarrow{\tau_c = \tau_2\tau_1} y(n-k) \quad (2.40)$$

ส่วนการเชื่อมต่อแบบระบบขนานเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.41

$$\begin{aligned}
 y_3(n) &= y_1(n) + y_2(n) \\
 &= \tau_1[x(n)] + \tau_2[x(n)] \\
 &= (\tau_1 + \tau_2)[x(n)] \\
 &= \tau_p[x(n)]
 \end{aligned} \tag{2.41}$$

เมื่อ  $\tau_p = \tau_1 + \tau_2$

## 2.5 การวิเคราะห์ระบบไม่ต่อเนื่องทางเวลาแบบเชิงเส้นและแปรตามเวลา [1, 2]

### 2.5.1 Convolution Sum

เป็นการผสมผสานระหว่างสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง  $x(n)$  กับผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของระบบไม่ต่อเนื่อง  $h(n)$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.42

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) \tag{2.42}$$

เมื่อ  $h(k)$  คือ ผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของระบบไม่ต่อเนื่อง  
 $x(n)$  คือ สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง

สำหรับระบบแบบ Causal การทำ Convolution จะทำตามสมการที่ 2.43

$$y(n) = \sum_{k=0}^n h(k)x(n-k) \tag{2.43}$$

นอกจากนี้สมการ Convolution สามารถเขียนได้อีกแบบหนึ่งดังสมการที่ 2.44

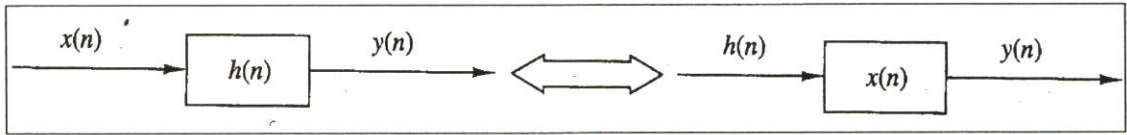
$$y(n) = h(n) * x(n) \tag{2.44}$$

คุณสมบัติของการ Convolution และการเชื่อมต่อระบบ

- คุณสมบัติการสลับที่ (Commutative law )

$$x(n) * h(n) = h(n) * x(n) \tag{2.45}$$

เขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 คุณสมบัติการสลับที่

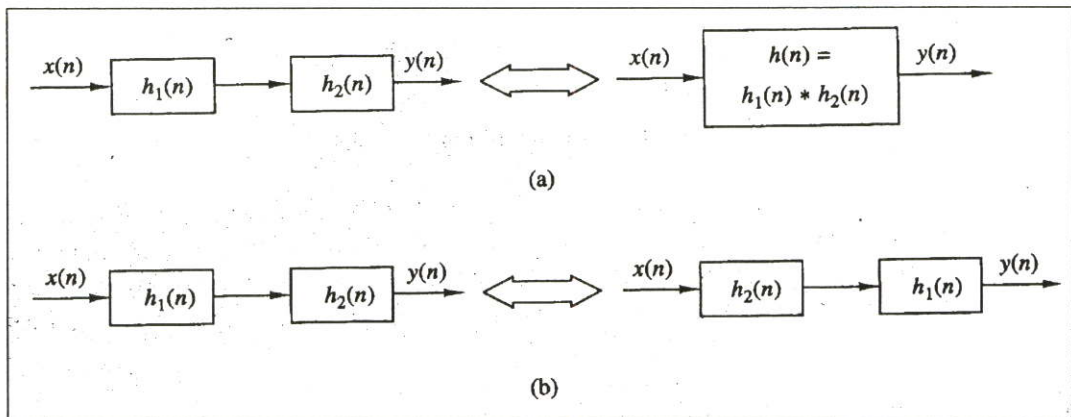
$$y(n) = x(n) * h(n) \quad (2.46)$$

$$y(n) = h(n) * x(n) \quad (2.47)$$

- คุณสมบัติการจัดกลุ่ม (Associative law)

$$[x(n) * h_1(n)] * h_2(n) = x(n) * [h_1(n) * h_2(n)] \quad (2.48)$$

เขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.29

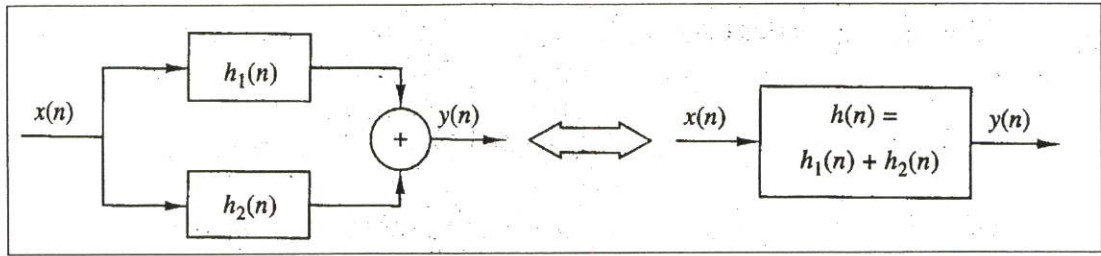


รูปที่ 2.29 คุณสมบัติการจัดกลุ่ม

- Distributive law

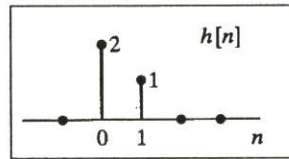
$$x(n) * [h_1(n) + h_2(n)] = x(n) * h_1(n) + x(n) * h_2(n) \quad (2.49)$$

จากสมการที่ 2.49 สามารถเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 คุณสมบัติการกระจาย

เช่นกรณีที่ 2.4 กำหนดให้ระบบแบบไม่ต่อเนื่องมีผลตอบสนองทางอิมพัลส์  $h(n)$  ดังรูปที่ 2.31 ถ้ากำหนดให้ระบบแบบไม่ต่อเนื่องนี้มีอินพุตเป็น  $x(n) = \{1, 2, 4\}$  หาผลตอบสนองทางเอาต์พุต



รูปที่ 2.31 ผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของระบบไม่ต่อเนื่อง

วิธีการ ในการหาผลตอบสนองทางเอาต์พุต จะใช้สมการที่ 2.43 เนื่องจาก ทั้ง  $h(n)$  และ  $x(n)$  ต่างมีค่า  $n$  เริ่มต้นที่ 0 จากสมการที่ 2.43

$$y(n) = \sum_{k=0}^n h(k)x(n-k)$$

กรณี  $n = 0$

$$y(0) = h(0)x(0) + h(1)x(-1) + h(2)x(-2) + h(3)x(-3) + \dots$$

$$y(0) = 2 + 0 + 0 + \dots = 2$$

กรณี  $n = 1$

$$y(1) = h(0)x(1) + h(1)x(0) + h(2)x(-1) + h(3)x(-2) + \dots$$

$$y(1) = 4 + 1 + 0 + 0 + \dots = 5$$

กรณี  $n = 2$

$$y(2) = h(0)x(2) + h(1)x(1) + h(2)x(0) + h(3)x(-1) + \dots$$

$$y(2) = 8 + 2 + 0 + 0 + \dots = 10$$

กรณี  $n = 3$

$$y(3) = h(0)x(3) + h(1)x(2) + h(2)x(1) + h(3)x(0) + \dots$$

$$y(3) = 0 + 4 + 0 + 0 + \dots = 4$$

กรณี  $n = 4$

$$y(4) = h(0)x(4) + h(1)x(3) + h(2)x(2) + h(3)x(1) + \dots$$

$$y(4) = 0 + 0 + 0 + 0 + \dots = 0$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } y(n) = \{2, 5, 10, 4, 0, \dots\}$$

## 2.6 โครงสร้างของระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา [1, 2]

### 2.6.1 โครงสร้างของระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา (Structures for the realization of linear time-invariant systems)

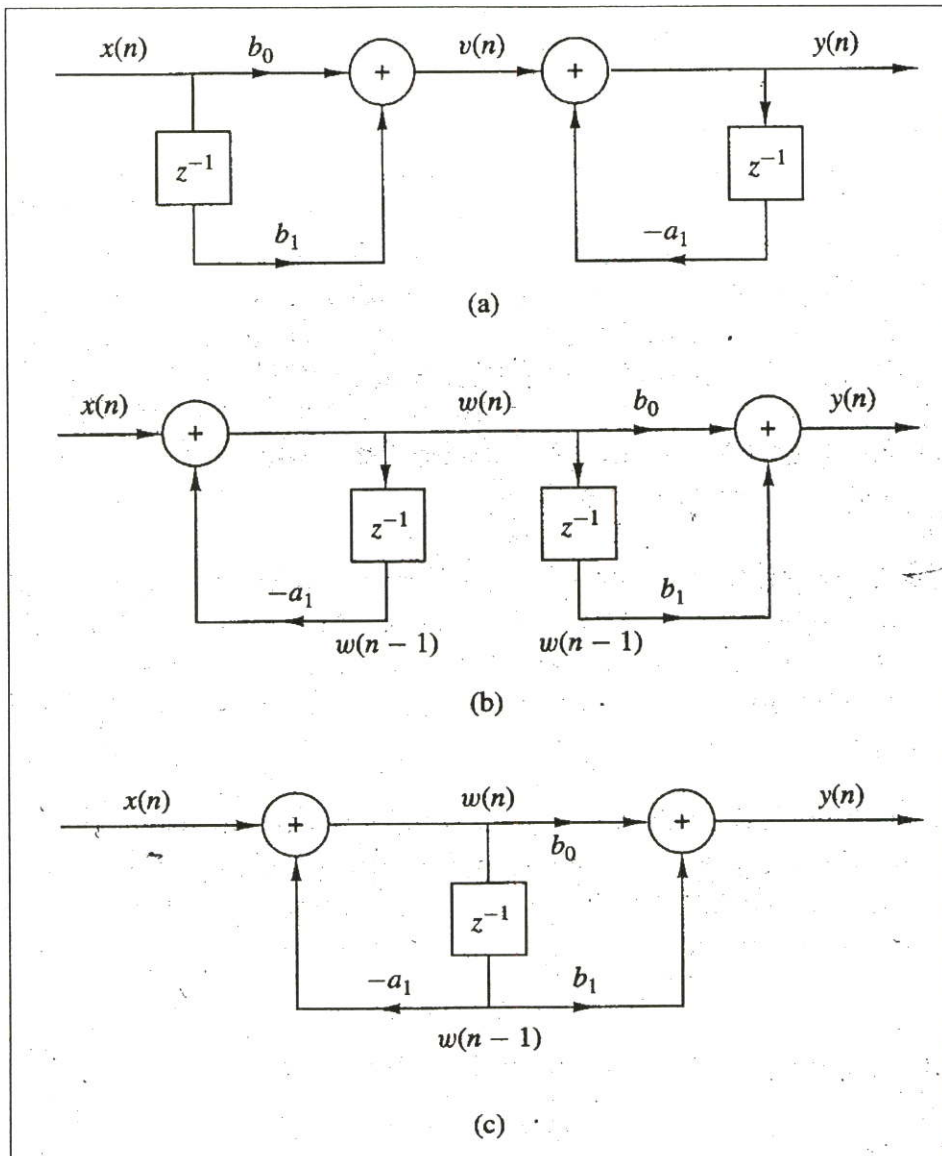
ระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาจะมีสมการดังสมการที่ 2.50 และนำไปเขียนเป็นโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.32 (a)

$$y(n) = -a_1 y(n-1) + b_0 x(n) + b_1 x(n-1)$$

$$v(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1)$$

$$y(n) = -a_1 y(n-1) + v(n) \quad (2.50)$$

จากรูปที่ 2.32(a) พบว่าระบบได้แยกออกเป็น 2 ระบบ โดย  $v(n)$  เป็นจุดเชื่อมต่อและจากคุณสมบัติการจัดกลุ่มในหัวข้อ 2.5.1 ทำการสลับที่ระบบในรูปที่ 2.32(a) ให้เป็นดังรูปที่ 2.32(b) เมื่อสลับที่แล้วพบว่าระบบทั้ง 2 ระบบสามารถใช้ตัวหน่วงร่วมกันได้ ทำให้เขียนเป็นโครงสร้างใหม่ได้ดังรูปที่ 2.32(c) และเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.51



รูปที่ 2.32 โครงสร้างของระบบเชิงเส้นแปรตามเวลา

$$w(n) = -a_1 w(n-1) + x(n)$$

$$y(n) = b_0 w(n) + b_1 w(n-1)$$

(2.51)

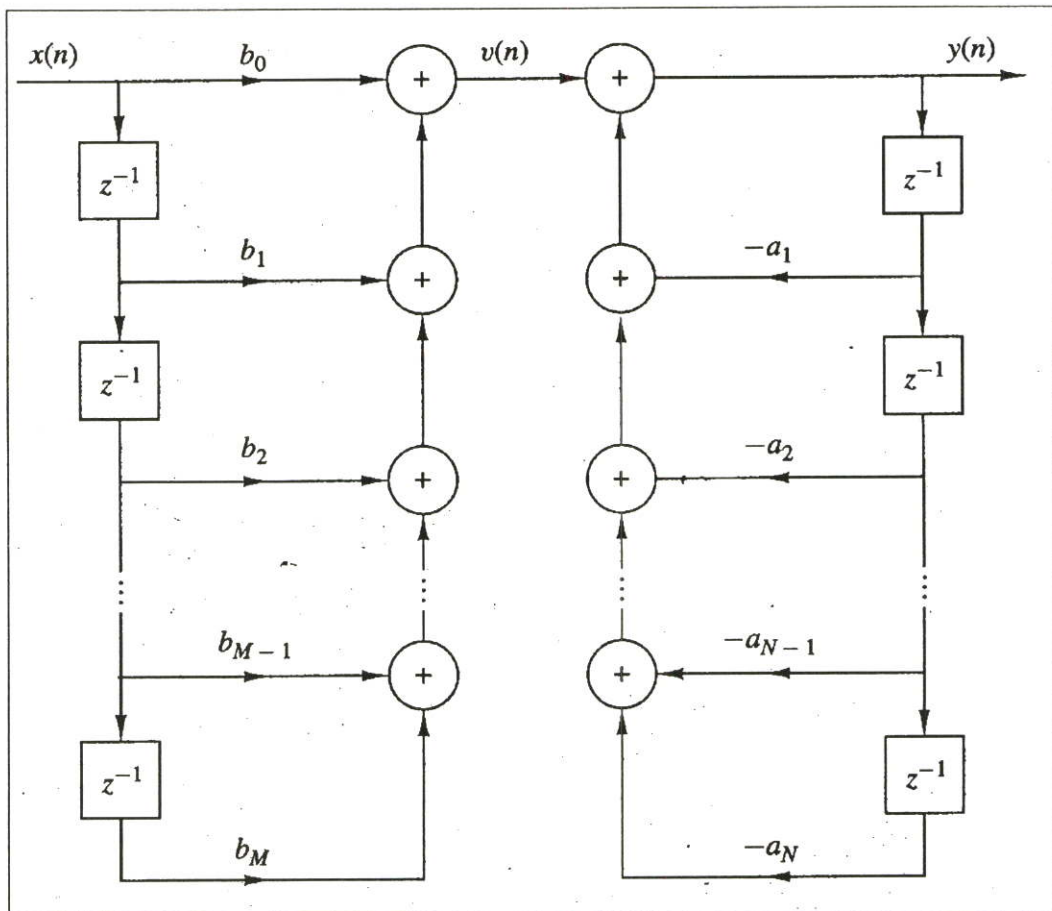
เรียกโครงสร้างที่แสดงดังรูปที่ 2.32(a) ว่าเป็นโครงสร้างแบบตรง I (Direct form I) ส่วนรูปที่ 2.32 (c) นั้นเรียกว่าโครงสร้างแบบ (Direct form II) และอาจเรียกระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลานี้ว่าระบบแบบ Recursive นอกจากนี้ระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลาสามารถเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ 2.52

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k)$$

(2.52)

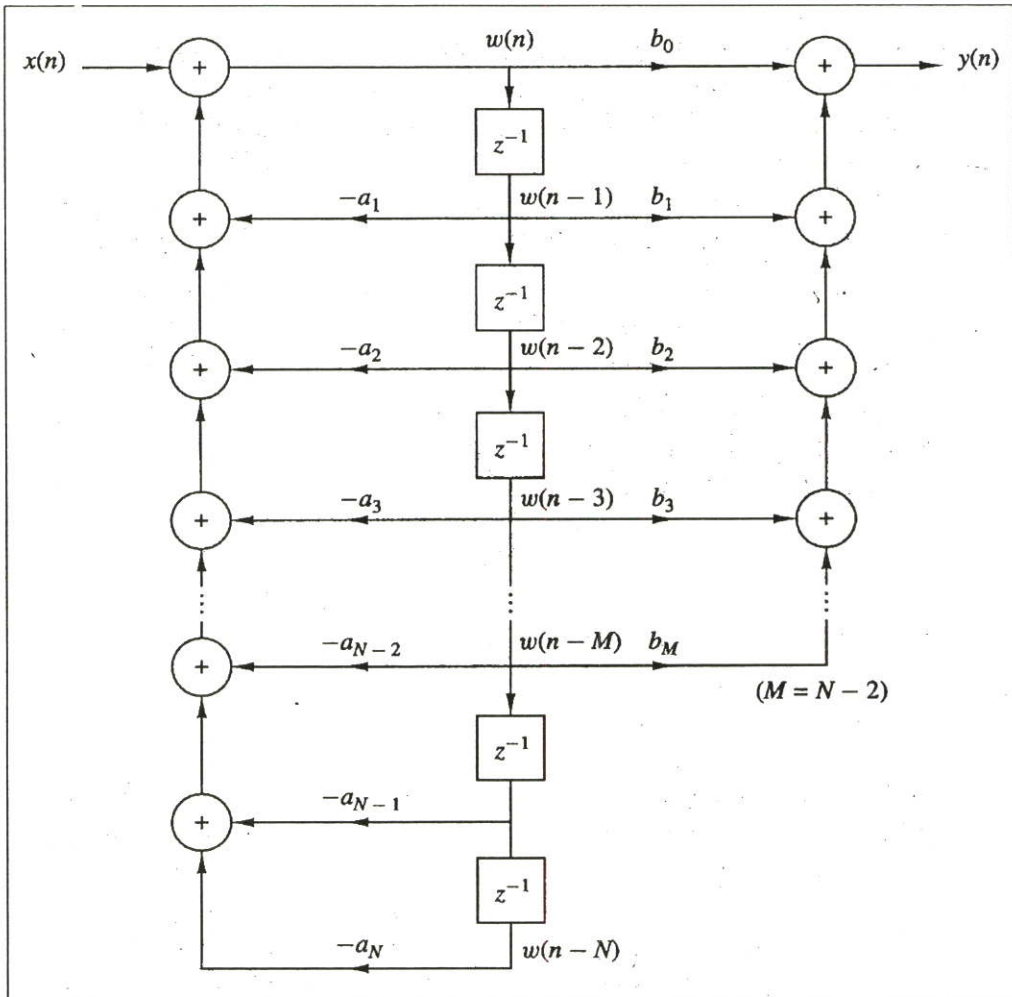
กำหนดให้  $v(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k)$  แทนค่าลงในสมการที่ 2.52 จะได้ดังสมการที่ 2.53 และนำไปเขียนโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.33

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + v(n) \quad (2.53)$$



รูปที่ 2.33 โครงสร้างแบบตรง I ของระบบไม่ต่อเนื่องแบบ Recursive

และจากสมการที่ 2.50 และสมการที่ 2.51 สามารถแปลงโครงสร้างแบบตรง I ดังรูปที่ 2.33 เป็นโครงสร้างแบบตรง II ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 โครงสร้างแบบตรง II ของระบบไม่ต่อเนื่องแบบ Recursive

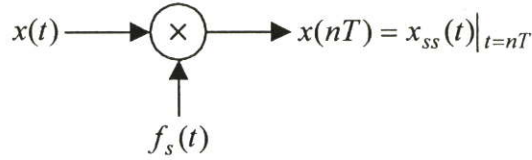
## 2.7 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง [1, 2, 3]

ในการเปลี่ยนสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาไปเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลานั้น จำเป็นจะต้องมีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) ซึ่งความถี่ในการสุ่มตัวอย่างโดยที่ไม่ทำให้สัญญาณสูญเสียข้อมูลที่สำคัญไปนั้นต้องเป็นไปตามทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง (Sampling theory) ของแซนนอน (Shannon) ซึ่งกล่าวไว้ว่า ถ้าสัญญาณเชิงอุปมาน  $x(t)$  ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับ  $f_0$  แล้ว จะสามารถทำการสุ่มตัวอย่างโดยสัญญาณที่ได้ ไม่สูญเสียข้อมูลที่สำคัญ ก็ต่อเมื่อความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง  $f_s$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่  $f_0$  ดังสมการที่ 2.54

$$f_s \geq 2f_0 \quad (2.54)$$

โดยทั่วไปอาจทำการสุ่มตัวอย่างด้วยความถี่  $f_{sn} = 2f_0$  พอดี ซึ่งค่าความถี่นี้เรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist frequency) และคาบเวลา  $T_n = 1/2f_0$  นี้ เรียกว่า ช่วงเวลาสุ่มตัวอย่างไนควิสต์

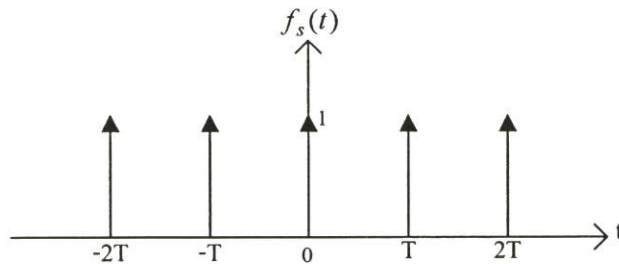
(Nyquist interval) แต่ในทางปฏิบัติเพื่อหลีกเลี่ยงผลของปรากฏการณ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) ที่อาจเกิดจากการสุ่มตัวอย่าง จึงมักใช้ความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง  $f_s$  มากกว่าค่าความถี่ในควิสต์  $f_{sn}$  ขึ้นไป ส่วนจะมีค่ามากกว่าเท่าใดนั้นขึ้นกับลักษณะงาน ไม่ได้มีการกำหนดค่าที่แน่นอน



รูปที่ 2.35 การสุ่มตัวอย่างสัญญาณเชิงอุปมาน

รูปที่ 2.35 แสดงการสุ่มตัวอย่างในโดเมนเวลาซึ่งก็คือการคูณสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา  $x(t)$  กับลำดับของอิมพัลส์หนึ่งหน่วย  $f_s(t)$  โดยที่อิมพัลส์แต่ละตัวสมมุติให้มีความห่างเท่ากับ  $T$  วินาที ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยสมการ

$$f_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (2.55)$$

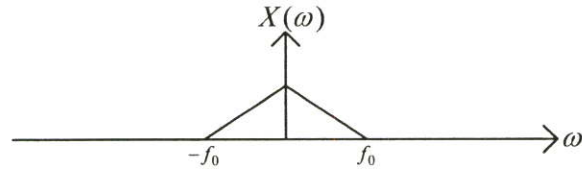
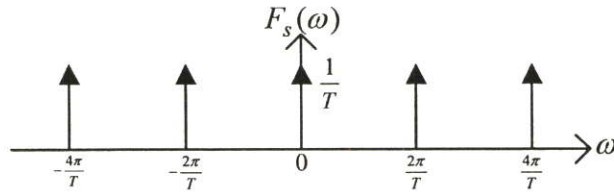
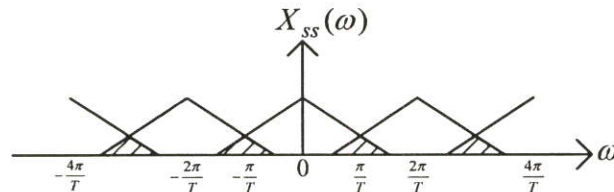


รูปที่ 2.36 สัญญาณสุ่มตัวอย่าง

และเมื่อทำการแปลงฟูเรียร์ เพื่อทำการหาค่าสเปกตรัมความถี่ของ  $f_s(t)$  จะได้

$$F_s(\omega) = \mathcal{F}\{f_s(t)\} = \frac{2\pi}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_s) \quad (2.56)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ  $f_s(t)$  เป็นอิมพัลส์ที่วางตัวห่างเท่าๆ กันไปบนแกนความถี่เช่นกัน ดังรูปที่ 2.37(b)

(a) สเปกตรัมของสัญญาณเชิงอุปมาน  $x(t)$ (b) สเปกตรัมของสัญญาณสุ่มตัวอย่าง  $f_s(t)$ (c) สเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง  $x_{ss}(t)$ 

รูปที่ 2.37 สเปกตรัมของสัญญาณจากการสุ่มตัวอย่าง

ถ้าให้  $x_{ss}(t)$  เป็นสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง ดังนั้น

$$x_{ss}(t) = f_s(t)x(t) \quad (2.57)$$

และถ้าให้  $X(\omega)$  เป็นสเปกตรัมความถี่ของ  $x(t)$  เนื่องจากในโดเมนเวลาสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างเป็นการคูณกันของสองสัญญาณ ดังนั้นในโดเมนความถี่จึงเป็นการทำคอนโวลูชัน (Convolution) ของสเปกตรัมของ  $f_s(t)$  และ  $x(t)$

$$X_{ss}(\omega) = F_s(\omega) * X(\omega) \quad (2.58)$$

การคอนโวลูชันนี้แสดงเป็นแผนรูปดังรูปที่ 2.37 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่าสเปกตรัมของสัญญาณที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง  $X_{ss}(\omega)$  เป็นการนำสเปกตรัมของ  $X(\omega)$  มาวางเรียงห่างเท่าๆ กันไปตลอดบนแกนความถี่  $\omega$  ซึ่งจากรูปที่ 2.37(c) จะเห็นว่า ถ้าความถี่ของสัญญาณสุ่มตัวอย่าง  $f_s(t)$  มีค่าน้อยกว่าความถี่ในควิสต์จะทำให้ช่วงห่างของแต่ละกลุ่มของสเปกตรัมเข้ามาเกทับกัน ผลนี้ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนไปของสเปกตรัมของสัญญาณเดิมซึ่งผลนี้มีชื่อเรียกว่า ผลการเอเลสซิง (Aliasing

effect) นอกจากนี้ รูปที่ 2.37 ยังแสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข จะมีผลตอบสนองความถี่ที่มีลักษณะเป็นคาบ คือ เริ่มซ้ำค่าเดิมที่จุดที่มีค่าความถี่เป็น  $2\pi/T$  หรือ  $f_s/2$  ซึ่งความถี่นี้เรียกว่า ความถี่พับ ซึ่งการที่ผลตอบสนองความถี่ที่มีลักษณะเป็นคาบก็เนื่องมาจากการสุ่มตัวอย่างสัญญาณนั่นเอง

## 2.8 สมการผลต่างสลับเนื่อง [1, 2, 3]

ในการวิเคราะห์ระบบเชิงแบบต่อเนื่องทางเวลา คุณสมบัติของระบบในโดเมนเวลา จะสามารถเขียนอธิบายโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) เช่นเดียวกันในระบบเชิงเลขก็จะมีสมการผลต่างสลับเนื่อง (Difference equation) ไว้ใช้ในการอธิบายคุณสมบัติของระบบในโดเมนเวลา ซึ่งสมการผลต่างสลับเนื่องอันดับที่  $n$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.59

$$y(n) = \sum_{k=0}^n b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^m a_k y(n-k) \quad (2.59)$$

โดยที่  $x(n)$  เป็นลำดับสัญญาณขาเข้า  $y(n)$  เป็นลำดับสัญญาณขาออกและ  $a_k, b_k$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ สมการผลต่างสามารถแสดงในรูปสมการฟังก์ชันถ่ายโอนโดยใช้คุณสมบัติการหน่วงเวลาของการแปลงแซดดังสมการที่ 2.60 – 2.61

$$a_k x(n) \leftrightarrow a_k X(z) \quad (2.60)$$

$$a_k x(n-k) \leftrightarrow a_k z^{-k} X(z) \quad (2.61)$$

จากสมการที่ (2.59) เมื่อใช้คุณสมบัติการแปลงแซดจะได้

$$Y(z) = \sum_{k=0}^n b_k z^{-k} X(z) - \sum_{k=1}^m a_k z^{-k} Y(z) \quad (2.62)$$

จัดรูปสมการเพื่อเขียนให้อยู่ในรูปสมการฟังก์ชันถ่ายโอน

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^n b_k z^{-k}}{\left(1 + \sum_{k=1}^m a_k z^{-k}\right)} \quad (2.63)$$

## 2.9 การแปลงแซด [1, 2]

การแปลงแซด (z-transform) ของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถนิยามอยู่ในรูปของอนุกรมอนันต์ (Power series) ดังสมการที่ 2.64 เรียกสมการที่ 2.64 นี้ว่า การแปลงแซดแบบตรง (Direct z-transform)

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.64)$$

เมื่อ  $z$  คือ ตัวแปรเชิงซ้อน (Complex variable)

$x(n)$  คือ ลำดับสัญญาณ (Sequence signal)

แต่สำหรับระบบแบบ Causal การแปลงแซดของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.65 เรียกสมการที่ 2.65 นี้ว่า การแปลงแซดด้านเดียว (One-Side z-transform)

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.65)$$

การแปลงแซดของสัญญาณแบบไม่ต่อเนื่องเขียนแทนได้อีกรูปแบบหนึ่ง ดังสมการที่ (2.66)

$$X(z) = Z\{x(n)\} \quad (2.66)$$

และจากสมการที่ 2.64 และ 2.65 จะเห็นได้ว่าผลการแปลงแซด ก็คืออนุกรมอนันต์ ดังนั้นจะมีค่า  $z$  ที่ทำให้  $X(z)$  หาคำตอบได้เรียกค่า  $z$  นี้ว่า Region of Convergence (ROC) โดยค่า  $z$  นี้จะมีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน

**เช่นกรณีที่ 2.5** หา z-transform ของสัญญาณไม่ต่อเนื่องแบบ Finite-duration

$$x(n) = \{1, 2, 5, 7, 0, 1\}$$

**วิธีการ** จากสมการที่ 2.64  $X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad X(z) &= \dots + 0z^2 + 0z^1 + 1z^0 + 2z^{-1} + 5z^{-2} + 7z^{-3} + 0z^{-4} + 1z^{-5} \\ X(z) &= 1 + 2z^{-1} + 5z^{-2} + 7z^{-3} + 1z^{-5} \end{aligned} \quad (2.67)$$

ส่วน ROC นั้นหาได้จากสมการที่ 2.67

$$X(z) = 1 + \frac{2}{z} + \frac{5}{z^2} + \frac{7}{z^3} + \frac{1}{z^5} \quad (2.68)$$

จากสมการที่ 2.68 พบว่าเมื่อ  $z = 0$  จะทำให้  $X(z)$  หาค่าไม่ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ROC ก็คือ ทุกๆค่าของ  $z$  ยกเว้น  $z = 0$  ซึ่งเมื่อ  $z = \infty$  จะทำให้  $X(z)$  หาค่าไม่ได้

**เช่นกรณีที่ 2.6** หา z-transform ของสัญญาณไม่ต่อเนื่องแบบ Finite-duration

$$x(n) = \{1, 2, 5, 7, 0, 1\}$$

**วิธีการ** จากสมการที่ 2.64  $X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$

จะได้  $X(z) = 1z^2 + 2z^1 + 5z^0 + 7z^{-1} + 0z^{-2} + 1z^{-3}$  (2.69)

$$X(z) = z^2 + 2z^1 + 5 + 7z^{-1} + z^{-3} \quad (2.70)$$

ROC หาได้จากสมการที่ 2.70 จัดสมการใหม่จะได้

$$X(z) = z^2 + 2z^1 + 5 + \frac{7}{z} + \frac{1}{z^3} \quad (2.71)$$

จากสมการที่ 2.71 จะเห็นได้ว่าถ้า  $z = 0$  หรือ  $z = \infty$  จะทำให้  $X(z)$  หาค่าไม่ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ROC ก็คือ ทุกๆค่า  $z$  ยกเว้น  $z = 0$  และ  $z = \infty$

**เช่นกรณีที่ 2.7** หา z-transform ของ  $\delta(n)$

**วิธีการ** กำหนดให้  $x(n) = \delta(n) = \{\dots, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, \dots\}$  (2.72)

จากสมการที่ 2.64  $X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$

$$X(z) = \dots + 0z^2 + 0z^1 + 1z + 0z^{-1} + 0z^{-2} + \dots$$

$$X(z) = 1 \quad (2.73)$$

**เช่นกรณีที่ 2.8** หา z-transform ของ  $\delta(n-k)$

**วิธีการ** กำหนดให้  $x(n) = \delta(n) = \{\dots, 0, 0, 0, 0, \dots, 0, \underset{x(k)}{1}, 0, 0, 0, \dots\}$  (2.74)

จากสมการที่ 2.64  $X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$

$$\begin{aligned}
 X(z) &= \dots + 0z^2 + 0z^1 + 0z^0 + 0z^{-1} + 0z^{-2} + \dots + 1z^{-k} + 0z^{-(k+1)} + 0z^{-(k+2)} + \dots \\
 X(z) &= z^{-k}
 \end{aligned}
 \tag{2.75}$$

**เช่นกรณีที่ 2.9** หา z-transform ของสัญญาณ

$$x(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n < \infty \\ 0 & n < 0 \end{cases}
 \tag{2.76}$$

$$x(n) = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, \dots\}$$

จากสมการที่ 2.64 
$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}
 \tag{2.77}$$

$$X(z) = 1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + z^{-5} + \dots + z^{-\infty}
 \tag{2.77}$$

$$X(z) = 1 + \frac{1}{z} + \frac{1}{z^2} + \frac{1}{z^3} + \frac{1}{z^4} + \dots
 \tag{2.78}$$

จากสมการอนุกรมอนันต์ดังสมการที่ 2.79

$$1 + A + A^2 + A^3 + A^4 + A^5 + \dots = \frac{1}{1-A} \quad |A| < 1
 \tag{2.79}$$

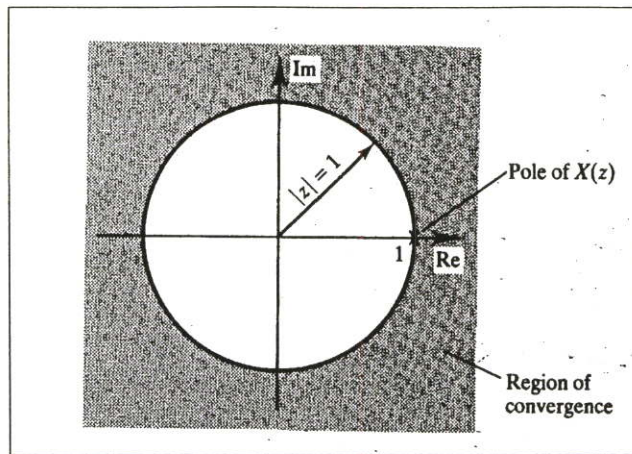
จัดสมการที่ 2.78 ใหม่ได้ดังสมการที่ 2.80

$$X(z) = 1 + \left(\frac{1}{z}\right) + \left(\frac{1}{z}\right)^2 + \left(\frac{1}{z}\right)^3 + \left(\frac{1}{z}\right)^4 + \left(\frac{1}{z}\right)^5 + \dots
 \tag{2.80}$$

เทียบสัมประสิทธิ์สมการที่ 2.79 กับสมการที่ 2.80 จะได้  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.81

$$X(z) = \frac{1}{1 - \frac{1}{z}} = \frac{1}{1 - z^{-1}} \quad \left|\frac{1}{z}\right| < 1 \text{ หรือ } 1 < |z|
 \tag{3.18}$$

เนื่องจาก  $z$  เป็นตัวแปรเชิงซ้อนดังนั้นค่า  $z$  ที่ทำให้  $X(z)$  หาค่าได้ หรือค่า ROC ของ  $X(z)$  สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.38

รูปที่ 2.38 ROC ของ  $X(z)$  ในกรณีที่ 2.9

**เช่นกรณีที่ 2.10** หา z-transform ของสัญญาณ  $x(n) = a^n u(n)$

$$x(n) = \{a^0, a^1, a^2, a^3, a^4, \dots\}$$

จากสมการที่ 2.64  $X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)z^{-n}$  จะได้  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.82

$$X(z) = a^0 z^0 + a^1 z^{-1} + a^2 z^{-2} + a^3 z^{-3} + \dots + a^n z^{-n} \quad (2.82)$$

$$X(z) = 1 + \frac{a}{z} + \frac{a^2}{z^2} + \frac{a^3}{z^3} + \dots + \frac{a^n}{z^n}$$

$$X(z) = 1 + \left(\frac{a}{z}\right) + \left(\frac{a}{z}\right)^2 + \left(\frac{a}{z}\right)^3 + \dots + \left(\frac{a}{z}\right)^n \quad (2.83)$$

จากสมการของอนุกรมอนันต์ที่ 2.79 ในกรณีที่ 2.9 ทำให้จัดสมการที่ 2.83 ได้ใหม่ดังสมการที่

2.84 โดย  $A = \frac{a}{z}$

$$X(z) = \frac{1}{1 - \frac{a}{z}} \quad \left| \frac{a}{z} \right| < 1 \quad (2.84)$$

$$X(z) = \frac{1}{1 - az^{-1}} \quad |a| < |z| \quad (2.85)$$

ค่า ROC ทุกๆค่า  $z$  ที่มากกว่า  $a$

**เช่นกรณีที่ 2.11** หา z-transform ของสัญญาณ  $x(n) = \sin(n\omega T)u(n)$

**วิธีการ** จากสมการ  $\sin(x) = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j}$  และ  $\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$

จากสมการที่ 2.64 จะได้  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.86

$$X(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{e^{jnwT} - e^{-jnwT}}{2j} \right) z^{-n} \quad (2.86)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left( \sum_{n=0}^{\infty} e^{jnwT} z^{-n} - \sum_{n=0}^{\infty} e^{-jnwT} z^{-n} \right)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left( \sum_{n=0}^{\infty} (e^{jwT} z^{-1})^n - \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-jwT} z^{-1})^n \right) \quad (2.87)$$

จากสมการของอนุกรมอนันต์ที่ 2.79 ในกรณีที่ 2.9 ทำให้จัดสมการที่ 2.87 ได้ใหม่ดังสมการที่ 2.88

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \left( \frac{1}{1 - e^{jwT} z^{-1}} \right) - \left( \frac{1}{1 - e^{-jwT} z^{-1}} \right) \right] \quad (2.88)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \left( \frac{z}{z - e^{jwT}} \right) - \left( \frac{z}{z - e^{-jwT}} \right) \right]$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \frac{(z^2 - ze^{-jwT})}{(z - e^{jwT})} - \frac{(z^2 - ze^{jwT})}{(z - e^{-jwT})} \right] \quad (2.89)$$

$$X(z) = \frac{1}{2j} \left[ \frac{(ze^{jwT} - ze^{-jwT})}{(z - e^{jwT})(z - e^{-jwT})} \right]$$

$$X(z) = \frac{z}{2j} \left[ \frac{e^{jwT} - e^{-jwT}}{z^2 - ze^{jwT} - ze^{-jwT} + e^{jwT}e^{-jwT}} \right]$$

$$X(z) = \frac{z}{2j} \left[ \frac{e^{jwT} - e^{-jwT}}{z^2 - z(e^{jwT} + e^{-jwT}) + 1} \right]$$

$$X(z) = \frac{z \sin(wT)}{z^2 - 2z \cos(wT) + 1} \quad (2.90)$$

## 2.10 คุณสมบัติของการแปลงแซด [1, 2]

### 2.10.1 คุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (Linearity property)

แสดงดังสมการที่ 2.91

$$Z[ax_1(n) + bx_2(n)] = aX_1(z) + bX_2(z) \quad (2.91)$$

### 2.10.2 คุณสมบัติการเลื่อน (Shift property)

กำหนดให้  $y(n) = x(n - m)$   $m \geq 0$

การแปลงแซดของ  $y(n) = Y(z)$  เขียนแทนได้ ดังสมการที่ 2.92 และ 2.93

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y(n)z^{-n} \quad (2.92)$$

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n-m)z^{-n} \quad (2.93)$$

กำหนดให้ระบบที่กำลังพิจารณาเป็นระบบแบบ Causal ดังนั้นสมการที่ (2.93) สามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ 2.94 - 2.97

$$Y(z) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n-m)z^{-n} \quad (2.94)$$

$$Y(z) = z^{-m}[x(0) + x(1)z^{-1} + x(2)z^{-2} + \dots + x(n)z^{-n}] \quad (2.95)$$

$$Y(z) = z^{-m} \sum_{n=0}^{\infty} x(n)z^{-n} \quad (2.96)$$

$$Y(z) = X(z)z^{-m} \quad (2.97)$$

### 2.10.3 คุณสมบัติการประสาน (Convolution property)

จากสมการผลการประสาน

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) \quad (2.98)$$

$$y(n) = h(n) * x(n) \quad (2.99)$$

ทำการแปลงแซด  $x(n)$ ,  $h(n)$  ให้เป็น  $X(z)$ ,  $H(z)$  จะได้การประสาน ดังสมการที่ 2.100

$$Y(z) = H(z)X(z) \quad (2.100)$$

ซึ่งผลการแปลงแซดของฟังก์ชันสัญญาณไม่ต่อเนื่องดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลของการแปลงแซด

| Entry number | Discrete-time Sequence  | $z$ -transform<br>$X(z)$  | Region of convergence<br>of $X(z)$                          |
|--------------|---|---|---|
| 1            | $\delta[n]$   | 1   | All $z$   |
| 2            | $u[n]$  | $\frac{1}{1-z^{-1}}$  | $ z  > 1$   |
| 3            | $-u[-n-1]$  | $\frac{1}{1-z^{-1}}$  | $ z  < 1$   |
| 4            | $\delta[n-m]$   | $z^{-m}$  | All $z$ except 0 (if $m > 0$ )<br>or $\infty$ (if $m < 0$ ) |
| 5            | $a^n u[n]$  | $\frac{1}{1-az^{-1}}$   | $ z  >  a $   |
| 6            | $-a^n u[-n-1]$  | $\frac{1}{1-az^{-1}}$   | $ z  <  a $   |
| 7            | $na^n u[n]$   | $\frac{az^{-1}}{(1-az^{-1})^2}$   | $ z  >  a $   |
| 8            | $-na^n u[-n-1]$   | $\frac{az^{-1}}{(1-az^{-1})^2}$   | $ z  <  a $   |
| 9            | $[\cos \omega_0 n] u[n]$  | $\frac{1 - [\cos \omega_0] z^{-1}}{1 - [2 \cos \omega_0] z^{-1} + z^{-2}}$        | $ z  > 1$   |
| 10           | $[\sin \omega_0 n] u[n]$  | $\frac{[\sin \omega_0] z^{-1}}{1 - [2 \cos \omega_0] z^{-1} + z^{-2}}$            | $ z  > 1$   |
| 11           | $[r^n \cos \omega_0 n] u[n]$  | $\frac{1 - [r \cos \omega_0] z^{-1}}{1 - [2r \cos \omega_0] z^{-1} + r^2 z^{-2}}$ | $ z  > r$   |
| 12           | $[r^n \sin \omega_0 n] u[n]$  | $\frac{[r \sin \omega_0] z^{-1}}{1 - [2r \cos \omega_0] z^{-1} + r^2 z^{-2}}$     | $ z  > r$   |
| 13           | $\begin{cases} a^n, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$ | $\frac{1 - a^N z^{-N}}{1 - az^{-1}}$  | $ z  > 0$   |

## 2.11 การแปลงแซตในรูปเศษส่วน [1, 2]

สัญญาณแบบไม่ต่อเนื่อง  $x(n)$  หรือระบบแบบไม่ต่อเนื่อง  $y(n)$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูป  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  ได้โดยการแปลงแซต ค่า  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  นี้เมื่อจัดให้อยู่ในรูปเศษส่วน (Rational) สามารถบอกรายละเอียดคุณลักษณะของสัญญาณและระบบได้

### 2.11.1 โพลและซีโร (Pole and Zero)[6,10-11]

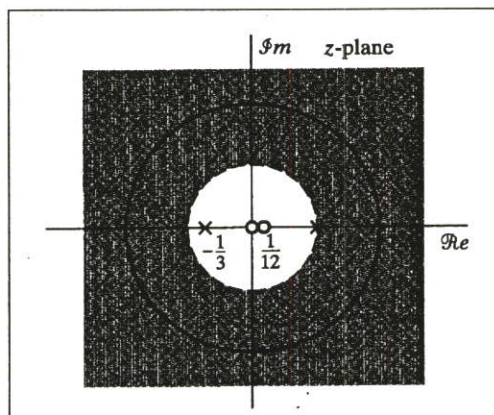
เป็นการนำค่า  $X(z)$  หรือ  $Y(z)$  ไปแก้สมการหาค่า  $z$  และนำคำตอบของ  $z$  ไปเขียนตำแหน่งลงในระนาบแซตเชิงซ้อน (Complex  $z$ -plane) ค่า  $z$  ที่เป็นคำตอบของเศษเรียกว่า ซีโร แทนด้วยสัญลักษณ์  $\circ$  ค่า  $z$  ที่เป็นคำตอบของส่วนเรียกว่า โพล แทนด้วยสัญลักษณ์  $\times$  เช่นการหาดำแหน่งโพลและซีโรของสัญญาณ

เช่นกรณีที่ 2.12 เขียนตำแหน่งการวางโพลและซีโรของระบบ  $H(z) = \frac{12 - z^{-1}}{6 - z^{-1} - z^{-2}}$

วิธีการ จากสมการ  $H(z)$  สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.101

$$H(z) = \frac{2z(z - \frac{1}{12})}{(z - \frac{1}{2})(z + \frac{1}{3})} \quad (2.101)$$

จากสมการที่ 2.101 พบว่าซีโรจะอยู่ที่ตำแหน่ง 0 และ  $\frac{1}{12}$  ส่วนโพลนั้นจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $\frac{1}{2}$  และ  $-\frac{1}{3}$  นำไปเขียนลงระนาบแซต ดังรูปที่ 2.39

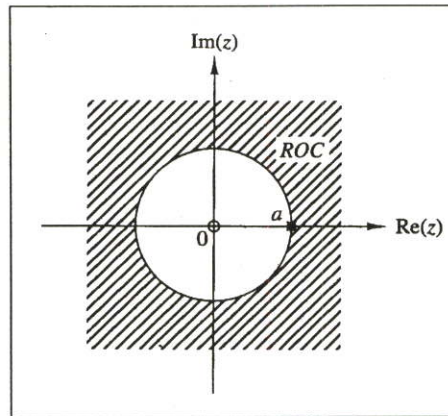


รูปที่ 2.39 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของระบบในกรณีที่ 2.12

เช่นกรณีที่ 2.13 หาคำแหน่งการวางโพลและซีโรของสัญญาณ  $x(n) = a^n u(n)$  ;  $a > 0$   
 วิธีการ จากตารางที่ 2.1 z-transform ของ  $x(n)$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.102

$$X(z) = \frac{1}{1 - az^{-1}} = \frac{z}{z - a} \quad (2.102)$$

นำไปเขียนลง z-plane ได้ดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของระบบในกรณีที่ 2.13

เช่นกรณีที่ 2.14 หาคำแหน่งการวางโพลและซีโรของสัญญาณ

$$x(n) = \begin{cases} a^n; & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0; & \text{elsewhere} \end{cases}$$

วิธีการ กำหนดพบว่า  $n$  เริ่มต้นจาก 0 ถึง  $M-1$  จะได้สมการ z-transform ดังสมการที่ 2.103

$$X(z) = \sum_{n=0}^{M-1} a^n z^{-n} \quad (2.103)$$

$$X(z) = \sum_{n=0}^{M-1} (az^{-1})^n \quad (2.104)$$

$$X(z) = 1 + \frac{a}{z} + \left(\frac{a}{z}\right)^2 + \left(\frac{a}{z}\right)^3 + \dots + \left(\frac{a}{z}\right)^{M-1} \quad (2.105)$$

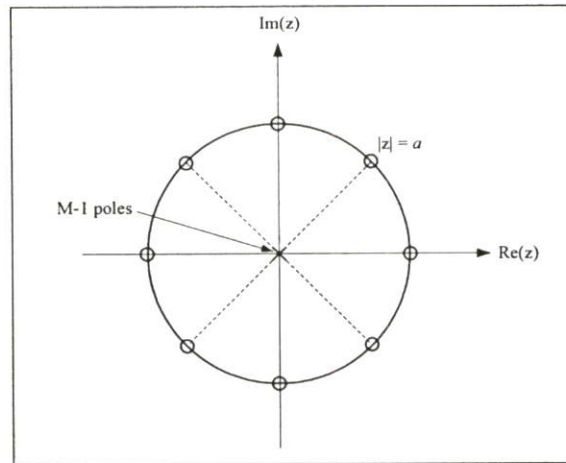
จัดสมการที่ 2.105 ได้ใหม่ [12] ดังสมการที่ 2.106

$$X(z) = \frac{1 - (az^{-1})^M}{1 - az^{-1}} \quad (2.106)$$

นำ  $z^M$  คูณตลอดทั้งเศษและส่วน

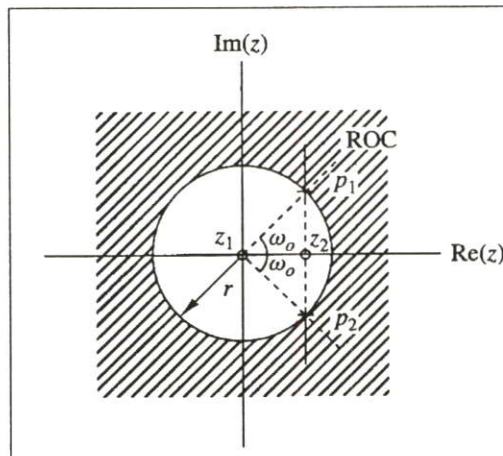
$$X(z) = \frac{z^M - a^M}{z^M - az^{M-1}} = \frac{z^M - a^M}{z^{M-1}(z - a)} \quad (2.107)$$

นำสมการที่ 2.107 เฉพาะเศษมาเขียนเป็นซีโรและเฉพาะส่วนมาเขียนเป็นโพลดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของกรณีที่ 2.14

เช่นกรณีที่ 2.15 หาสัญญาณ  $x(n)$  จากระนาบแซค ดังรูปที่ 2.42



รูปที่ 2.42 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรของกรณีที่ 2.15

วิธีการ จากรูปที่ 2.42 พบว่ามีซีโรอยู่ 2 ตัว โดย  $Z_1$  อยู่ที่จุดกำเนิดหรืออยู่ที่ตำแหน่ง 0 ส่วน  $Z_2$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $r \cos(\omega_0)$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.108 และ 2.109

$$Z_1 = 0 \quad (2.108)$$

$$Z_2 = r \cos(\omega_0) \quad (2.109)$$

สำหรับโพลจากรูปที่ 2.42 มีอยู่ 2 ตัวโดย  $P_1$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $re^{j\omega_0}$  ส่วน  $P_2$  อยู่ที่ตำแหน่ง  $re^{-j\omega_0}$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.110 และสมการที่ 2.111

$$P_1 = re^{j\omega_0} \quad (2.110)$$

$$P_2 = re^{-j\omega_0} \quad (2.111)$$

จากสมการที่ 2.108-2.111 นำไปเขียนเป็น  $X(z)$  ได้ดังสมการที่ 2.112 และ 2.113

$$X(z) = G \frac{(z - Z_1)(z - Z_2)}{(z - P_1)(z - P_2)} \quad (2.112)$$

$$X(z) = G \frac{(z - 0)(z - r \cos(\omega_0))}{(z - re^{j\omega_0})(z - re^{-j\omega_0})} \quad (2.113)$$

เมื่อ  $G$  เป็นค่าคงที่ และจากสมการที่ 2.113 สามารถจัดรูปได้ใหม่ดังสมการที่ 2.114

$$X(z) = G \left[ \frac{z(z - r \cos(\omega_0))}{(z - re^{j\omega_0})(z - re^{-j\omega_0})} \right]$$

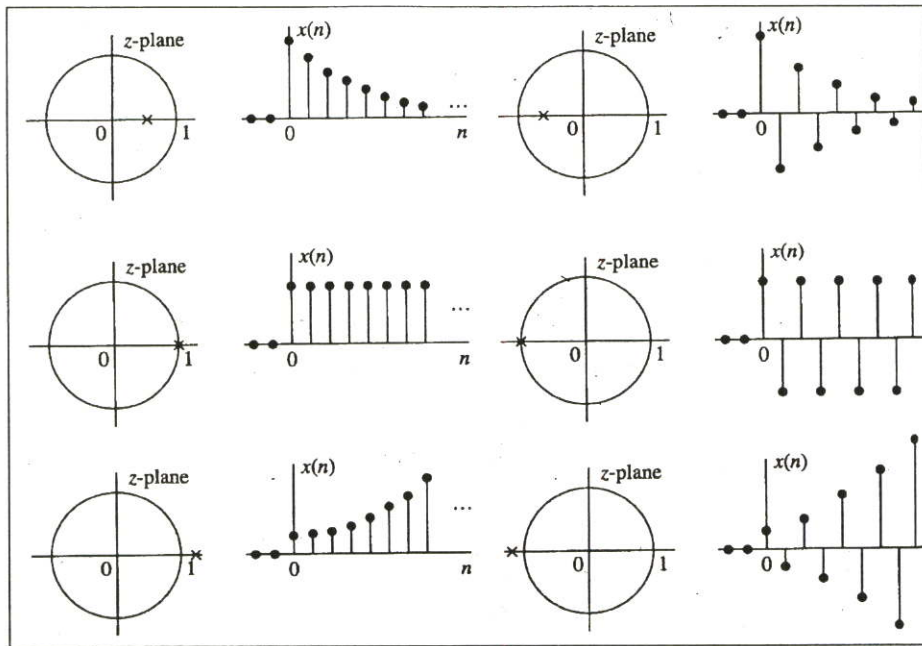
$$X(z) = G \left[ \frac{1 - rz^{-1} \cos(\omega_0)}{1 - 2rz^{-1} \cos(\omega_0) + r^2 z^{-2}} \right] \quad (2.114)$$

และจากตารางที่ 2.1 (ข้อที่ 11) z-transform ของสมการที่ 2.114 สามารถแปลงเป็น  $x(n)$  ได้ดังสมการที่ 2.115

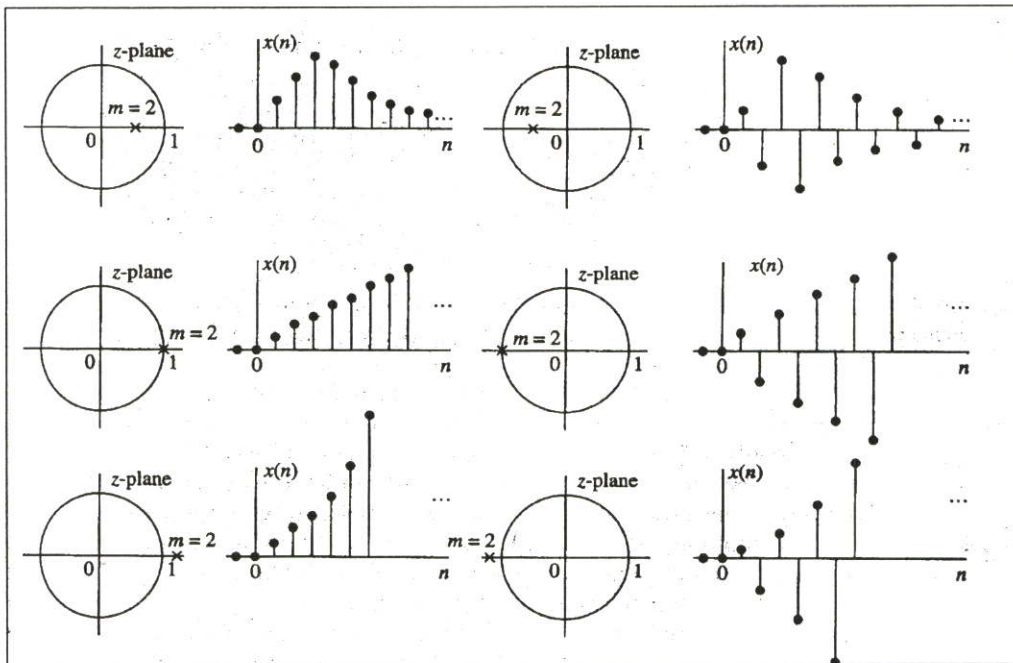
$$x(n) = G[r^n \cos(\omega_0 n)u(n)] \quad (2.115)$$

### 2.11.2 ลักษณะสัญญาณกับการวางตำแหน่งของโพล

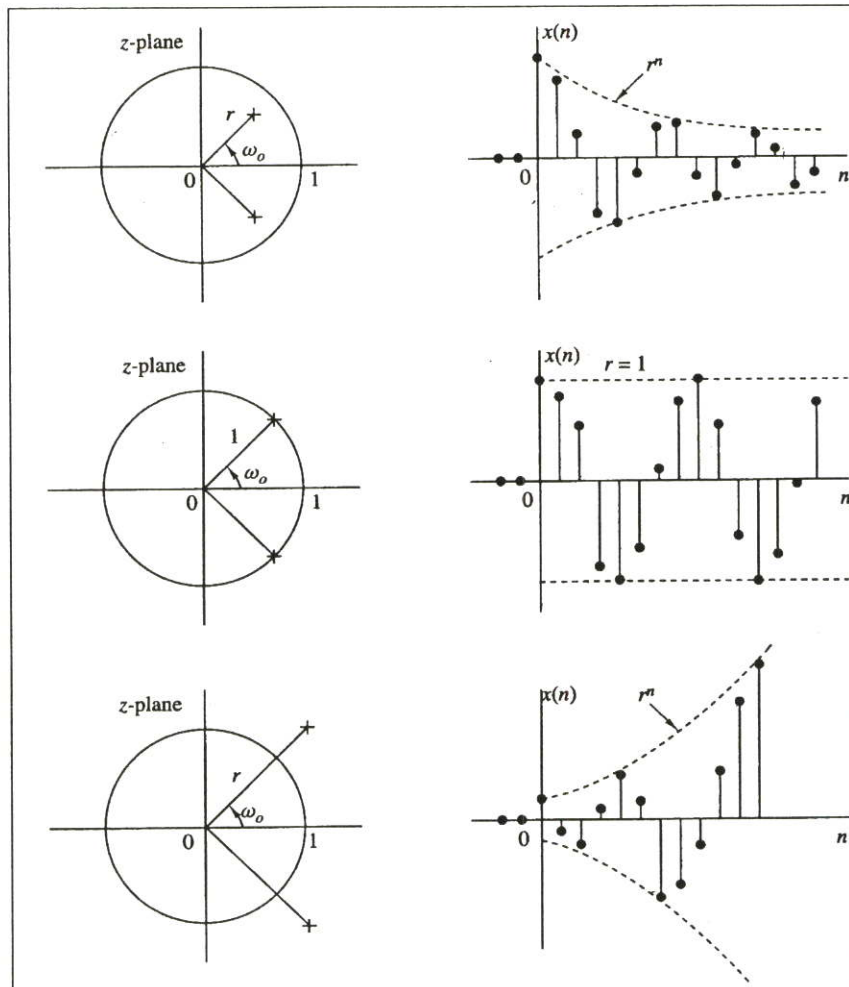
ตำแหน่งของโพลในระนาบแซด สามารถบ่งบอกลักษณะของลำดับสัญญาณใน Time-domain ได้ ซึ่งลักษณะของลำดับสัญญาณที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากการแปลงแซดผกผัน (Inverse z-transform) และแสดงได้ดังรูปที่ 2.43



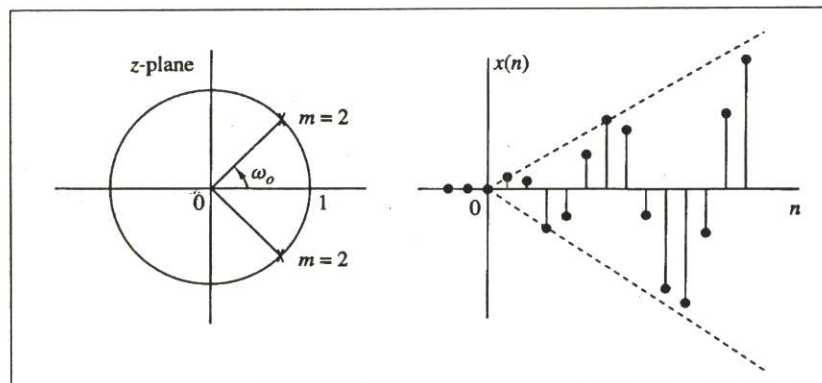
รูปที่ 2.43(a) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโพลกับลำดับสัญญาณ



รูปที่ 2.43(b) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโพลกับลำดับสัญญาณ



รูปที่ 2.43(c) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโพลกับลำดับสัญญาณ



รูปที่ 2.43(d) ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโพลกับลำดับสัญญาณ

## 2.12 การแปลง z ผกผัน (Inversion of z-transform) [1, 2, 3]

เป็นการแปลง  $X(z)$  กลับเป็น  $x(n)$  ทำได้ 3 วิธีดังต่อไปนี้

- วิธีอนุกรมอนันต์ (Power series method)
- วิธีแยกเศษส่วนย่อย (Partial-fraction expansion method)
- Residue method

### 2.12.1 การแปลงแซดผกผันด้วยวิธีอนุกรมอนันต์

กำหนดให้  $X(z)$  เป็น z-transform ของ Causal sequence ดังสมการที่ 2.116 ซึ่งสมการนี้สามารถจัดให้เป็นอนุกรมอนันต์ในรูป  $z$  หรือ  $z^{-1}$  โดยใช้การหารยาว (Long division)

$$X(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}} \quad (2.116)$$

เมื่อทำการหารยาวสมการที่ 2.116 จะได้ค่า  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.117

$$X(z) = x(0) + x(1)z^{-1} + x(2)z^{-2} + x(3)z^{-3} + \dots \quad (2.117)$$

เช่นกรณีที่ 2.16 แปลงแซดผกผันของสัญญาณดังสมการที่ 2.118 โดยใช้วิธีอนุกรมอนันต์

$$X(z) = \frac{1 + 2z^{-1} + z^{-2}}{1 - z^{-1} + 0.3561z^{-2}} \quad (2.118)$$

วิธีการ จากสมการที่ 2.118 ทำการหารยาวได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{array}{r} \frac{1 + 3z^{-1} + 3.6439z^{-2} + 2.5756z^{-3} + \dots}{1 - z^{-1} + 0.3561z^{-2}} \Big| \frac{1 + 2z^{-1} + z^{-2}}{1 - z^{-1} + 0.3561z^{-2}} \\ \underline{1 - z^{-1} + 0.3561z^{-2}} \phantom{+ \dots} \\ 3z^{-1} + 0.6439z^{-2} \\ \underline{3z^{-1} - 3z^{-2} + 1.0683z^{-3}} \\ 3.6439z^{-2} - 1.0683z^{-3} \\ \underline{3.6439z^{-2} - 1.0683z^{-3} + 1.2975927z^{-4}} \\ 2.5756z^{-3} - 1.2975927z^{-4} \end{array}$$

จะได้คำตอบ  $X(z) = 1 + 3z^{-1} + 3.6439z^{-2} + 2.5756z^{-3} + \dots$  และจากคุณสมบัติของ z-transform จะได้ค่า  $x(n)$  ดังสมการที่ 2.119

$$x(0) = 1; x(1) = 3; x(2) = 3.6439; x(3) = 2.5756; \dots \quad (2.119)$$

ในการหารยาวนั้นอาจทำให้ค่า  $z$  ในสมการที่ 2.118 มีกำลังเป็นบวกก่อนก็ได้ดังสมการที่ 2.120 โดยนำ  $z^2$  คูณตลอดทั้งเศษและส่วน แล้วจึงทำการหาร

$$X(z) = \frac{z^2 + 2z + 1}{z^2 - z + 0.3561} \quad (2.120)$$

เมื่อทำการหารจะได้

$$\begin{array}{r} 1 + 3z^{-1} + 3.6439z^{-2} + 2.5756z^{-3} + \dots \\ z^2 - z + 0.3561 \overline{) z^2 + 2z^1 + 1} \\ \underline{z^2 - z^1 + 0.3561} \\ 3z^1 + 0.6439 \\ \underline{3z^1 - 3z + 1.0683z^{-1}} \\ 3.6439 - 1.0683z^{-1} \\ \underline{3.6439 - 3.6439z^{-1} + 1.2975927z^{-2}} \\ 2.5756z^{-1} - 1.2975927z^{-2} \\ \underline{2.5756z^{-1} - 2.5756z^{-2} + 0.91717116z^{-3}} \\ 1.27800721z^{-2} - 0.91717116z^{-3} \end{array}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการหารยาวจะได้ค่า  $X(z)$  และ  $x(n)$  เท่ากัน แต่การแปลงแซดผกผันด้วยวิธีอนุกรมอนันต์นี้พบคำตอบที่ได้จะเป็นตัวเลขไม่เป็นสมการ  $x(n)$  ใดๆ แต่จะเป็นตัวเลขโดยเริ่มจาก  $x(0)$ ,  $x(1)$ ,  $x(2)$ , .... การหารหนึ่งครั้งจะได้  $x(n)$  หนึ่งค่า ดังนั้นถ้าต้องการหาค่า  $x(n)$  โดยที่  $n$  มีค่ามาก จะทำให้จำนวนครั้งของการหารมีมากขึ้นไปด้วย

### 2.12.2 การแปลงแซดผกผันด้วยวิธีแยกเศษส่วนย่อย

ทำโดยจัดสมการ  $X(z)$  ให้อยู่ในรูปเศษส่วนย่อยจากนั้นนำสมการที่จัดรูปได้แปลงให้เป็น  $x(n)$  โดยใช้ตาราง  $z$ -transform พิจารณา  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.116 การจัดรูปสมการจะเป็นไปตามตำแหน่งของโพลในระนาบแซดซึ่งแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

- กรณีโพลมีตำแหน่งไม่ซ้ำกัน สมการ  $X(z)$  สมการที่ 2.116 สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ 2.121

$$X(z) = B_0 + \frac{C_1}{1 - p_1 z^{-1}} + \frac{C_2}{1 - p_2 z^{-1}} + \dots + \frac{C_3}{1 - p_3 z^{-1}} \quad (2.121)$$

$$X(z) = B_0 + \frac{C_1 z}{z - p_1} + \frac{C_2 z}{z - p_2} + \dots + \frac{C_M z}{z - p_M}$$

$$X(z) = B_0 + \sum_{k=1}^M \frac{C_k z}{z - p_k} \quad (2.122)$$

- กรณีโพลอยู่มากกว่าหนึ่งตัวอยู่ตำแหน่งซ้ำกัน สมการ  $X(z)$  สมการที่ 2.116 สามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ 2.123

$$X(z) = \sum_{i=1}^m \frac{D_i}{(z - p_k)^i} \quad (2.123)$$

และค่า  $D_i$  หาได้จากสมการที่ 2.124

$$D_i = \frac{1}{(m-i)!} \frac{d^{m-i}}{dz^{m-i}} [(z - p_k)^m X(z)]_{z=p_k} \quad (2.124)$$

แต่ถ้าระบบหรือลำดับสัญญาณมีโพลมากกว่าหนึ่งตัวและตำแหน่งของโพลอยู่ในตำแหน่งที่ซ้ำกันและไม่ซ้ำกันตัวอย่างเช่นระบบมีโพลทั้งหมด 3 ตัว มีโพล 2 ตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกันส่วนอีก 1 ตัวอยู่คนละตำแหน่งการจัดสมการในรูปเศษส่วนย่อยก็จะใช้สมการที่ 2.122 และ 2.123 รวมกัน แต่ถ้าระบบหรือลำดับสัญญาณมีโพลมากกว่าหนึ่งตัวและตำแหน่งของโพลอยู่ในตำแหน่งที่ซ้ำกันและไม่ซ้ำกันตัวอย่างเช่นระบบมีโพล ทั้งหมด 3 ตัว มีโพล 2 ตัวอยู่ตำแหน่งเดียวกันส่วนอีก 1 ตัวอยู่คนละตำแหน่งการจัดสมการในรูปเศษส่วนย่อยก็จะใช้สมการที่ 2.122 และ 2.123 รวมกัน

เช่นกรณีที่ 2.17 แปลงแซดพคผันของสัญญาณ  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.125 โดยใช้วิธีแยกเศษส่วนย่อย

$$X(z) = \frac{z^{-1}}{1 - 0.25z^{-1} - 0.375z^{-2}} \quad (2.125)$$

วิธีการ ทำกำลังของ  $z$  ในสมการที่ 2.125 ให้เป็นบวกโดยนำ  $z^2$  คูณตลอด

$$X(z) = \frac{z}{z^2 - 0.25z - 0.375}$$

ทำการแยกเศษส่วนย่อยได้ดังสมการที่ 2.126

$$\begin{aligned} X(z) &= \frac{z}{(z - 0.75)(z + 0.5)} \\ \frac{X(z)}{z} &= \frac{1}{(z - 0.75)(z + 0.5)} = \frac{C_1}{z - 0.75} + \frac{C_2}{z + 0.5} \end{aligned} \quad (2.126)$$

กำหนดให้สมการที่ 2.126 มีค่าเท่ากับ  $F(z)$  ดังสมการที่ 2.127

$$F(z) = \frac{1}{(z - 0.75)(z + 0.5)} = \frac{C_1}{z - 0.75} + \frac{C_2}{z + 0.5} \quad (2.127)$$

หา  $C_1$  นำ  $(z-0.75)$  คูณตลอดในสมการที่ 2.127 จะได้

$$\frac{1}{z+0.5} = C_1 + \frac{C_2(z-0.75)}{(z+0.5)} \quad (2.128)$$

แทนค่า  $z$  เท่ากับ 0.75 ลงในสมการที่ 2.128 ได้ค่า  $C_1$  ดังสมการที่ 2.129

$$C_1 = \frac{1}{0.75+0.5} = \frac{4}{5} = 0.8 \quad (2.129)$$

ส่วนค่า  $C_2$  สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกับการหาค่า  $C_1$  ได้ค่า  $C_2$  ดังสมการที่ 2.130

$$C_2 = \frac{1}{-0.5-0.75} = -\frac{4}{5} = -0.8 \quad (2.130)$$

แทนค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ลงในสมการที่ 2.126 จะได้

$$X(z) = \frac{0.8z}{z-0.75} - \frac{0.8z}{z+0.5} \quad (2.131)$$

ใช้ตารางที่ 2.1 แปลง  $X(z)$  ในสมการที่ 2.131 กลับเป็น  $x(n)$  ได้ดังสมการที่ 2.132

$$\begin{aligned} x(n) &= Z^{-1} \left[ \frac{0.8z}{z-0.75} - \frac{0.8z}{z+0.5} \right] \\ x(n) &= 0.8 \left[ (0.75)^n - (-0.5)^n \right], \quad n > 0 \end{aligned} \quad (2.132)$$

**เช่นกรณีที่ 2.18** จงแปลงแซดพคคผันของสัญญาณ  $X(z)$  ดังสมการที่ 2.133 โดยใช้วิธีแยกเศษส่วนย่อย

$$X(z) = \frac{z^2}{(z-0.5)(z-1)^2} \quad (2.133)$$

**วิธีการ** จากสมการที่ 2.133 พบว่าบนระนาบแซดจะมีโพล 1 ตัวอยู่ที่ตำแหน่ง 0.5 และมีโพล อีก 2 ตัววางซ้อนกันอยู่ที่ตำแหน่ง 1 เมื่อพิจารณาดำแหน่งของโพล แล้วการแยกเศษส่วนย่อยของสมการ  $X(z)$  จะจัดรูปตามสมการที่ 2.122 และสมการที่ 2.123 ได้ดังสมการที่ 2.134

$$X(z) = \frac{z^2}{(z-0.5)(z-1)^2} = \frac{K_1}{z-0.5} + \frac{K_2}{z-1} + \frac{K_3}{(z-1)^2} \quad (2.134)$$

จัดรูปสมการที่ 2.134 ใหม่

$$\frac{X(z)}{z} = \frac{z}{(z-0.5)(z-1)^2} = \frac{K_1}{z-0.5} + \frac{K_2}{z-1} + \frac{K_3}{(z-1)^2} \quad (2.135)$$

กำหนดให้สมการที่ 2.135 มีค่าเท่ากับ  $F(z)$

$$F(z) = \frac{z}{(z-0.5)(z-1)^2} = \frac{K_1}{z-0.5} + \frac{K_2}{z-1} + \frac{K_3}{(z-1)^2} \quad (2.136)$$

หาค่า  $K_1$  นำ  $(z-0.5)$  คูณตลอดในสมการที่ 2.136 และแทน  $z=0.5$  จะได้ค่า  $K_1$  ดังสมการที่ 2.137

$$\begin{aligned} \frac{z}{(z-1)^2} &= K_1 + \frac{K_2(z-0.5)}{z-1} + \frac{K_3(z-0.5)}{(z-1)^2} \\ K_1 &= \frac{z}{(z-1)^2} = \frac{0.5}{(0.5-1)^2} = 2 \end{aligned} \quad (2.137)$$

ค่า  $K_2$  หาได้จากสมการที่ 2.123 เริ่มจากนำ  $(z-1)^2$  คูณตลอดในสมการที่ 2.136

$$\frac{z}{z-0.5} = \frac{K_1(z-1)^2}{z-0.5} + K_2(z-1) + K_3 \quad (2.138)$$

หาอนุพันธ์ของสมการที่ 2.138 เทียบกับ  $z$  และแทนค่า  $z=1$  ได้ค่า  $K_2$  ดังสมการที่ 2.139

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \left[ \frac{z}{z-0.5} \right] &= \frac{d}{dz} \left[ \frac{K_1(z-1)^2}{z-0.5} + K_2z - K_2 + K_3 \right] \\ K_2 &= \frac{z-0.5-z}{(z-0.5)^2} = \frac{-0.5}{(1-0.5)^2} = -2 \end{aligned} \quad (2.139)$$

ค่า  $K_3$  หาได้จากสมการที่ 2.138 โดยการแทน  $z=1$  ได้  $K_3$  ดังสมการที่ 2.140

$$K_3 = \frac{z}{z-0.5} = \frac{1}{1-0.5} = 2 \quad (2.140)$$

แทนค่า  $K_1, K_2, K_3$  ลงในสมการที่ 2.135 และนำ  $z$  คูณตลอด

$$X(z) = \frac{2z}{z-0.5} - \frac{2z}{z-1} + \frac{2z}{(z-1)^2} \quad (2.141)$$

ใช้ตารางที่ 2.1 แปลง  $X(z)$  ในสมการที่ 2.141 กลับเป็น  $x(n)$  ได้ดังสมการที่ 2.142

$$x(n) = 2(0.5)^n - 2 + 2n = 2[(n-1) + (0.5)^n], \quad n \geq 0 \quad (2.142)$$

### 2.12.3 การแปลงแซดผกผันโดยวิธี Residue

การแปลงแซดผกผันด้วยวิธีนี้ค่า  $x(n)$  จะถูกแทนด้วยการอินทิเกรตครบรอบ (Contour integral) ดังสมการที่ 2.143

$$x(n) = \frac{1}{2\pi j} \oint_C z^{n-1} X(z) dz \quad (2.143)$$

เมื่อ  $c$  คือเส้นทางการอินทิเกรตครบรอบโพลของ  $X(z)$  ที่อยู่ในรูปเศษส่วนและโพลิโนเมียล (Rational and polynomials) การอินทิเกรตครบรอบดังสมการที่ 2.143 คำตอบจะถูกแทนอยู่ในรูปตัวแปรเชิงซ้อนด้วยทฤษฎีของ Cauchy's residue [12] ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า  $x(n)$  ก็คือผลรวมของการทำ Residue เฉพาะโพลในบริเวณ  $c$  ของฟังก์ชัน  $z^{n-1} X(z)$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.144

$$\text{Res}[F(z), p_k] = \frac{1}{(m-1)!} \frac{d^{m-1}}{dz^{m-1}} [(z-p_k)F(z)]_{z=p_k} \quad (2.144)$$

เมื่อ  $F(z) = z^{n-1} X(z)$

เช่นกรณีที่ 2.19 ใช้วิธี Residue แปลง  $X(z)$  ในสมการที่ 2.145 ให้เป็น  $x(n)$

$$X(z) = \frac{z}{(z-0.75)(z+0.5)} \quad (2.145)$$

วิธีการ กำหนดให้  $F(z) = z^{-1} X(z)$

$$F(z) = \frac{z^{n-1} z}{(z-0.75)(z+0.5)} = \frac{z^n}{(z-0.75)(z+0.5)} \quad (2.146)$$

จากสมการที่ 2.146 พบว่า  $F(z)$  มีโพลอยู่ที่ 0.75 และ -0.5 ดังนั้นการหา Residue จะกระทำที่โพลสองตำแหน่งนี้โดยใช้สมการที่ 2.144 ซึ่งจะมีค่า  $m = 1$  โพลที่ตำแหน่ง 0.75 มีค่า Residue ดังสมการที่ 2.147

$$\text{Res}[F(z), 0.75] = (z-0.75)F(z) \quad (2.147)$$

$$\text{Res}[F(z), 0.75] = \frac{z^n}{z+0.5}$$

แทนค่า  $z = 0.75$

$$\text{Res}[F(z), 0.75] = \frac{0.75^n}{0.75+0.5} = \frac{4}{5}(0.75)^n \quad (2.148)$$

หน้านี้ไม่มีในต้นฉบับ

ที่ตำแหน่ง  $p_2$  มีโพลซ้อนกันอยู่ 2 ตัวทำให้ค่า  $m$  ในสมการที่ 2.144 มีค่าเท่ากับ 2 ดังนั้น Residue ของโพลที่ตำแหน่ง  $p_2$  หาได้จากสมการที่ 2.154

$$\text{Res}[F(z),1] = \frac{d}{dz} [(z-1)^2 F(z)] = \frac{d}{dz} \left[ \frac{z^{n+1}}{z-0.5} \right] \quad (2.154)$$

$$\text{Res}[F(z),1] = \frac{(z-0.5)(n+1)z^n - z^{n+1}}{(z-0.5)^2}$$

แทนค่า  $z = 1$

$$\text{Res}[F(z),1] = \frac{(1-0.5)(n+1)1^n - 1^{n+1}}{(1-0.5)^2} = \frac{(0.5)(n+1) - 1}{(0.5)^2}$$

$$\text{Res}[F(z),1] = 2(n+1) \quad (2.155)$$

$x(n)$  ก็คือผลรวมของการทำ Residue ที่โพลทั้งสองตำแหน่งเขียนได้ดังสมการที่ 2.156

$$x(n) = \text{Res}[F(z), p_1] + \text{Res}[F(z), p_2]$$

$$x(n) = 2(0.5)^n + 2(n+1) = 2[(n-1) + (0.5)^n] \quad (2.156)$$

### 2.13 ฟังก์ชันระบบของระบบเชิงเส้นที่แปรตามเวลา

ในการหาผลตอบสนองทางเอาต์พุตของระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถกระทำได้โดยใช้หลักการ Convolution ซึ่งการหาจะต้องทราบค่าของ  $x(n)$  และ  $h(n)$  แต่จากคุณสมบัติของการแปลงแซดทำให้การหาผลตอบสนองทางเอาต์พุตหาได้จากสมการที่ 2.157

$$Y(z) = H(z)X(z) \quad (2.157)$$

เมื่อ  $Y(z)$  คือ การแปลงแซดของ Output sequence  $y(n)$

$X(z)$  คือ การแปลงแซดของ Input sequence  $x(n)$

$H(z)$  คือ การแปลงแซดของ Unit sample response  $h(n)$

ดังนั้นถ้ารู้ค่า  $x(n)$  และ  $h(n)$  ก็สามารถหาค่า  $X(z)$  และ  $H(z)$  ได้โดยการแปลงแซด และเมื่อนำมาคูณกันดังสมการที่ 2.157 ก็จะได้  $Y(z)$  และสามารถหาค่า  $y(n)$  ได้โดยการแปลงแซดผกผัน  $Y(z)$  และในทางกลับกันถ้ารู้ค่า  $x(n)$  และ  $y(n)$  ก็สามารถหาค่า  $H(z)$  ได้ดังสมการที่ 2.158

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} \quad (2.158)$$

เพื่อความชัดเจนจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของระบบนั้นอธิบายได้ 2 ลักษณะคือ  $h(n)$  และ  $H(z)$  โดย  $h(n)$  นั้นจะอธิบายถึงคุณสมบัติของระบบในโดเมนเวลา ส่วน  $H(z)$  จะอธิบายถึงคุณสมบัติในโดเมนแซด ซึ่งแท้ที่จริงแล้ว  $H(z)$  และ  $h(n)$  นั้นเหมือนกันเพียงแต่อยู่กันคนละโดเมน และโดยทั่วไปจะเรียก  $H(z)$  ในสมการที่ 2.158 ว่า ฟังก์ชันระบบ (System function) หรือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

สำหรับระบบที่เป็นแบบเชิงเส้นและมีค่าสัมประสิทธิ์คงที่ (Linear constant-coefficient difference equation) ดังสมการที่ 2.159 สามารถใช้คุณสมบัติของการแปลงแซดเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอน  $H(z)$  ได้ดังสมการที่ 2.160

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^M b_k x(n-k) \quad (2.159)$$

$$Y(z) = -\sum_{k=1}^N a_k Y(z)z^{-k} + \sum_{k=0}^M b_k X(z)z^{-k}$$

$$Y(z) \left( 1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k} \right) = X(z) \left( \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} \right)$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}}$$

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^M b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N a_k z^{-k}} \quad (2.160)$$

และระบบที่เป็นแบบ Non-recursive ดังสมการที่ 2.161 สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนได้ ดังสมการที่ 2.162

$$y(n) = \sum_{k=0}^M h(k)x(n-k) \quad (2.161)$$

$$Y(z) = \sum_{k=0}^M h(k)X(z)z^{-k}$$

$$Y(z) = X(z) \left( \sum_{k=0}^M h(k)z^{-k} \right)$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{k=0}^M h(k)z^{-k} \quad (2.162)$$

## 2.14 ผลตอบสองทางเวลาของระบบแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา

การหาฟังก์ชันระบบและผลตอบสนองของ Unit sample กำหนดให้ระบบแบบไม่ต่อเนื่องมีสมการผลต่างดังสมการที่ 2.163

$$y(n] = \frac{1}{2}y[n-1] + 2x[n] \quad (2.163)$$

ใช้การแปลงแซด แปลงสมการที่ 2.163 และจัดสมการได้ฟังก์ชันระบบดังสมการที่ 2.164

$$\begin{aligned} Y(z) &= \frac{1}{2}z^{-1}Y(z) + 2X(z) \\ H(z) &= \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{2}{1 - \frac{1}{2}z^{-1}} \end{aligned} \quad (2.164)$$

ส่วนผลตอบสนองของ Unit sample หาได้จากสมการที่ (2.165)

$$Y(z) = \frac{2}{1 - \frac{1}{2}z^{-1}} X(z) \quad (2.165)$$

เมื่ออินพุตของระบบ  $x[n] = \delta[n]$  ดังนั้น  $X(z) = 1$  จะได้  $Y(z)$  ดังสมการที่ (2.166)

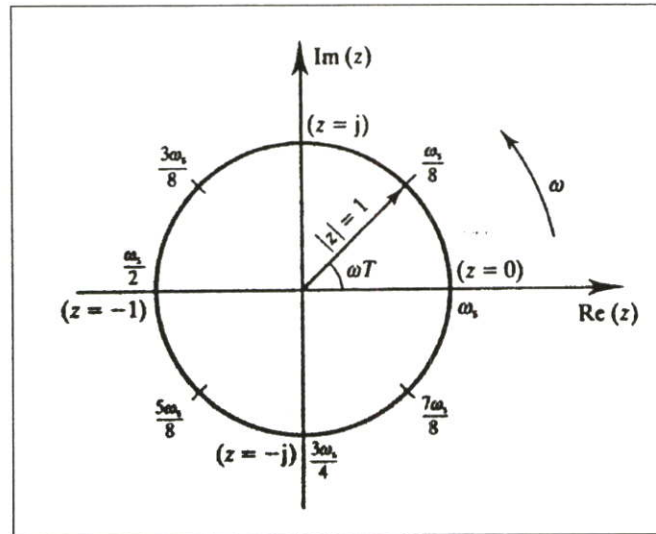
$$Y(z) = \frac{2}{1 - \frac{1}{2}z^{-1}} \quad (2.166)$$

จากตารางที่ 2.1 สามารถแปลง  $Y(z)$  ให้เป็น  $y[n]$  (ใช้สูตรที่ 5) ดังสมการที่ (2.167)

$$y[n] = 2\left(\frac{1}{2}\right)^n u[n] \quad (2.167)$$

## 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซด [3, 8, 11]

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซด แสดงได้ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซด

จากรูปที่ 2.44 จะเห็นได้ว่ามุม  $\omega$  จะอยู่ในช่วง  $0-2\pi$  และในระบบไม่ต่อเนื่องความถี่สูงของระบบจะมีค่าเท่ากับ  $\omega_s$  แต่ความถี่ที่สามารถใช้งานได้จริงในระบบจะมีค่าเพียง  $\frac{\omega_s}{2}$  เท่านั้น ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซด จะอยู่ในช่วง  $0-\pi$  เท่านั้น

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมบนระนาบแซด

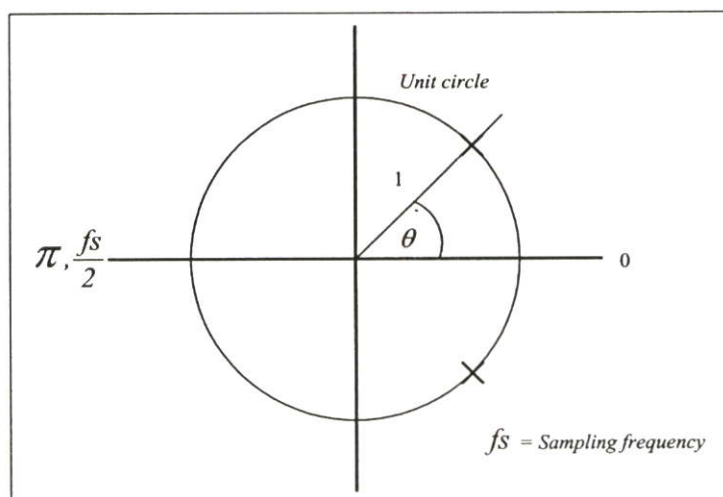
| Frequency (Hz) | $\omega(\text{rad/s})$ | มุม $\omega T(\text{rad})$ |
|----------------|------------------------|----------------------------|
| 0              | 0                      | 0                          |
| $f_s/8$        | $\omega_s/8$           | $\pi/4$                    |
| $f_s/4$        | $\omega_s/4$           | $\pi/2$                    |
| $3f_s/8$       | $3\omega_s/8$          | $3\pi/4$                   |
| $f_s/2$        | $\omega_s/2$           | $\pi$                      |

## บทที่ 3

### ตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัล

#### 3.1 ตัวกำเนิดไซน์แบบดิจิทัลตามหลักการแบบพื้นฐาน (Digital Sinusoidal Oscillators) [1, 3, 4]

ตัวกำเนิดไซน์แบบดิจิทัลเป็นระบบไม่ต่อเนื่องลำดับสองที่มีโพล 2 ตัววางอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมรัศมี 1 หน่วยในลักษณะ Complex conjugate ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งของโพลบนระนาบแซดของตัวกำเนิดไซน์แบบดิจิทัล

พิจารณาสมการของระบบไม่ต่อเนื่องลำดับสองดังสมการที่ 3.1

$$H(z) = \frac{b_0}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3.1)$$

เพื่อให้โพลทั้งสองตัววางบนเส้นรอบวงในลักษณะ Complex conjugate ดังนั้นจึงกำหนดค่า  $a_1$  และ  $a_2$  ดังสมการที่ 3.2

$$a_1 = -2r \cos \omega_0 \text{ และ } a_2 = r^2 \quad (3.2)$$

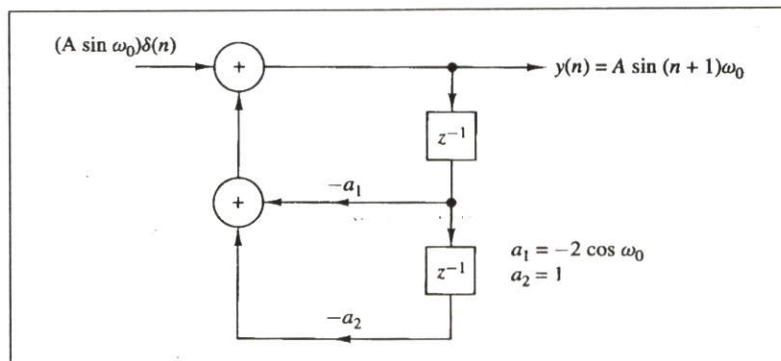
และเมื่อแทนค่า  $a_1$  และ  $a_2$  ลงในสมการที่ 3.1 จะทำให้โพลทั้งสองตัวมีค่าดังสมการที่ 3.3

$$p = r e^{\pm j\omega_0} \quad (3.3)$$

แต่เนื่องจากตัวกำเนิดขายน้จำเป็นต้องวางโพลทั้งสองตัวอยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ดังนั้นจะต้องกำหนดค่า  $r=1$  เมื่อกำหนดให้อินพุตของระบบเป็น  $\delta(n)$  จะได้ผลตอบสนองทางเอาต์พุตดังสมการที่ 3.4

$$h(n) = \frac{b_0 r^n}{\sin \omega} u(n) \sin(n+1)\omega_0 \quad (3.4)$$

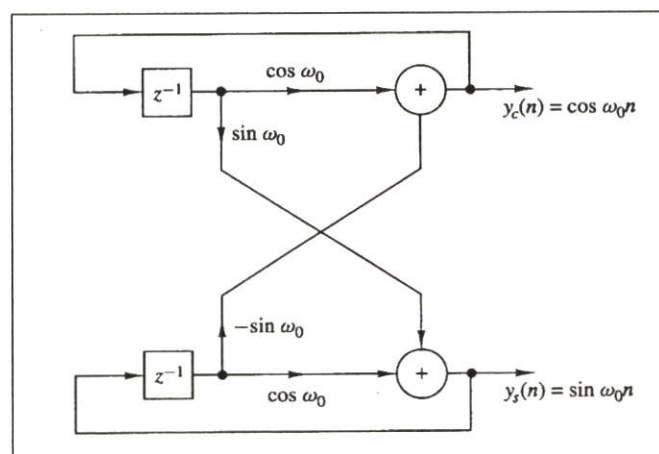
กำหนดให้  $b_0 = A \sin \omega_0$  และแทนค่า  $r=1$  ลงในสมการที่ 3.4 จะได้ผลตอบสนองทางเอาต์พุตดังสมการที่ 3.5 และนำไปเขียนเป็นโครงสร้างแบบตรงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของตัวกำเนิดขายน้แบบตรง

$$h(n) = A \sin(n+1)\omega_0 \quad ; n \geq 0 \quad (3.5)$$

นอกจากนี้ตัวกำเนิดขายน้ยังสามารถจัดให้อยู่ในโครงสร้างอื่นๆ ได้อีกเช่น โครงสร้างแบบ Coupled-form ดังแสดงดังรูปที่ 3.3 และมีสมการของระบบดังสมการที่ 3.6



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของตัวกำเนิดขายน้แบบ Coupled-form

$$y_c = (\cos \omega_0) y_c(n-1) - (\sin \omega_0) y_s(n-1) \quad (3.6a)$$

$$y_s = (\sin \omega_0) y_c(n-1) + (\cos \omega_0) y_s(n-1) \quad (3.6b)$$

จากโครงสร้างแบบตรงจะได้ผลตอบสนองทางเอาต์พุตดังสมการที่ 3.5 ซึ่งพบว่าเอาต์พุตของระบบที่ได้เป็นสัญญาณไซน์และมีเพียงสมการเดียว จึงไม่สามารถทำการเทียบสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟสได้ ส่วนโครงสร้างแบบ Coupled-form นั้นผลตอบสนองทางเอาต์พุตของระบบเป็นดังสมการที่ 3.6a และ 3.6b ซึ่งเอาต์พุตของสมการที่ 2 ได้สัญญาณโคไซน์ (Cosine) ส่วนเอาต์พุตของสมการที่ 3.6b ได้สัญญาณไซน์ทำให้เอาต์พุตทั้ง 2 ของระบบมีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งไม่สามารถปรับค่าเฟสต่างๆตามที่ต้องการได้

**เช่นกรณีทที่ 3.1** ออกแบบตัวกำเนิดไซน์ความถี่ 1 kHz กำหนดให้ความถี่สุ่ม 10 kHz โดยใช้โครงสร้างแบบตรง

**วิธีการ** ใช้โครงสร้างแบบตรงดังรูปที่ 3.2 กำหนดให้  $f = 1 \text{ kHz}$  และ  $f_s = 10 \text{ kHz}$  จากความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมในหัวข้อที่ 2.15 ทำให้มุมของโพล ( $\omega_0$ ) มีค่าดังสมการที่ 3.7

$$\begin{aligned}\frac{\omega_0}{\pi} &= \frac{f}{f_s/2} \\ \omega_0 &= \frac{2\pi f}{f_s}\end{aligned}\quad (3.7)$$

ดังนั้น  $a_1$  และ  $b_0$  จะมีค่าดังสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$\begin{aligned}a_1 &= -2 \cos \omega_0 = -2 \cos\left(\frac{2\pi f}{f_s}\right) \\ a_1 &= -2 \cos\left(\frac{2\pi}{10}\right) = -1.618 \\ b_0 &= A \sin \omega_0\end{aligned}\quad (3.8)$$

กำหนดให้  $A = 1$

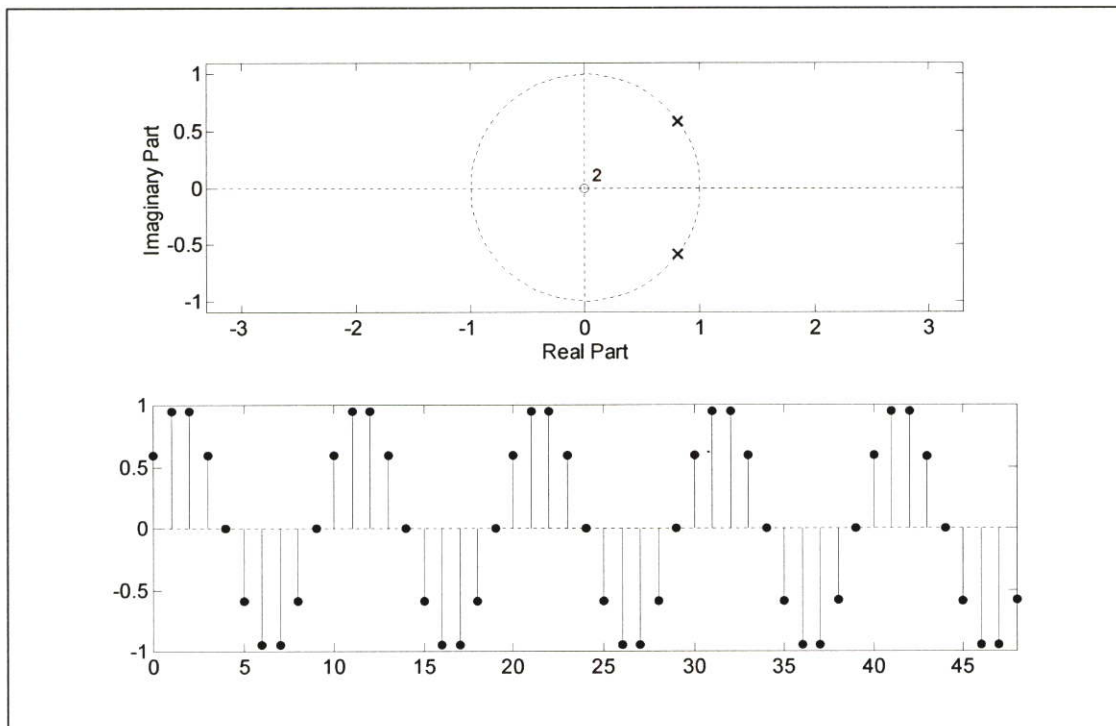
$$\begin{aligned}b_0 &= \sin \omega_0 = \sin\left(\frac{2\pi f}{f_s}\right) \\ b_0 &= \sin\left(\frac{2\pi}{10}\right) = 0.5878\end{aligned}\quad (3.9)$$

และจากสมการที่ 3.1 แทนค่า  $a_1, a_2, b_0$  และ  $\delta(n)$  เป็นอินพุตของระบบเขียนเป็นสมการผลต่างได้ดังสมการที่ 3.10 ส่วนตำแหน่งการวางโพลและซีโร และผลตอบสนองทางอิมพัลส์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.4

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0}{1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}} = \frac{0.5878}{1-1.618z^{-1}+z^{-2}}$$

$$Y(z)(1-1.618z^{-1}+z^{-2}) = 0.5878X(z)$$

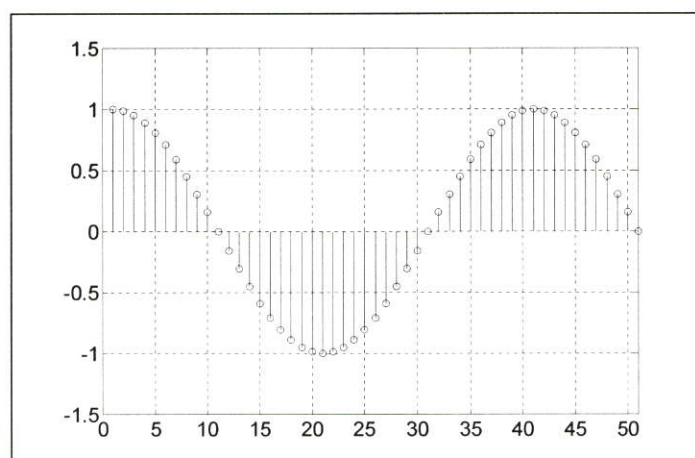
$$y(n) = 0.5878\delta(n) + 1.618y(n-1) - y(n-2) \quad (3.10)$$



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการวางโพลและซีโรและผลตอบสนองทางอิมพัลส์ของตัวกำเนิดชายน

### 3.2 ตัวกำเนิดสัญญาณชายนแบบดิจิทัลตามหลักการที่นำเสนอ

กำหนดให้ลำดับสัญญาณ  $x_1(n) = \cos(\omega_0 n)$  ดังรูปที่ 3.5 และ  $z$ -transform [3] ของ  $x_1(n)$  สามารถนิยามได้ดังสมการที่ 3.11



รูปที่ 3.5 ลำดับสัญญาณของ  $\cos(\omega_0 n)$

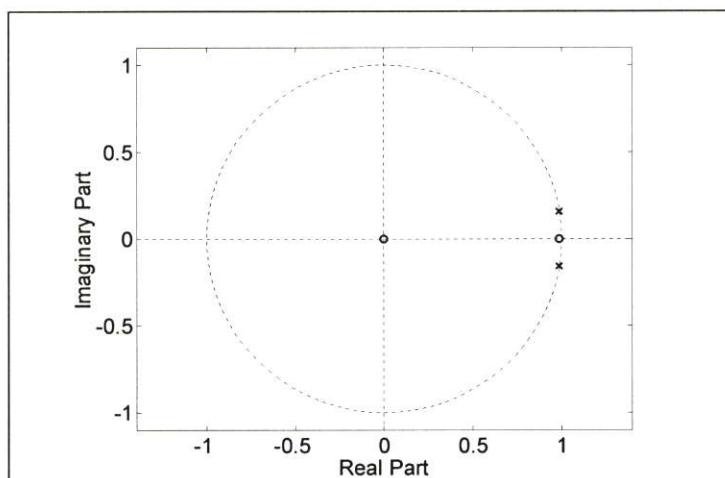
$$X_1(z) \equiv Z\{x_1(n)\}$$

$$X_1(z) = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (3.11)$$

ถ้ากำหนดให้ระบบแบบไม่ต่อเนื่องมี Transfer function ดังสมการที่ 3.11 สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 3.12 ซึ่งตำแหน่งการวางโพลและซีโรแสดงดังรูปที่ 3.6 และจากสมการที่ 3.12 ถ้ากำหนดให้อินพุตของระบบแบบไม่ต่อเนื่องเป็น  $\delta(n)$  ดังนั้นจะได้ผลตอบสนองทางเอาต์พุต หรือผลตอบสนองทางอิมพัลส์  $h_1(n)$  ดังสมการที่ 3.13

$$H_1(z) = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (3.12)$$

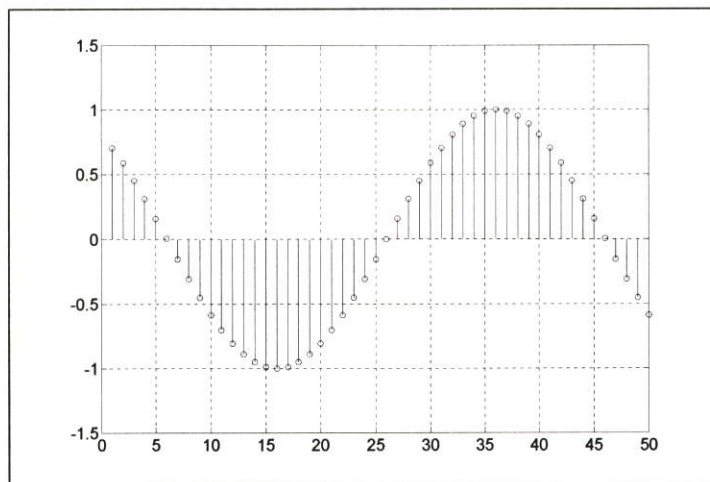
$$h_1(n) = \cos(\omega_0 n) \quad (3.13)$$



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวางโพลและซีโร

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าระบบแบบไม่ต่อเนื่องจะมีซีโร 2 ตัว วางอยู่ที่จุดกำเนิด 1 ตัว ส่วนอีกหนึ่งตัววางอยู่บนแกนเวลาจริงและถ้ากำหนดให้ลำดับสัญญาณ  $x_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi)$  แสดงดังรูปที่ 3.7 z-transform ของ  $x_2(n)$  แสดงได้ดังสมการที่ 3.14

$$X_2(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (3.14)$$

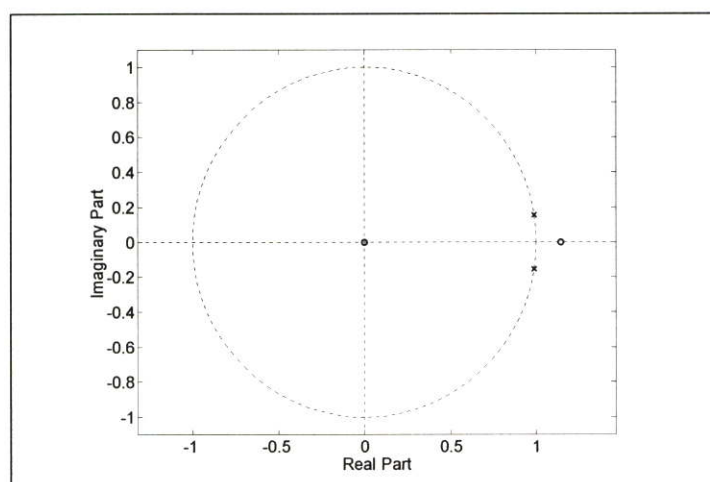


รูปที่ 3.7 ลำดับสัญญาณของ  $\cos(\omega_0 n + \phi)$

ถ้ากำหนดให้ระบบแบบไม่ต่อเนื่องมี Transfer function ดังสมการที่ 3.14 สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 3.15 และมีตำแหน่งการวางโพลและซีโร ของระบบดังรูปที่ 3.8 และจากสมการที่ 3.15 ถ้ากำหนดให้อินพุตของระบบไม่ต่อเนื่องเป็น  $\delta(n)$  ดังนั้นจะได้ผลตอบสนองทางเอาต์พุต หรือผลตอบสนองทางอิมพัลส์  $h_2(n)$  ดังสมการที่ 3.16

$$H_2(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (3.15)$$

$$h_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi) \quad (3.16)$$

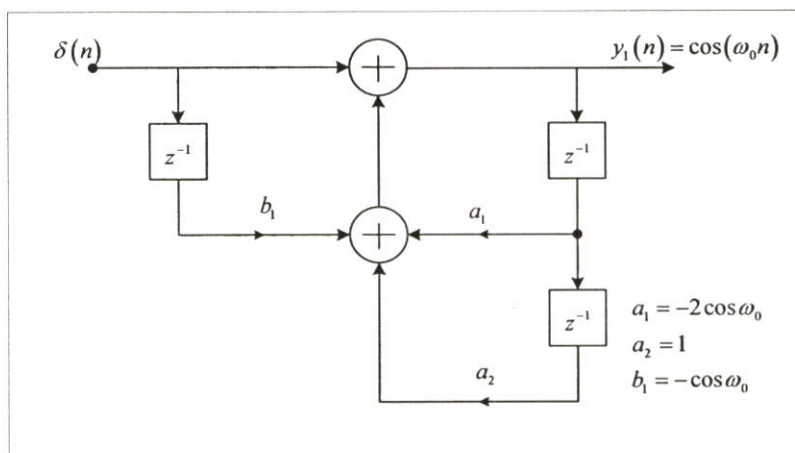


รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการวางโพลและซีโร

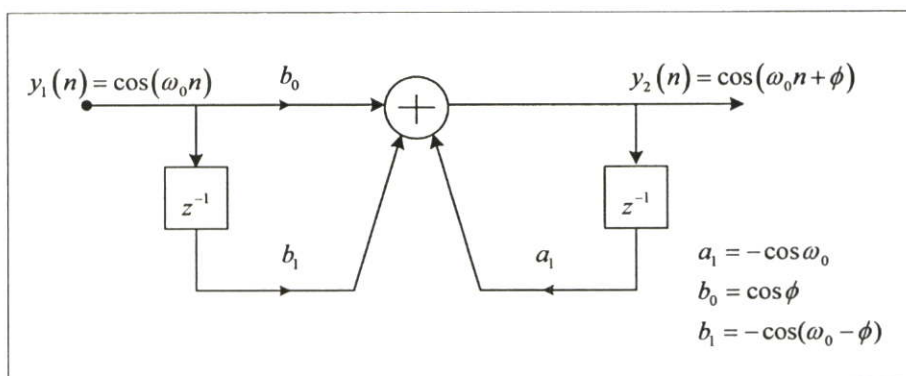
จากตำแหน่งการวางโพลและซีโรว์ ในรูปที่ 3.6 และ 3.8 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งการวางซีโรว์บนแกนเวลาจริงมีความแตกต่างกันนั้นหมายความว่า การเปลี่ยนตำแหน่งซีโรว์บนแกนเวลาจริง จะส่งผลให้สัญญาณ  $\cos(\omega_0 n)$  สามารถเปลี่ยนแปลงเฟสได้

ดังนั้นการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟสจะเริ่มจากการนำ Transfer function ของระบบแบบไม่ต่อเนื่องคั้งสมการที่ 3.12 มาเขียนเป็น โครงสร้างแบบตรงได้ดังรูปที่ 3.9 และในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของซีโรว์บนแกนเวลาจริงสามารถทำได้โดยการสร้างระบบแบบไม่ต่อเนื่องอีกระบบหนึ่งที่มี Transfer function แสดงคั้งสมการที่ 3.17 และมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.10 เรียกระบบนี้ว่า Phase shift system จากนั้นนำโครงสร้างทั้ง 2 มาต่อลำดับกันดังรูปที่ 3.11

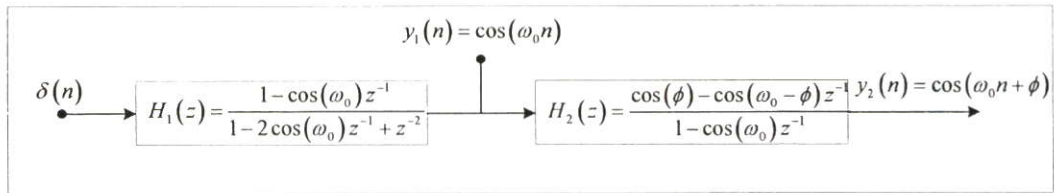
$$H(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}} \quad (3.17)$$



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบตรง



รูปที่ 3.10 ระบบแบบไม่ต่อเนื่องที่นำมาต่อลำดับกับ โครงสร้างในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.11 โครงสร้างการต่อลำดับ

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการป้อนอินพุตของระบบแบบไม่ต่อเนื่องเป็น  $\delta(n)$  ดังนั้นจะได้ผลตอบสนองทางแอมพลิจูดหรือผลตอบสนองทางอิมพัลส์  $y_1(n)$  และ  $y_2(n)$  ดังสมการที่ 3.19 และ 3.21 ตามลำดับ

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{1 - \cos(\omega_0) z^{-1}}{1 - 2 \cos(\omega_0) z^{-1} + z^{-2}} \quad (3.18)$$

$$y_1(n) = h_1(n) = \cos(\omega_0 n) \quad (3.19)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \left( \frac{1 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \right) \left( \frac{b_2 + b_3 z^{-1}}{1 + a_3 z^{-1}} \right) \quad (3.20)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \left( \frac{1 - \cos(\omega_0) z^{-1}}{1 - 2 \cos(\omega_0) z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos \phi - \cos(\omega_0 - \phi) z^{-1}}{1 - \cos(\omega_0) z^{-1}} \right)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \frac{\cos \phi - \cos(\omega_0 - \phi) z^{-1}}{1 - 2 \cos(\omega_0) z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_2(n) = h_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi) \quad (3.21)$$

### 3.2.1. ตัวอย่างการออกแบบตัวกำเนิดสัญญาณไซน์

การออกแบบและสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์แบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอได้กำหนดความถี่อยู่ในช่วง 1 - 100 Hz โดยทุกความถี่จะมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณไซน์  $\phi = \pm \frac{\pi}{6} \pi, \pm \frac{3\pi}{4}, \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{2\pi}{3}, \pm \frac{\pi}{3}, \pm \frac{\pi}{2}, \pi$  และความถี่สุ่ม  $f_s = 500 \text{ Hz}, 5 \text{ kHz}$  และ  $16 \text{ kHz}$  ซึ่งตัวอย่างการออกแบบแสดงได้ดังนี้

เช่นการออกแบบที่ 1 กำหนดให้ความถี่สุ่ม  $f_s = 500 \text{ Hz}$ ,  $f = 1 \text{ Hz}$  และ  $\phi = \frac{\pi}{6}$

วิธีการ การออกแบบเริ่มจากหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมในหัวข้อที่ 2.15 ทำให้มุมของโพล ( $\omega_0$ ) มีค่าดังสมการที่ 3.22

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 1}{500} = 0.004\pi \quad (3.22)$$

จากนั้นนำค่า  $\omega_0$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.22 แทนลงในสมการที่ 3.18 เพื่อหาค่า  $y_1(n)$  จะได้

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 - \cos(0.004\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.004\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_1(n) = x_1(n) - \cos(0.004\pi)x_1(n-1) + 2\cos(0.004\pi)y_1(n-1) - y_1(n-2) \quad (3.23)$$

และหาค่า  $y_2(n)$  จากสมการที่ 3.21 จะได้

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \left( \frac{1 - \cos(0.004\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.004\pi)z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(0.004\pi - \frac{\pi}{6}\right)z^{-1}}{1 - \cos(0.004\pi)z^{-1}} \right)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(0.004\pi - \frac{\pi}{6}\right)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.004\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_2(n) = \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)x_2(n) - \cos\left(0.004\pi - \frac{\pi}{6}\right)x_2(n-1) + 2\cos(0.004\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (3.24)$$

เช่นการออกแบบที่ 2 กำหนดให้ความถี่สุ่ม  $f_s = 500\text{Hz}$ ,  $f = 3\text{Hz}$  และ  $\phi = -\frac{\pi}{3}$

วิธีการ การออกแบบเริ่มจากหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมในหัวข้อที่ 2.15 ทำให้มุมของโพล ( $\omega_0$ ) มีค่าดังสมการที่ 3.25

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 3}{500} = 0.012\pi \quad (3.25)$$

จากนั้นนำค่า  $\omega_0$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.25 แทนลงในสมการที่ 3.18 เพื่อหาค่า  $y_1(n)$  จะได้

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 - \cos(0.012\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.012\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_1(n) = x_1(n) - \cos(0.012\pi)x_1(n-1) + 2\cos(0.012\pi)y_1(n-1) - y_1(n-2) \quad (3.26)$$

และหาค่า  $y_2(n)$  จากสมการที่ 3.21 จะได้

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \left( \frac{1 - \cos(0.012\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.012\pi)z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos\left(-\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(0.012\pi + \frac{\pi}{3}\right)z^{-1}}{1 - \cos(0.012\pi)z^{-1}} \right)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \frac{\cos\left(-\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(0.012\pi + \frac{\pi}{3}\right)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.012\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_2(n) = \cos\left(-\frac{\pi}{3}\right)x_2(n) - \cos\left(0.012\pi + \frac{\pi}{3}\right)x_2(n-1) + 2\cos(0.012\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2)$$
(3.27)

เช่นการออกแบบที่ 3 กำหนดให้ความถี่สุ่ม  $f_s = 5\text{kHz}$ ,  $f = 12\text{Hz}$  และ  $\phi = \frac{2\pi}{3}$

วิธีการ การออกแบบเริ่มจากหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมในหัวข้อที่ 2.15 ทำให้มุมของโพล ( $\omega_0$ ) มีค่าดังสมการที่ 3.28

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 12}{5000} = 0.0048\pi$$
(3.28)

จากนั้นนำค่า  $\omega_0$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.28 แทนลงในสมการที่ 3.18 เพื่อหาค่า  $y_1(n)$  จะได้

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 - \cos(0.0048\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.0048\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_1(n) = x_1(n) - \cos(0.0048\pi)x_1(n-1) + 2\cos(0.0048\pi)y_1(n-1) - y_1(n-2)$$
(3.29)

และหาค่า  $y_2(n)$  จากสมการที่ 3.21 จะได้ว่า

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \left( \frac{1 - \cos(0.0048\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.0048\pi)z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(0.0048\pi - \frac{2\pi}{3}\right)z^{-1}}{1 - \cos(0.0048\pi)z^{-1}} \right)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \frac{\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(0.0048\pi - \frac{2\pi}{3}\right)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.0048\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_2(n) = \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)x_2(n) - \cos\left(0.0048\pi - \frac{2\pi}{3}\right)x_2(n-1) + 2\cos(0.0048\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2)$$
(3.30)

เช่นการออกแบบที่ 4 กำหนดให้ความถี่สุ่ม  $f_s = 5kHz$  ,  $f = 45Hz$  และ  $\phi = -\frac{3\pi}{4}$

วิธีการ ก รออกแบบเริ่มจากหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมในหัวข้อที่ 2.15 ทำให้มุมของโพล ( $\omega_0$ ) มีค่าดังสมการที่ 3.31

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 45}{5000} = 0.018\pi \quad (3.31)$$

จากนั้นนำค่า  $\omega_0$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.31 แทนลงในสมการที่ 3.18 เพื่อหาค่า  $y_1(n)$  จะได้

$$\begin{aligned} \frac{Y_1(z)}{X_1(z)} &= \frac{1 - \cos(0.018\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.018\pi)z^{-1} + z^{-2}} \\ y_1(n) &= x_1(n) - \cos(0.018\pi)x_1(n-1) + 2\cos(0.018\pi)y_1(n-1) - y_1(n-2) \end{aligned} \quad (3.32)$$

และหาค่า  $y_2(n)$  จากสมการที่ 3.21 จะได้

$$\begin{aligned} \frac{Y_2(z)}{X_2(z)} &= \left( \frac{1 - \cos(0.018\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.018\pi)z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos(-\frac{3\pi}{4}) - \cos(0.018\pi + \frac{3\pi}{4})z^{-1}}{1 - \cos(0.018\pi)z^{-1}} \right) \\ \frac{Y_2(z)}{X_2(z)} &= \frac{\cos(-\frac{3\pi}{4}) - \cos(0.018\pi + \frac{3\pi}{4})z^{-1}}{1 - 2\cos(0.018\pi)z^{-1} + z^{-2}} \\ y_2(n) &= \cos(-\frac{3\pi}{4})x_2(n) - \cos(0.018\pi + \frac{3\pi}{4})x_2(n-1) + 2\cos(0.018\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \end{aligned} \quad (3.33)$$

เช่นการออกแบบที่ 5 กำหนดให้ความถี่สุ่ม  $f_s = 16kHz$  ,  $f = 80Hz$  และ  $\phi = -\frac{\pi}{4}$

วิธีการ ก รออกแบบเริ่มจากหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมในหัวข้อที่ 2.15 ทำให้มุมของ โพล ( $\omega_0$ ) มีค่าดังสมการที่ 3.34

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 80}{16000} = 0.01\pi \quad (3.34)$$

จากนั้นนำค่า  $\omega_0$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.34 แทนลงในสมการที่ 3.18 เพื่อหาค่า  $y_1(n)$  จะได้

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 - \cos(0.01\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.01\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_1(n) = x_1(n) - \cos(0.01\pi)x_1(n-1) + 2\cos(0.01\pi)y_1(n-1) - y_1(n-2) \quad (3.35)$$

และหาค่า  $y_2(n)$  จากสมการที่ 3.21 จะได้

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \left( \frac{1 - \cos(0.01\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.01\pi)z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) - \cos\left(0.01\pi + \frac{\pi}{4}\right)z^{-1}}{1 - \cos(0.01\pi)z^{-1}} \right)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \frac{\cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) - \cos\left(0.01\pi + \frac{\pi}{4}\right)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.01\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_2(n) = \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right)x_2(n) - \cos\left(0.01\pi + \frac{\pi}{4}\right)x_2(n-1) + 2\cos(0.01\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (3.36)$$

เช่นการออกแบบที่ 6 กำหนดให้ความถี่สุ่ม  $f_s = 16\text{kHz}$  ,  $f = 100\text{Hz}$  และ  $\phi = \pi$

วิธีการ กรออกแบบเริ่มจากหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับมุมในหัวข้อที่ 2.15 ทำให้มุมของโพล ( $\omega_0$ ) มีค่าดังสมการที่ 3.37

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 100}{16000} = 0.0125\pi \quad (3.37)$$

จากนั้นนำค่า  $\omega_0$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.37 แทนลงในสมการที่ 3.18 เพื่อหาค่า  $y_1(n)$  จะได้

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 - \cos(0.0125\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.0125\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_1(n) = x_1(n) - \cos(0.0125\pi)x_1(n-1) + 2\cos(0.0125\pi)y_1(n-1) - y_1(n-2) \quad (3.38)$$

และหาค่า  $y_2(n)$  จากสมการที่ 3.21 จะได้

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \left( \frac{1 - \cos(0.0125\pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.0125\pi)z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos(\pi) - \cos(0.0125\pi - \pi)z^{-1}}{1 - \cos(0.0125\pi)z^{-1}} \right)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_2(z)} = \frac{\cos(\pi) - \cos(0.0125\pi - \pi)z^{-1}}{1 - 2\cos(0.0125\pi)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_2(n) = \cos(\pi)x_2(n) - \cos(0.0125\pi - \pi)x_2(n-1) + 2\cos(0.0125\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (3.39)$$

จากนั้นนำสมการ  $y_2(n)$  ที่คำนวณได้ ไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และสร้างจริงด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณเชิงเลข TMS320C31

### 3.3 การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้

#### 3.3.1 การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟส (Phase Error Estimation)

ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟสถูกประมาณค่าโดยการเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณโคซายน์มาตรฐานกับสัญญาณโคซายน์ที่สร้างด้วยวิธีเปิดตาราง (Look Up Table: LUT) และสัญญาณโคซายน์ที่สร้างด้วยหลักการที่นำเสนอ ซึ่งการหาค่าผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟสสามารถแบ่งได้ 3 วิธีคือ

**วิธีที่ 1: เปรียบเทียบกับค่าเฟสที่มีอยู่ในตารางเพียงค่าเดียวเป็นหลัก**

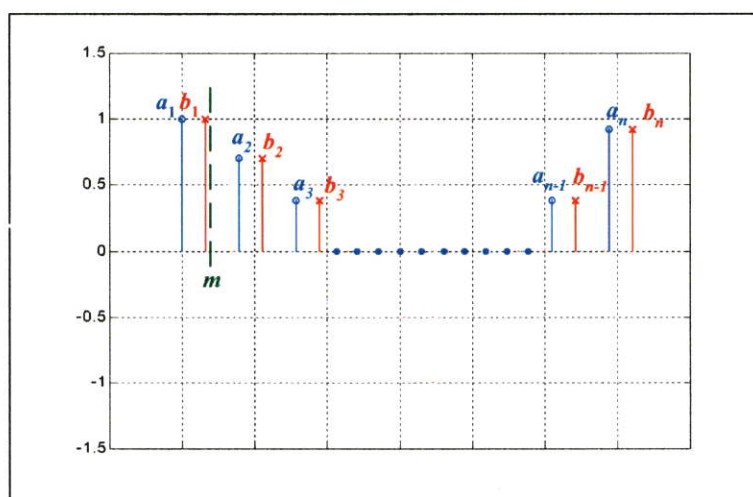
ในการคำนวณค่าผิดพลาดด้วยวิธีนี้ ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าเฟสระหว่างตำแหน่ง  $a_n$  กับ  $b_n$  ดังรูปที่ 3.12 ซึ่งสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดได้ดังสมการที่ 3.40

$$e_n = |a_n - b_n| \quad (3.40)$$

เมื่อ  $a_n$  แสดงถึง ตำแหน่งหรือค่าของเฟสที่มีอยู่ในตาราง ตาราง

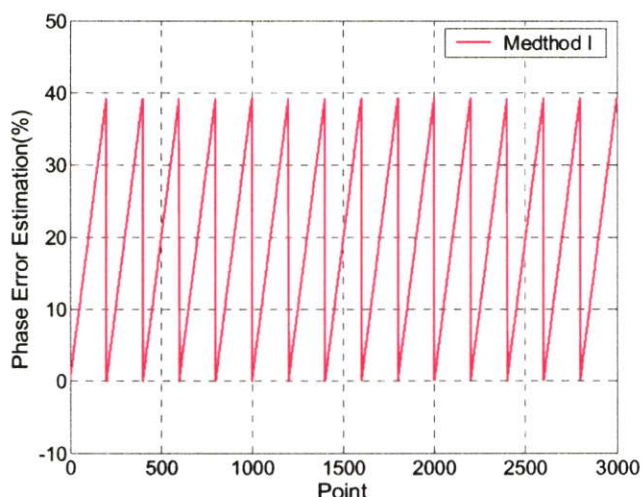
$b_n$  แสดงถึง ตำแหน่งหรือค่าของเฟสที่ต้องการเลื่อน

$e_n$  แสดงถึง ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟส



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการหาค่าเฟสของสัญญาณชายน้

จากสมการที่ 3.40 สามารถแสดงค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีที่ 1 ได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีที่ 1

จากรูปที่ 3.13 พบว่าค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีที่ 1 เกิดจากการเลื่อนเฟสของสัญญาณซายน์จะต้องยึดค่าเฟสที่มีอยู่ใน ตาราง เพียงค่าเดียวเป็นหลัก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเลื่อนเฟสด้วยวิธีนี้ จึงทำการเปรียบเทียบกับค่าเฟสที่มีอยู่ในตารางด้วยวิธีเลือกค่าเฟส

#### วิธีที่ 2: เปรียบเทียบกับค่าเฟสที่มีอยู่ใน ตาราง ด้วยวิธีเลือกค่าเฟส

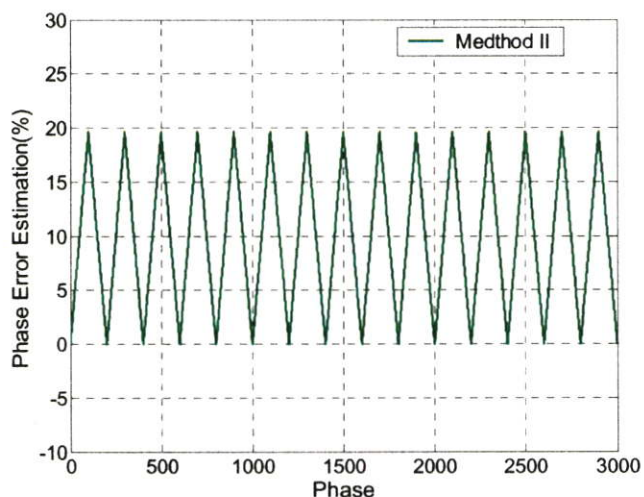
ในการคำนวณค่าผิดพลาดด้วยวิธีนี้ ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าเฟสที่ต้องการเลื่อนกับค่าเฟสที่มีอยู่ในตารางซึ่งจะทำการเลือกค่าเฟสที่มีอยู่ในตารางให้ใกล้เคียงกับค่าเฟสที่ต้องการเลื่อนมากที่สุด ดังรูปที่ 3.12 และสามารถคำนวณหาค่าผิดพลาดได้ดังสมการที่ 3.41 - 3.42

$$e_n = \begin{cases} |a_n - b_n| & ; b_n < m \\ |a_{n+1} - b_n| & ; b_n > m \end{cases} \quad (3.41)$$

$$m = \frac{a_{n+1} - a_n}{2} \quad (3.42)$$

เมื่อ  $m$  แสดงถึง ตำแหน่งหรือค่ากลางของเฟสระหว่าง  $a_n$  กับ  $a_{n+1}$

จากสมการที่ 3.41 และ 3.42 สามารถแสดงค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับค่าเฟสที่มีอยู่ในตารางด้วยวิธีเลือกค่าเฟส ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีที่ 2

จากรูปที่ 3.14 พบว่าค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสจะลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับการคิดค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสด้วยวิธีที่ 1 แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าความผิดพลาดทั้ง 2 วิธียังมีข้อจำกัดกรณีที่ต้องการเลื่อนเฟสที่ตำแหน่งหรือค่าใดใดที่ไม่ตรงกับค่าเฟสที่มีอยู่ในตาราง ดังนั้นจึงนำเสนอหลักการคำนวณค่าความผิดพลาดด้วยวิธีการเปรียบเทียบกับการเลื่อนเฟสของสัญญาณชายนด้วยหลักการที่นำเสนอ

### วิธีที่ 3: เปรียบเทียบกับสัญญาณชายนที่มีการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอ

การหาค่าความผิดพลาดด้วยวิธีนี้ ทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของสัญญาณชายนที่มีการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอ ดังสมการที่ 3.43 กับแอมพลิจูดของสัญญาณชายนมาตรฐานที่มีการเลื่อนเฟสดังสมการที่ 3.44 จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของการเลื่อนเฟสได้ดังสมการที่ 3.45

$$y_{ac}(n) = \cos(\omega_0 n + \phi_{ac}) \quad (3.43)$$

$$y(n) = \cos(\omega_0 n + \phi) \quad (3.44)$$

$$e_n = |y_{ac}(n) - y(n)| \quad (3.45)$$

ค่าความผิดพลาดที่คำนวณได้ จากสมการที่ 3.45สามารถนำไปหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวม (Mean Square Error: MSE) ของสัญญาณชายนที่มีการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอได้ดังสมการที่ 3.46

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - T)^2 \quad (3.46)$$

เมื่อ  $m$  แสดงถึง จำนวนข้อมูลที่ต้องการหาค่าความผิดพลาด

$x_i$  แสดงถึง ค่าความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณชาयน์ ณ. ความถี่ใดๆ

$T$  แสดงถึง ค่าเฟสของสัญญาณชาयน์ที่ต้องการพิจารณา

### 3.3.2. ความเพี้ยนฮาร์โมนิกสรวม (Total Harmonic Distortion: THD)

ในการสื่อสาร โดยทั่วไปนั้น มีจุดประสงค์ที่ต้องการให้สัญญาณนั้นสามารถไปถึงจุดหมายปลายทางได้โดยปราศจากการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ แต่ในทางปฏิบัติสัญญาณมักจะมี ความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น ไม่มากก็น้อย วิธีการที่ใช้วัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากระบบที่นิยมใช้กันอยู่ก็คือ การใช้สัญญาณที่มีลักษณะเป็นรูปชาयน์สมบูรณ (Pure sinusoidal wave) ป้อนเข้าระบบ ซึ่งต้องการทดสอบนั้น แล้วใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyser) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ว่าสัญญาณที่นำมาตรวจสอบนั้นมีฮาร์โมนิกสร่างๆ ประกอบกันมาอยู่เช่นไร มาวิเคราะห์สัญญาณ เอาต์พุต ของระบบว่ามีฮาร์โมนิกสร่าง นอกจกคลืนมูลฐาน ( Fundamental harmonic ) หรือไม่ ถ้ามีฮาร์โมนิกสร่างเกิดขึ้นในสัญญาณเอาต์พุตก็แสดงว่าระบบที่กำลังทดสอบนั้น เป็นระบบที่จะทำให้สัญญาณที่ผ่านตัวมันเกิดความผิดเพี้ยนขึ้น ทั้งนี้เพราะเรารู้ว่าสัญญาณรูปชาयน์สมบูรณนั้นมีความถี่เฉพาะความถี่เดียว การที่เอาต์พุตของระบบนั้นเกิดมีฮาร์โมนิกสร่างอื่นขึ้นมาอยู่ด้วยนั้น แสดงให้รู้ว่าสัญญาณเอาต์พุต ที่เกิดขึ้นจะต้องมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณชาयน์สมบูรณนั่นเอง การที่สัญญาณจะมีความผิดเพี้ยนมากหรือน้อยเท่าไรนั้น ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของฮาร์โมนิกสร่างๆที่เกิดขึ้น ดังนั้นวิธีหนึ่งที่จะบอกให้รู้ว่าสัญญาณเอาต์พุตนั้นเกิดความผิดเพี้ยนมากหรือน้อยก็คือ การหาอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังเฉลี่ยอาร์เอ็มเอส (RMS) ของผลรวมฮาร์โมนิกสร่าง อื่นๆนอกจากคลืนมูลฐานเทียบกับค่ากำลังเฉลี่ยอาร์เอ็มเอส (RMS) ของผลรวมฮาร์โมนิกสร่าง อื่นๆ รวมกับคลืนมูลฐาน ดังนั้นค่าที่ได้ออกมาจากการวัดตามวิธีการดังกล่าวนี้ว่า ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกสรวม (Total Harmonic Distortion: THD) แสดงได้ดังสมการที่ 3.29

$$\%THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n V_i^2}{V_1^2 + \sum_{i=2}^n V_i^2}} \times 100 \quad (3.47)$$

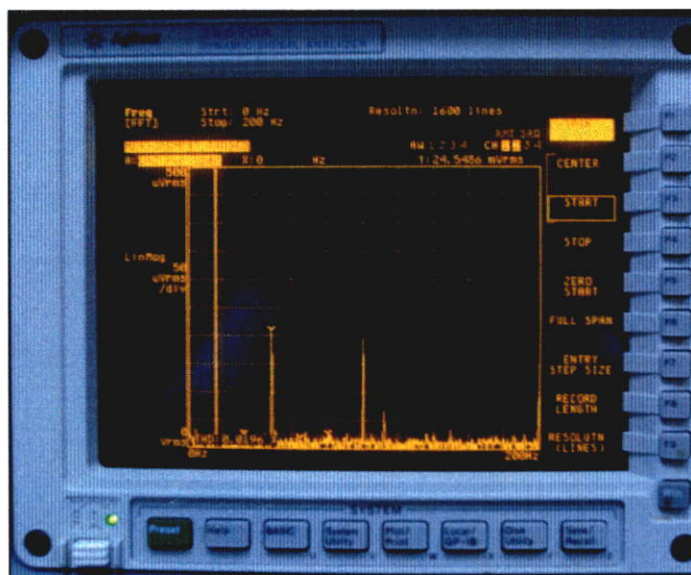
เมื่อ  $V_1$  แสดงถึง ขนาดของฮาร์โมนิกสร่างคลืนมูลฐานที่มีหน่วย RMS

$V_i$  แสดงถึง ขนาดของฮาร์โมนิกสร่างอื่นที่มีหน่วย RMS

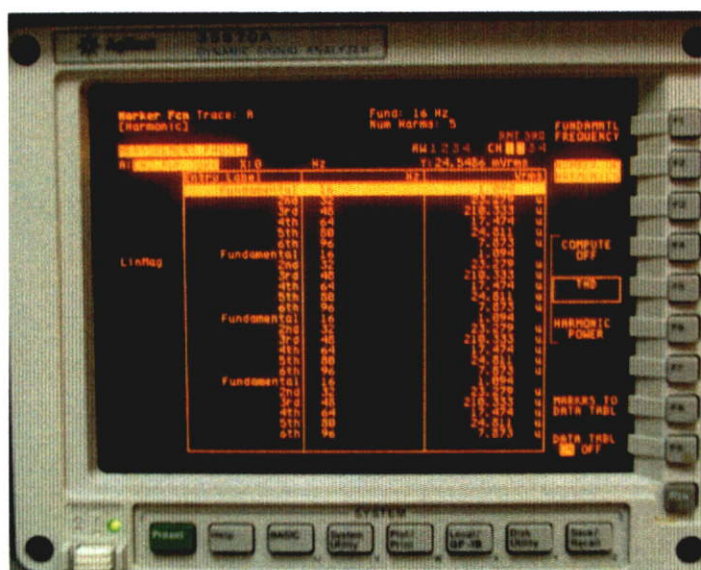
$n$  แสดงถึง จำนวนฮาร์โมนิกสร่าง

เช่นการหาค่า  $\%THD$  ที่ 1 กำหนดความถี่คลื่นมูลฐานมีค่า  $f = 1\text{Hz}$ ,  $f_s = 500\text{Hz}$  จำนวนฮาร์มอนิกส์  $n = 5$

วิธีการ การหาค่า  $\%THD$  เริ่มจากสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f = 1\text{Hz}$ ,  $f_s = 500\text{Hz}$  ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 จากนั้นทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ (Dynamic Signal Analyzer) โดยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์จะวิเคราะห์องค์ประกอบของสัญญาณในรูปฮาร์มอนิกส์ได้ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแสดงได้ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.15 การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์



รูปที่ 3.16 ข้อมูลของขนาดของฮาร์มอนิกส์ ณ ตำแหน่งใดๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์

ตารางที่ 3.1 ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณขาอินพุตที่ความถี่  $f=1\text{Hz}, f_s=500\text{Hz}$

| ลำดับฮาร์โมนิกส์        | ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ( $V_{\text{RMS}}$ ) |
|-------------------------|---|
| ความถี่มูลฐาน (1 Hz)    | 1.072                                   |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (2 Hz) | $31.331 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (3 Hz) | $213.674 \times 10^{-6}$                |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 (4 Hz) | $11.646 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (5 Hz) | $30.32 \times 10^{-6}$                  |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 (6 Hz) | $6.724 \times 10^{-6}$                  |

จากนั้นนำในตารางที่ 3.1 มาหาค่า %THD โดยใช้สมการที่ 3.47 จะได้ดังสมการที่ 3.48

$$\%THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{31.331}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{213.674}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.646}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{30.32}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{6.724}{10^6}\right)^2}{(1.072)^2 + \left(\frac{31.331}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{213.674}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.646}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{30.32}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{6.724}{10^6}\right)^2}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{\frac{4.7738353729 \times 10^{-8}}{1.14918404773835}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{4.154108632377139 \times 10^{-8}} \times 100$$

$$\%THD = (2.038163053432462 \times 10^{-4}) \times 100$$

$$\%THD = 0.02038163053432 \quad (3.48)$$

เช่นการหาค่า %THD ที่ 2 กำหนดความถี่คลื่นมูลฐานมีค่า  $f = 3\text{Hz}$ ,  $f_s = 500\text{Hz}$  จำนวนฮาร์โมนิกส์  $n = 5$

วิธีการ การหาค่า %THD เริ่มจากสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ความถี่  $f = 3\text{Hz}$ ,  $f_s = 500\text{Hz}$  ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 จากนั้นทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ ซึ่งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์จะวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสัญญาณในรูปฮาร์โมนิกส์ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณไซน์ที่ความถี่  $f=3\text{Hz}$ ,  $f_s = 500\text{Hz}$

| ลำดับฮาร์โมนิกส์         | ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ( $V_{\text{RMS}}$ ) |
|--------------------------|---|
| ความถี่มูลฐาน (3 Hz)     | 1.142                                   |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (6 Hz)  | $12.874 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (9 Hz)  | $236.882 \times 10^{-6}$                |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 (12 Hz) | $3.883 \times 10^{-6}$                  |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (15 Hz) | $30.731 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 (18 Hz) | $10.423 \times 10^{-6}$                 |

จากนั้นนำในตารางที่ 3.2 มาหาค่า %THD โดยใช้สมการที่ 3.47 จะได้ดังสมการ 3.49

$$\%THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{12.874}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{236.882}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{3.883}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{30.731}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{10.423}{10^6}\right)^2}{(1.142)^2 + \left(\frac{12.874}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{236.882}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{3.883}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{30.731}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{10.423}{10^6}\right)^2}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{\frac{5.7346932779 \times 10^{-8}}{1.30416405734693}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{4.397217700943327 \times 10^{-8}} \times 100$$

$$\%THD = (2.096954386948683 \times 10^{-4}) \times 100$$

$$\%THD = 0.02096954386949 \quad (3.49)$$

เช่นการหาค่า %THD ที่ 3 กำหนดความถี่คลื่นมูลฐานมีค่า  $f = 12\text{Hz}$ ,  $f_s = 5\text{kHz}$  จำนวนฮาร์โมนิกส์  $n = 5$

วิธีการ การหาค่า %THD เริ่มจากสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f = 12\text{Hz}$ ,  $f_s = 5\text{kHz}$  ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 จากนั้นทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ ซึ่งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์จะวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสัญญาณในรูปฮาร์โมนิกส์ได้ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ณ.ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f = 12\text{Hz}$ ,  $f_s = 5\text{kHz}$

| ลำดับฮาร์โมนิกส์         | ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ( $V_{\text{RMS}}$ ) |
|--------------------------|---|
| ความถี่มูลฐาน (12 Hz)    | 0.993992                                |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (24 Hz) | $27.871 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (36 Hz) | $135.924 \times 10^{-6}$                |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 (48 Hz) | $3.024 \times 10^{-6}$                  |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (60 Hz) | $70.153 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 (72 Hz) | $3.928 \times 10^{-6}$                  |

จากนั้นนำในตารางที่ 3.3 มาหาค่า %THD โดยใช้สมการที่ 3.47 จะได้ดังสมการที่ 3.50

$$\%THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{31.331}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{213.674}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.646}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{30.32}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{6.724}{10^6}\right)^2}{(0.993992)^2 + \left(\frac{31.331}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{213.674}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.646}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{30.32}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{6.724}{10^6}\right)^2}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{\frac{2.4198143586 \times 10^{-8}}{0.98802012026214}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{2.449154940243494 \times 10^{-8}} \times 100$$

$$\%THD = (1.564977616531142 \times 10^{-4}) \times 100$$

$$\%THD = 0.01564977616531 \quad (3.50)$$

เช่นการหาค่า %THD ที่ 4 กำหนดความถี่คลื่นมูลฐานมีค่า  $f = 45\text{Hz}$ ,  $f_s = 5\text{kHz}$  จำนวนฮาร์โมนิกส์  $n = 5$

วิธีการ การหาค่า %THD เริ่มจากสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f = 45\text{Hz}$ ,  $f_s = 5\text{ kHz}$  ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 จากนั้นทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ ซึ่งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์จะวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสัญญาณในรูปฮาร์โมนิกส์ได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f=45\text{Hz}$ ,  $f_s = 5\text{kHz}$

| ลำดับฮาร์โมนิกส์          | ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ( $V_{\text{RMS}}$ ) |
|---------------------------|---|
| ความถี่มูลฐาน (45 Hz)     | 1.097                                   |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (90 Hz)  | $16.951 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (135 Hz) | $269.19 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 (180 Hz) | $11.686 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (225 Hz) | $43.335 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 (270 Hz) | $11.271 \times 10^{-6}$                 |

จากนั้นนำในตารางที่ 3.4 มาหาค่า %THD โดยใช้สมการที่ 3.47 จะได้ดังสมการที่ 3.51

$$\%THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{16.951}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{269.19}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.686}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{43.335}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.271}{10^6}\right)^2}{(1.097)^2 + \left(\frac{16.951}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{269.19}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.686}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{43.335}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{11.271}{10^6}\right)^2}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{\frac{7.489211276299999 \times 10^{-8}}{1.20340907489211}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{6.223329566441418 \times 10^{-8}} \times 100$$

$$\%THD = (2.494660210618155 \times 10^{-4}) \times 100$$

$$\%THD = 0.02494660210618 \quad (3.51)$$

เช่นการหาค่า %THD ที่ 5 กำหนดความถี่คลื่นมูลฐานมีค่า  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16\text{kHz}$  จำนวนฮาร์โมนิกส์  $n = 5$

วิธีการ การหาค่า %THD เริ่มจากสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16\text{kHz}$  ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 จากนั้นทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ ซึ่งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์จะวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสัญญาณในรูปฮาร์โมนิกส์ได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ณ ตำแหน่งใดๆ ของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f = 80\text{Hz}$ ,  $f_s = 16\text{kHz}$

| ลำดับฮาร์โมนิกส์        | ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ( $V_{\text{RMS}}$ ) |
|-------------------------|---|
| ความถี่มูลฐาน (1 Hz)    | 1.079                                   |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (2 Hz) | $12.221 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (3 Hz) | $155.076 \times 10^{-6}$                |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 (4 Hz) | $5.428 \times 10^{-6}$                  |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (5 Hz) | $9.039 \times 10^{-6}$                  |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 (6 Hz) | $7.561 \times 10^{-6}$                  |

จากนั้นนำในตารางที่ 3.5 มาหาค่า %THD โดยใช้สมการที่ 3.47 จะได้ดังสมการที่ 3.52

$$\%THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{12.221}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{155.076}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{5.428}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{9.039}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{7.561}{10^6}\right)^2}{(1.079)^2 + \left(\frac{12.221}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{155.076}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{5.428}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{9.039}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{7.561}{10^6}\right)^2}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{\frac{2.436625404299999 \times 10^{-8}}{1.16424102436625}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{2.092887429066811 \times 10^{-8}} \times 100$$

$$\%THD = (1.446681523026686 \times 10^{-4}) \times 100$$

$$\%THD = 0.01446681523027 \quad (3.52)$$

ตัวอย่างการหาค่า %THD ที่ 6 กำหนดความถี่คลื่นมูลฐานมีค่า  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$  จำนวนฮาร์โมนิกส์  $n = 5$

วิธีการ การหาค่า %THD เริ่มจากสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$  ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 จากนั้นทำการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ ซึ่งเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์จะวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสัญญาณในรูปฮาร์โมนิกส์ได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ณ ตำแหน่งใดๆของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่  $f=100\text{Hz}$ ,  $f_s=16 \text{ kHz}$

| ลำดับฮาร์โมนิกส์          | ขนาดของฮาร์โมนิกส์ ( $V_{\text{RMS}}$ ) |
|---------------------------|---|
| ความถี่มูลฐาน (100 Hz)    | 1.015                                   |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (200 Hz) | $15.057 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (300 Hz) | $62.563 \times 10^{-6}$                 |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 (400 Hz) | $5.524 \times 10^{-6}$                  |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (500 Hz) | $3.918 \times 10^{-6}$                  |
| ฮาร์โมนิกส์ที่ 6 (600 Hz) | $5.558 \times 10^{-6}$                  |

จากนั้นนำในตารางที่ 3.6 มาหาค่า %THD โดยใช้สมการที่ 3.47 จะได้ดังสมการที่ 3.53

$$\%THD = \sqrt{\frac{\left(\frac{15.057}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{62.563}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{5.524}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{3.918}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{5.558}{10^6}\right)^2}{(1.015)^2 + \left(\frac{15.057}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{62.563}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{5.524}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{3.918}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{5.558}{10^6}\right)^2}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{\frac{4.217598882 \times 10^{-9}}{1.03022500421760}} \times 100$$

$$\%THD = \sqrt{4.09386188913464 \times 10^{-9}} \times 100$$

$$\%THD = (6.398329382842555 \times 10^{-5}) \times 100$$

$$\%THD = 0.00639832938284 \quad (3.53)$$

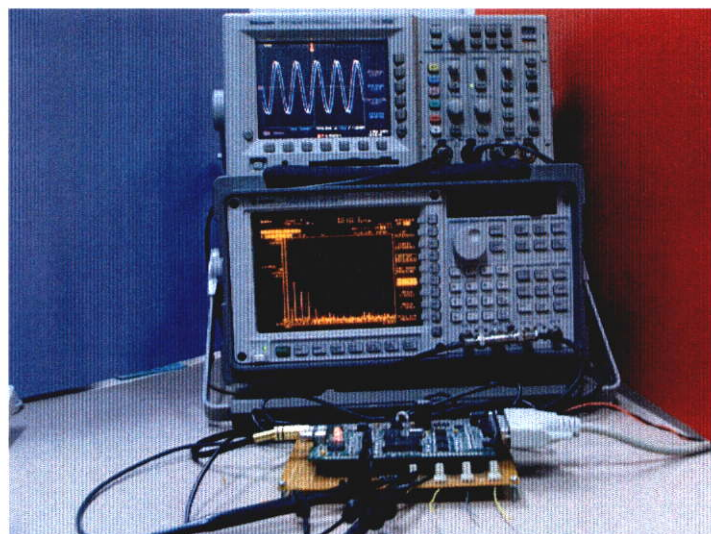
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอได้ กำหนดความถี่อยู่ในช่วง 1-100Hz โดยทุกความถี่จะมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณชายน้  $\phi = \pm \frac{\pi}{6}, \pm \frac{3\pi}{4}, \pm \frac{\pi}{4}, \pm \frac{2\pi}{3}, \pm \frac{\pi}{3}, \pm \frac{\pi}{2}, \pi$  และความถี่สุ่มมีค่า  $f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$  ซึ่งผลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. จำลองการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอ โดยใช้โปรแกรม MATLAB
2. สร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอ ด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณเชิงเลข TMS320C31
3. กำหนดหาค่าความผิดพลาดของตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนเฟส โดยใช้หลักการคำนวณค่าความผิดพลาดวิธีที่ 3 ตามหลักการที่นำเสนอ
4. หาความผิดเพี้ยนของสัญญาณชายน้ที่เกิดขึ้น ในรูปผลรวมความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์ (Total Harmonic Distortion:THD) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ (Dynamic Signal Analyzer)

Hardware และเครื่องมือวัดทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองสร้างตัวกำเนิดสัญญาณชายน้ที่มีการเลื่อนเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

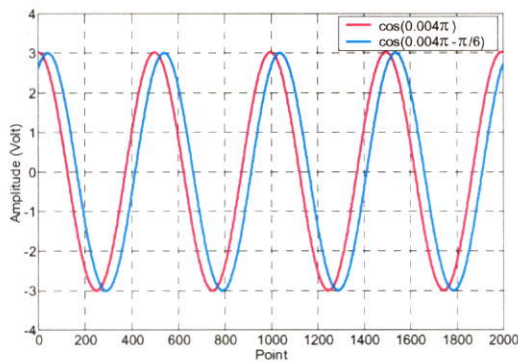


รูปที่ 4.1 Hardware และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด

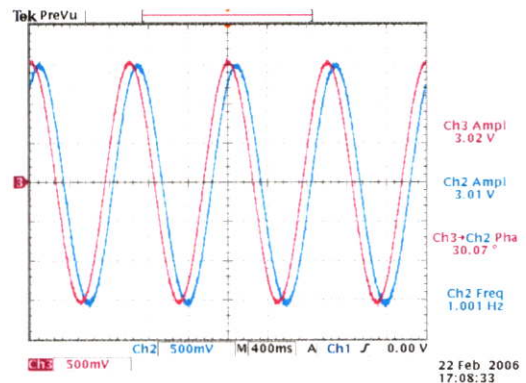
#### 4.1 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการจำลองและการสร้างจริง

ในผลการทดลองนี้จะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟสด้วยโปรแกรม MATLAB กับ การสร้างสัญญาณจริงด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณเชิงเลข TMS320C31 และสามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟส โดยใช้หลักการหาค่าความผิดพลาดของสัญญาณไซน์ที่มีการเลื่อนเฟสวิธีที่ 3 ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังนี้

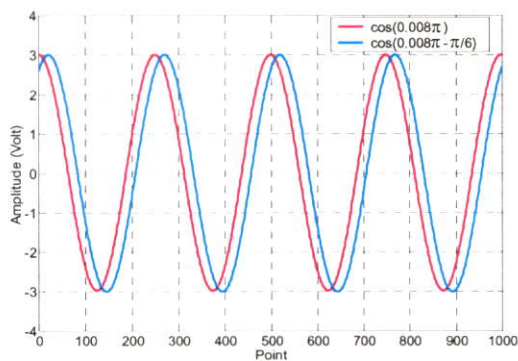
ผลการทดลองที่ 1 ความถี่ของสัญญาณไซน์อยู่ในช่วง 1-100Hz,  $\phi = \frac{\pi}{6}$  และความถี่สุ่มมีค่า  $f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$



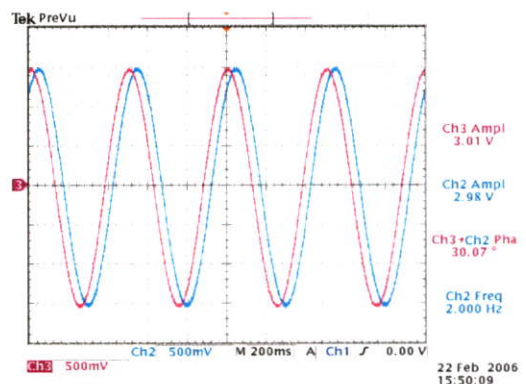
รูปที่ 4.2a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{Hz}$



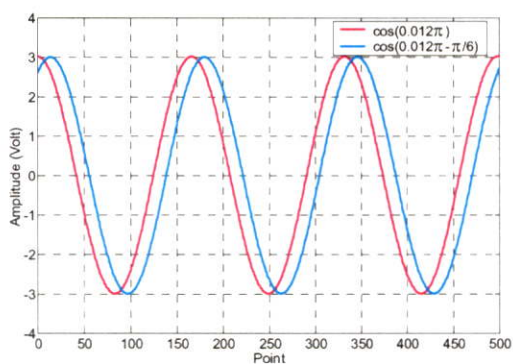
รูปที่ 4.2b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



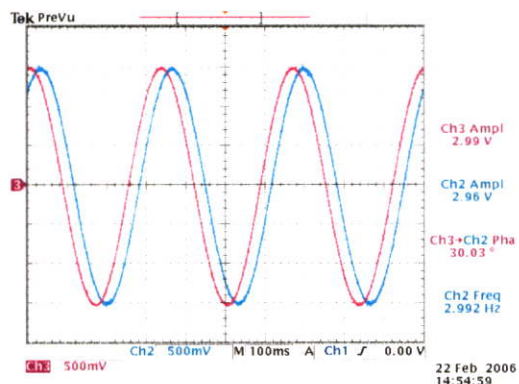
รูปที่ 4.3a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



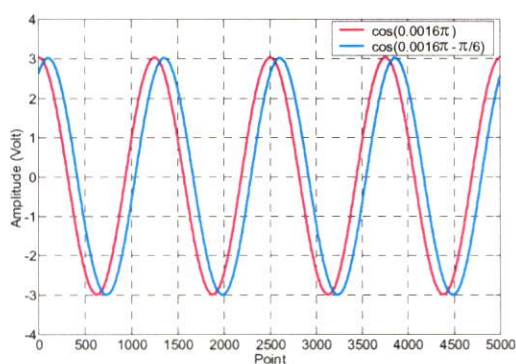
รูปที่ 4.3b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



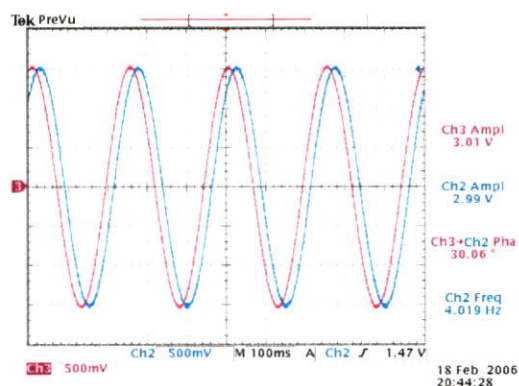
รูปที่ 4.4a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 3 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 500 \text{ Hz}$



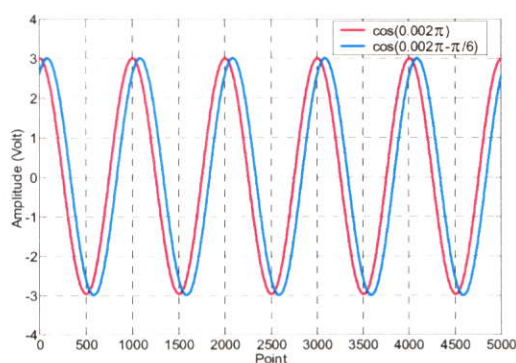
รูปที่ 4.4b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 3 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 500 \text{ Hz}$



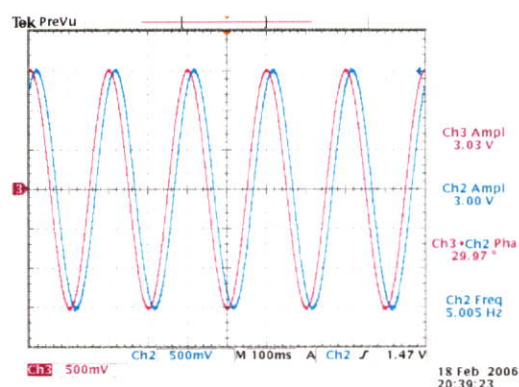
รูปที่ 4.5a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



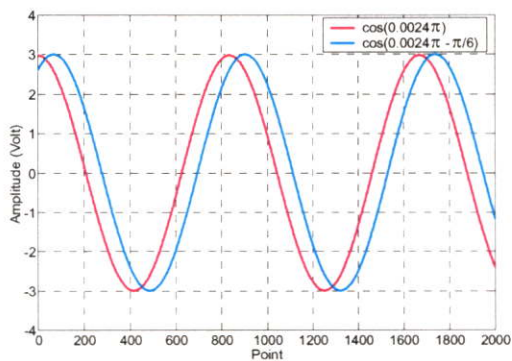
รูปที่ 4.5b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



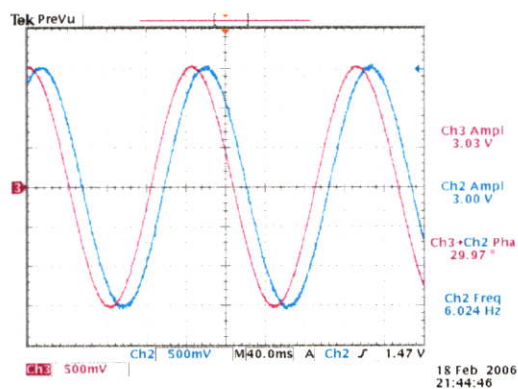
รูปที่ 4.6a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



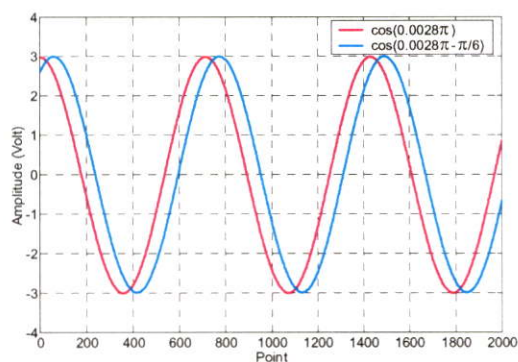
รูปที่ 4.6b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



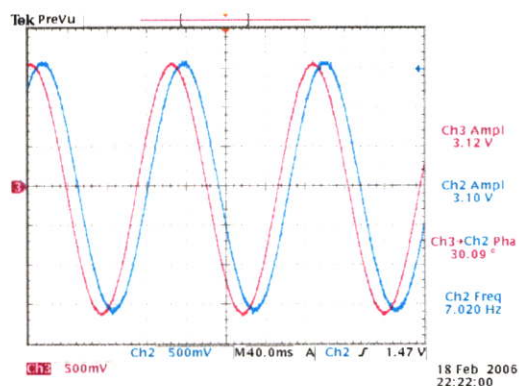
รูปที่ 4.7a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



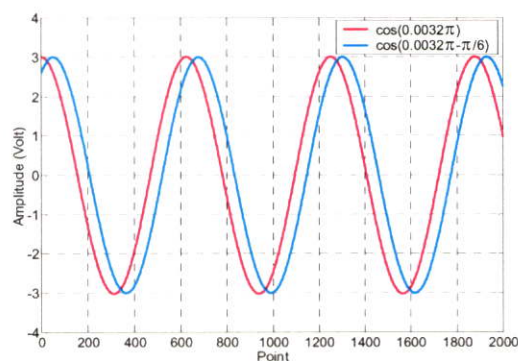
รูปที่ 4.7b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



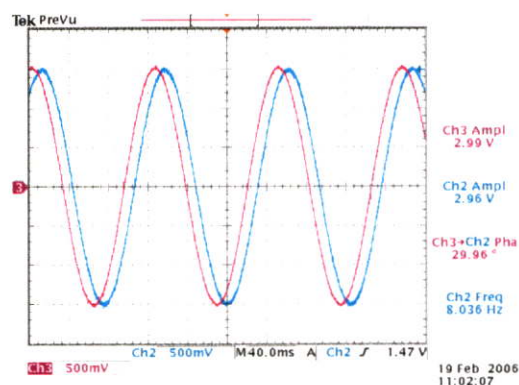
รูปที่ 4.8a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



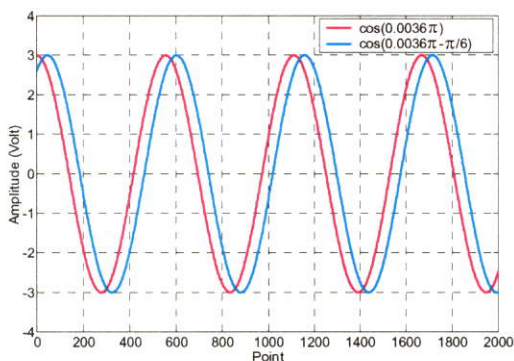
รูปที่ 4.8b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



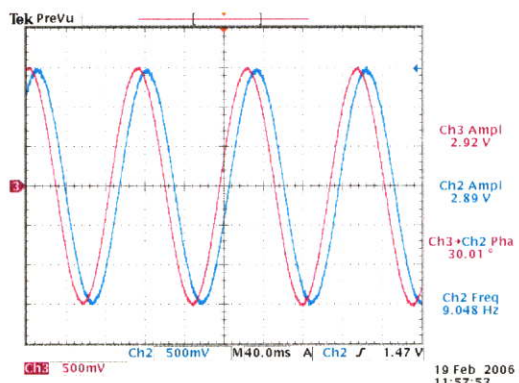
รูปที่ 4.9a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



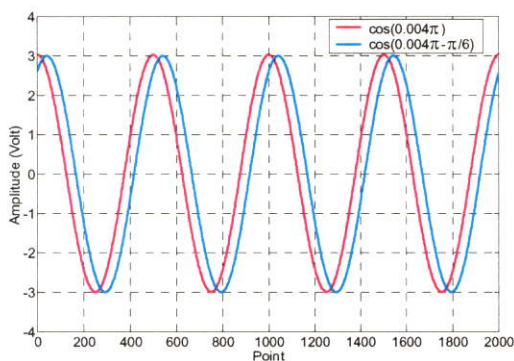
รูปที่ 4.9b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



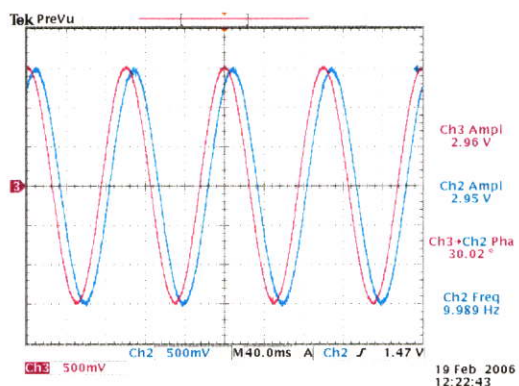
รูปที่ 4.10a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



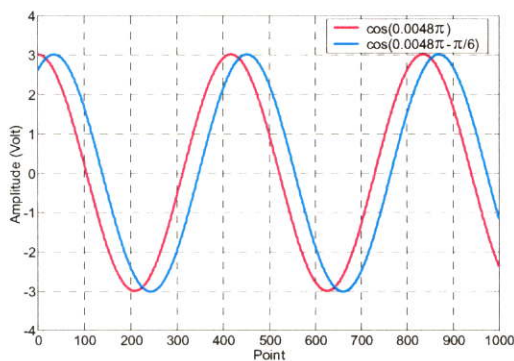
รูปที่ 4.10b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



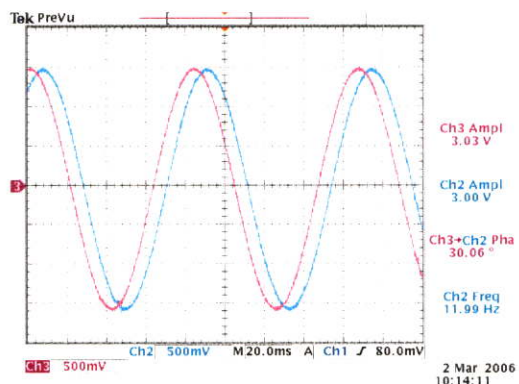
รูปที่ 4.11a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



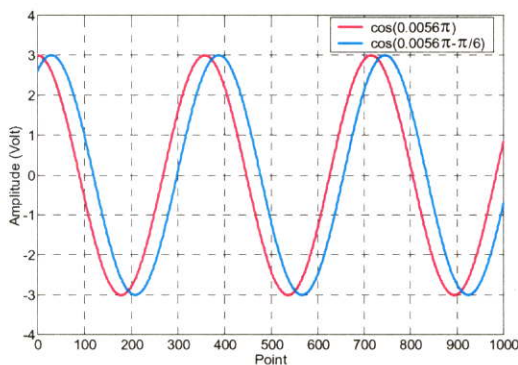
รูปที่ 4.11b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



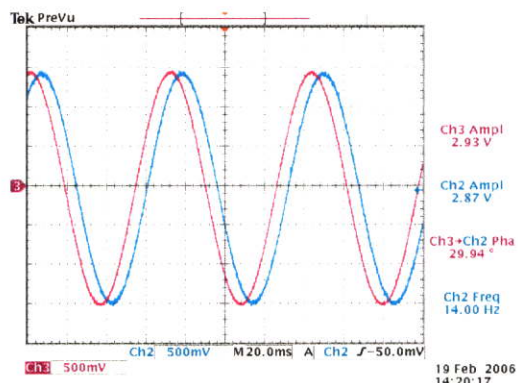
รูปที่ 4.12a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



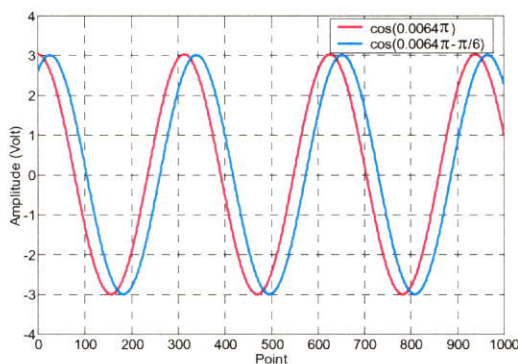
รูปที่ 4.12b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



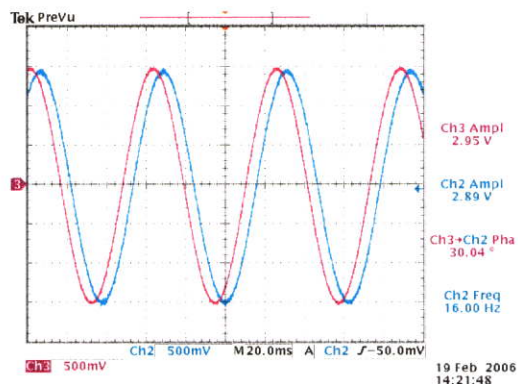
รูปที่ 4.13a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



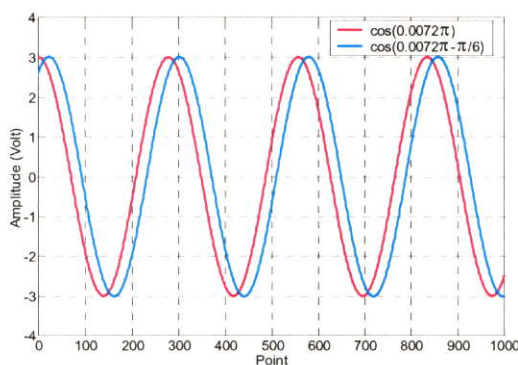
รูปที่ 4.13b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



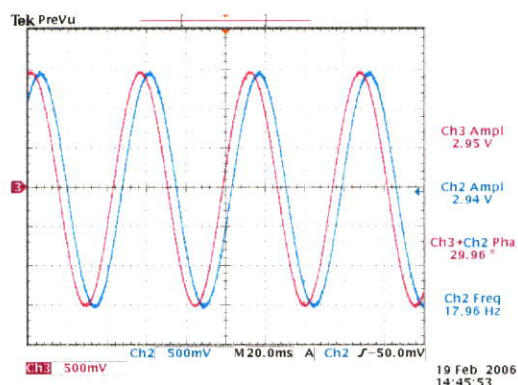
รูปที่ 4.14a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



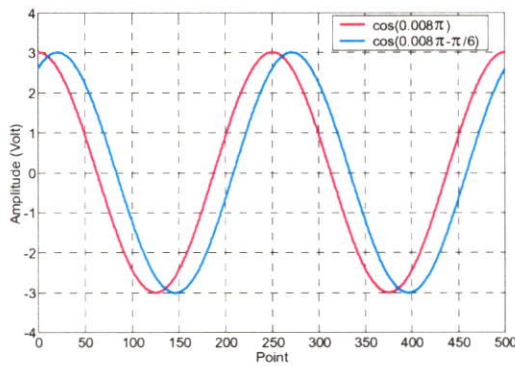
รูปที่ 4.14b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



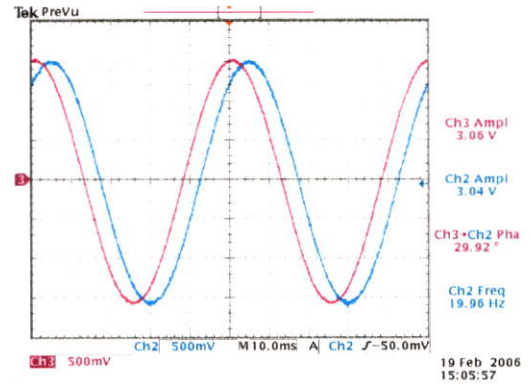
รูปที่ 4.15a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



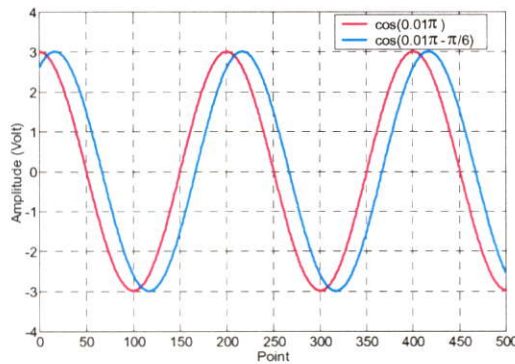
รูปที่ 4.15b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



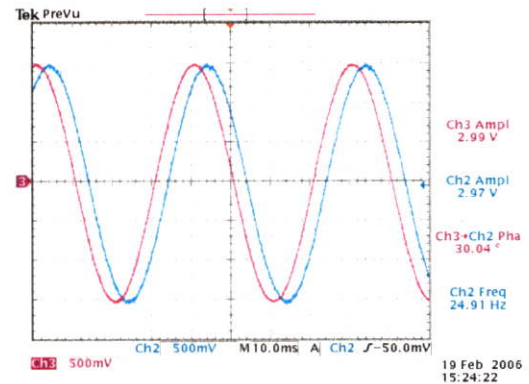
รูปที่ 4.16a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



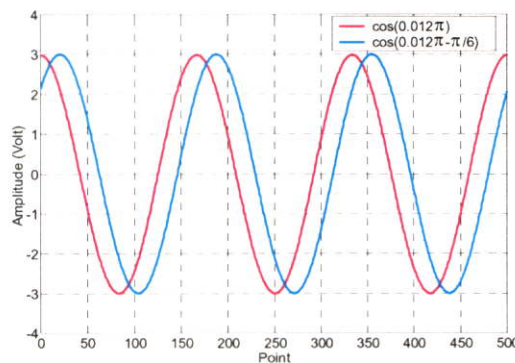
รูปที่ 4.16b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



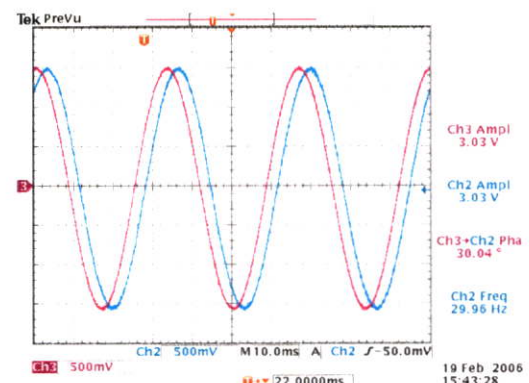
รูปที่ 4.17a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



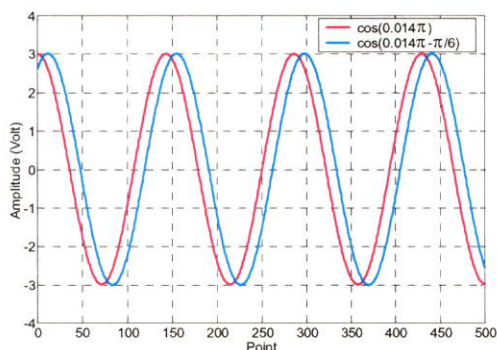
รูปที่ 4.17b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



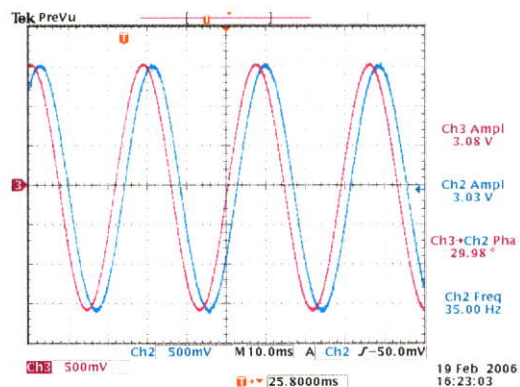
รูปที่ 4.18a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



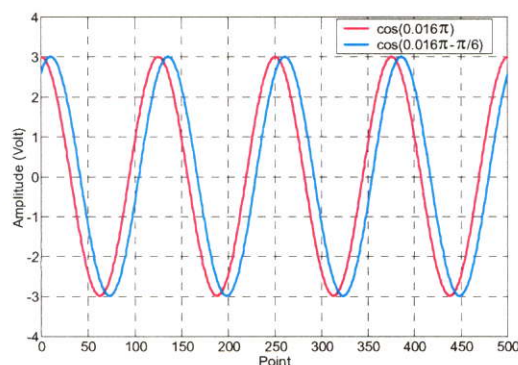
รูปที่ 4.18b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



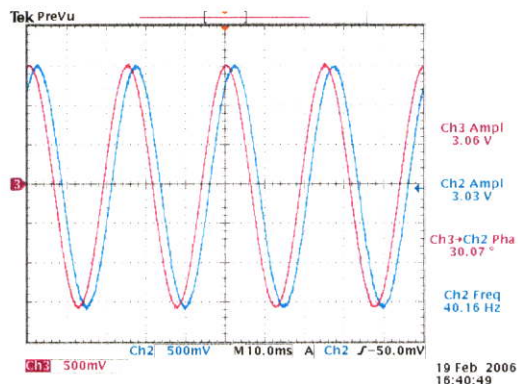
รูปที่ 4.19a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



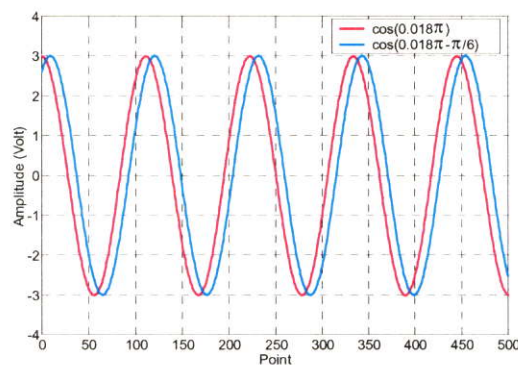
รูปที่ 4.19b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



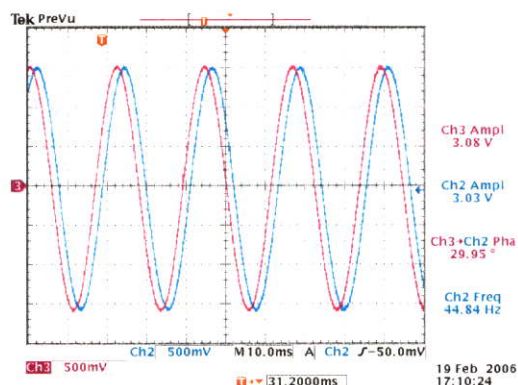
รูปที่ 4.20a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



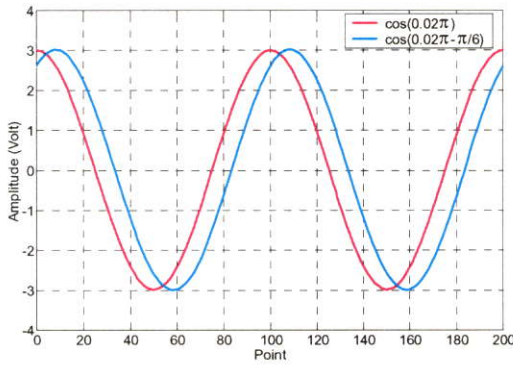
รูปที่ 4.20b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



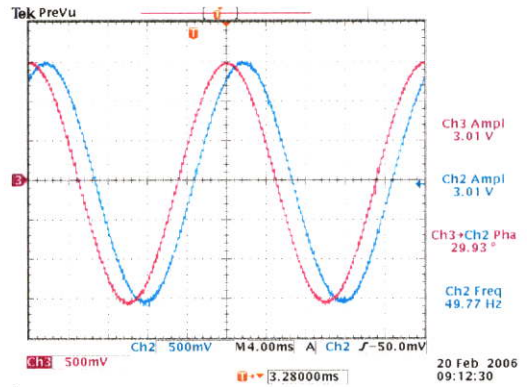
รูปที่ 4.21a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



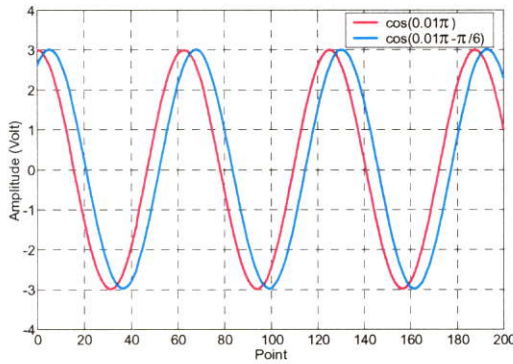
รูปที่ 4.21b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



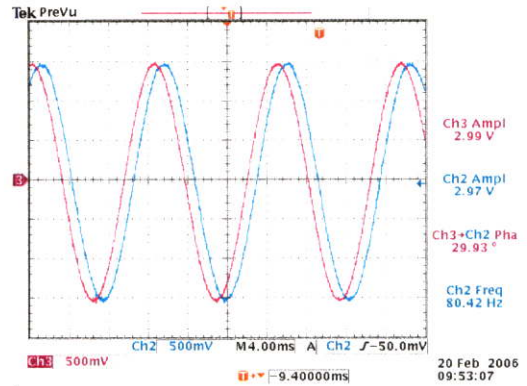
รูปที่ 4.22a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



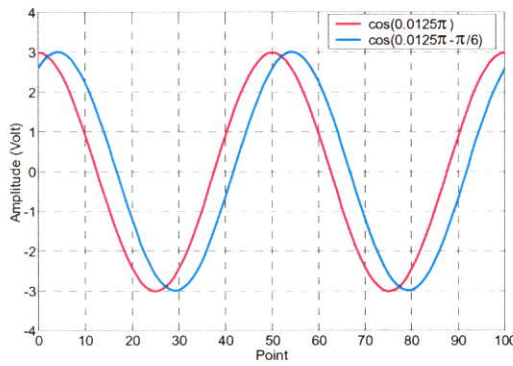
รูปที่ 4.22b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



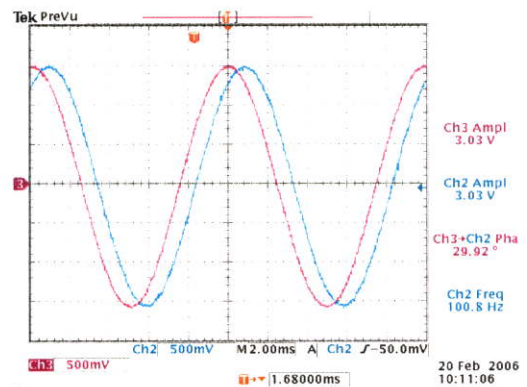
รูปที่ 4.23a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



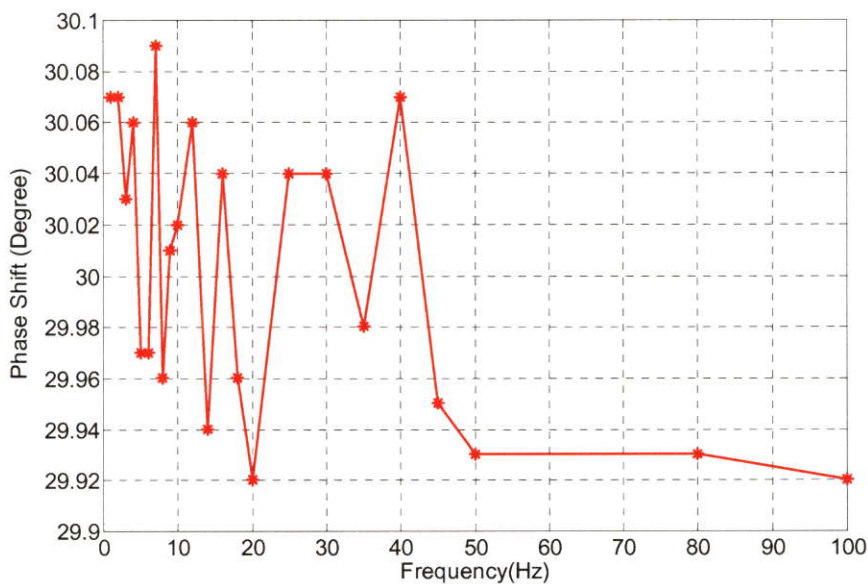
รูปที่ 4.23b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.24a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



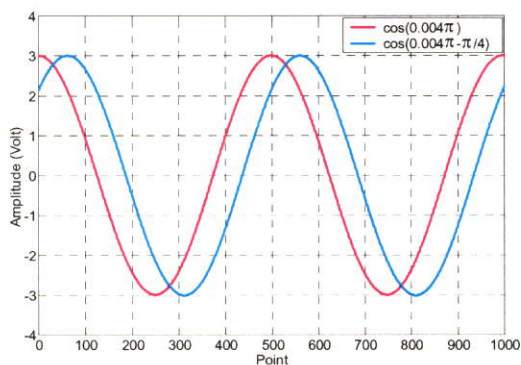
รูปที่ 4.24b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



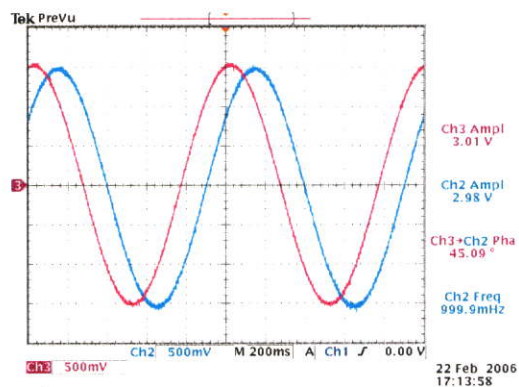
รูปที่ 4.25 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายนที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = \frac{\pi}{6}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 2 ความถี่ของสัญญาณชายน้อยอยู่ในช่วง 1-100Hz ,  $\phi = \frac{\pi}{4}$  และความถี่สุ่มมีค่า

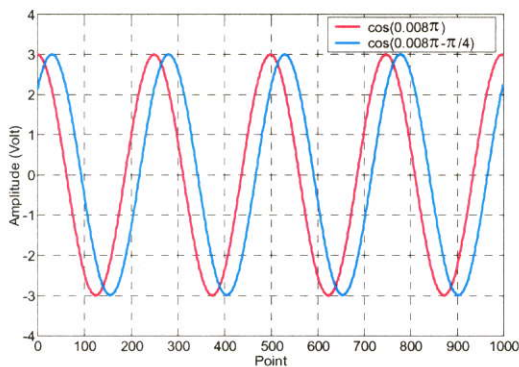
$$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$$



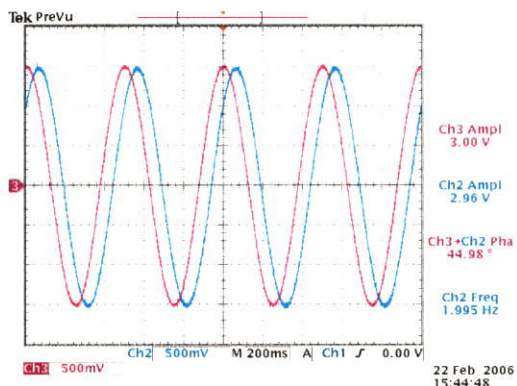
รูปที่ 4.26a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



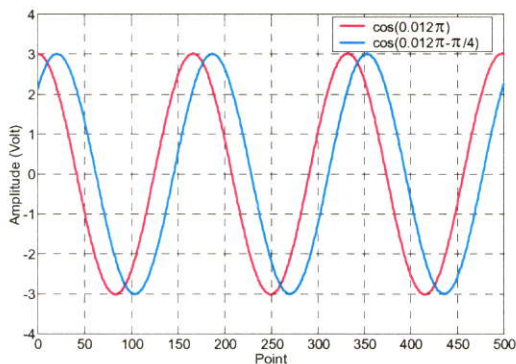
รูปที่ 4.26b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



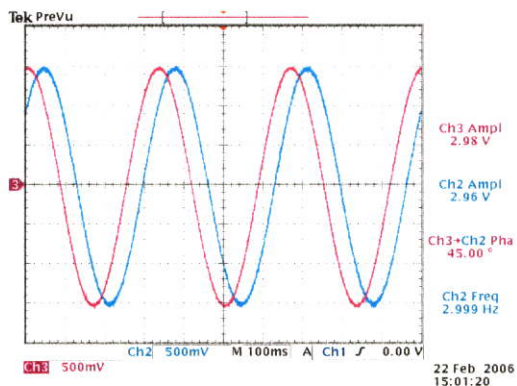
รูปที่ 4.27a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 500 \text{ Hz}$



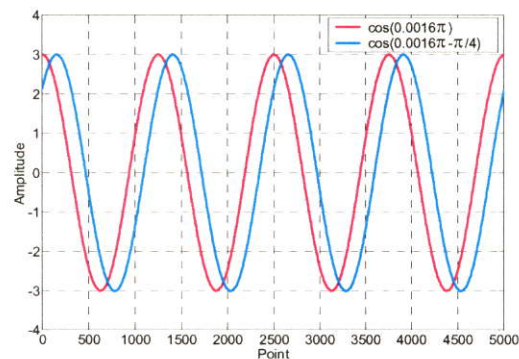
รูปที่ 4.27b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 500 \text{ Hz}$



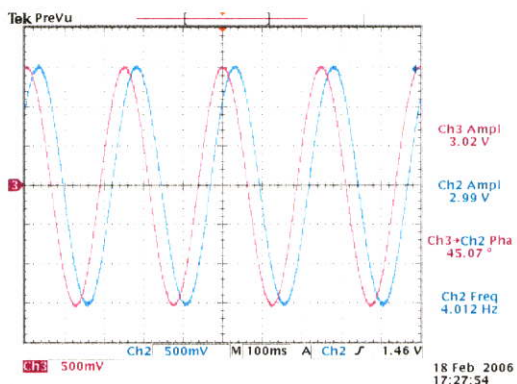
รูปที่ 4.28a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 500 \text{ Hz}$



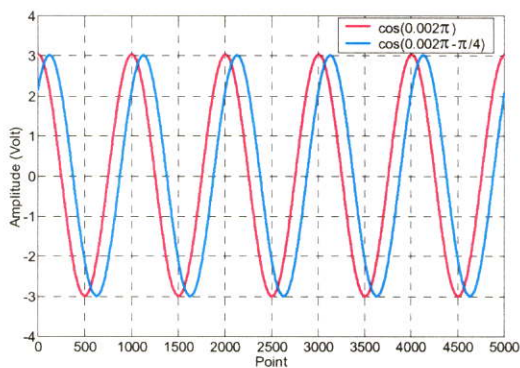
รูปที่ 4.28b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 500 \text{ Hz}$



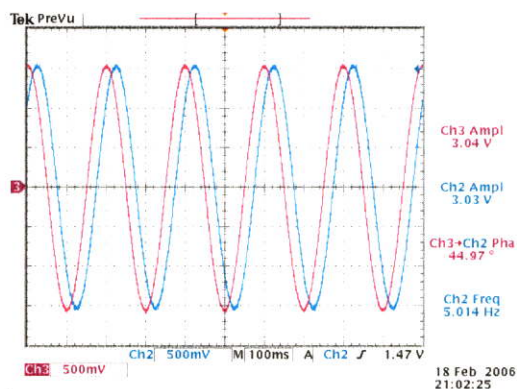
รูปที่ 4.29a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



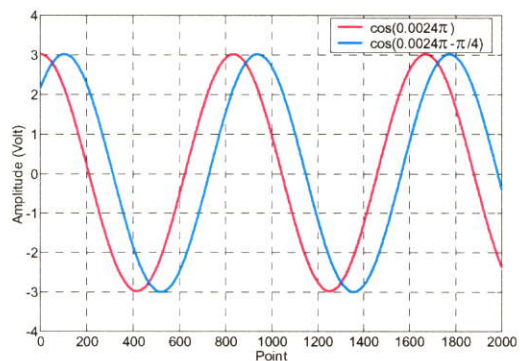
รูปที่ 4.29b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



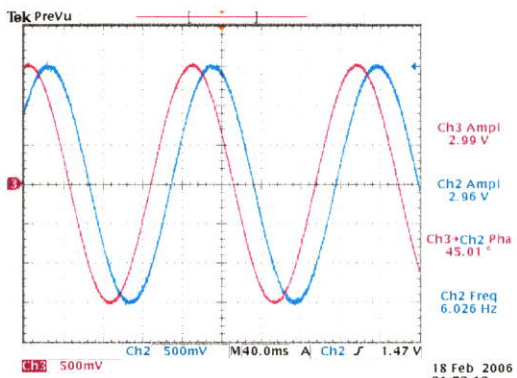
รูปที่ 4.30a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



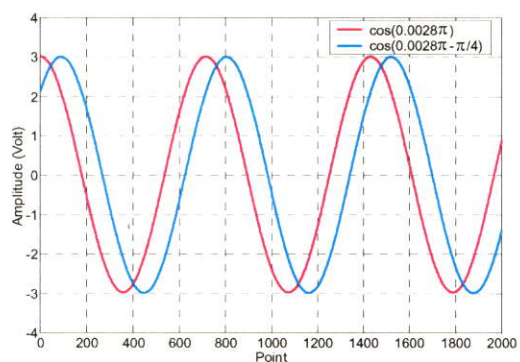
รูปที่ 4.30b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



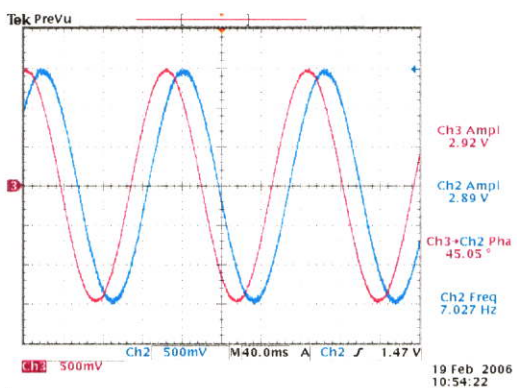
รูปที่ 4.31a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



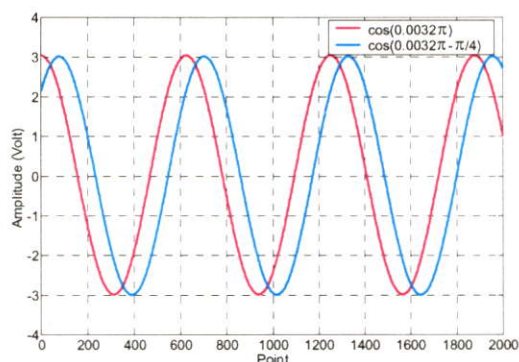
รูปที่ 4.31b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



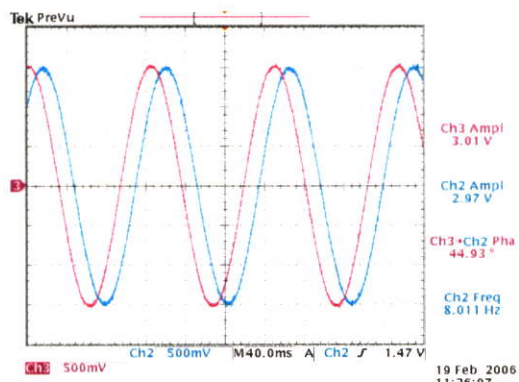
รูปที่ 4.32a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



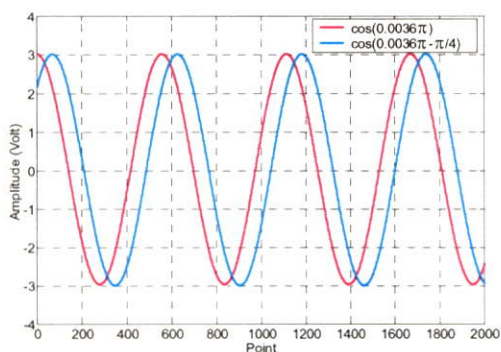
รูปที่ 4.32b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



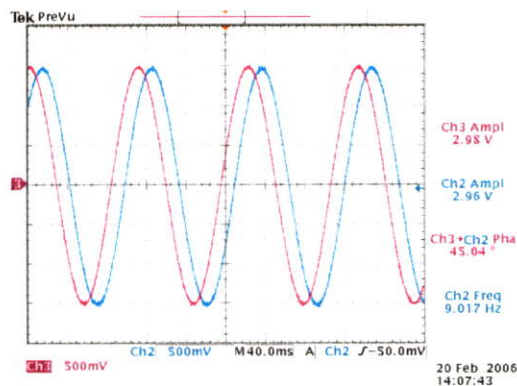
รูปที่ 4.33a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



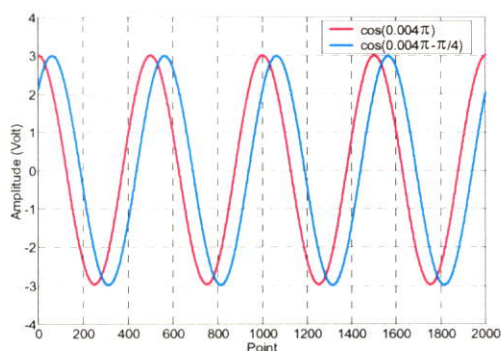
รูปที่ 4.33b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



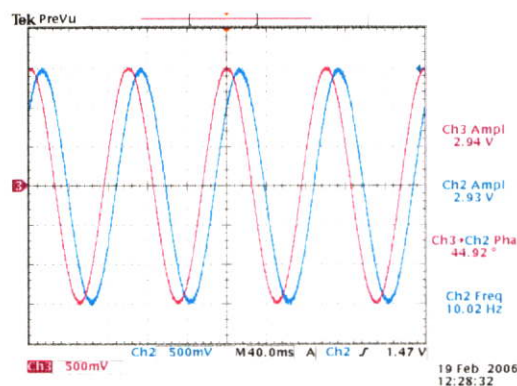
รูปที่ 4.34a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



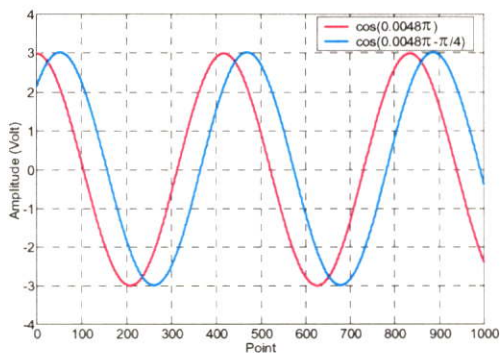
รูปที่ 4.34b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



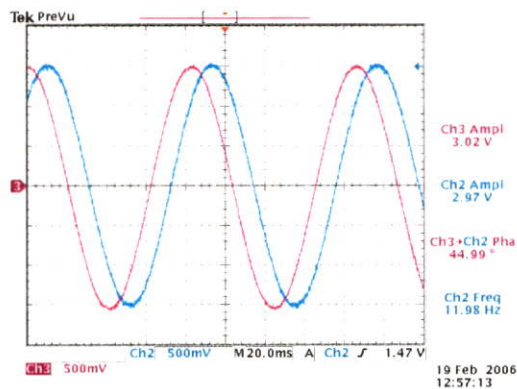
รูปที่ 4.35a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



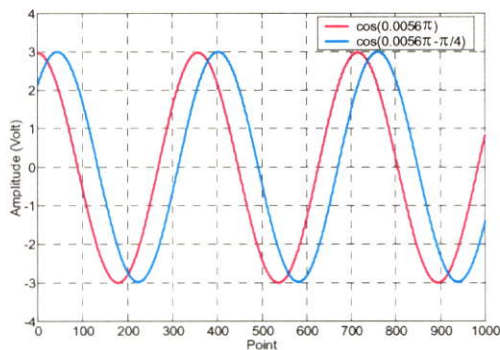
รูปที่ 4.35b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



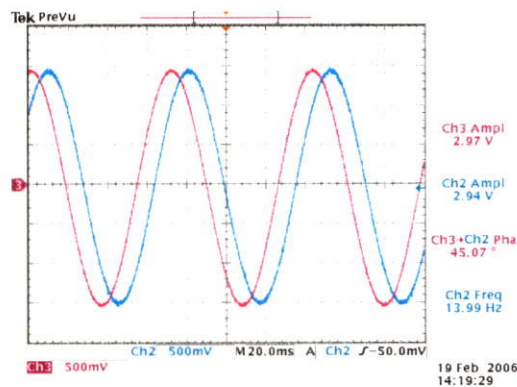
รูปที่ 4.36a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



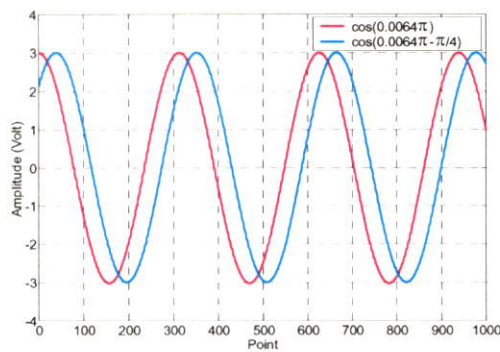
รูปที่ 4.36b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



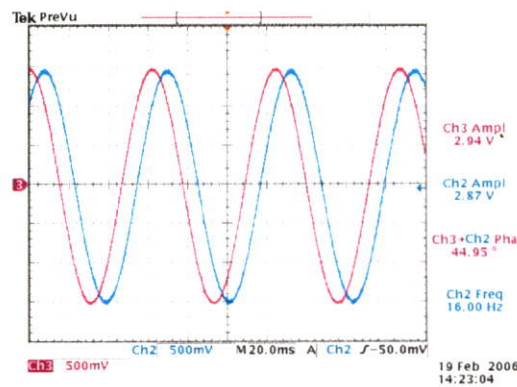
รูปที่ 4.37a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



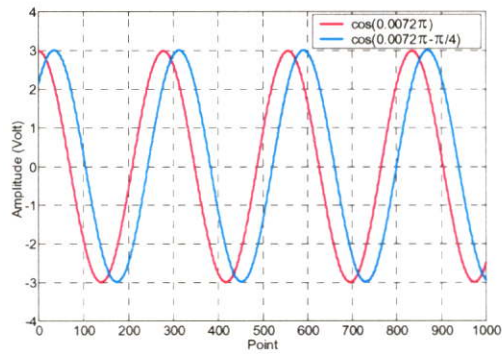
รูปที่ 4.37b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



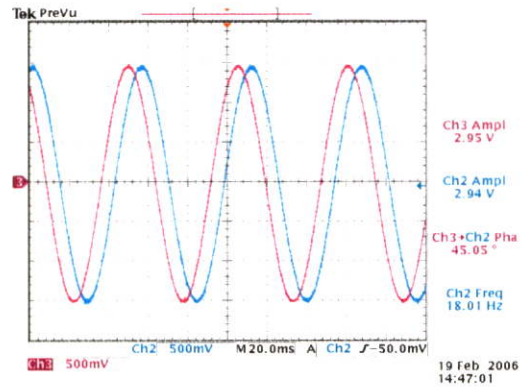
รูปที่ 4.38a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



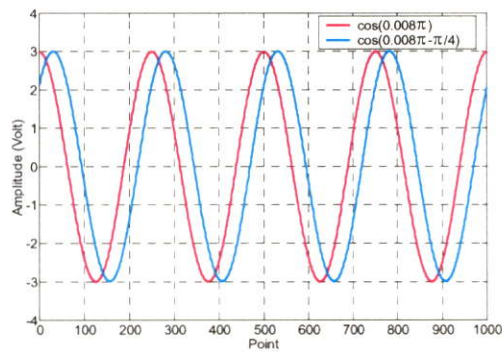
รูปที่ 4.38b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



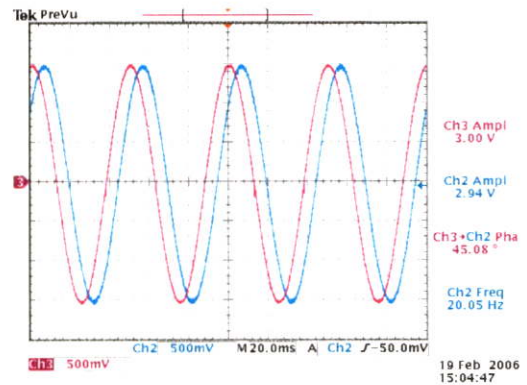
รูปที่ 4.39a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



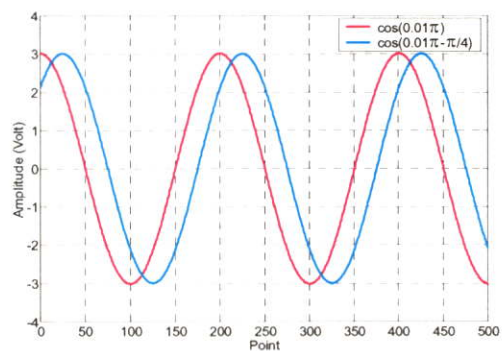
รูปที่ 4.39b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



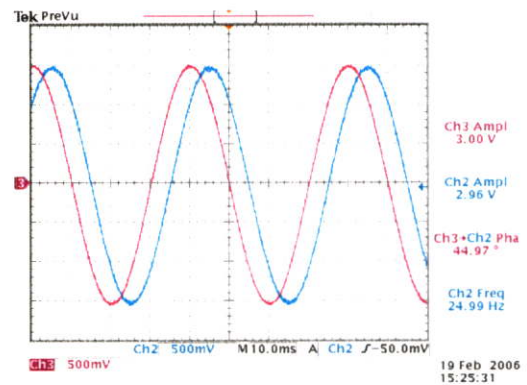
รูปที่ 4.40a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



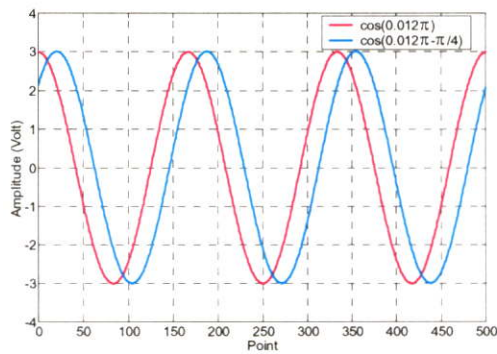
รูปที่ 4.40b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



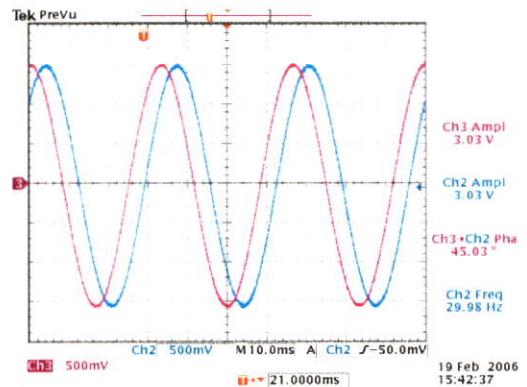
รูปที่ 4.41a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



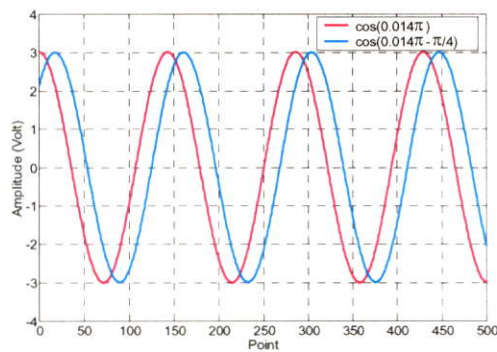
รูปที่ 4.41b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



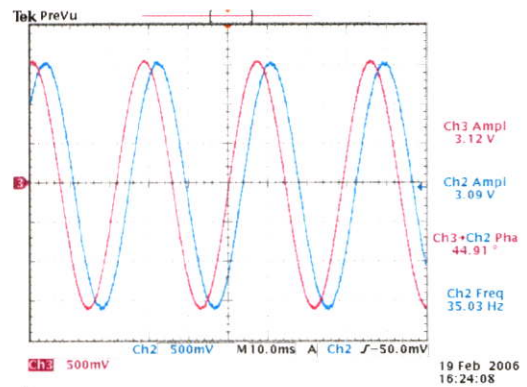
รูปที่ 4.42a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



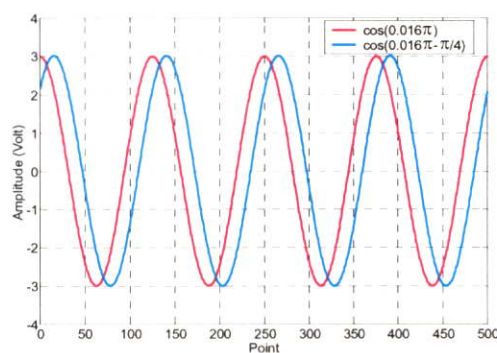
รูปที่ 4.42b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



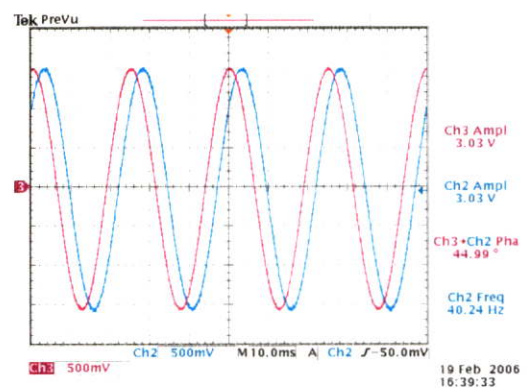
รูปที่ 4.43a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



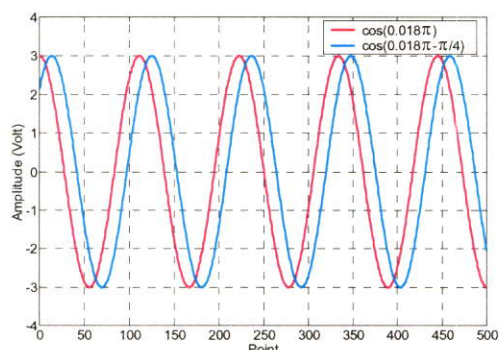
รูปที่ 4.43b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



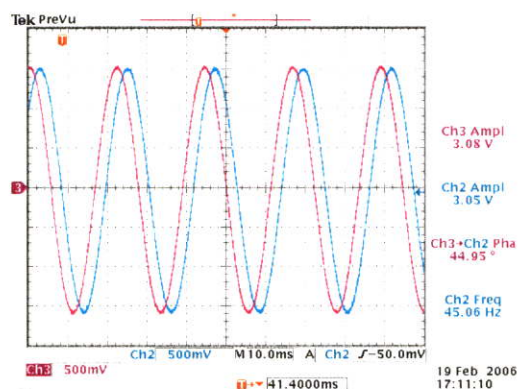
รูปที่ 4.44a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



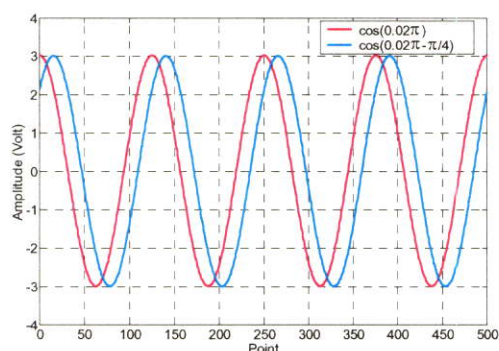
รูปที่ 4.44b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



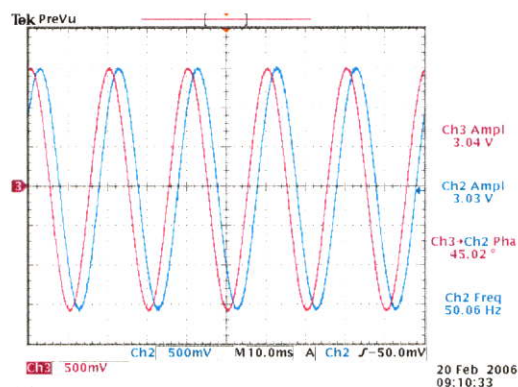
รูปที่ 4.45a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



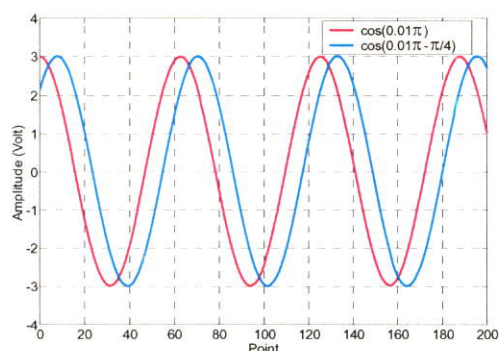
รูปที่ 4.45b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



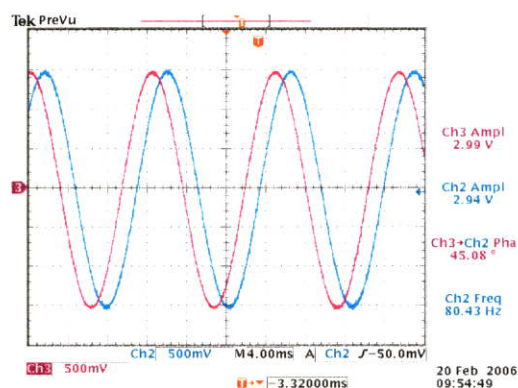
รูปที่ 4.46a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



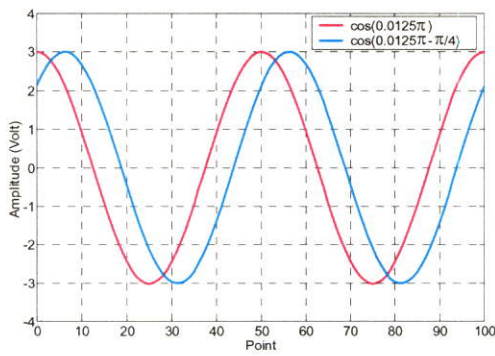
รูปที่ 4.46b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



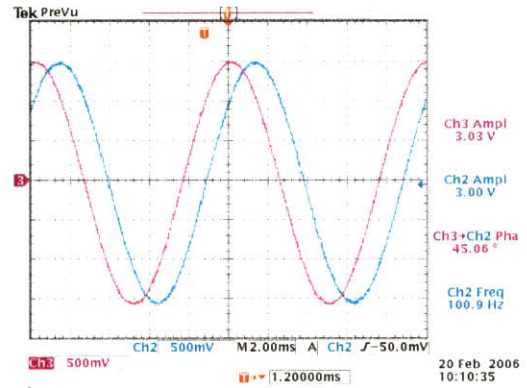
รูปที่ 4.47a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



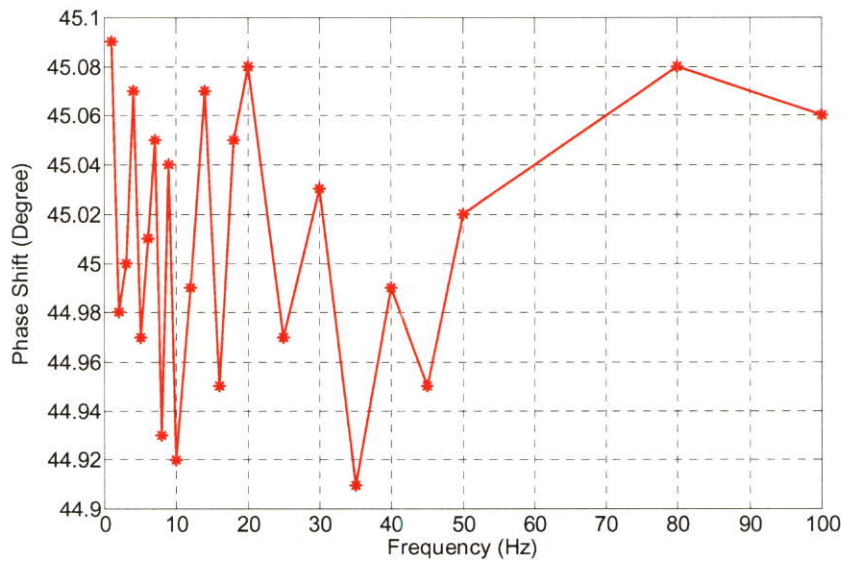
รูปที่ 4.47b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.48a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$

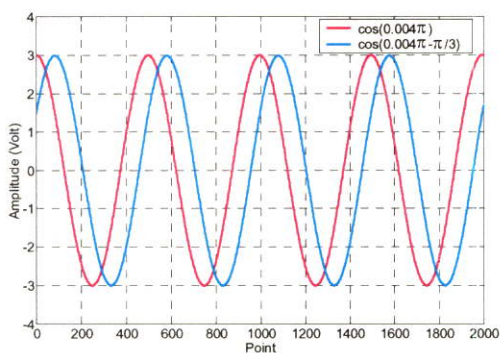


รูปที่ 4.48b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$

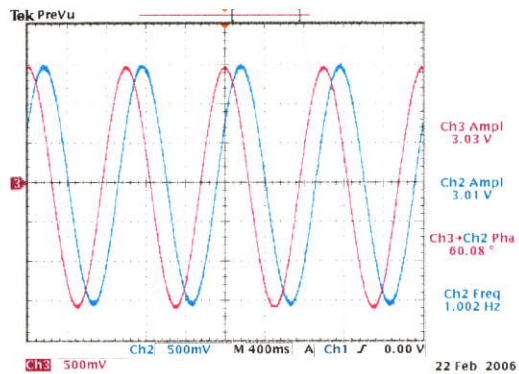


รูปที่ 4.49 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชาน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = \frac{\pi}{4}$  ณ. ความถี่ใดๆ

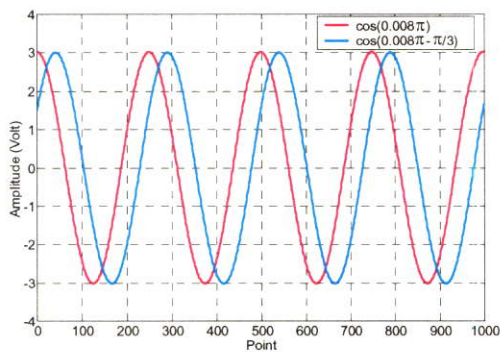
ผลการทดลองที่ 3 ความถี่ของสัญญาณขาในอยู่ในช่วง 1-100Hz  $\phi = \frac{\pi}{3}$  และความถี่สุ่มมีค่า  $f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$



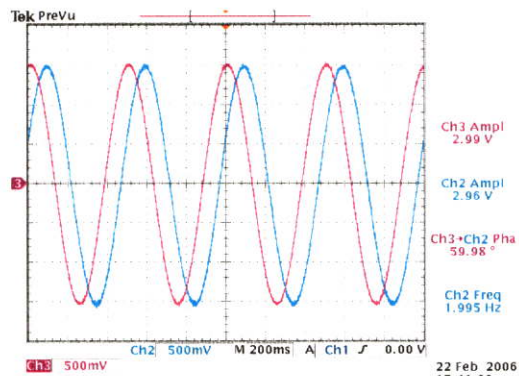
รูปที่ 4.50a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



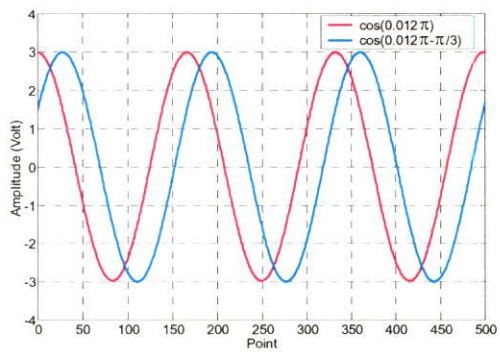
รูปที่ 4.50b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



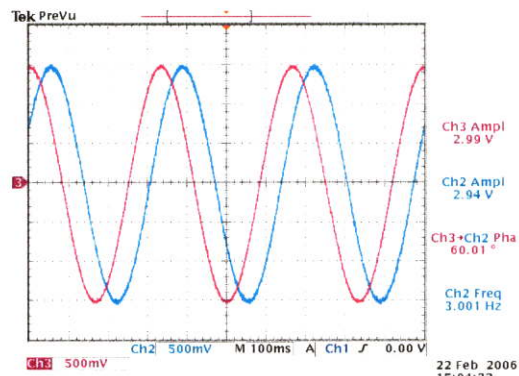
รูปที่ 4.51a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



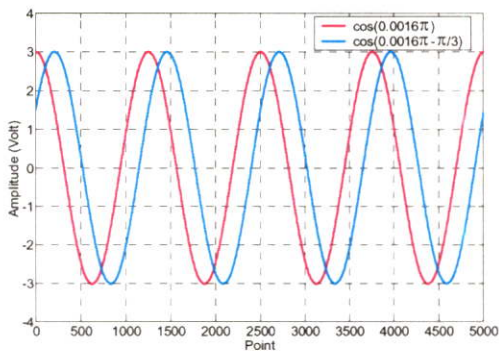
รูปที่ 4.51b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



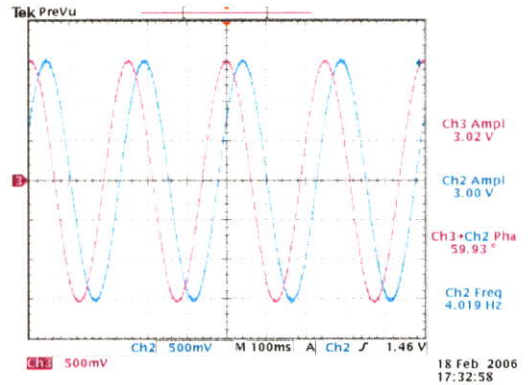
รูปที่ 4.52a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



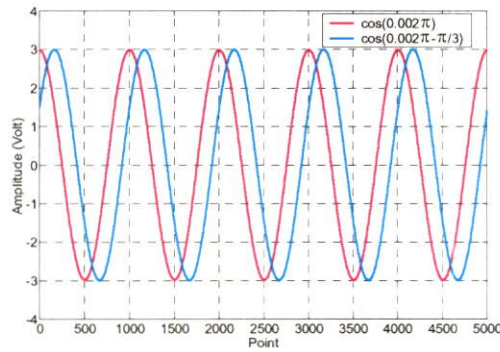
รูปที่ 4.52b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



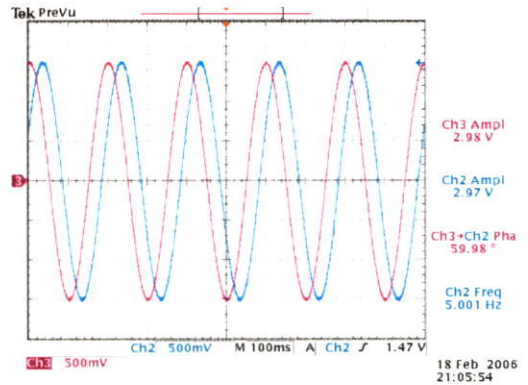
รูปที่ 4.53a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



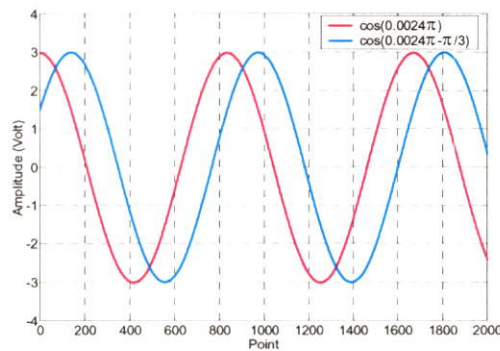
รูปที่ 4.53b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



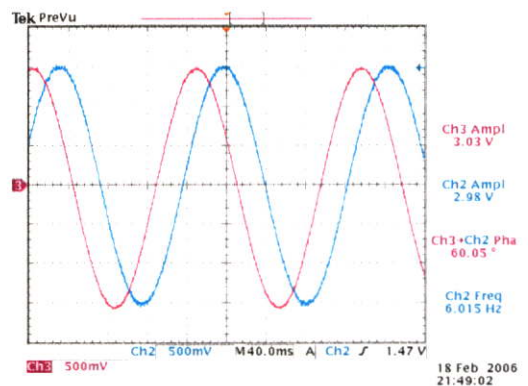
รูปที่ 4.54a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



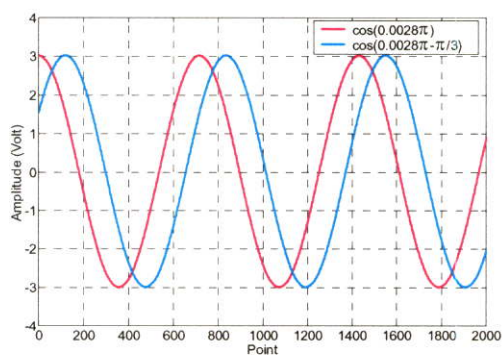
รูปที่ 4.54b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



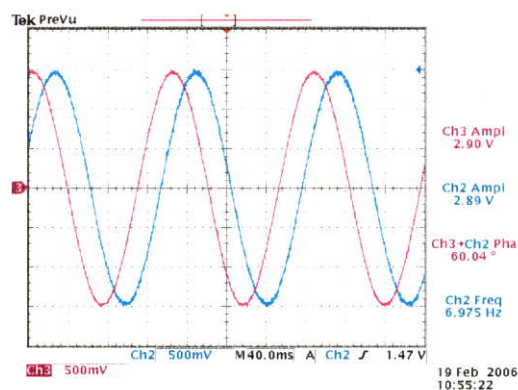
รูปที่ 4.55a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



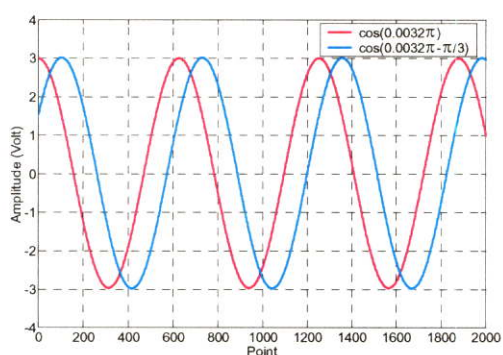
รูปที่ 4.55b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



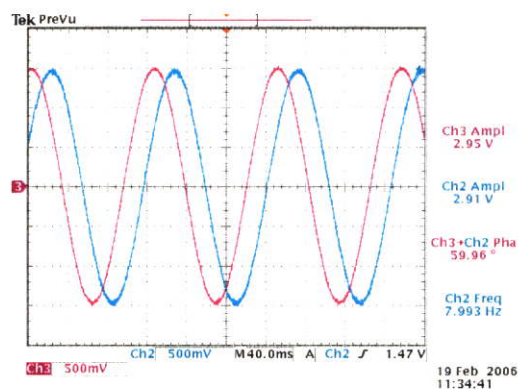
รูปที่ 4.56a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB

ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$ 

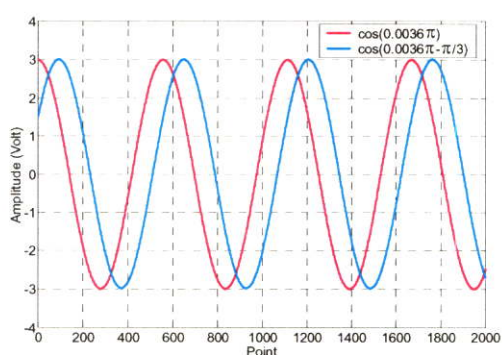
รูปที่ 4.56b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31

ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$ 

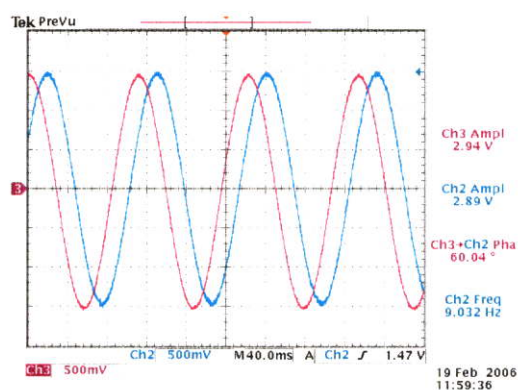
รูปที่ 4.57a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB

ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$ 

รูปที่ 4.57b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31

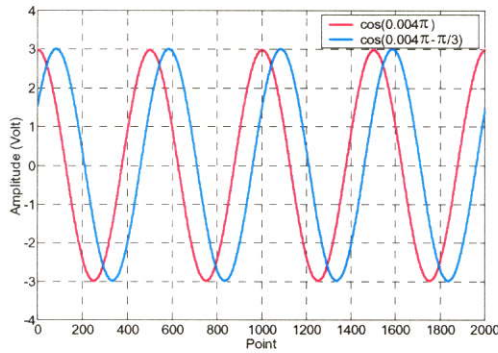
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$ 

รูปที่ 4.58a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB

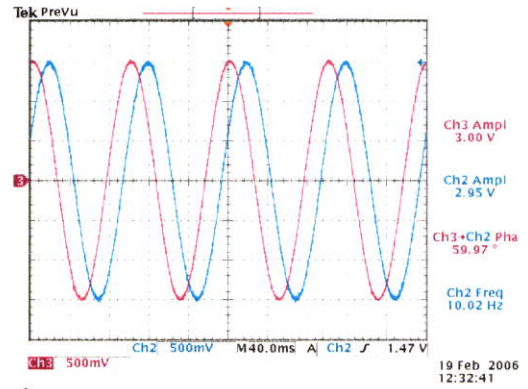
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$ 

รูปที่ 4.58b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31

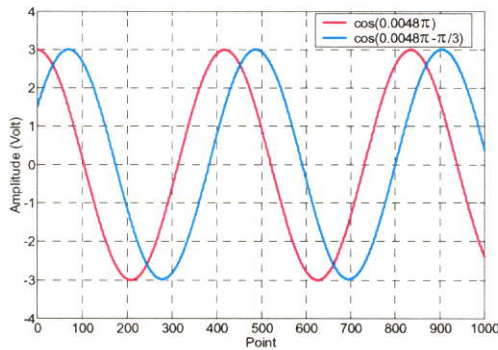
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



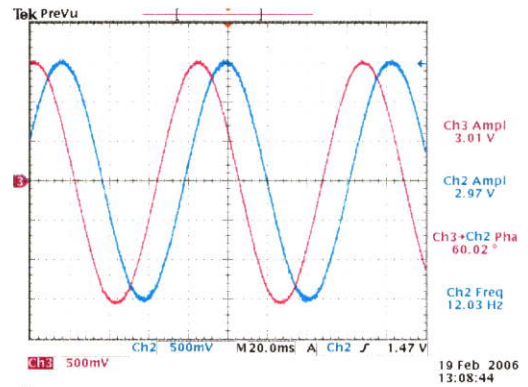
รูปที่ 4.59a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



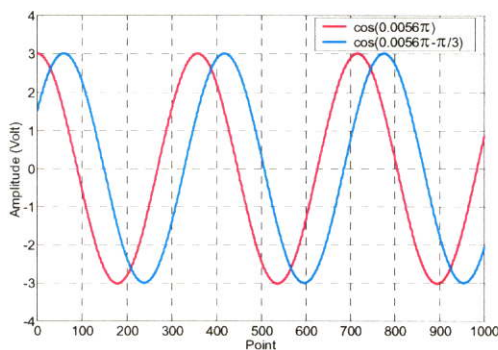
รูปที่ 4.59b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



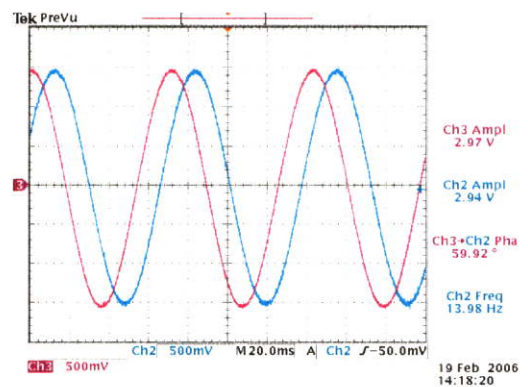
รูปที่ 4.60a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



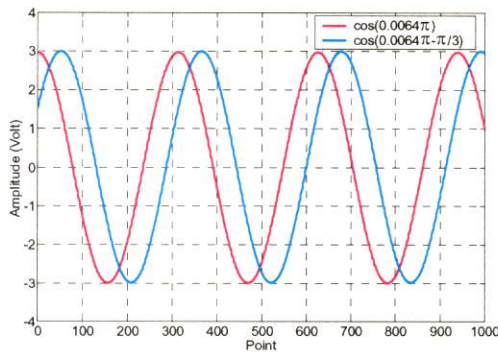
รูปที่ 4.60b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



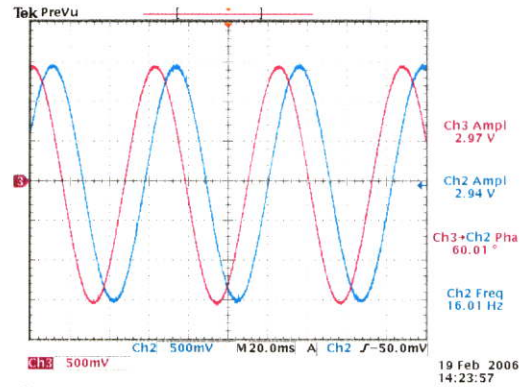
รูปที่ 4.61a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



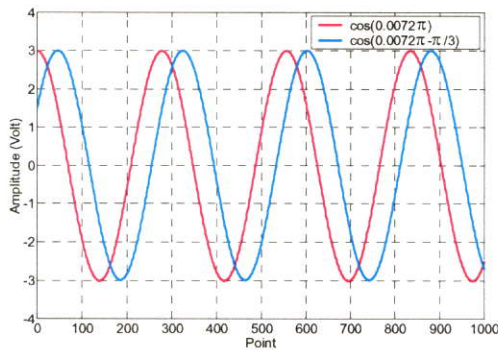
รูปที่ 4.61b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



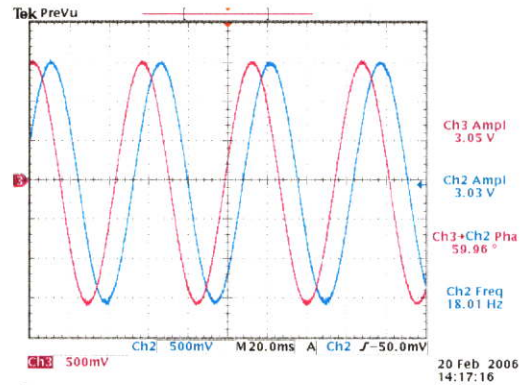
รูปที่ 4.62a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



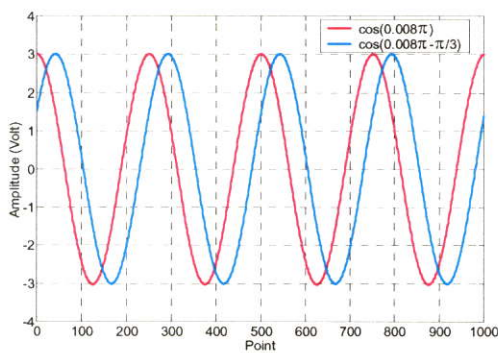
รูปที่ 4.62b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



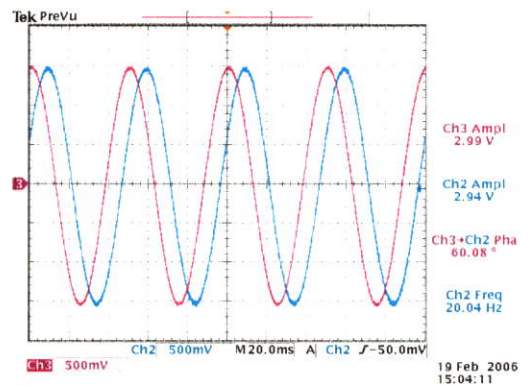
รูปที่ 4.63a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



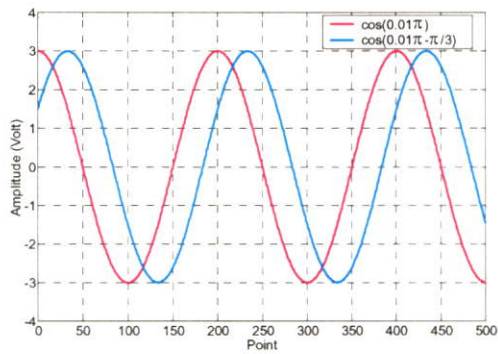
รูปที่ 4.63b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



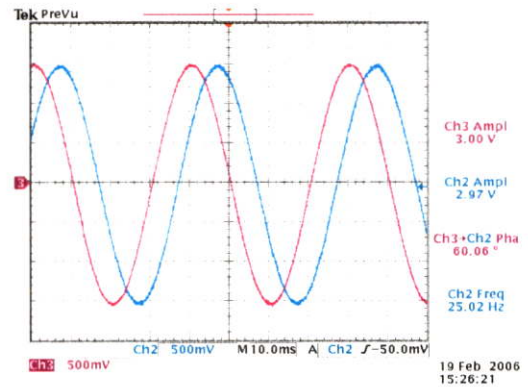
รูปที่ 4.64a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



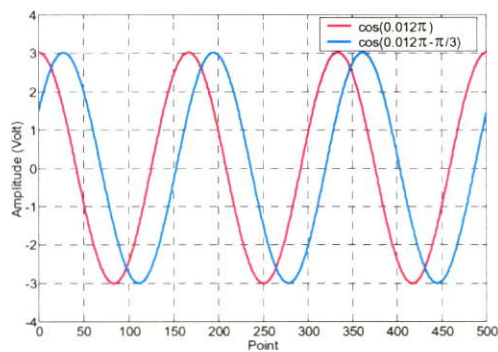
รูปที่ 4.64b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



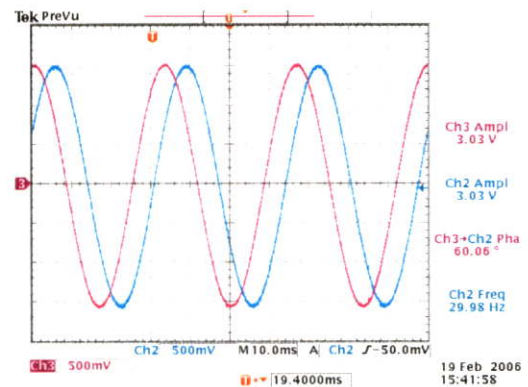
รูปที่ 4.65a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



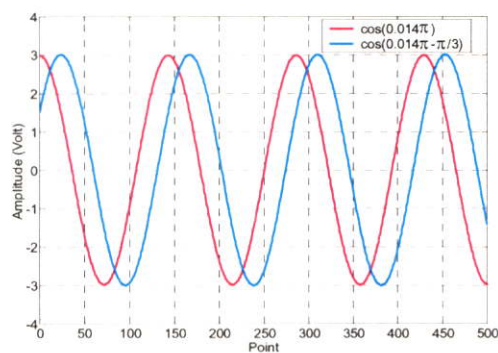
รูปที่ 4.65b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



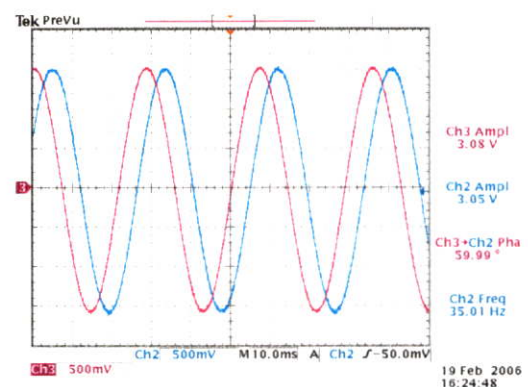
รูปที่ 4.66a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



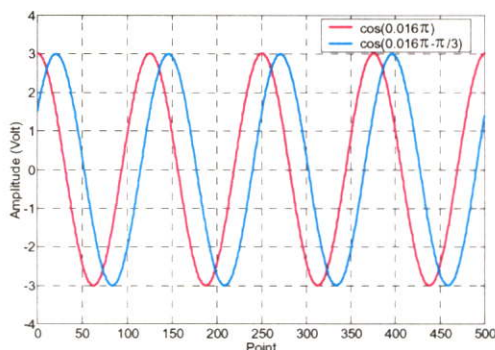
รูปที่ 4.66b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



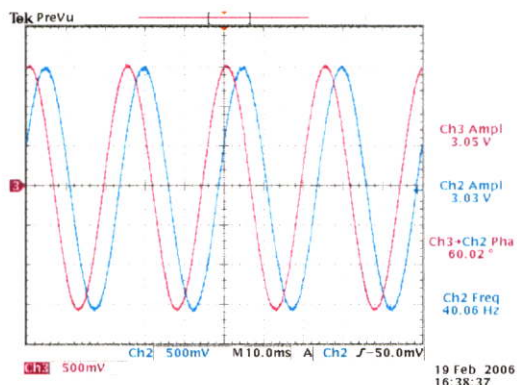
รูปที่ 4.67a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



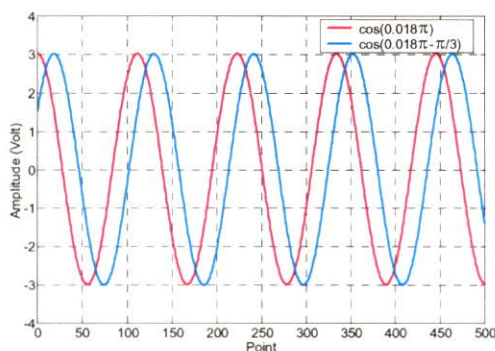
รูปที่ 4.67b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



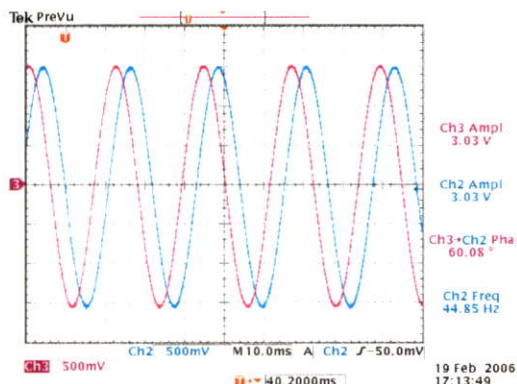
รูปที่ 4.68a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



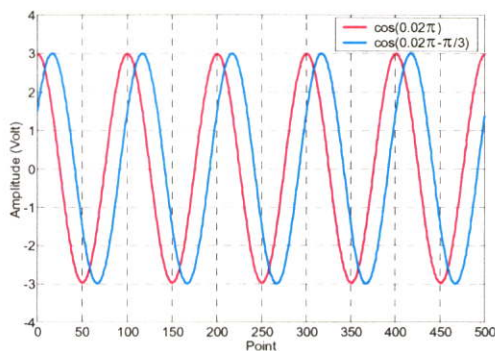
รูปที่ 4.68b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



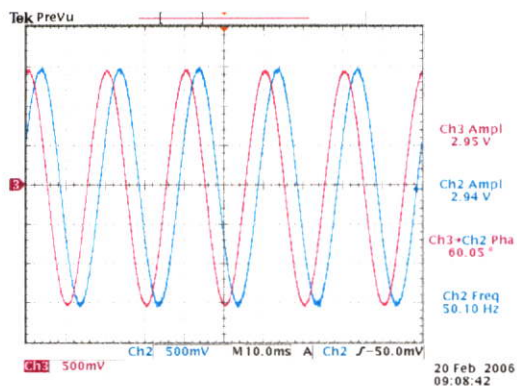
รูปที่ 4.69a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



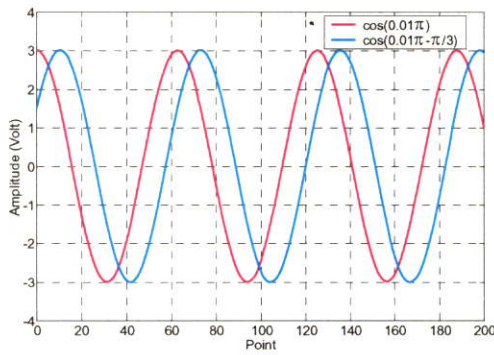
รูปที่ 4.69b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



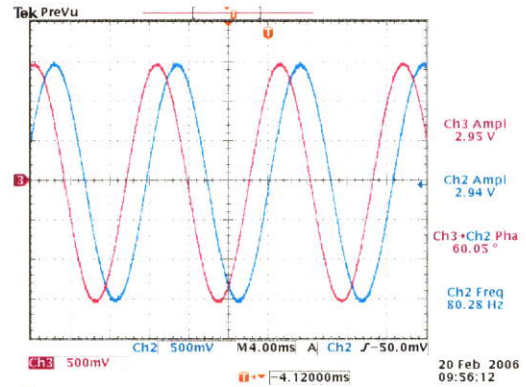
รูปที่ 4.70a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



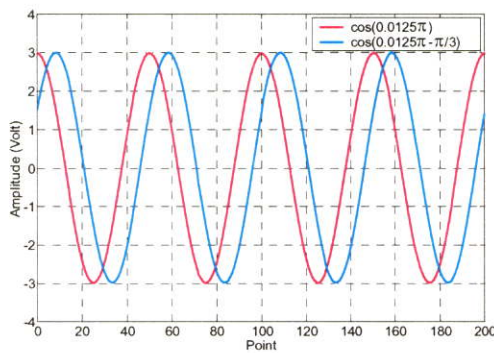
รูปที่ 4.70b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



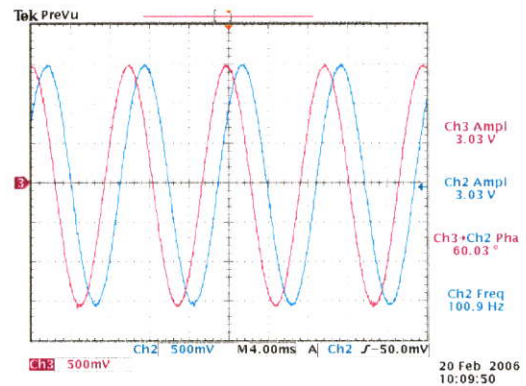
รูปที่ 4.71a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



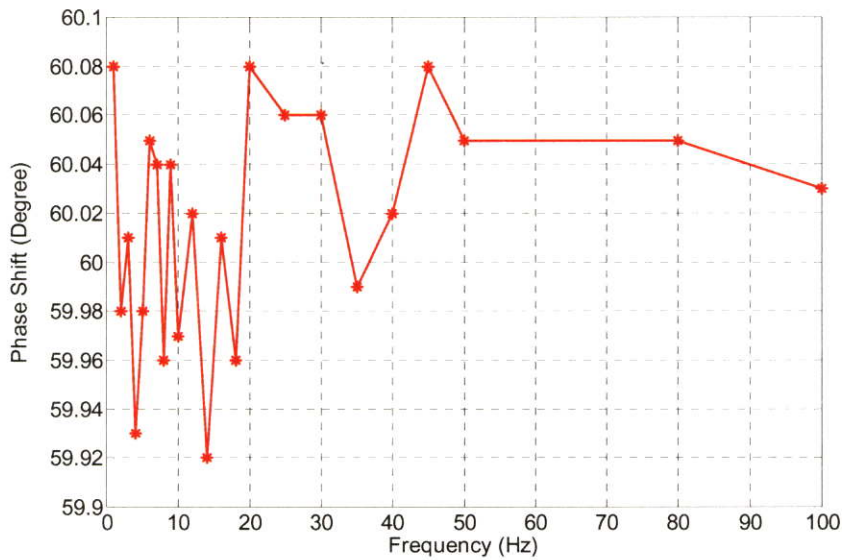
รูปที่ 4.71b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.72a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



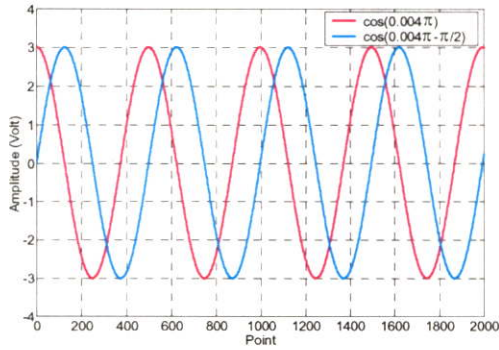
รูปที่ 4.72b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



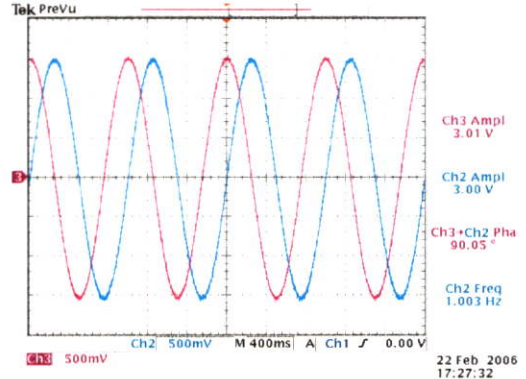
รูปที่ 4.73 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณขาอินพุตที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = \frac{\pi}{3}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 4 ความถี่ของสัญญาณขาอินพุตในช่วง  $1-100\text{Hz}$ ,  $\phi = \frac{\pi}{2}$  และความถี่สุ่มมีค่า

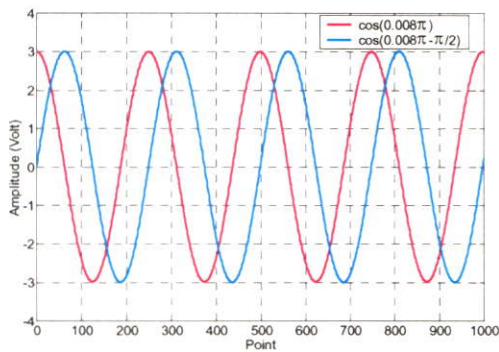
$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{kHz}, 16\text{kHz}$



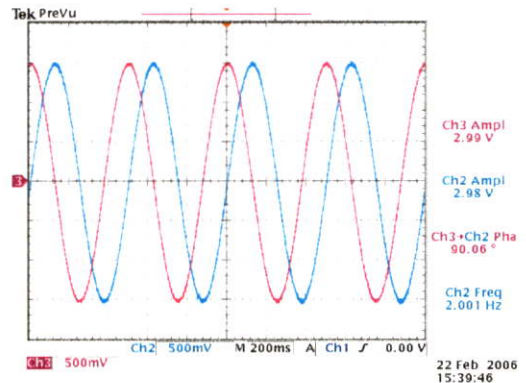
รูปที่ 4.74a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



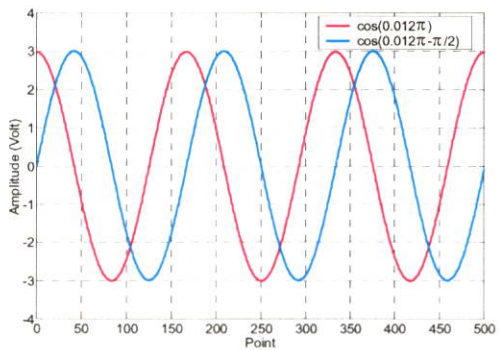
รูปที่ 4.74b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



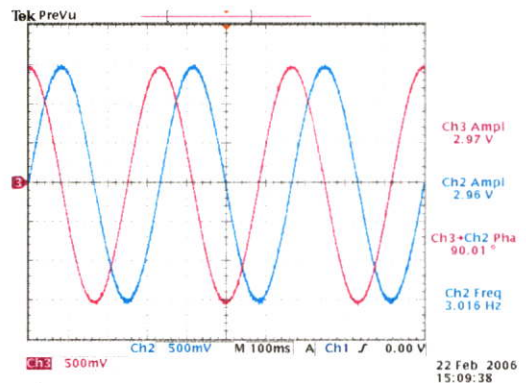
รูปที่ 4.75a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



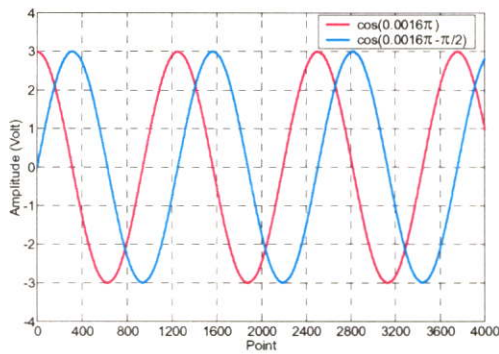
รูปที่ 4.75b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



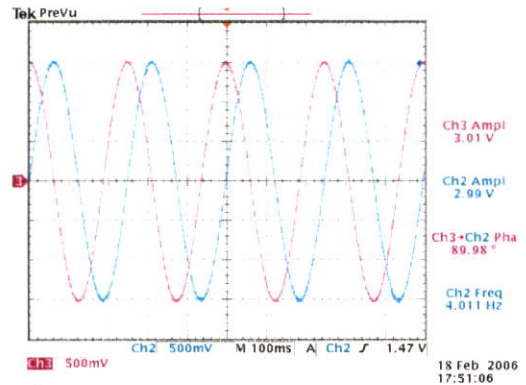
รูปที่ 4.76a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



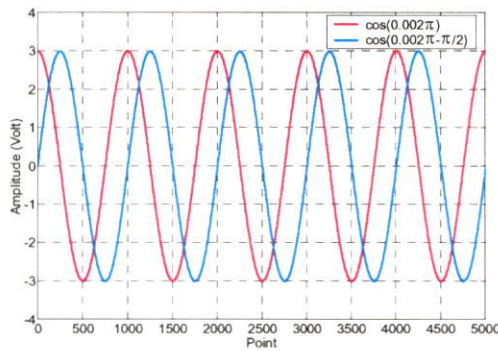
รูปที่ 4.76b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



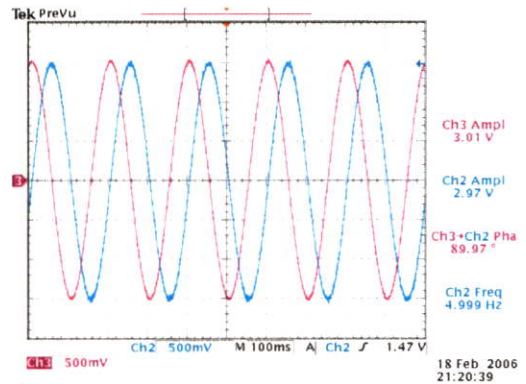
รูปที่ 4.77a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



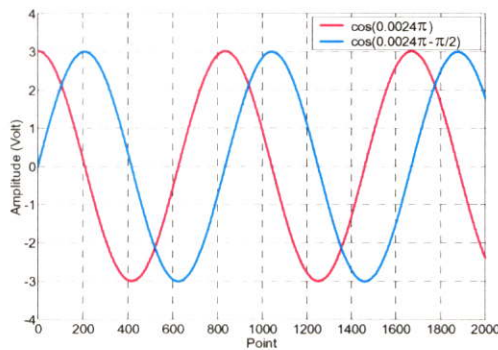
รูปที่ 4.77b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



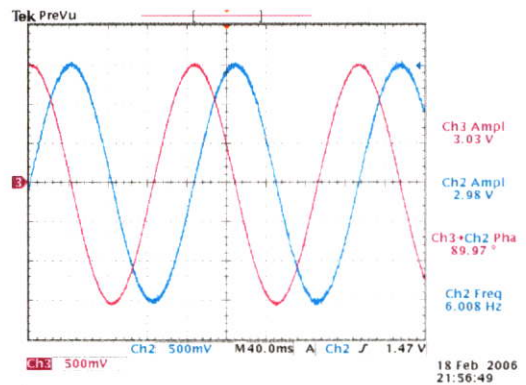
รูปที่ 4.78a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



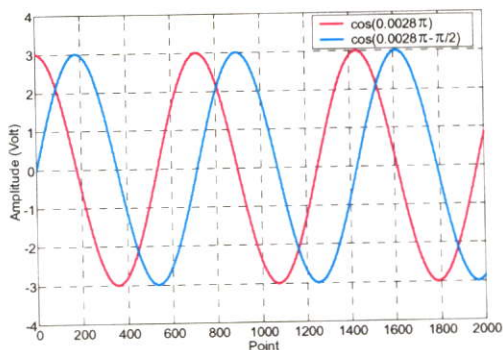
รูปที่ 4.78b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



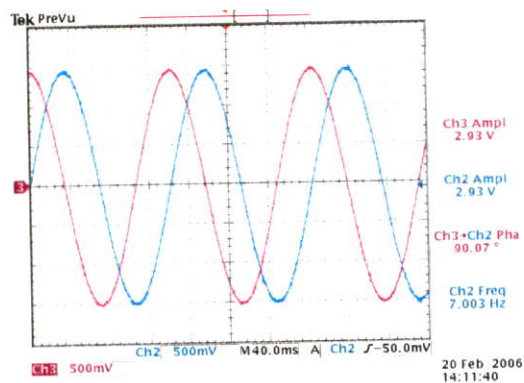
รูปที่ 4.79a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



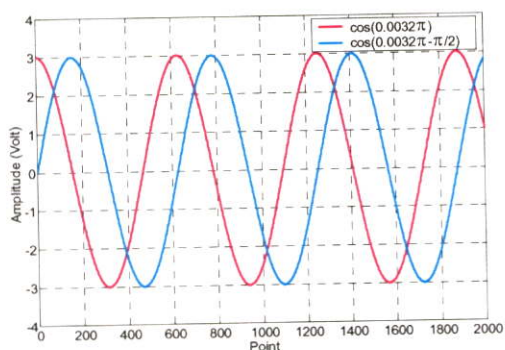
รูปที่ 4.79b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



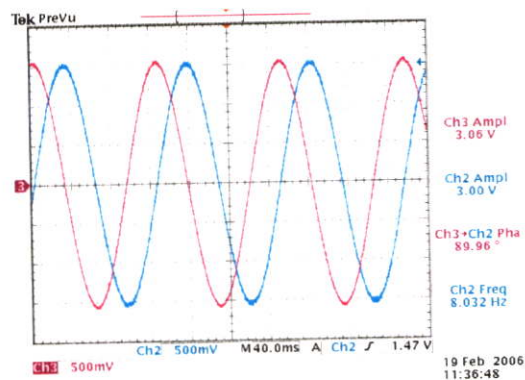
รูปที่ 4.80a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



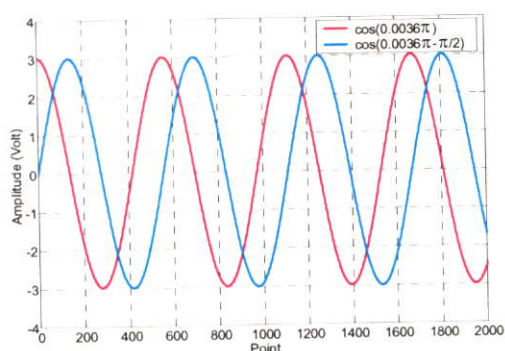
รูปที่ 4.80b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



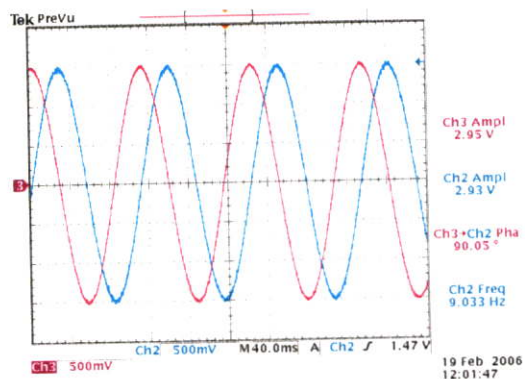
รูปที่ 4.81a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



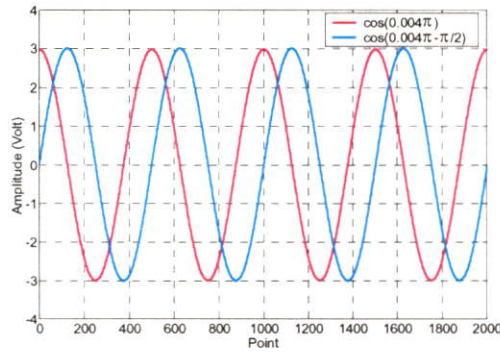
รูปที่ 4.81b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



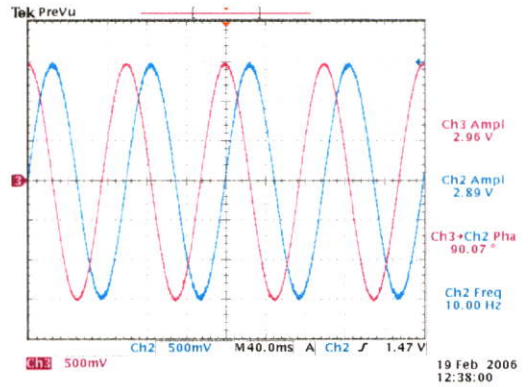
รูปที่ 4.82a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



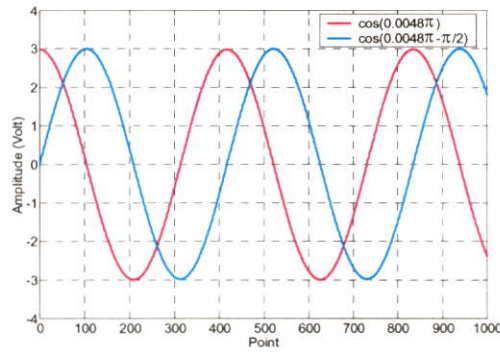
รูปที่ 4.82b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



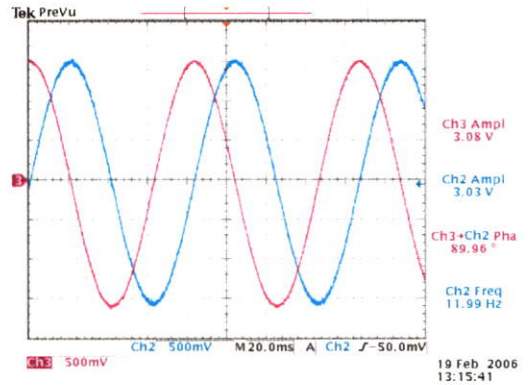
รูปที่ 4.83a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



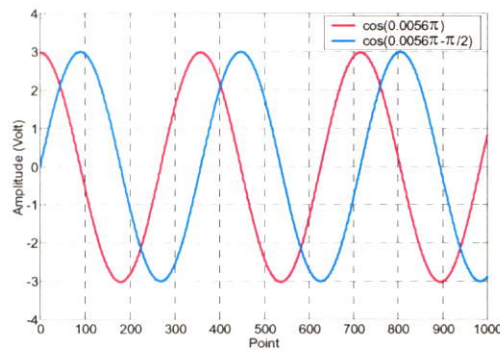
รูปที่ 4.83b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



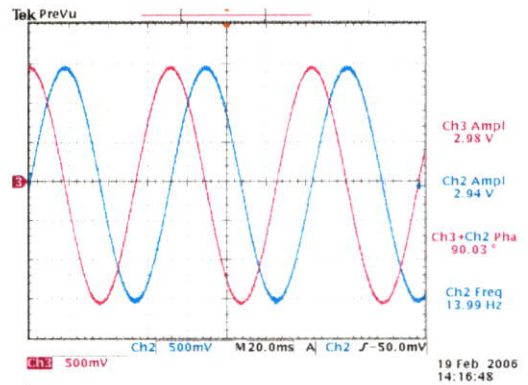
รูปที่ 4.84a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



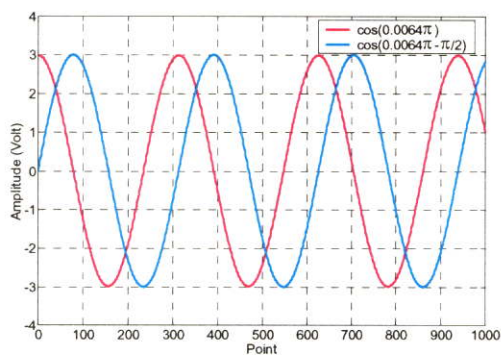
รูปที่ 4.84b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



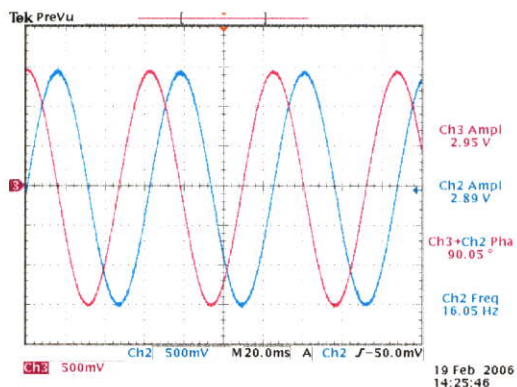
รูปที่ 4.85a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



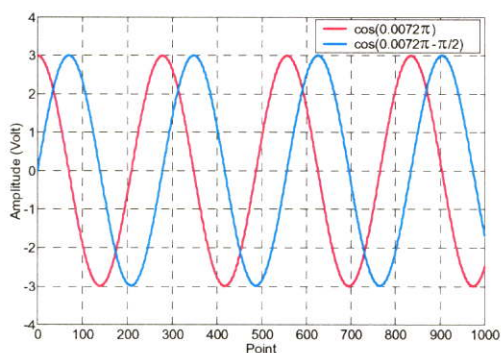
รูปที่ 4.85b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



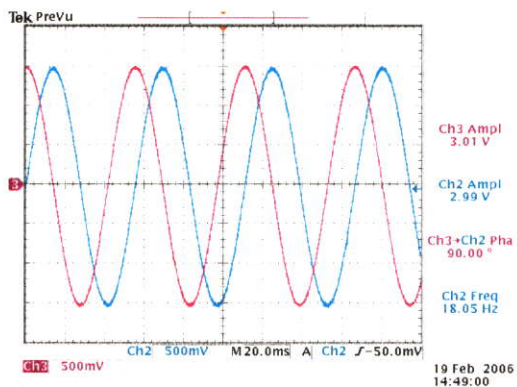
รูปที่ 4.86a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



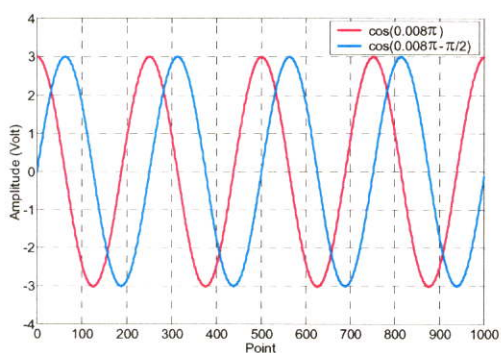
รูปที่ 4.86b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



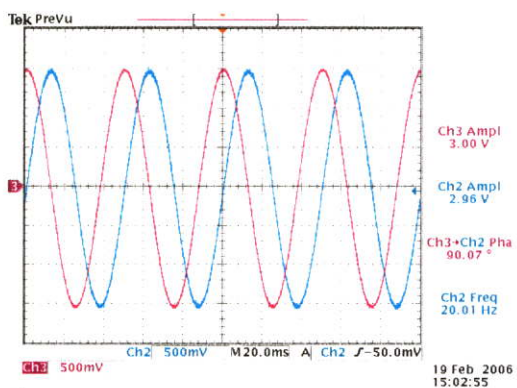
รูปที่ 4.87a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



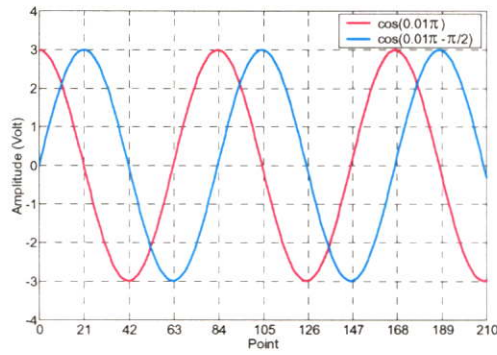
รูปที่ 4.87b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



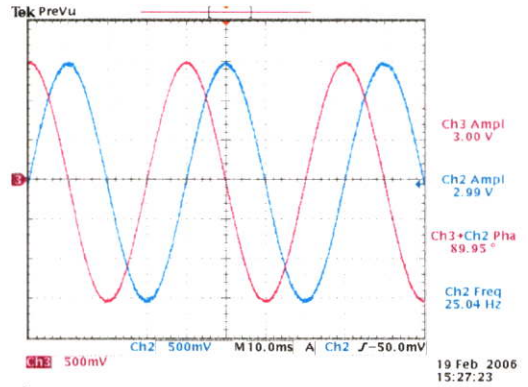
รูปที่ 4.88a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



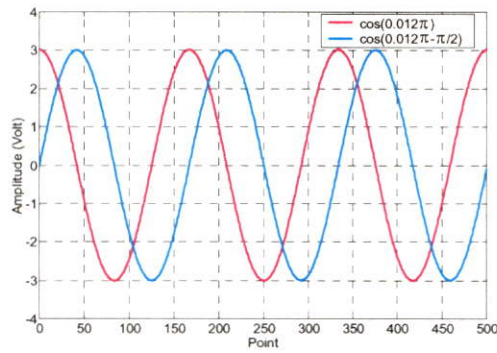
รูปที่ 4.88b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



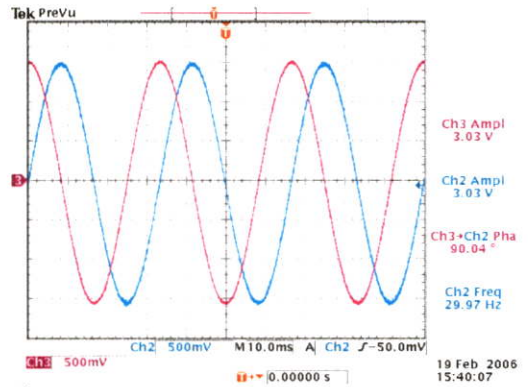
รูปที่ 4.89a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



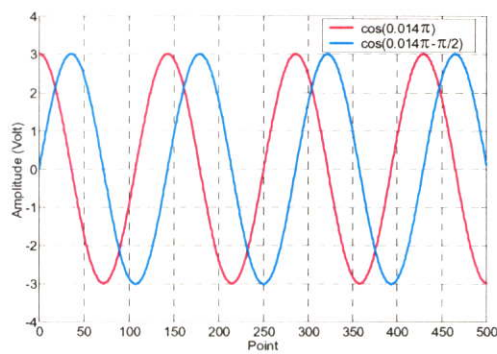
รูปที่ 4.89b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



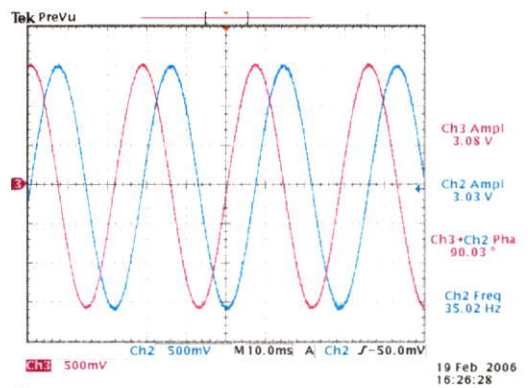
รูปที่ 4.90a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



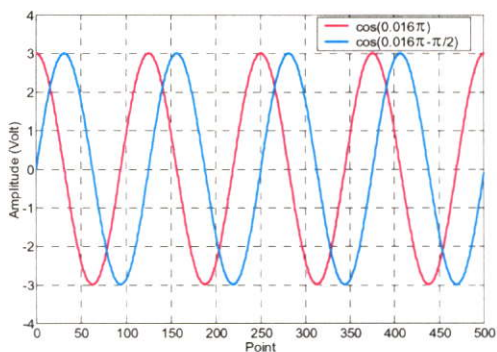
รูปที่ 4.90b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



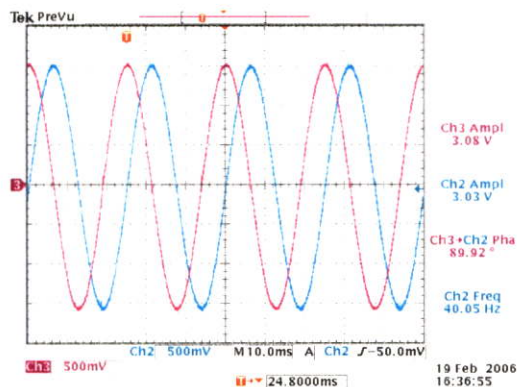
รูปที่ 4.91a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



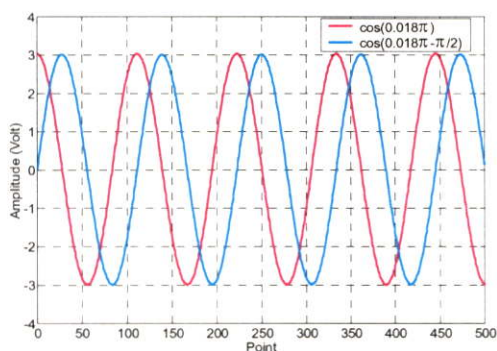
รูปที่ 4.91b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



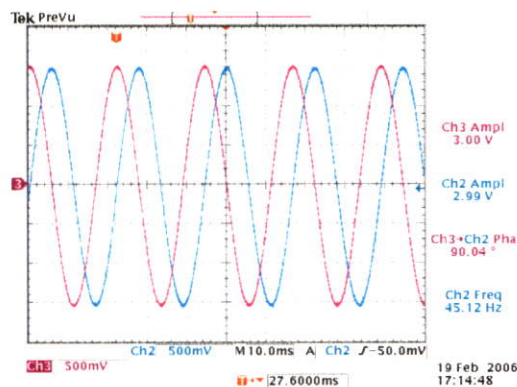
รูปที่ 4.92a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



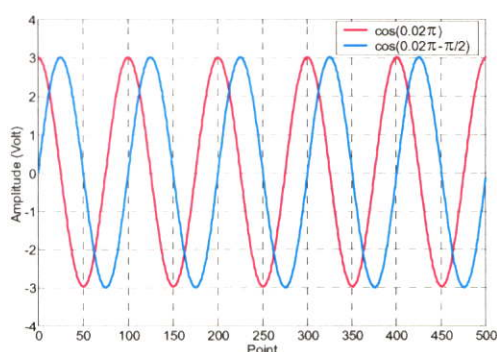
รูปที่ 4.92b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



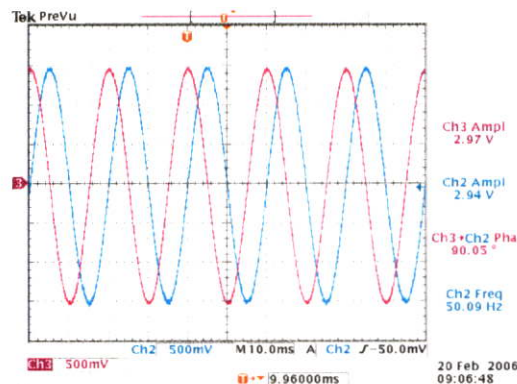
รูปที่ 4.93a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



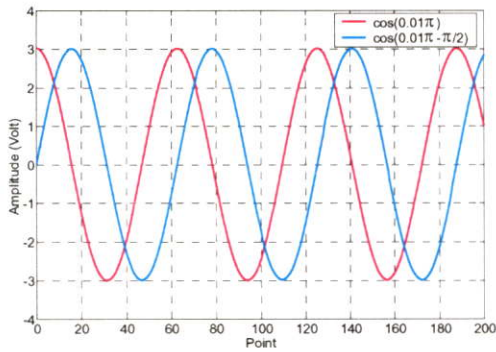
รูปที่ 4.93b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



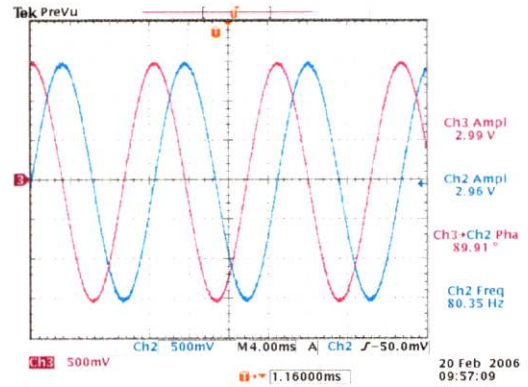
รูปที่ 4.94a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



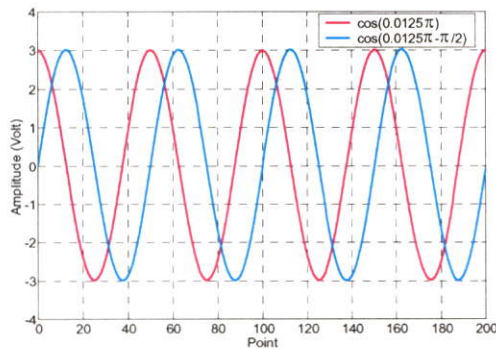
รูปที่ 4.94b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



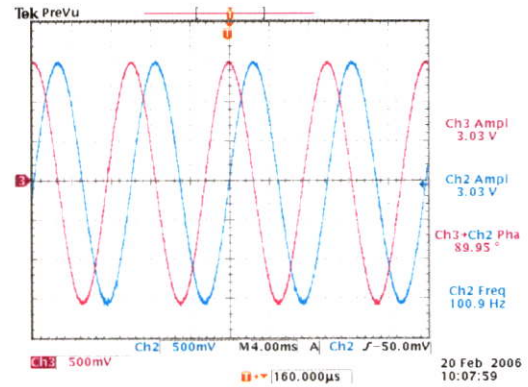
รูปที่ 4.95a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



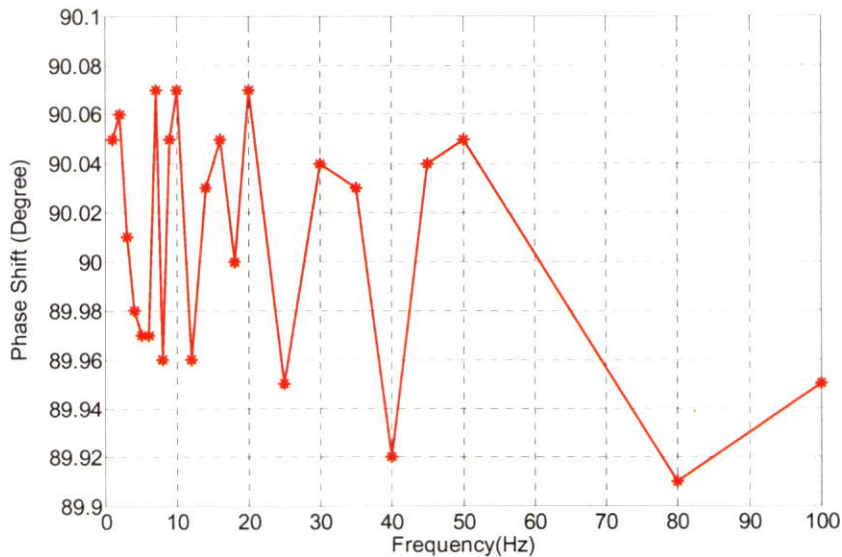
รูปที่ 4.95b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.96a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



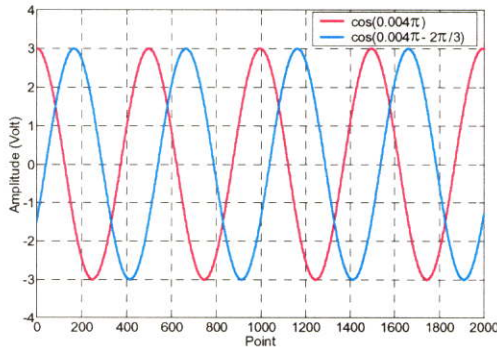
รูปที่ 4.96b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



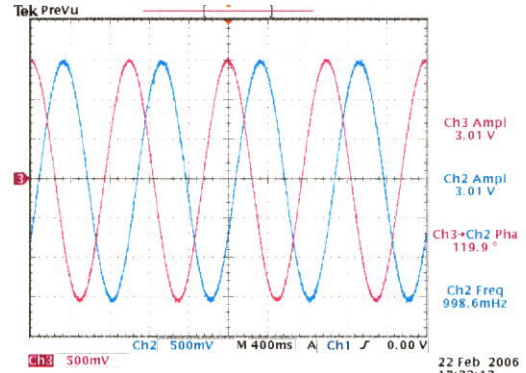
รูปที่ 4.97 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = \frac{\pi}{2}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 5 ความถี่ของสัญญาณขาในอยู่ในช่วง 1-100Hz,  $\phi = \frac{2\pi}{3}$  และความถี่สุ่มมีค่า

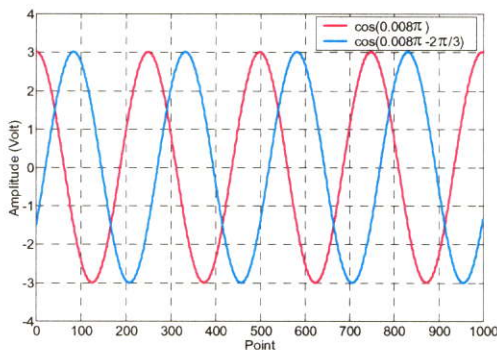
$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{kHz}, 16\text{kHz}$



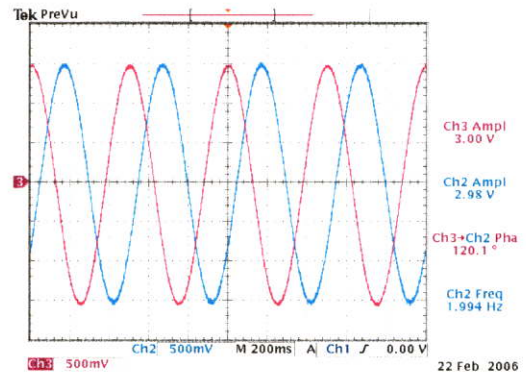
รูปที่ 4.98a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



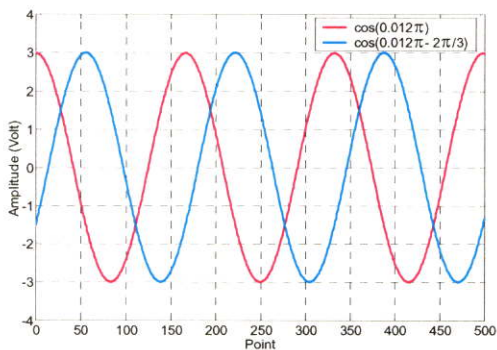
รูปที่ 4.98b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



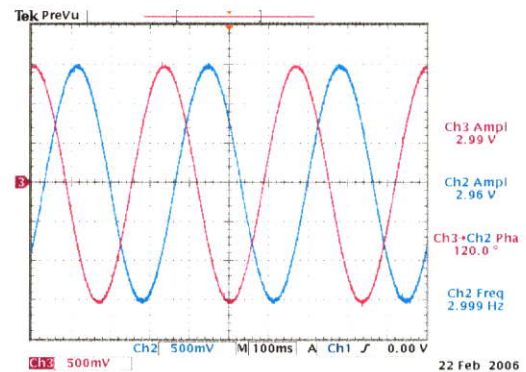
รูปที่ 4.99a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



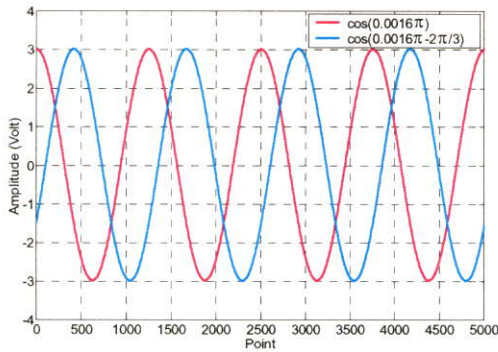
รูปที่ 4.99b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



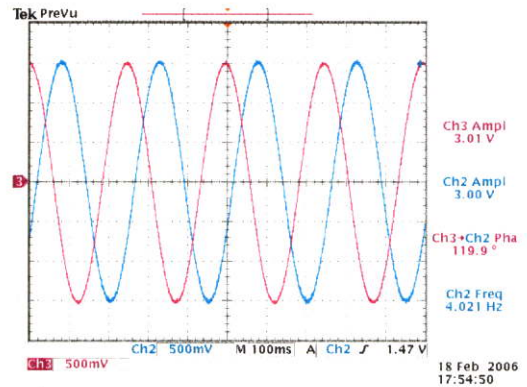
รูปที่ 4.100a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



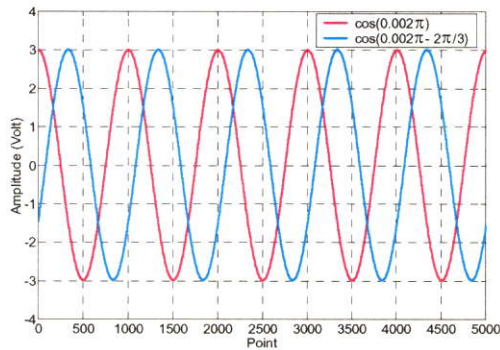
รูปที่ 4.100b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



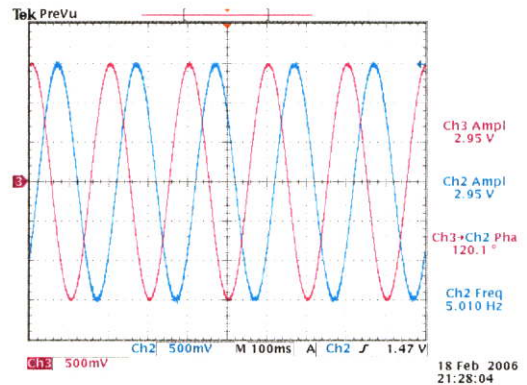
รูปที่ 4.101a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



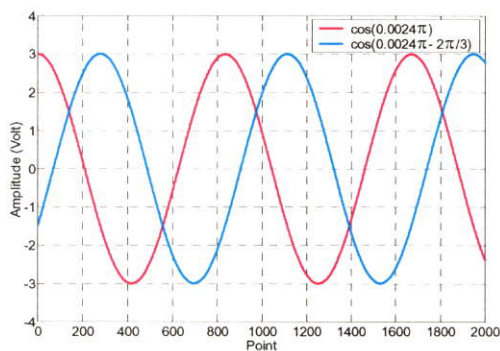
รูปที่ 4.101b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



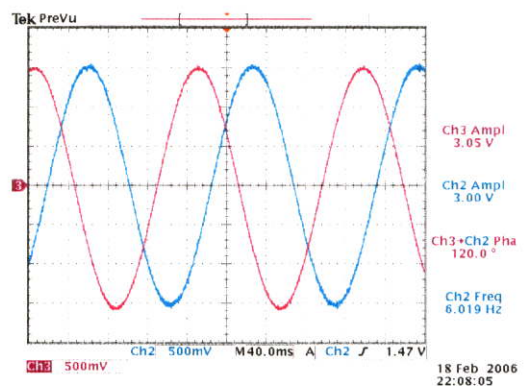
รูปที่ 4.102a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



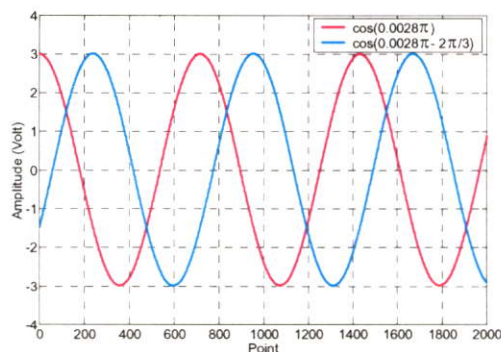
รูปที่ 4.102b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



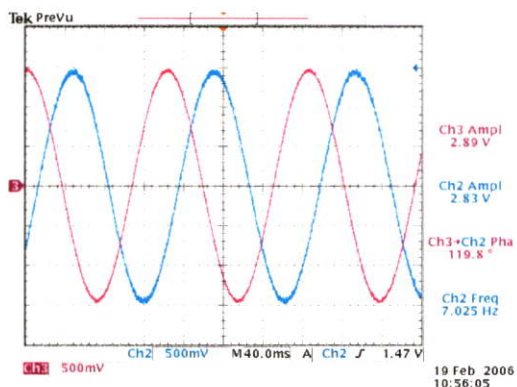
รูปที่ 4.103a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



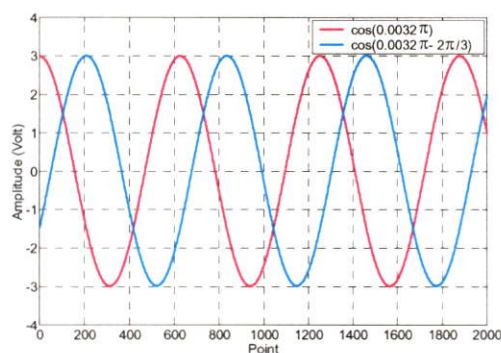
รูปที่ 4.103b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



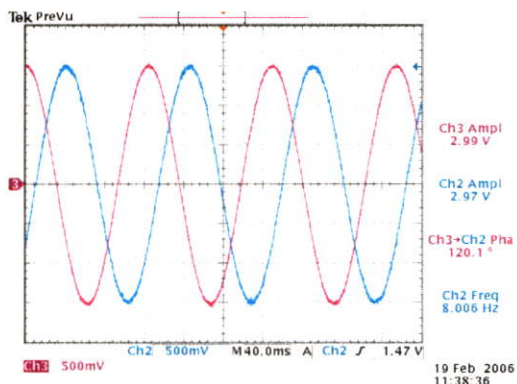
รูปที่ 4.104a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



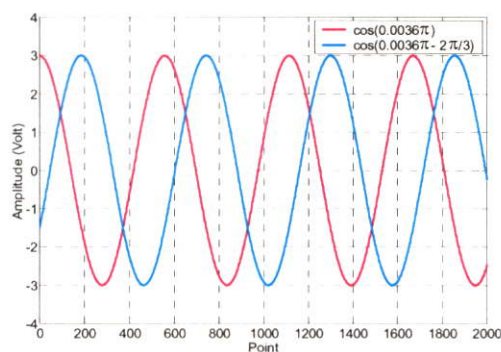
รูปที่ 4.104b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



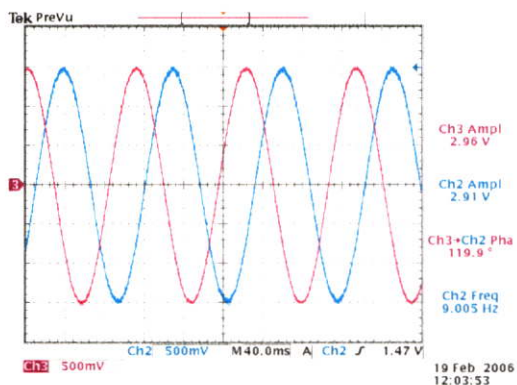
รูปที่ 4.105a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



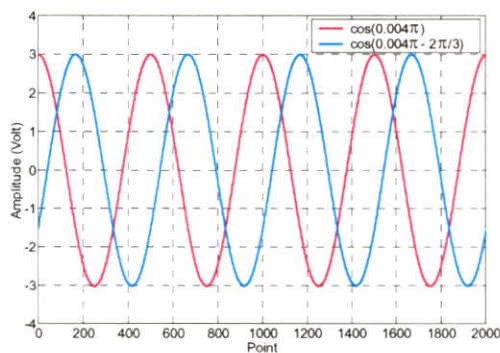
รูปที่ 4.105b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



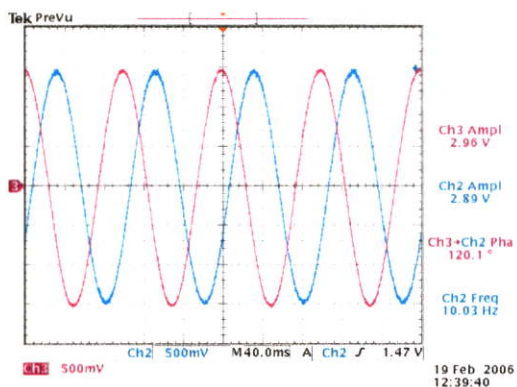
รูปที่ 4.106a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



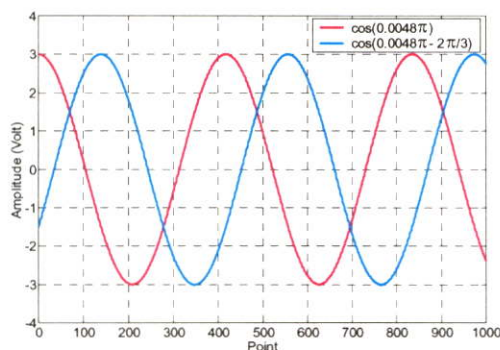
รูปที่ 4.106b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



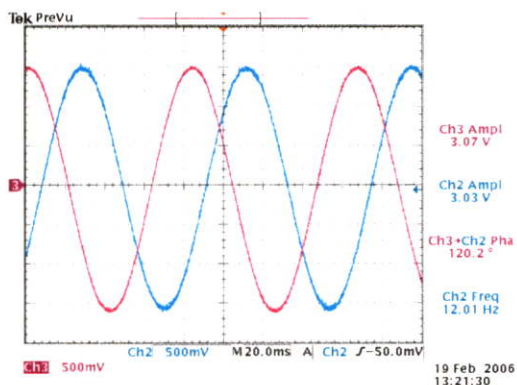
รูปที่ 4.107a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



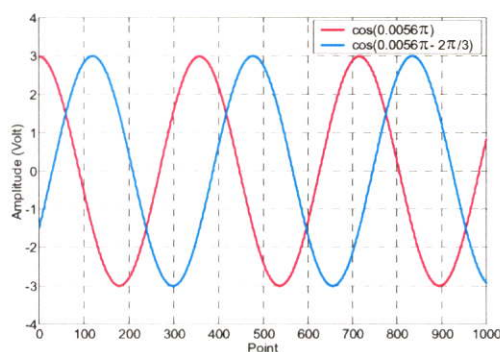
รูปที่ 4.107b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



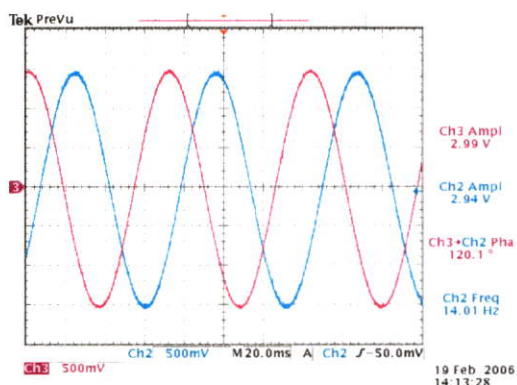
รูปที่ 4.108a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



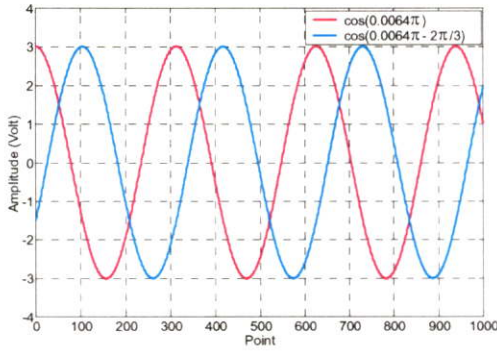
รูปที่ 4.108b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



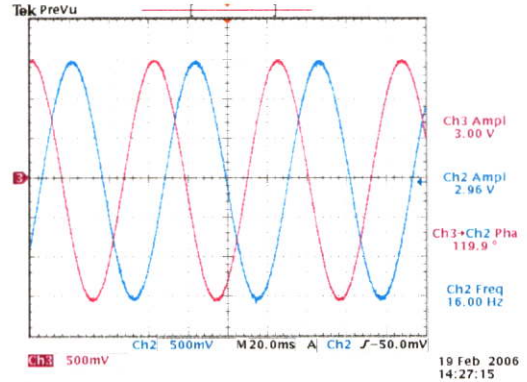
รูปที่ 4.109a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



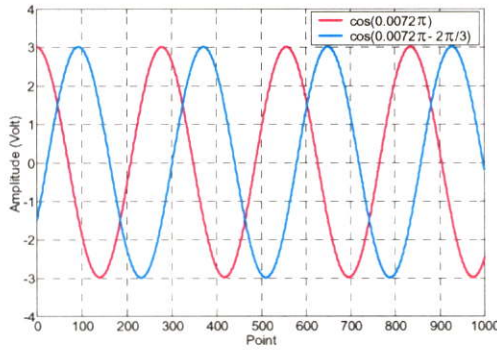
รูปที่ 4.109b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



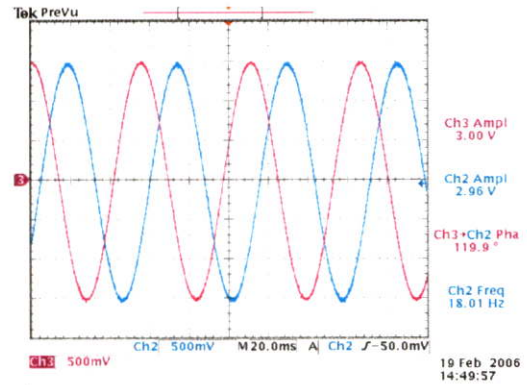
รูปที่ 4.110a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



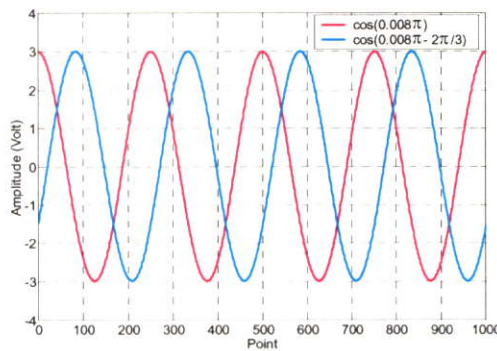
รูปที่ 4.110b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



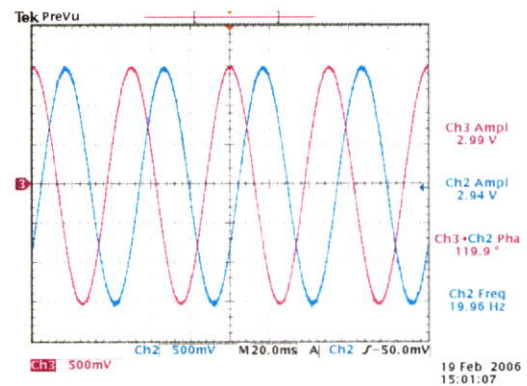
รูปที่ 4.111a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



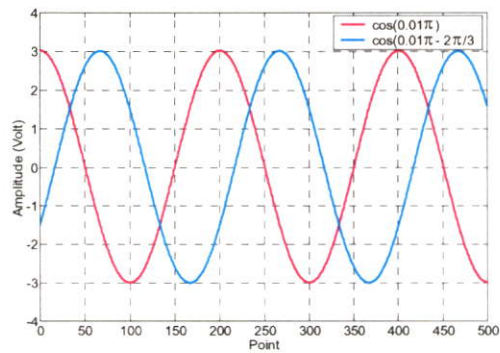
รูปที่ 4.111b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



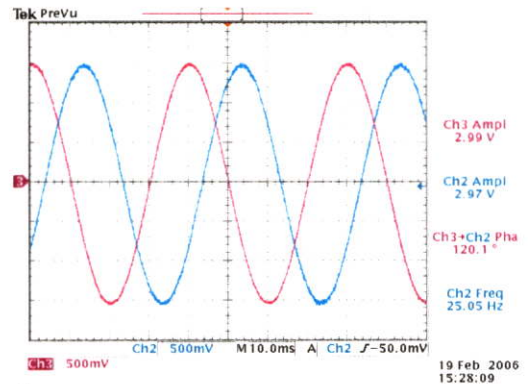
รูปที่ 4.112a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



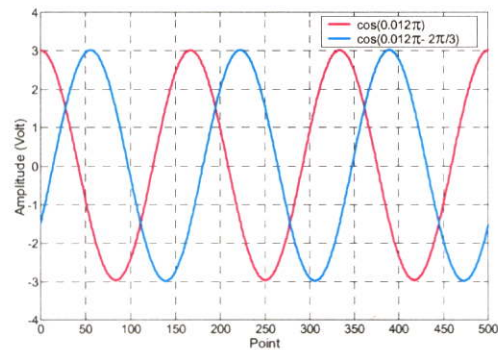
รูปที่ 4.112b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



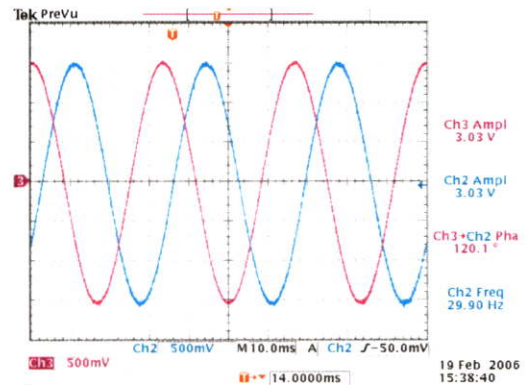
รูปที่ 4.113a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



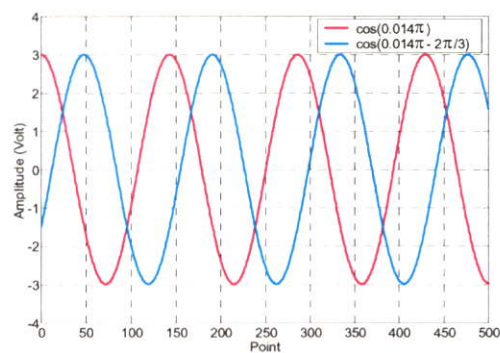
รูปที่ 4.113b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



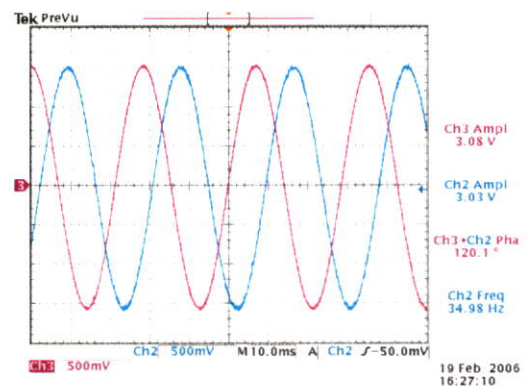
รูปที่ 4.114a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



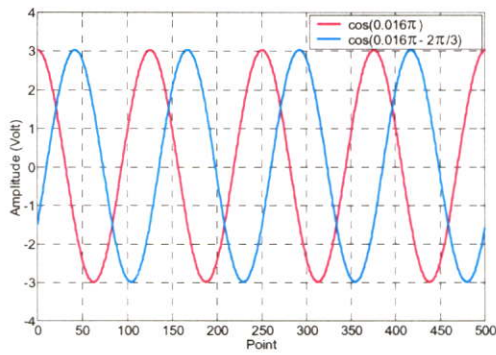
รูปที่ 4.114b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



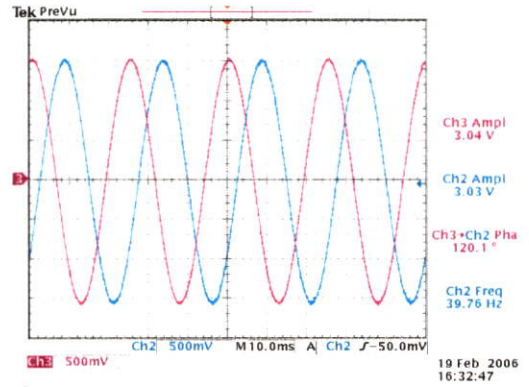
รูปที่ 4.115a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



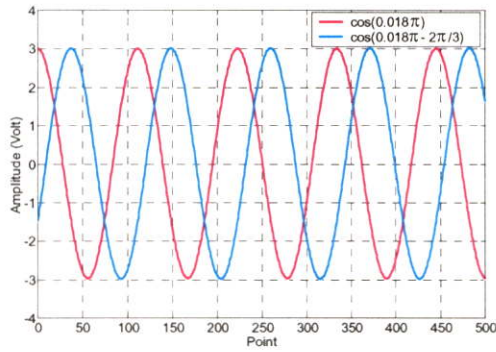
รูปที่ 4.115b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



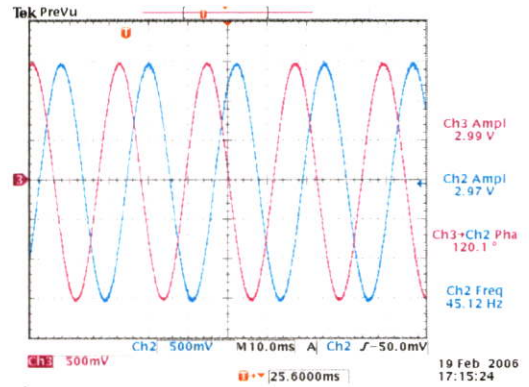
รูปที่ 4.116a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



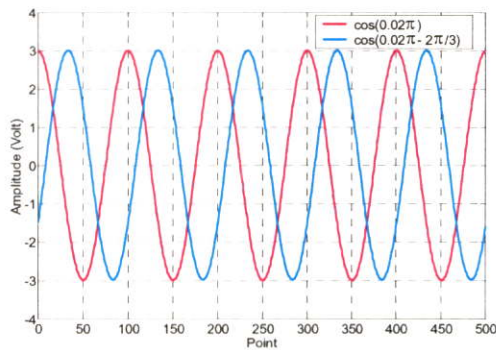
รูปที่ 4.116b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



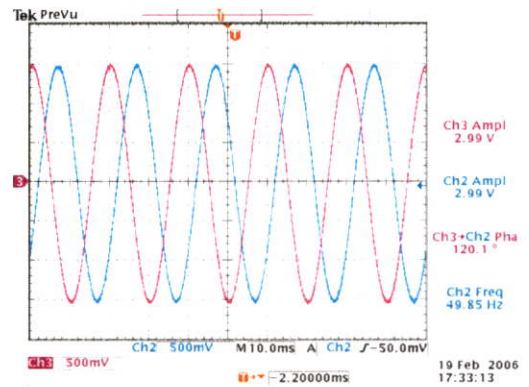
รูปที่ 4.117a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



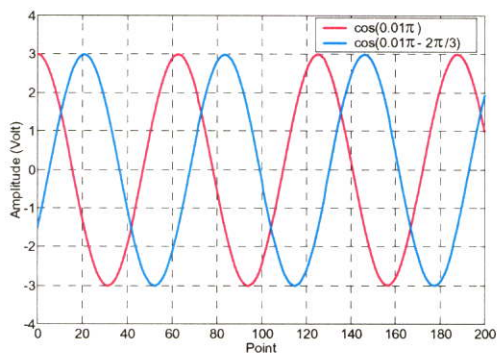
รูปที่ 4.117b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



รูปที่ 4.118a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$

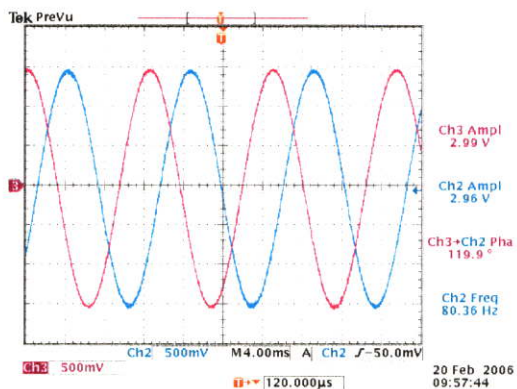


รูปที่ 4.118b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



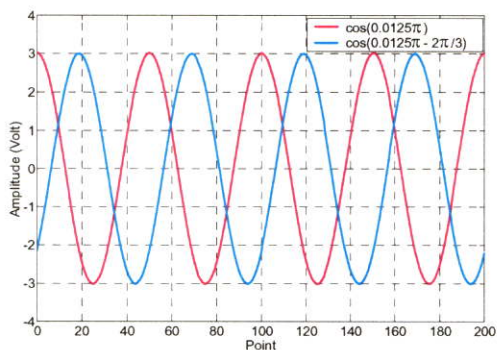
รูปที่ 4.119a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB

ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



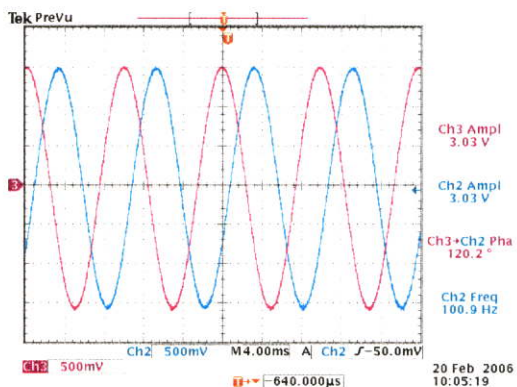
รูปที่ 4.119b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31

ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



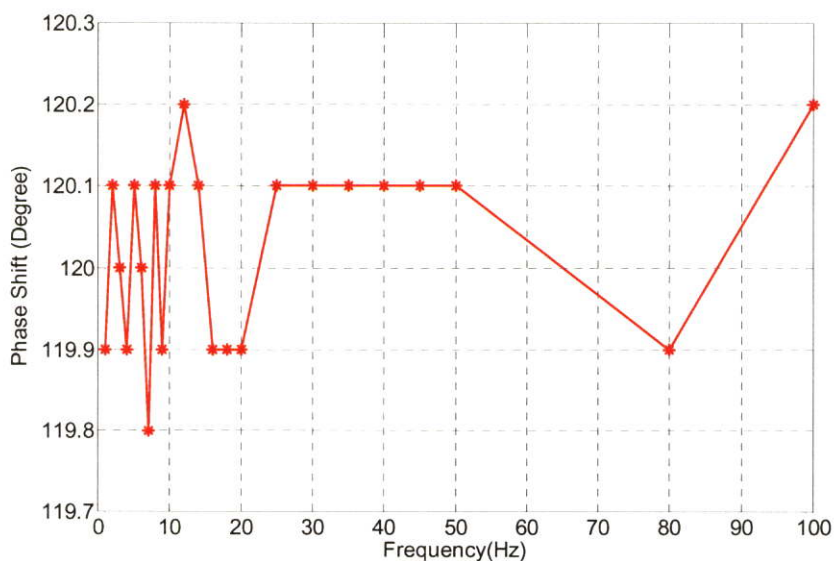
รูปที่ 4.120a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB

ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.120b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31

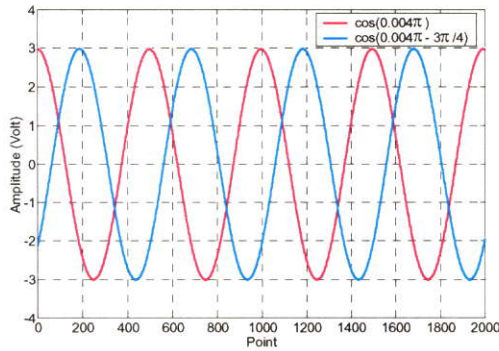
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



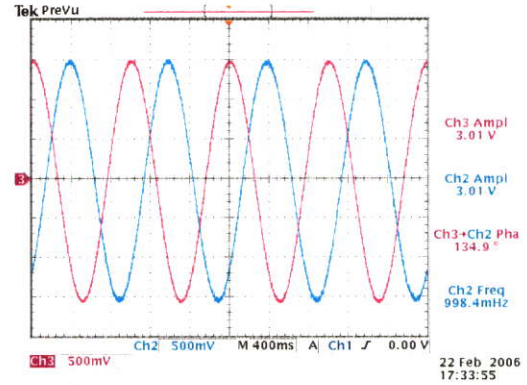
รูปที่ 4.121 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = \frac{2\pi}{3}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 6 ความถี่ของสัญญาณขาอินพุตในช่วง 1-100Hz,  $\phi = \frac{3\pi}{4}$  และความถี่สุ่มมีค่า

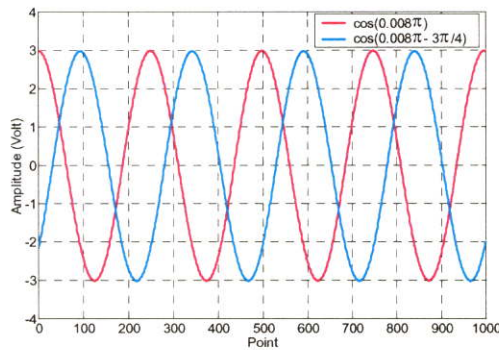
$$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$$



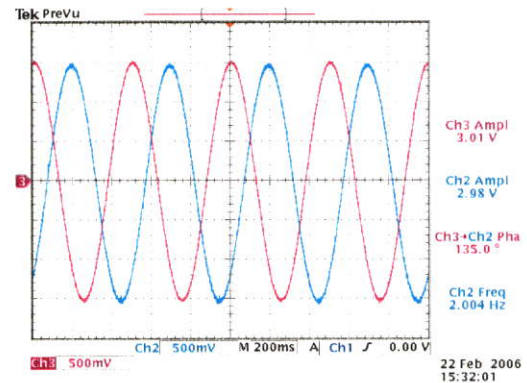
รูปที่ 4.122a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



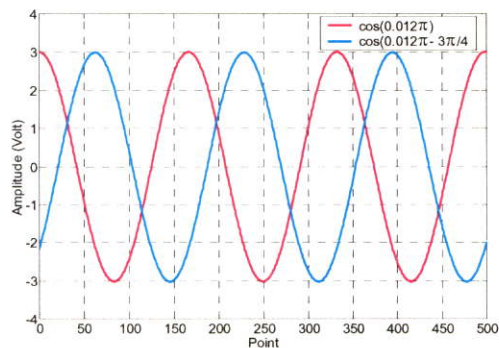
รูปที่ 4.122b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



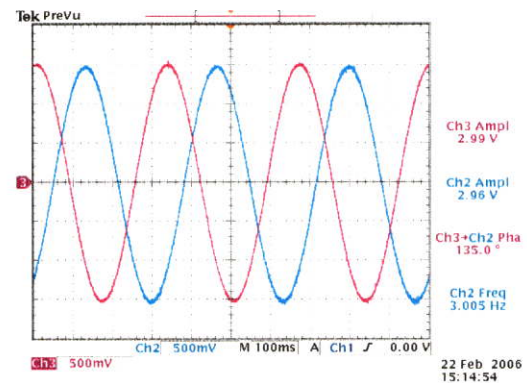
รูปที่ 4.123a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



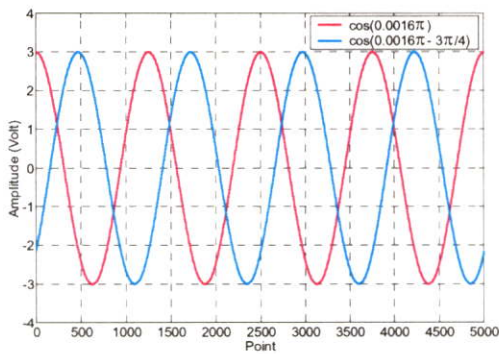
รูปที่ 4.123b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



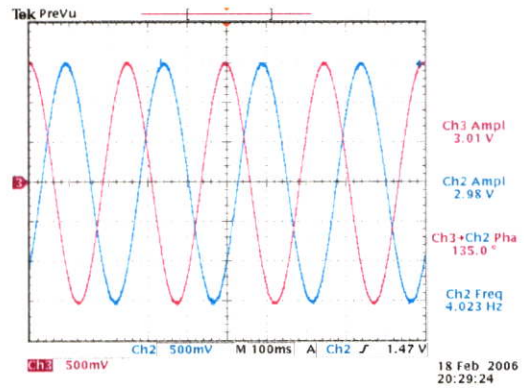
รูปที่ 4.124a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



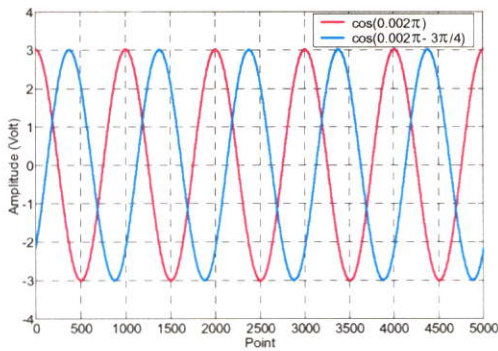
รูปที่ 4.124b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



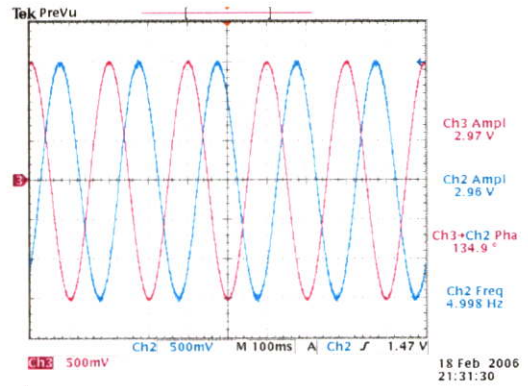
รูปที่ 4.125a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



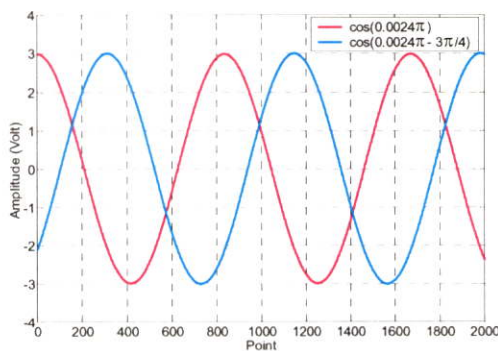
รูปที่ 4.125b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



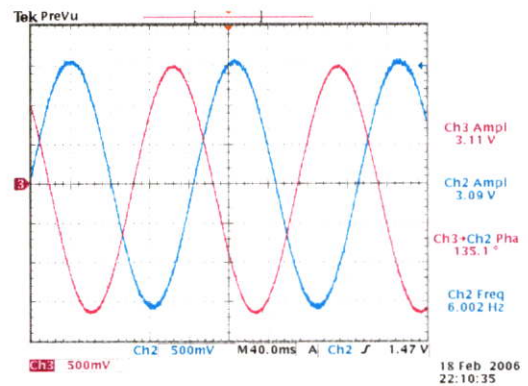
รูปที่ 4.126a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



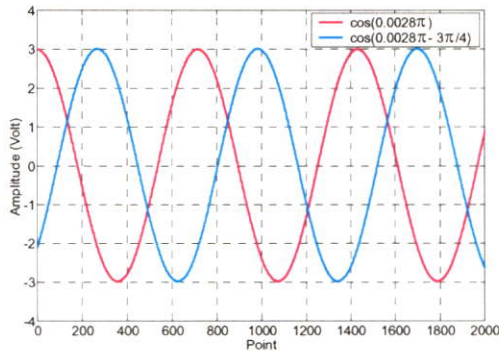
รูปที่ 4.126b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



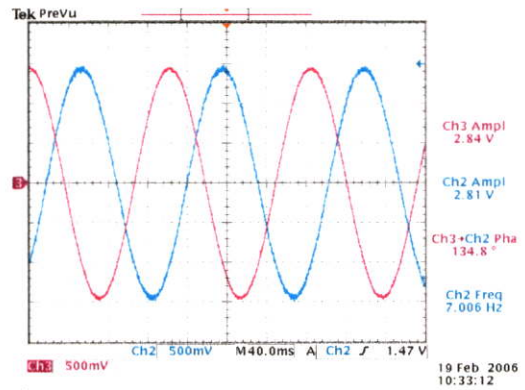
รูปที่ 4.127a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



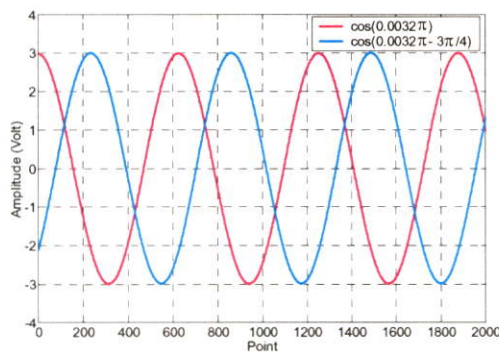
รูปที่ 4.127b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



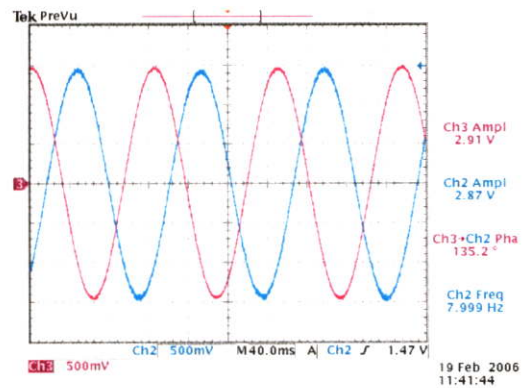
รูปที่ 4.128a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



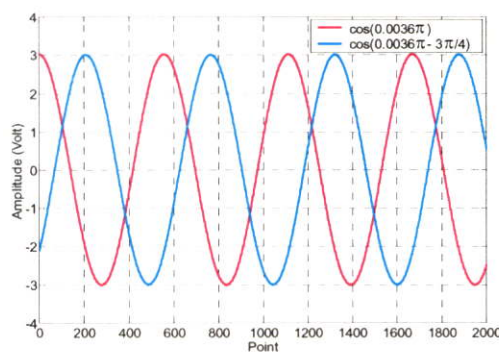
รูปที่ 4.128b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



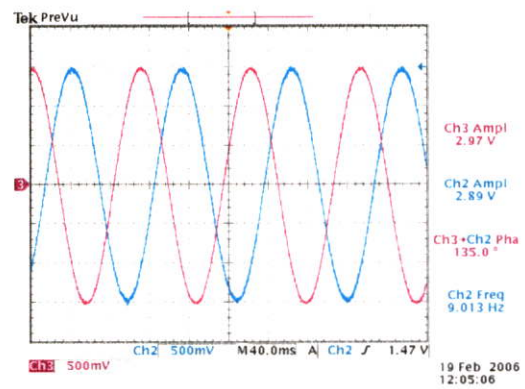
รูปที่ 4.129a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



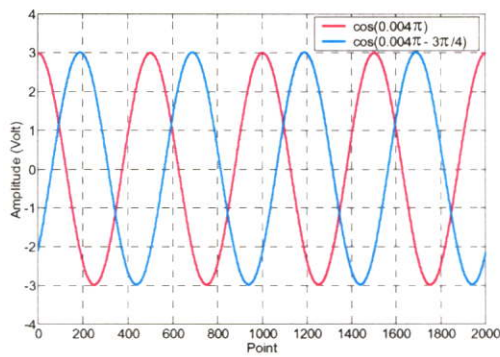
รูปที่ 4.129b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



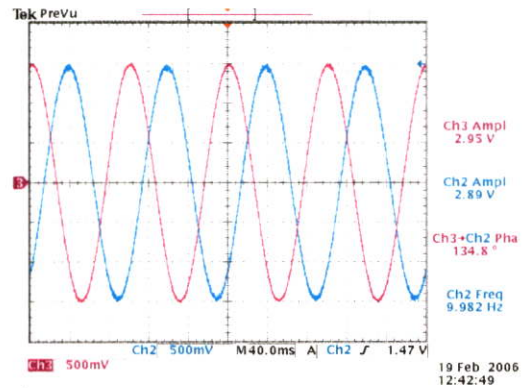
รูปที่ 4.130a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



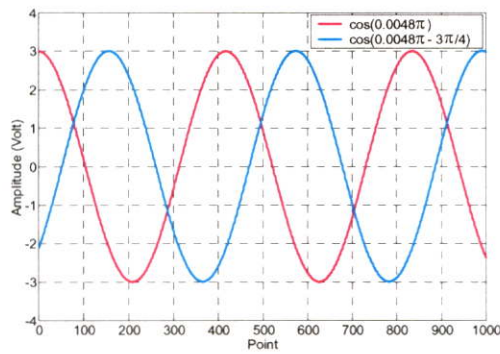
รูปที่ 4.130b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



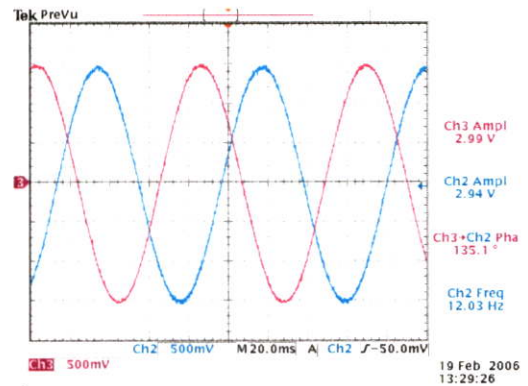
รูปที่ 4.131a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



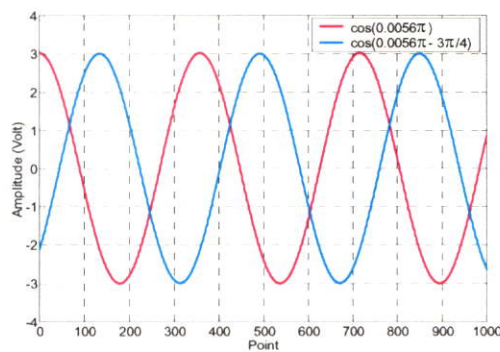
รูปที่ 4.131b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



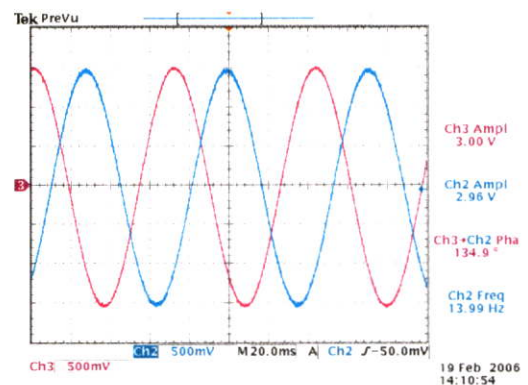
รูปที่ 4.132a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



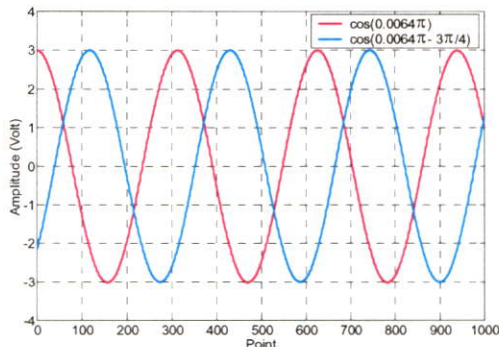
รูปที่ 4.132b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



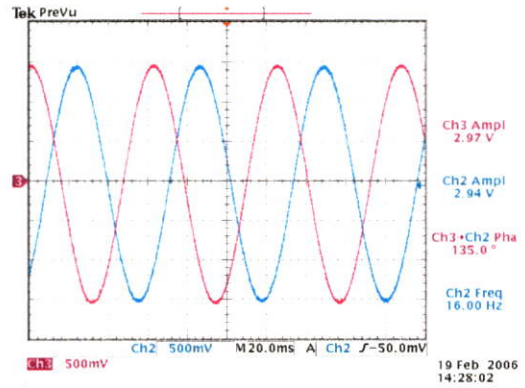
รูปที่ 4.133a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



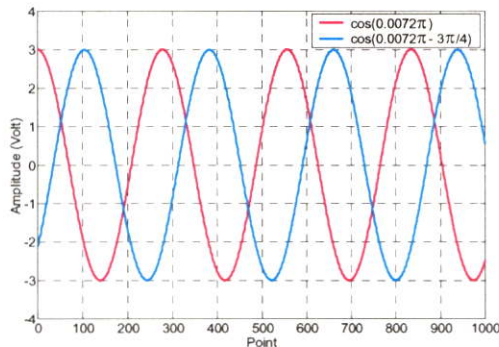
รูปที่ 4.133b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



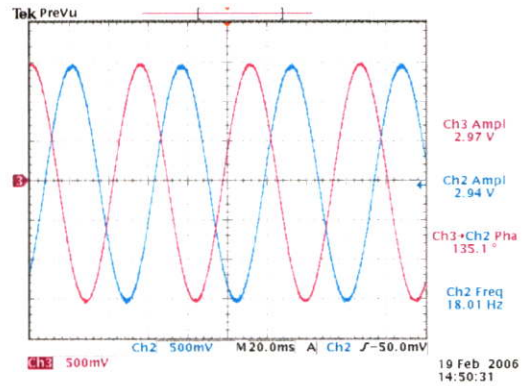
รูปที่ 4.134a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



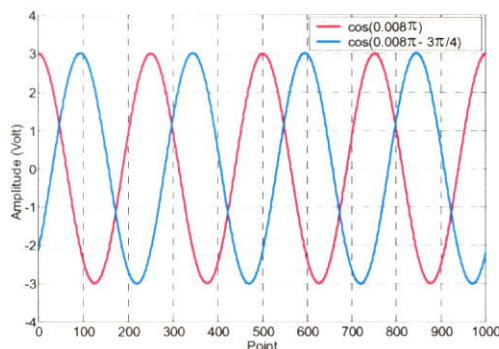
รูปที่ 4.134b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



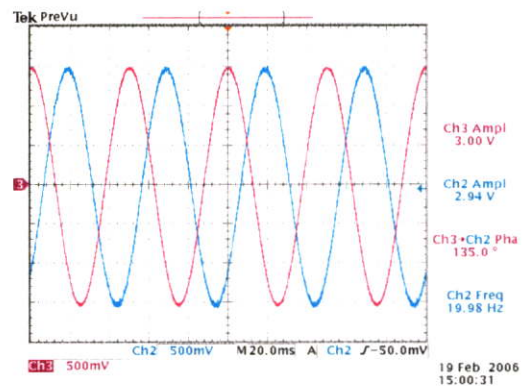
รูปที่ 4.135a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



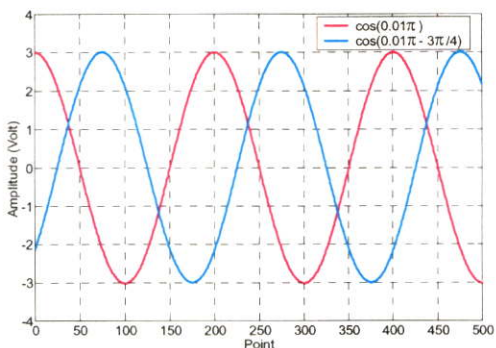
รูปที่ 4.135b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



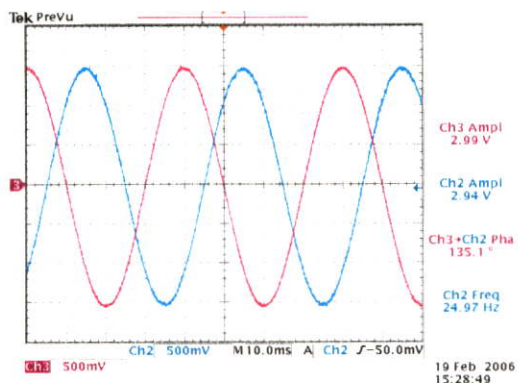
รูปที่ 4.136a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



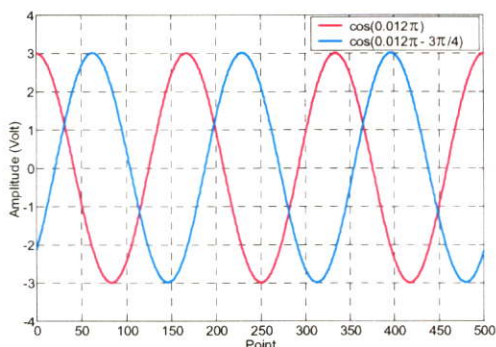
รูปที่ 4.136b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



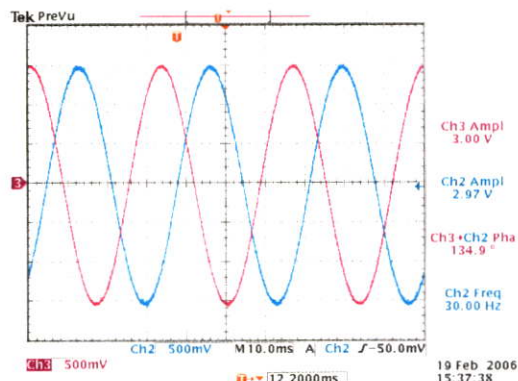
รูปที่ 4.137a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



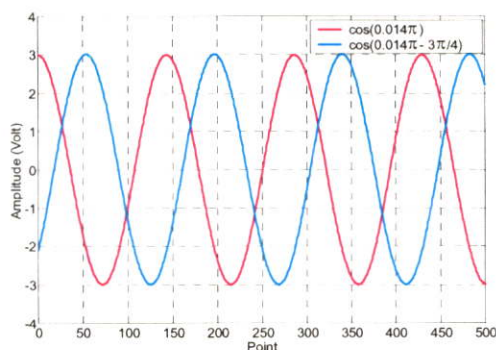
รูปที่ 4.137b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



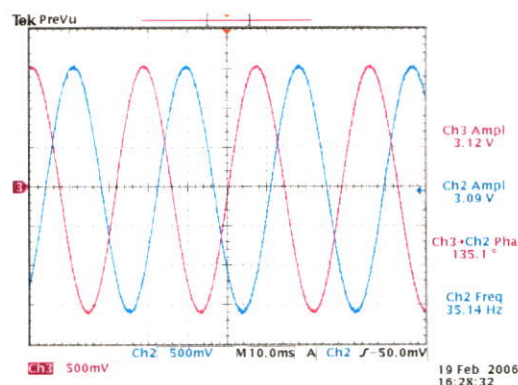
รูปที่ 4.138a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



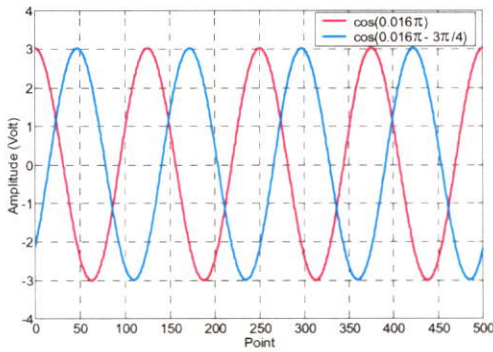
รูปที่ 4.138b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



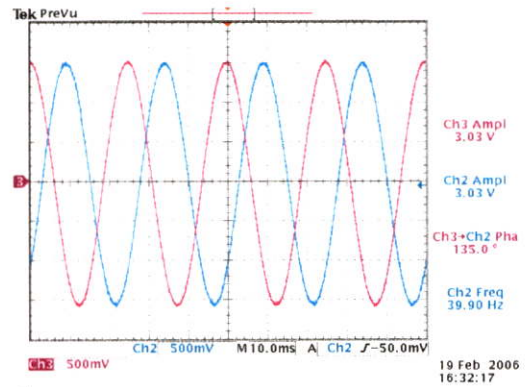
รูปที่ 4.139a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



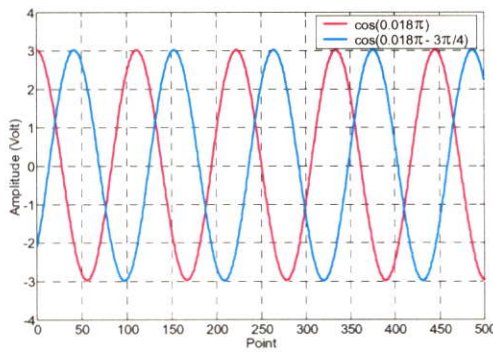
รูปที่ 4.139b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



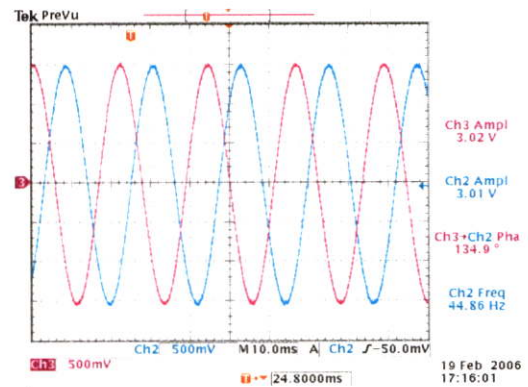
รูปที่ 4.140a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



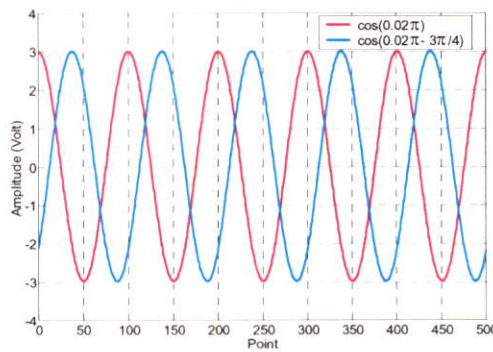
รูปที่ 4.140b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



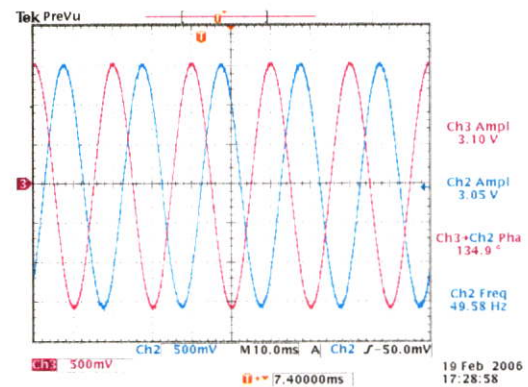
รูปที่ 4.141a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



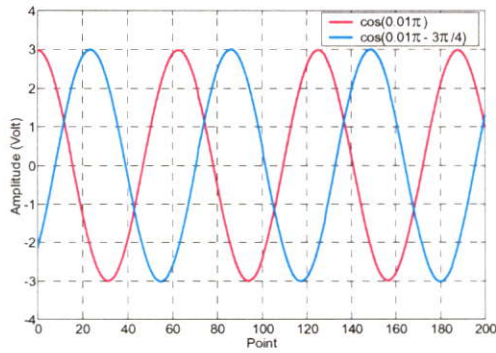
รูปที่ 4.141b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



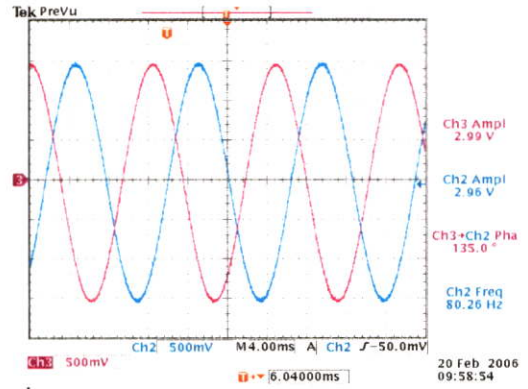
รูปที่ 4.142a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



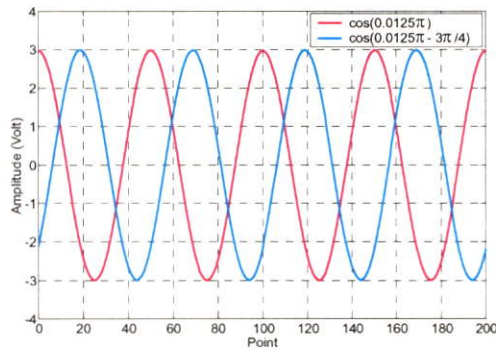
รูปที่ 4.142b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



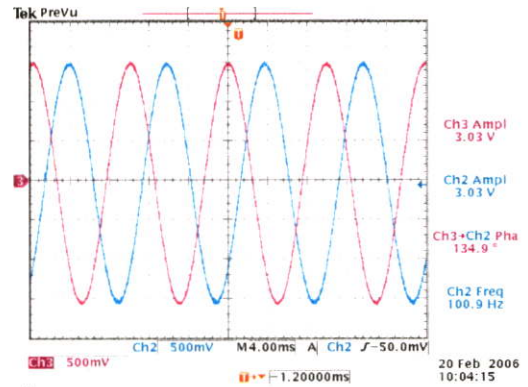
รูปที่ 4.143a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



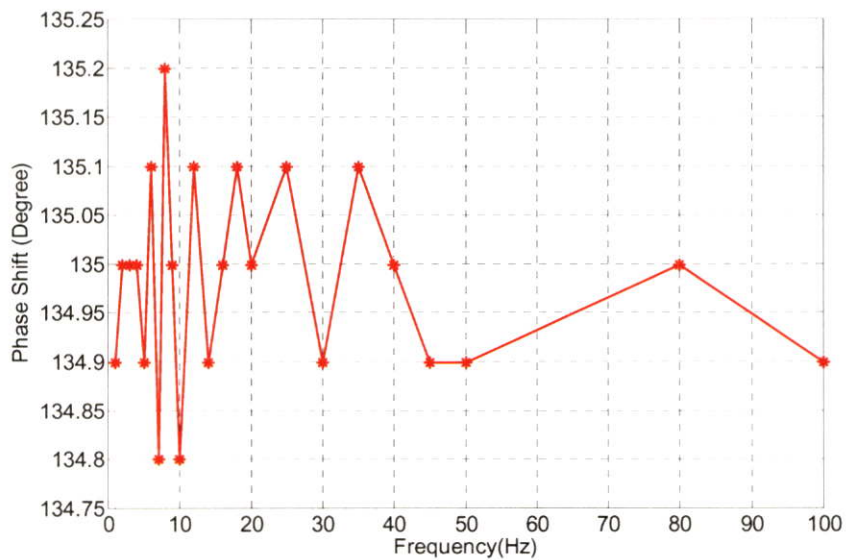
รูปที่ 4.143b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.144a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$

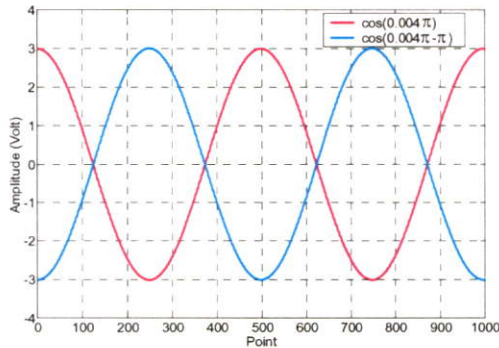


รูปที่ 4.144b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$

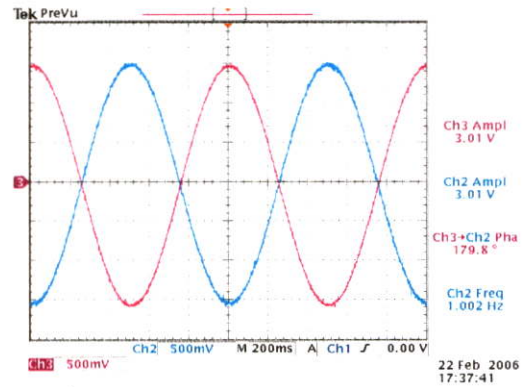


รูปที่ 4.145 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซามพ์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = \frac{3\pi}{4}$  ณ. ความถี่ใดๆ

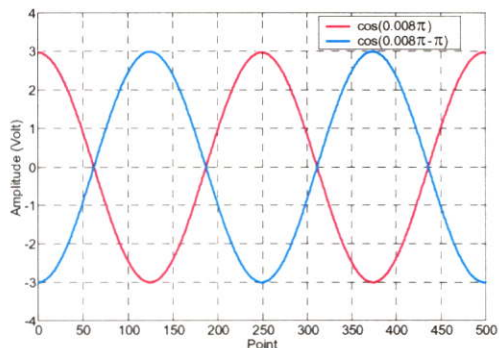
ผลการทดลองที่ 7 ความถี่ของสัญญาณขาอินพุตในช่วง 1-100Hz,  $\phi = \pi$  และความถี่สุ่มมีค่า  $f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$



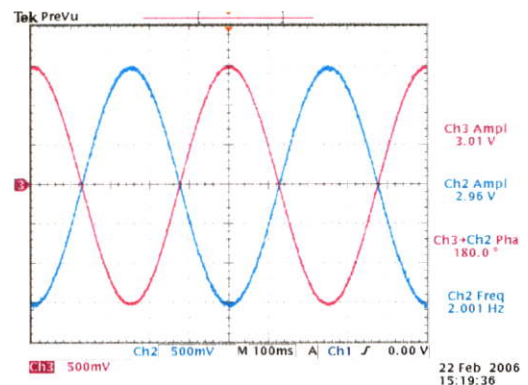
รูปที่ 4.146a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



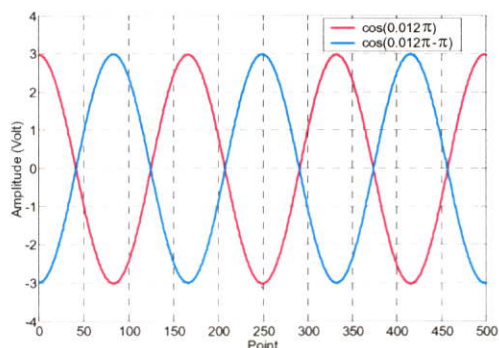
รูปที่ 4.146b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



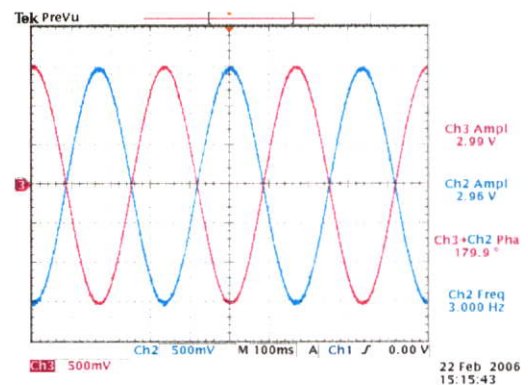
รูปที่ 4.147a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



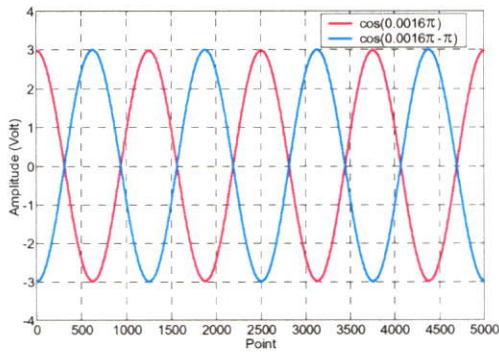
รูปที่ 4.147b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



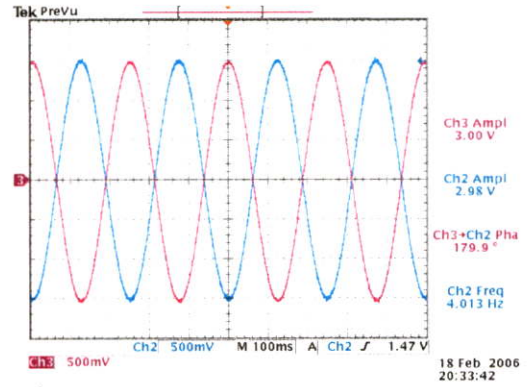
รูปที่ 4.148a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



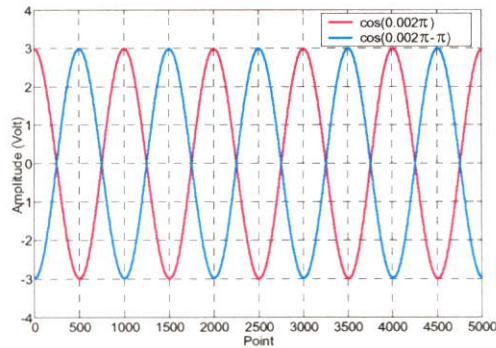
รูปที่ 4.148b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



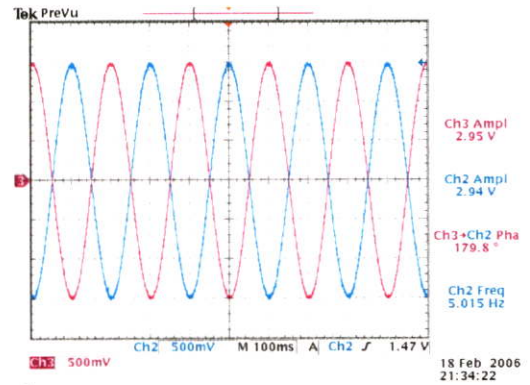
รูปที่ 4.149a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



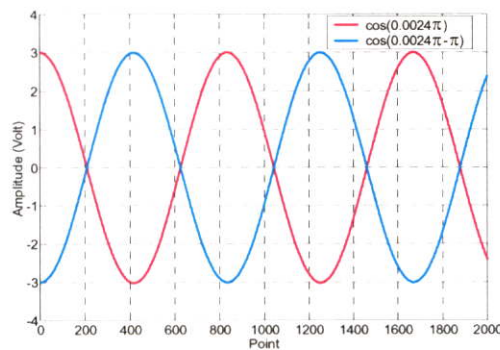
รูปที่ 4.149b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



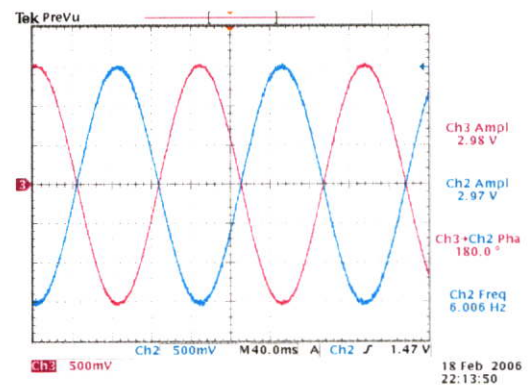
รูปที่ 4.150a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



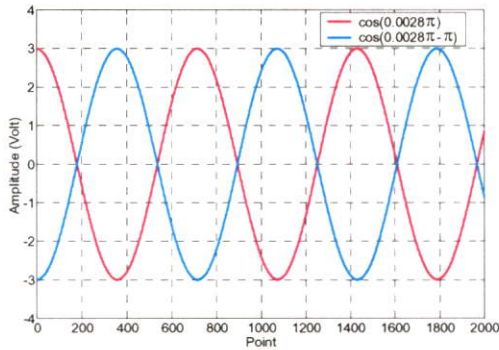
รูปที่ 4.150b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



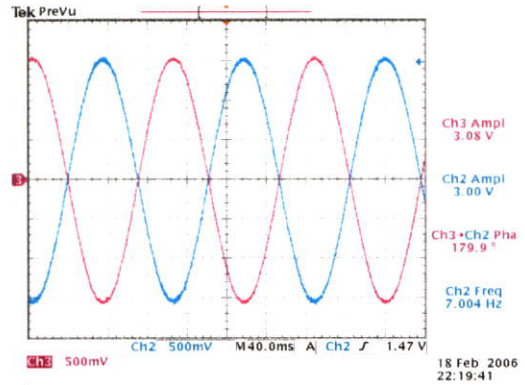
รูปที่ 4.151a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



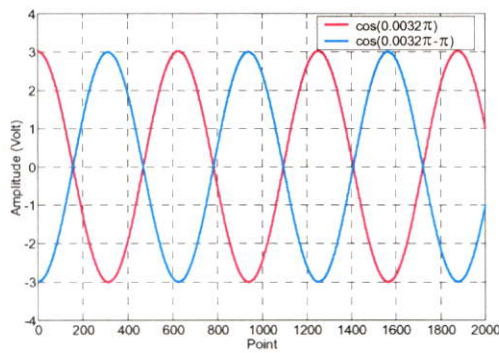
รูปที่ 4.151b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



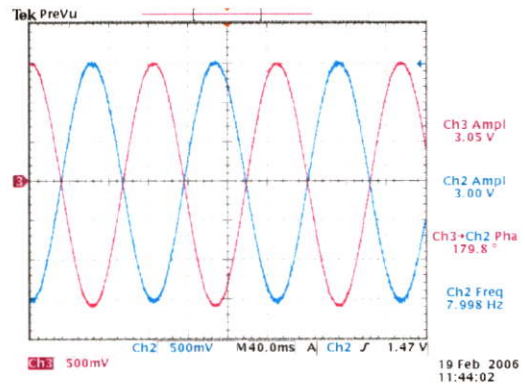
รูปที่ 4.152a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



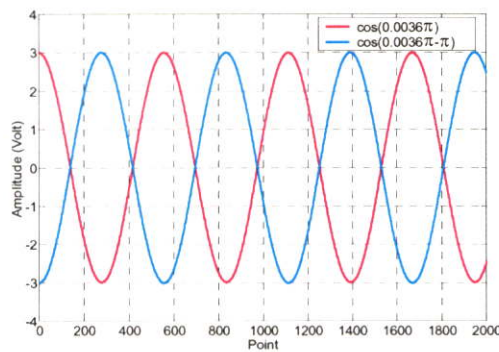
รูปที่ 4.152b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



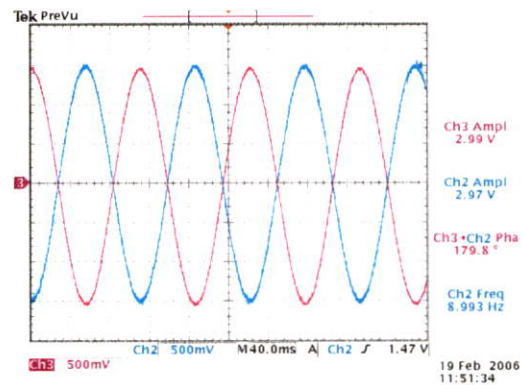
รูปที่ 4.153a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



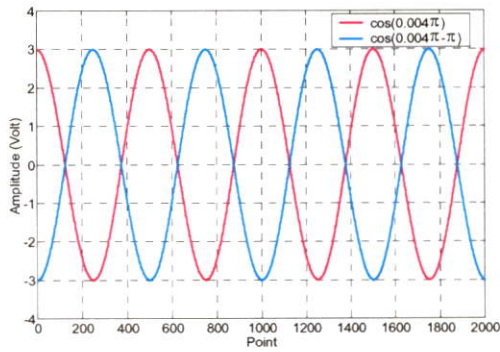
รูปที่ 4.153b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



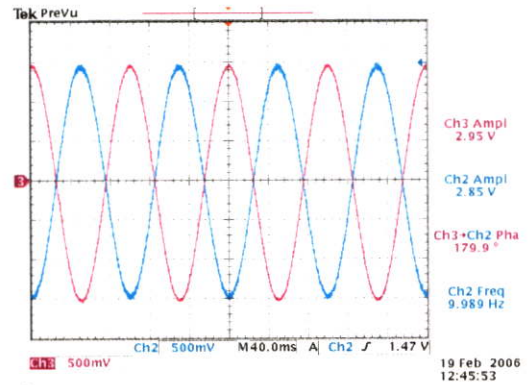
รูปที่ 4.154a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



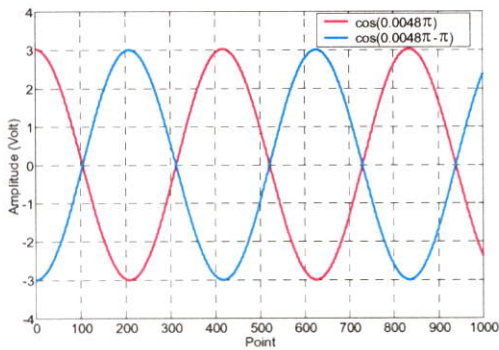
รูปที่ 4.154b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



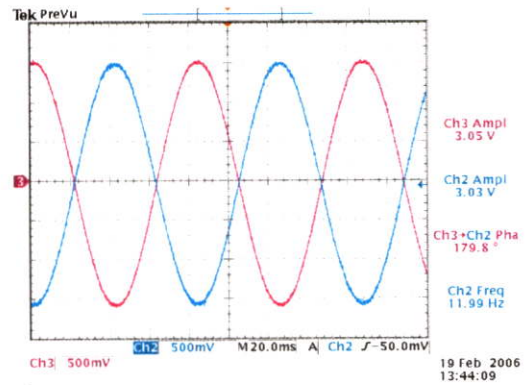
รูปที่ 4.155a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



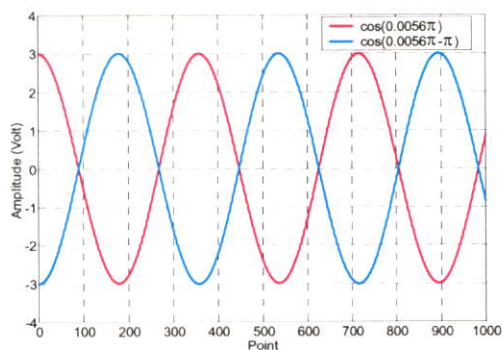
รูปที่ 4.155b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



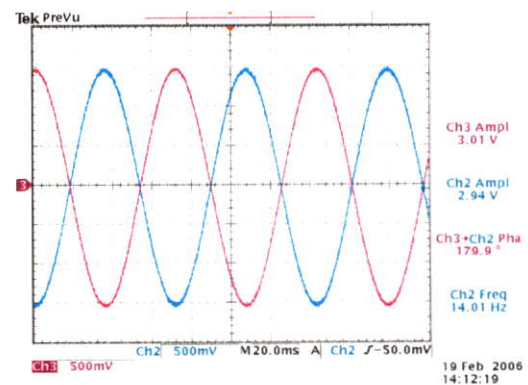
รูปที่ 4.156a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



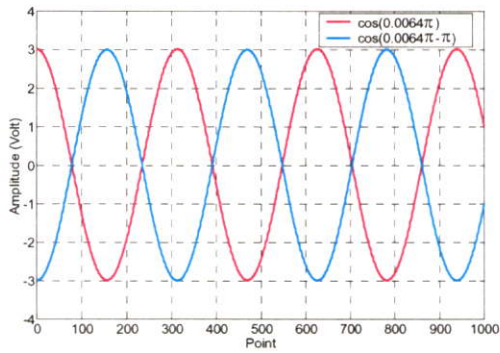
รูปที่ 4.156b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



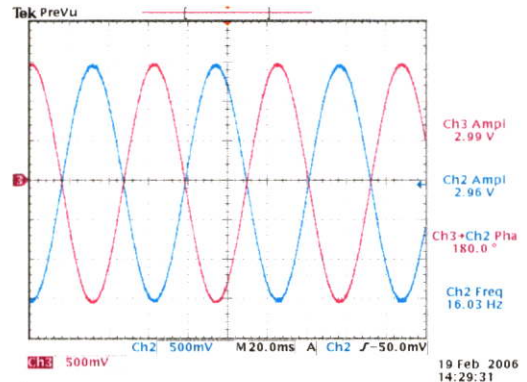
รูปที่ 4.157a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



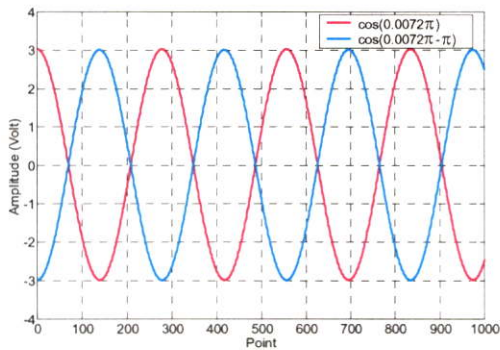
รูปที่ 4.157b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



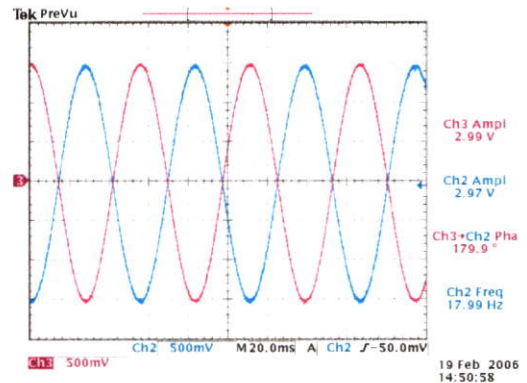
รูปที่ 4.158a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



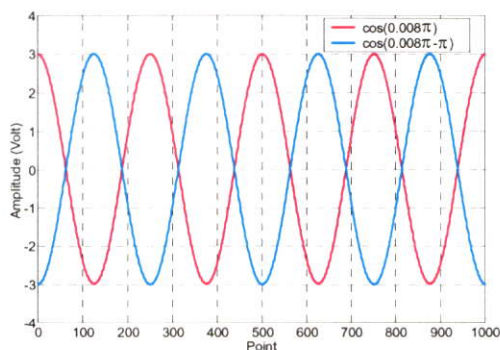
รูปที่ 4.158b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



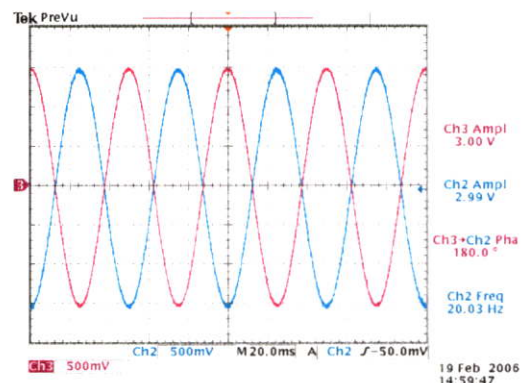
รูปที่ 4.159a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



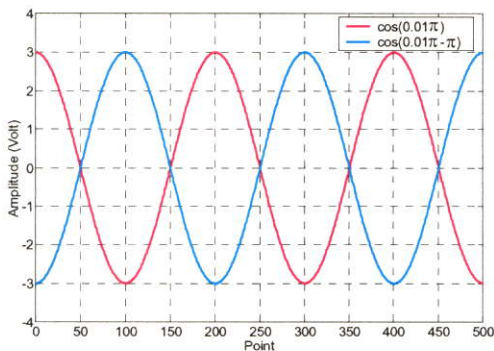
รูปที่ 4.159b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



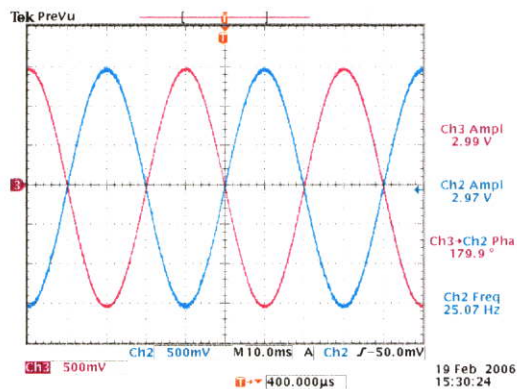
รูปที่ 4.160a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



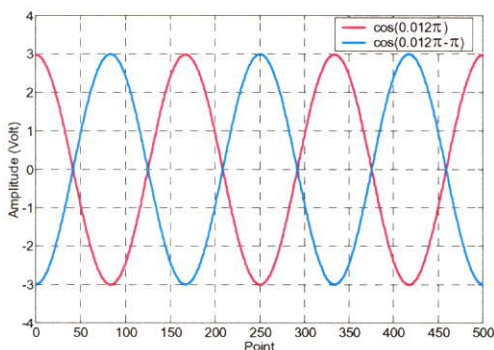
รูปที่ 4.160b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



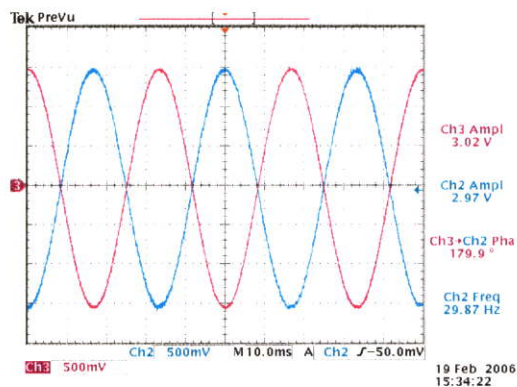
รูปที่ 4.161a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



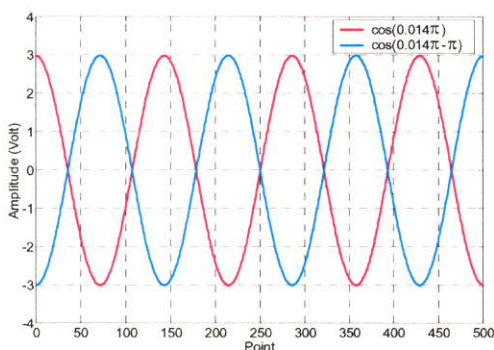
รูปที่ 4.161b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



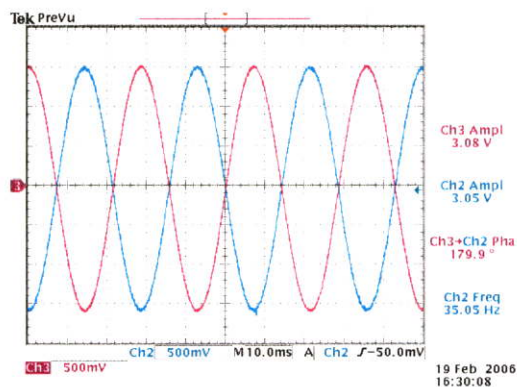
รูปที่ 4.162a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



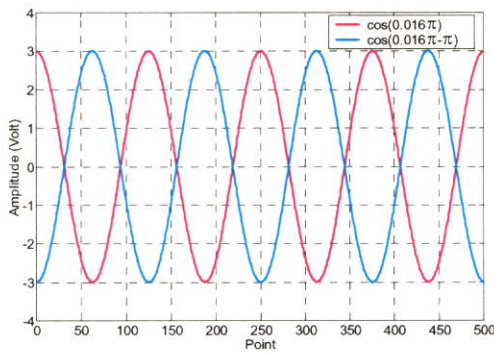
รูปที่ 4.162b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



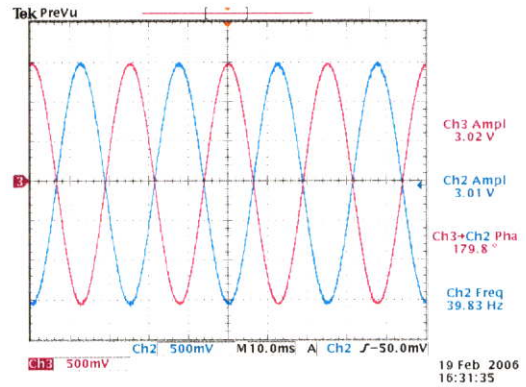
รูปที่ 4.163a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



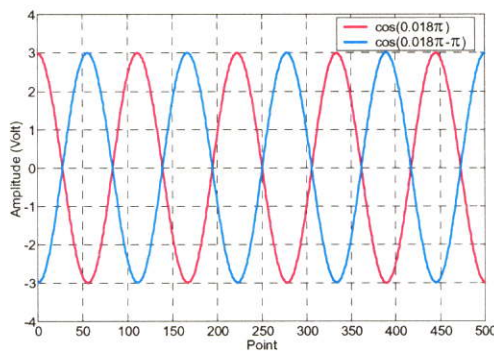
รูปที่ 4.163b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



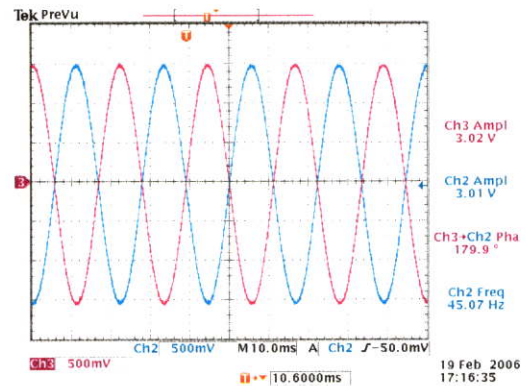
รูปที่ 4.164a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



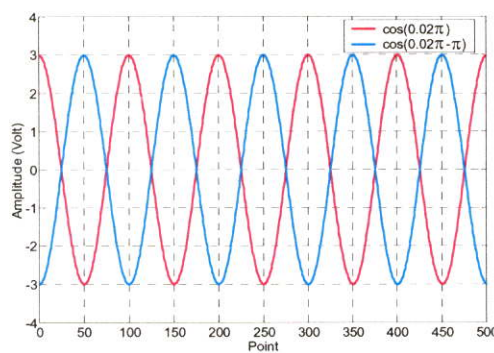
รูปที่ 4.164b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



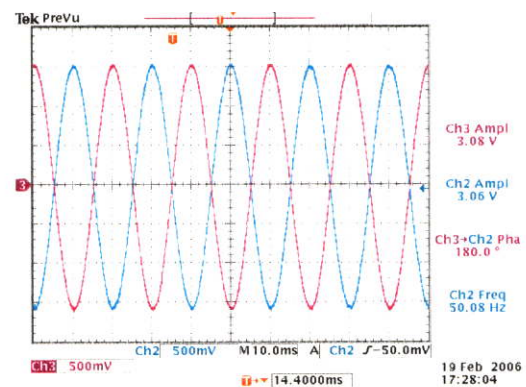
รูปที่ 4.165a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



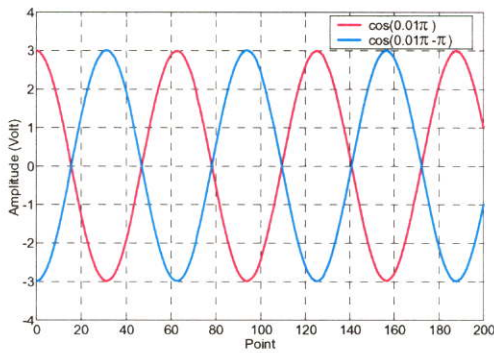
รูปที่ 4.165b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



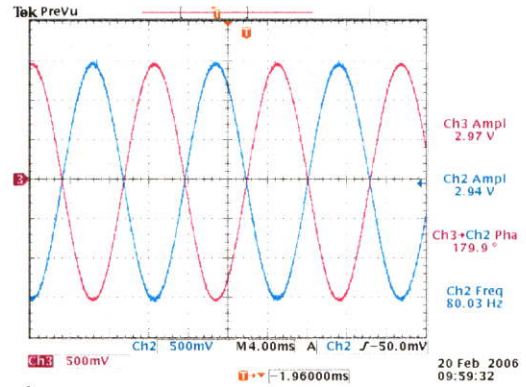
รูปที่ 4.166a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



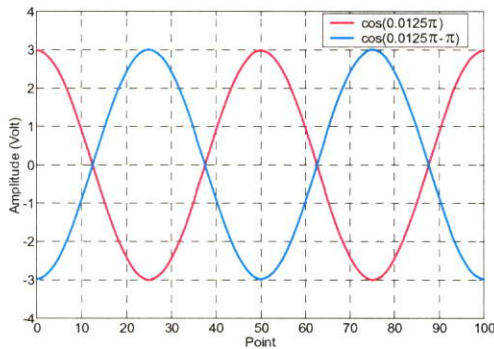
รูปที่ 4.166b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



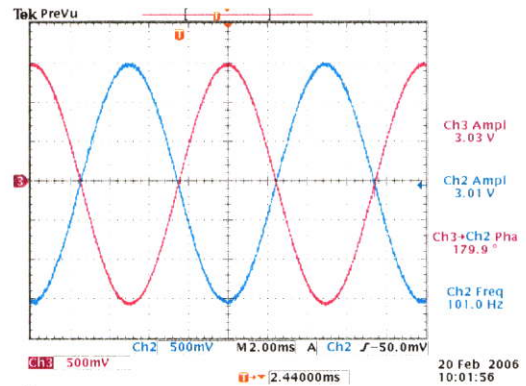
รูปที่ 4.167a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



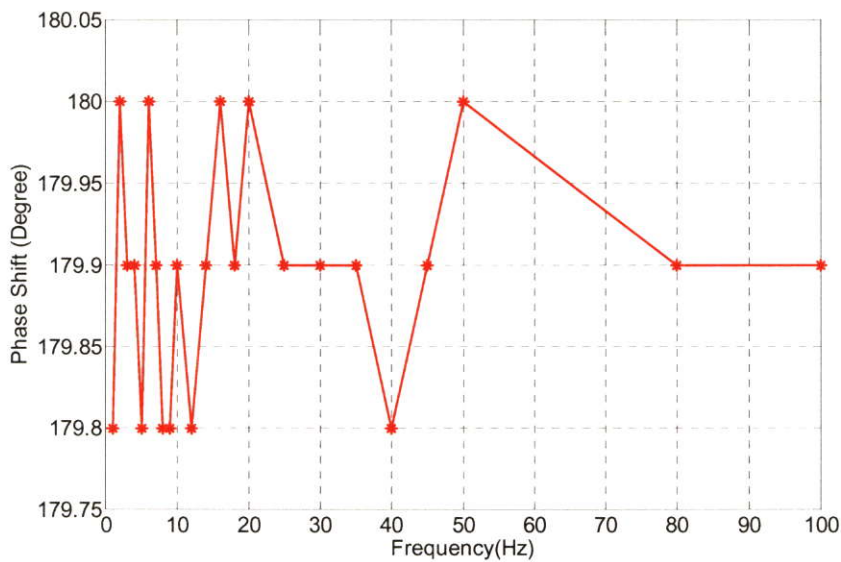
รูปที่ 4.167b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.168a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



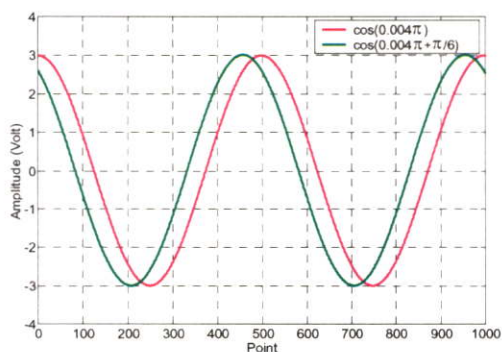
รูปที่ 4.168b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



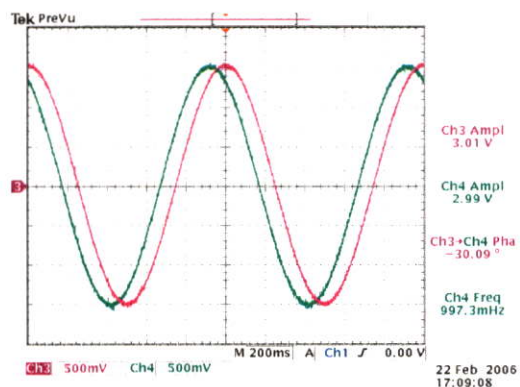
รูปที่ 4.169 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = \pi$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 8 ความถี่ของสัญญาณขาในอยู่ในช่วง 1-100Hz.  $\phi = -\frac{\pi}{6}$  และความถี่สุ่มมีค่า

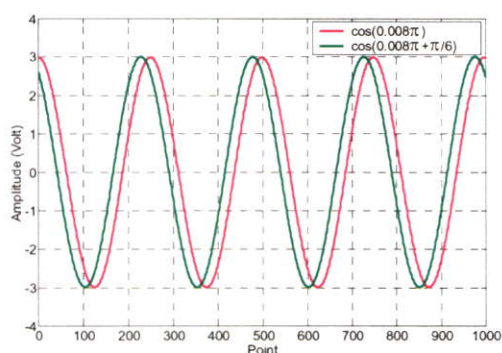
$$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$$



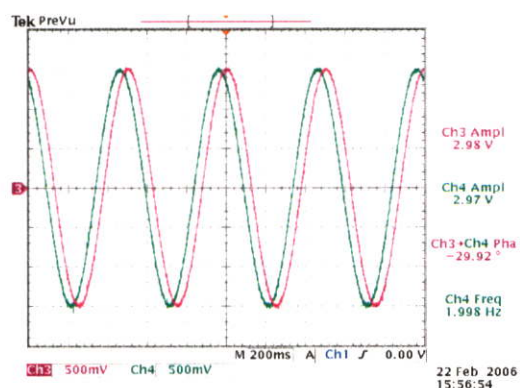
รูปที่ 4.170a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



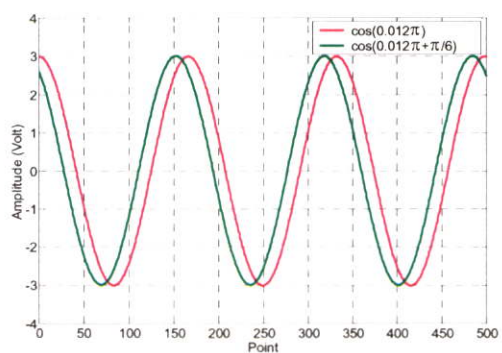
รูปที่ 4.170b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



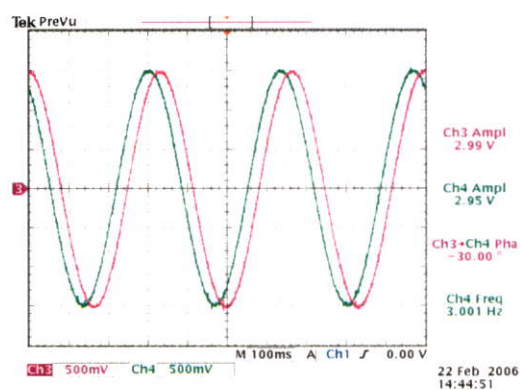
รูปที่ 4.171a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



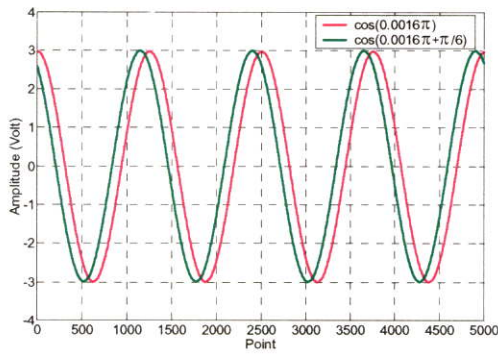
รูปที่ 4.171b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



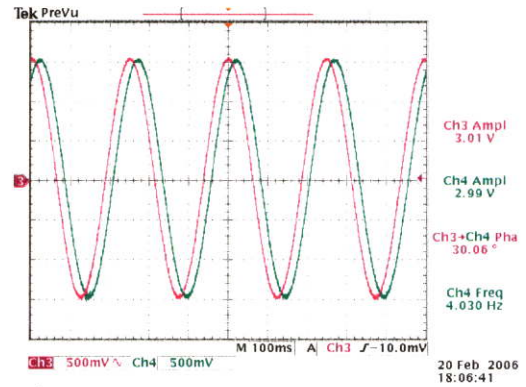
รูปที่ 4.172a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



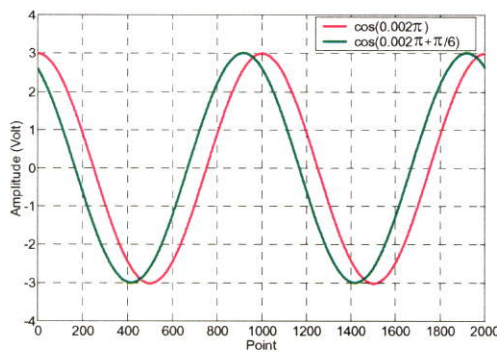
รูปที่ 4.172b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



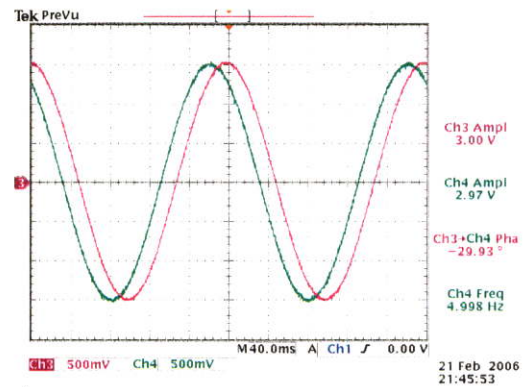
รูปที่ 4.173a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



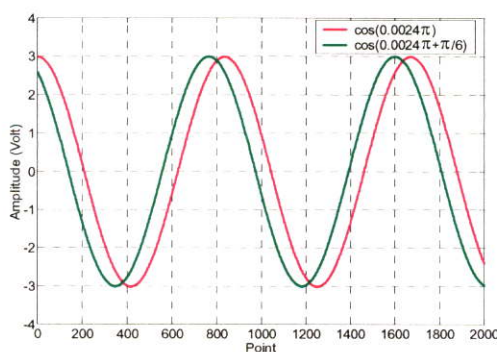
รูปที่ 4.173b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



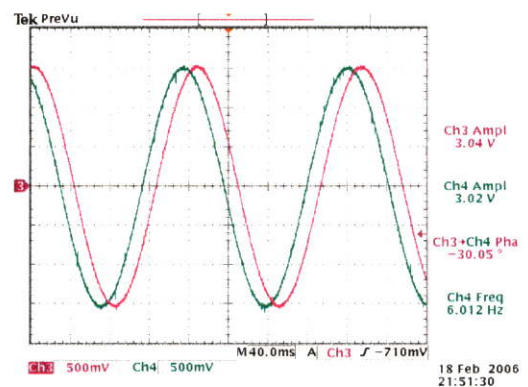
รูปที่ 4.174a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



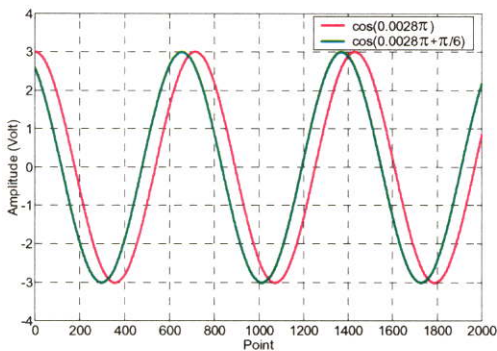
รูปที่ 4.174b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



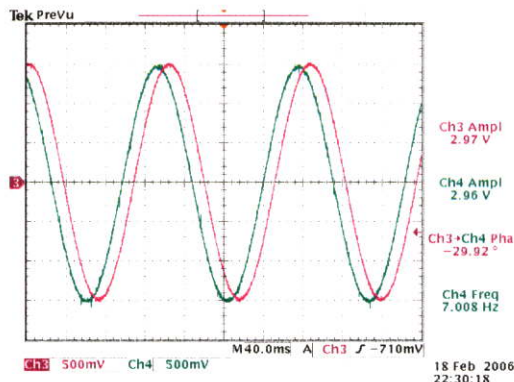
รูปที่ 4.175a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



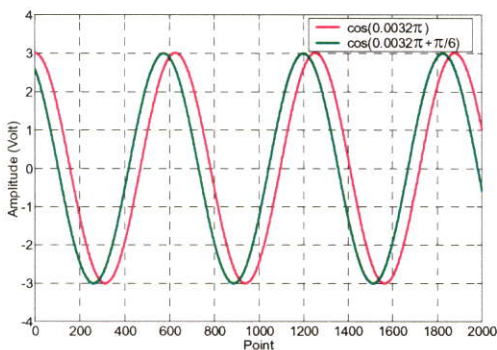
รูปที่ 4.175b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



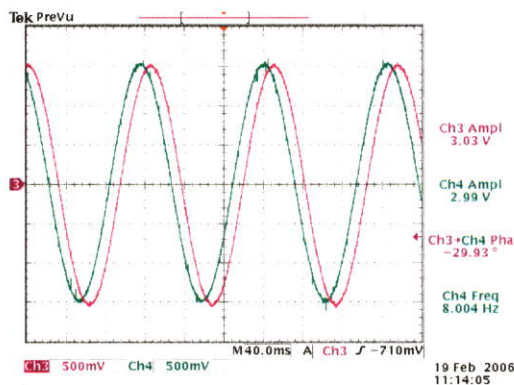
รูปที่ 4.176a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



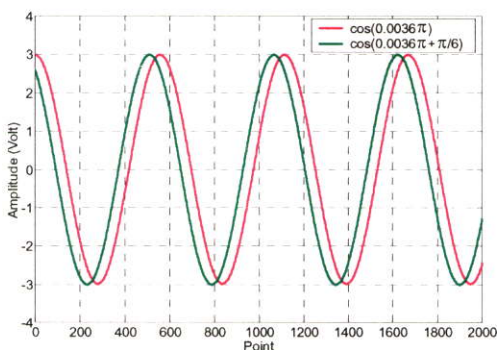
รูปที่ 4.176b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



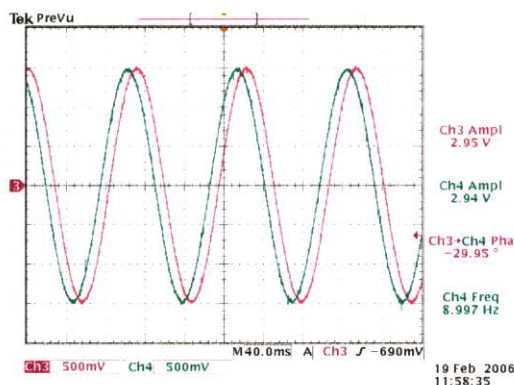
รูปที่ 4.177a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



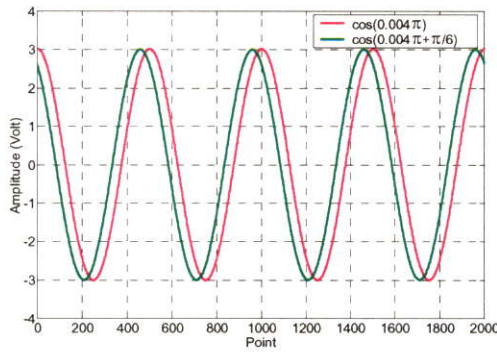
รูปที่ 4.177b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



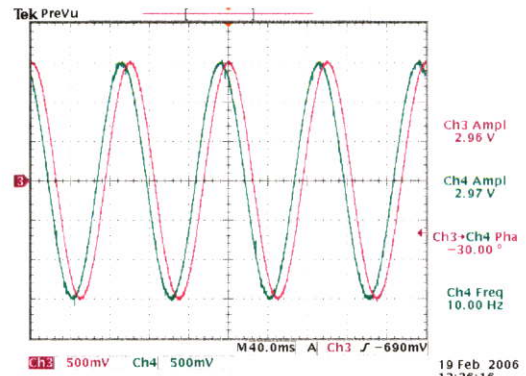
รูปที่ 4.178a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



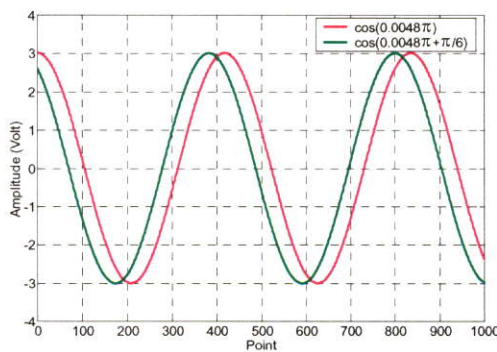
รูปที่ 4.178b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



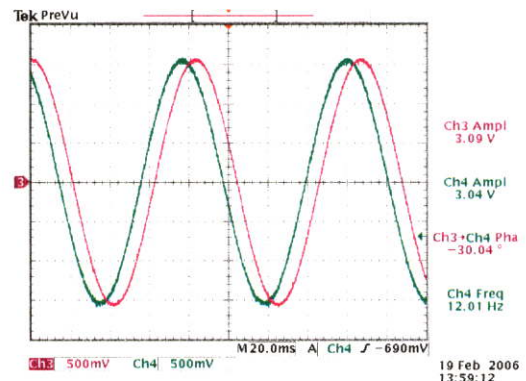
รูปที่ 4.179a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



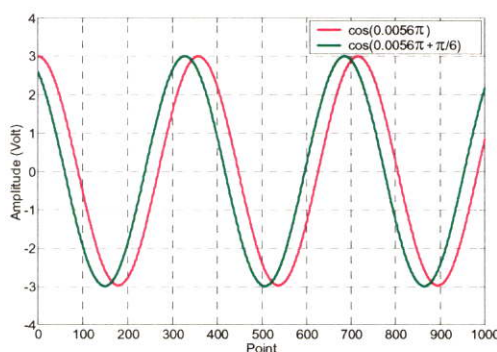
รูปที่ 4.179b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



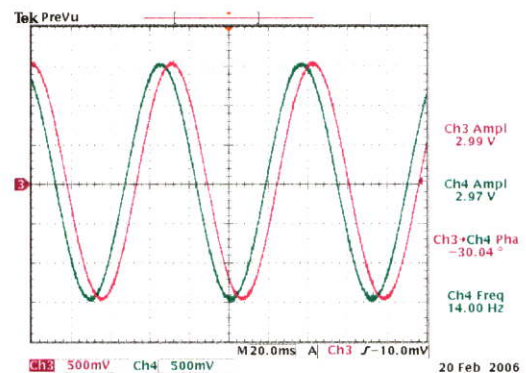
รูปที่ 4.180a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



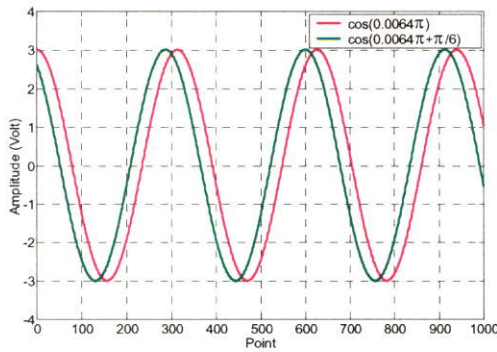
รูปที่ 4.180b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



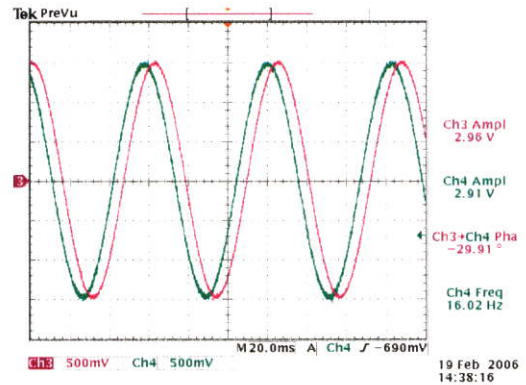
รูปที่ 4.181a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



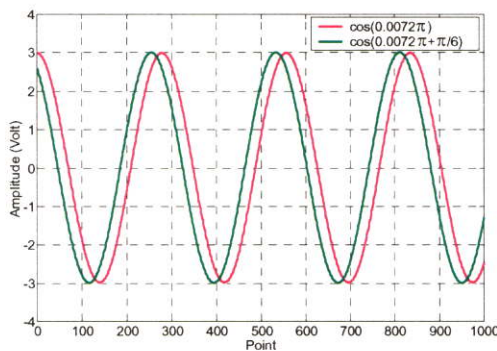
รูปที่ 4.181b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



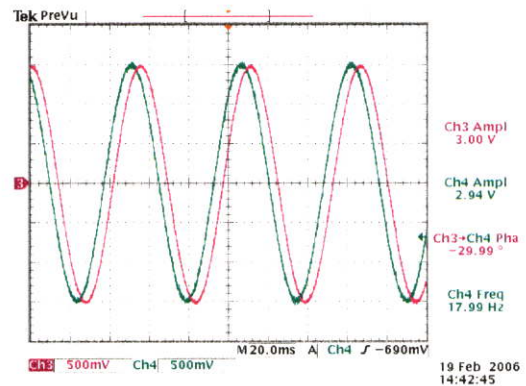
รูปที่ 4.182a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



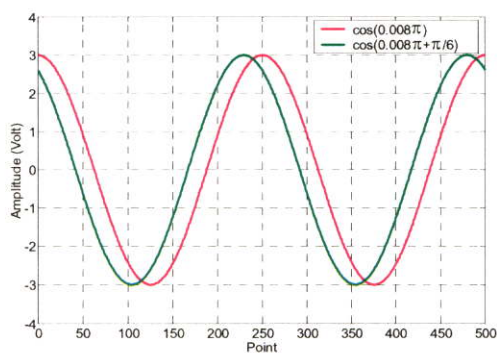
รูปที่ 4.182b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



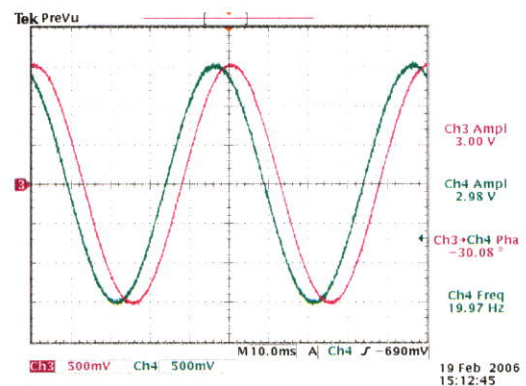
รูปที่ 4.183a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



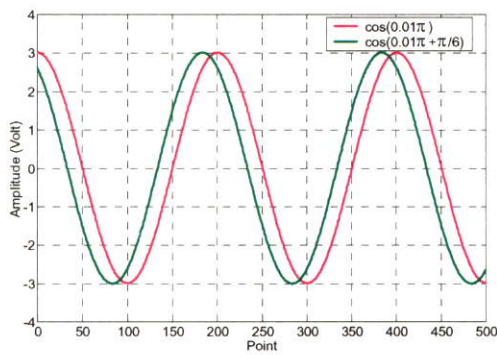
รูปที่ 4.183b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



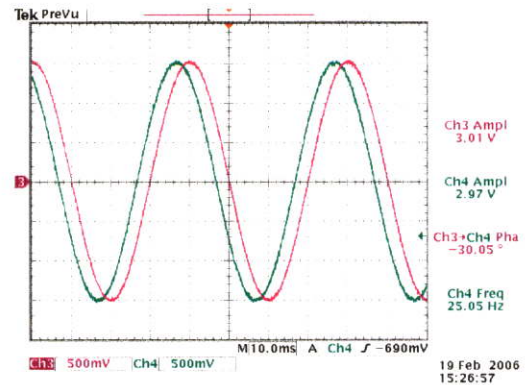
รูปที่ 4.184a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



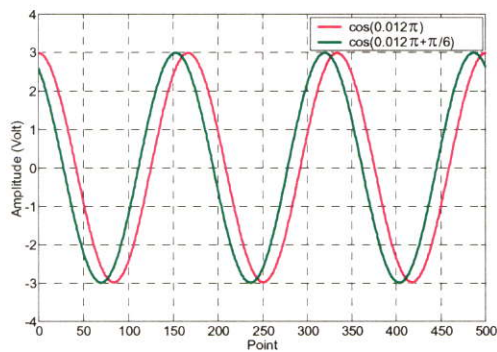
รูปที่ 4.184b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



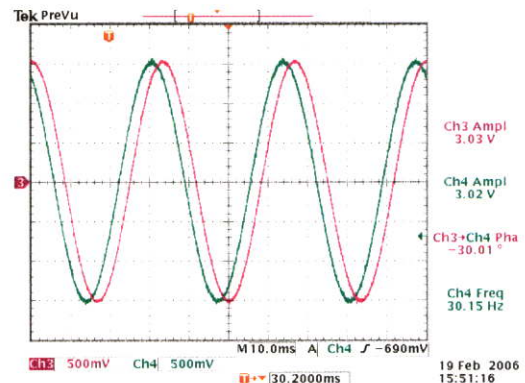
รูปที่ 4.185a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



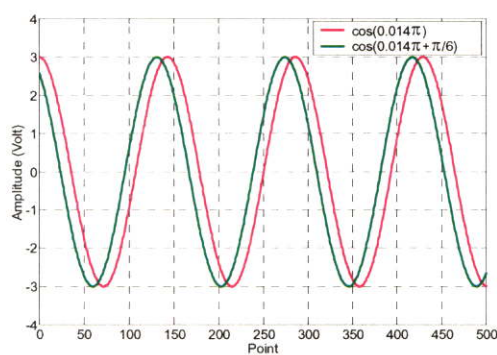
รูปที่ 4.185b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



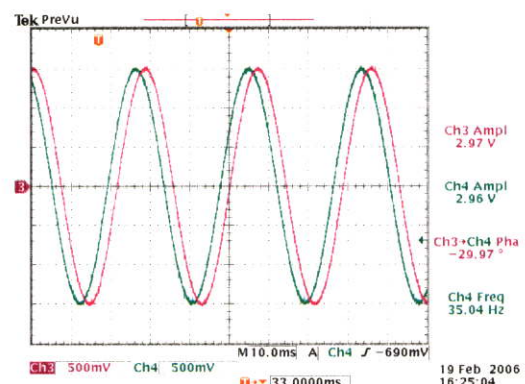
รูปที่ 4.186a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



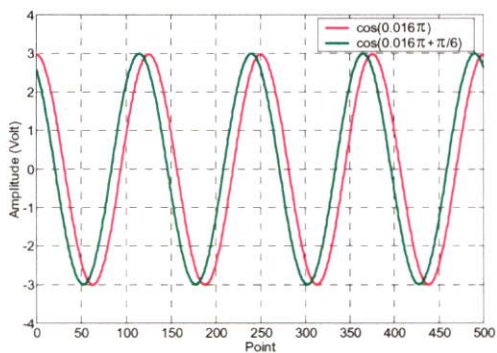
รูปที่ 4.186b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



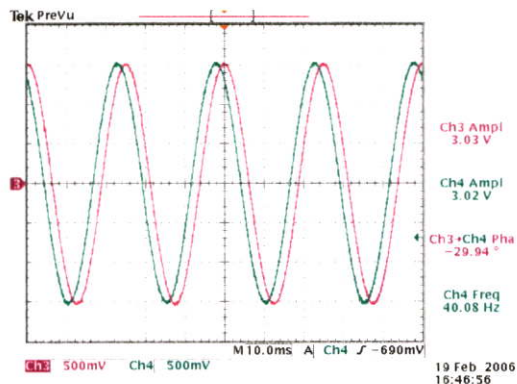
รูปที่ 4.187a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



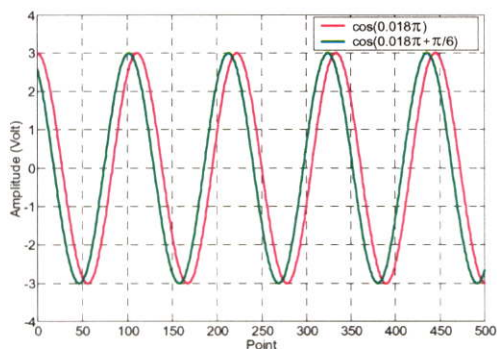
รูปที่ 4.187b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



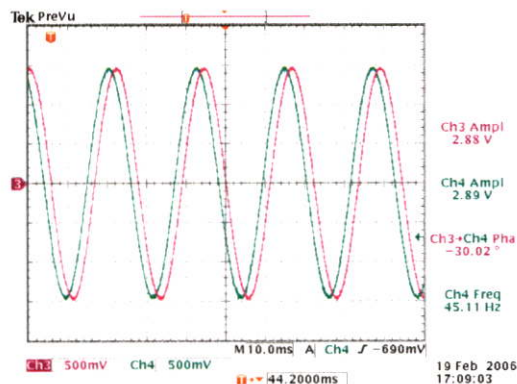
รูปที่ 4.188a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



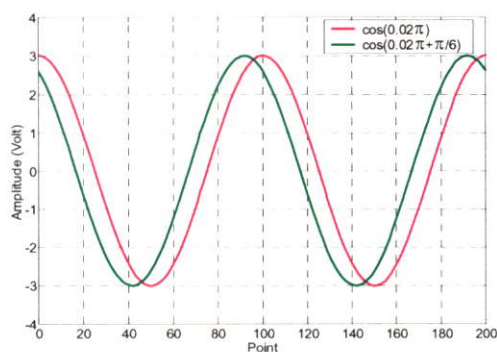
รูปที่ 4.188b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



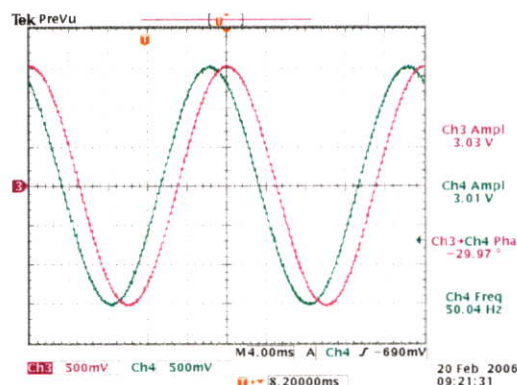
รูปที่ 4.189a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



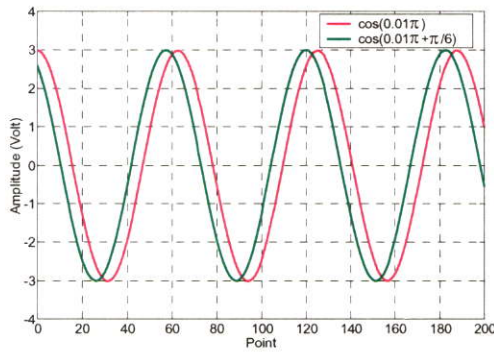
รูปที่ 4.189b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



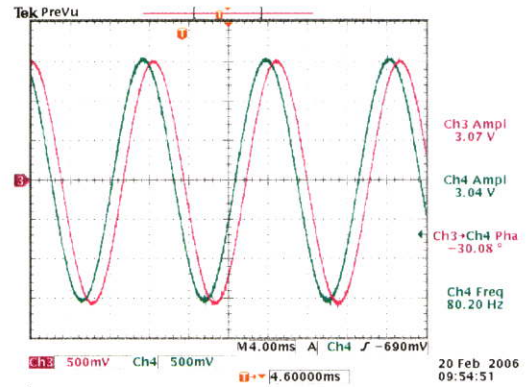
รูปที่ 4.190a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



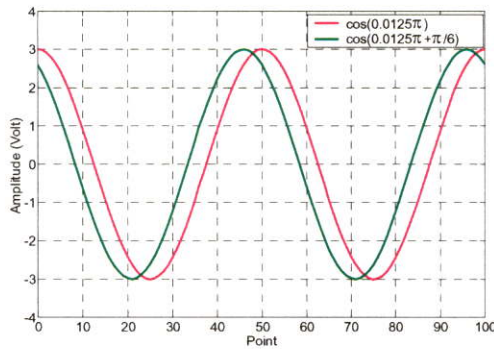
รูปที่ 4.190b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



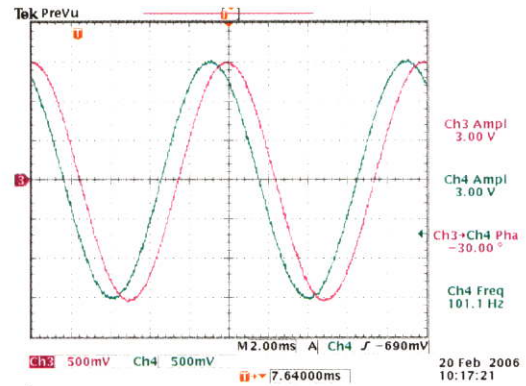
รูปที่ 4.191a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



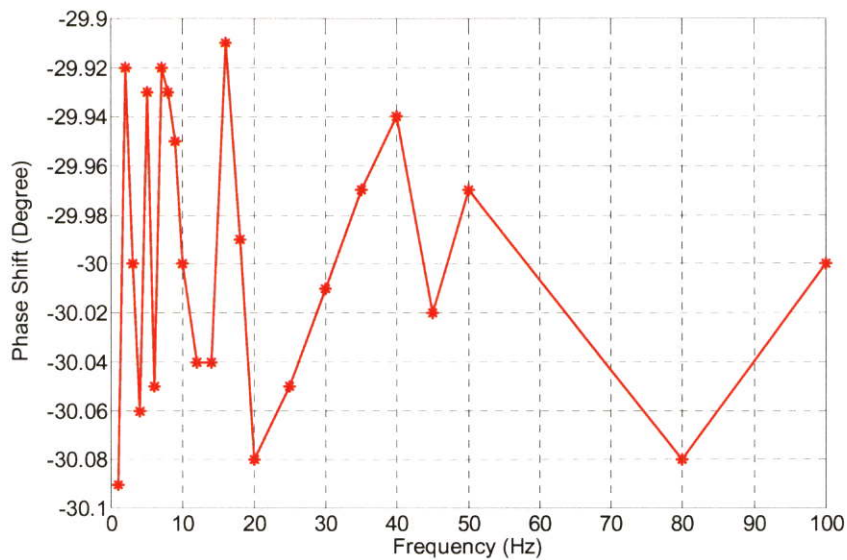
รูปที่ 4.191b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.192a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



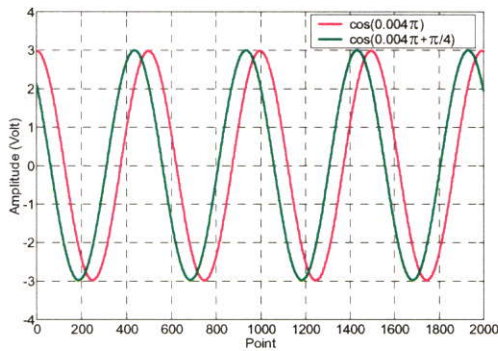
รูปที่ 4.192b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



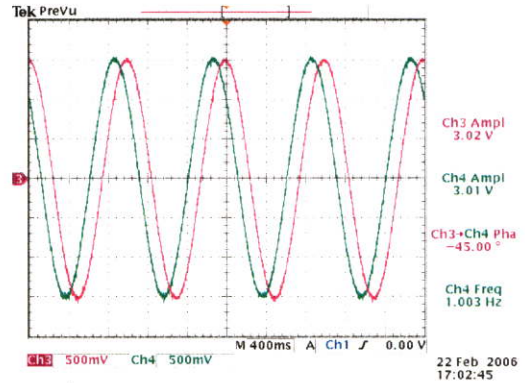
รูปที่ 4.193 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = -\frac{\pi}{6}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 9 ความถี่ของสัญญาณชายน้อยอยู่ในช่วง 1-100Hz,  $\phi = -\frac{\pi}{4}$  และความถี่สุ่มมีค่า

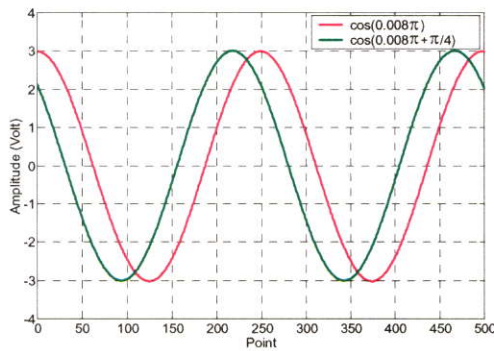
$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$



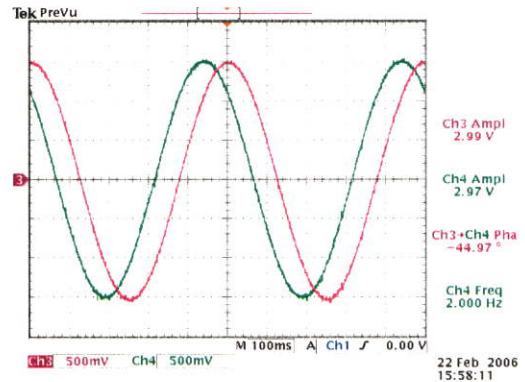
รูปที่ 4.194a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



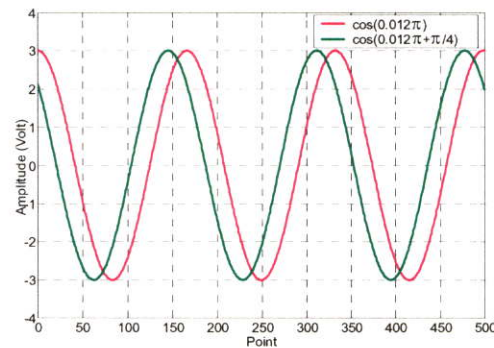
รูปที่ 4.194b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



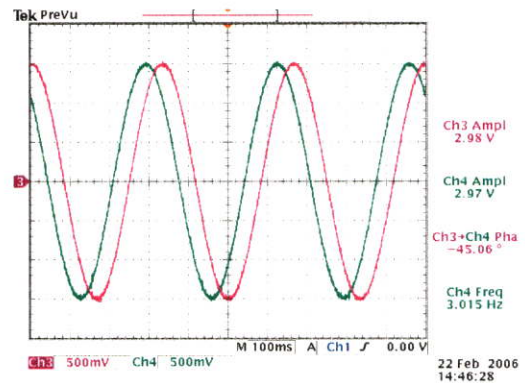
รูปที่ 4.195a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



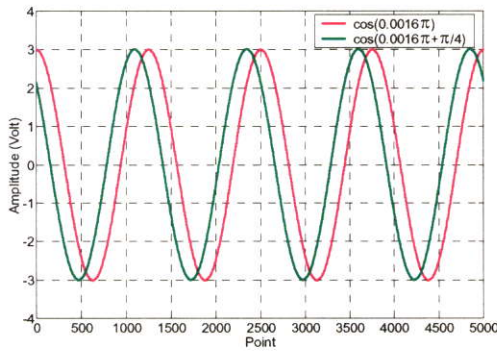
รูปที่ 4.195b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



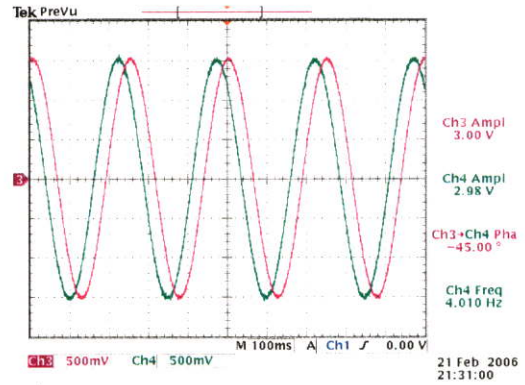
รูปที่ 4.196a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



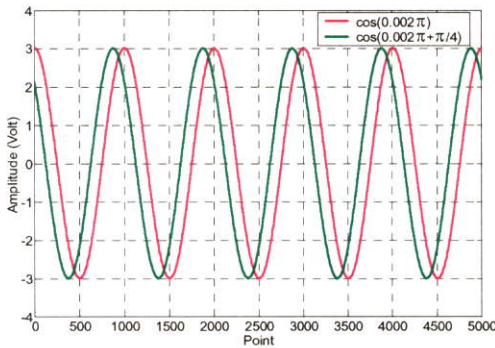
รูปที่ 4.196b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



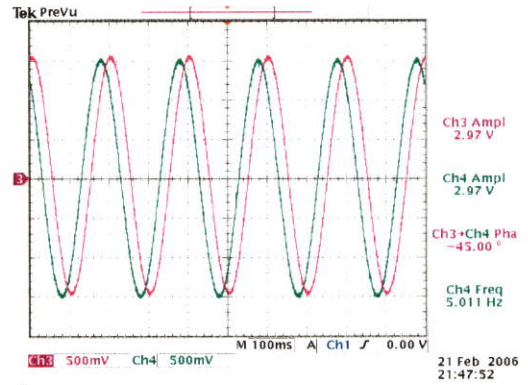
รูปที่ 4.197a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



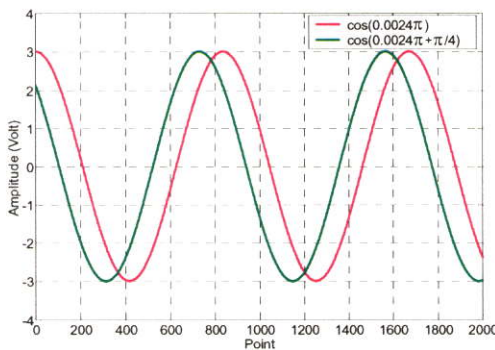
รูปที่ 4.167b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



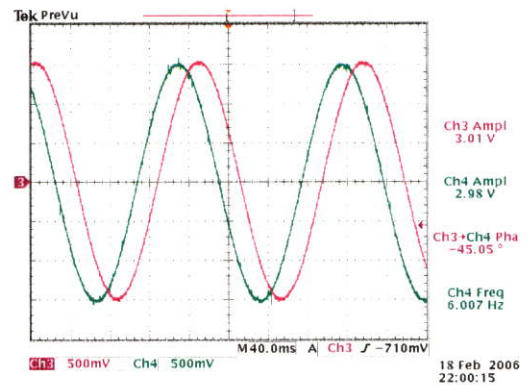
รูปที่ 4.198a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



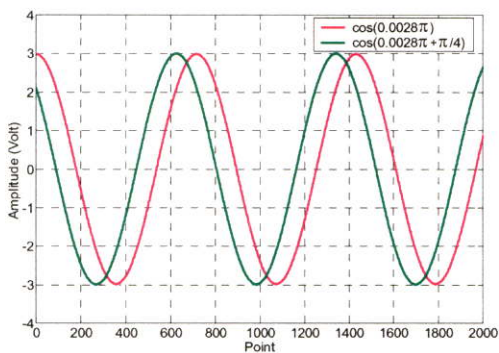
รูปที่ 4.198b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



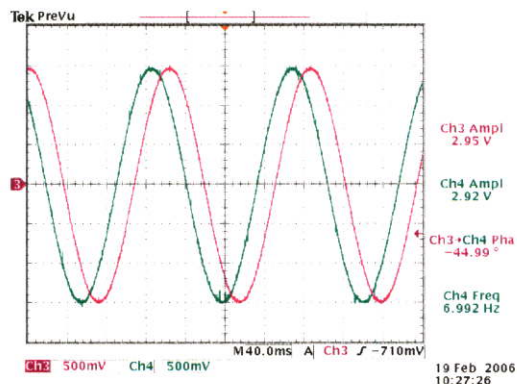
รูปที่ 4.199a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



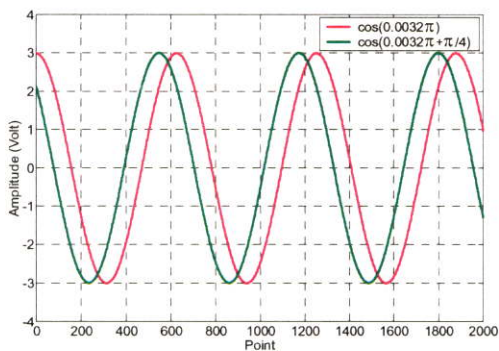
รูปที่ 4.199b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



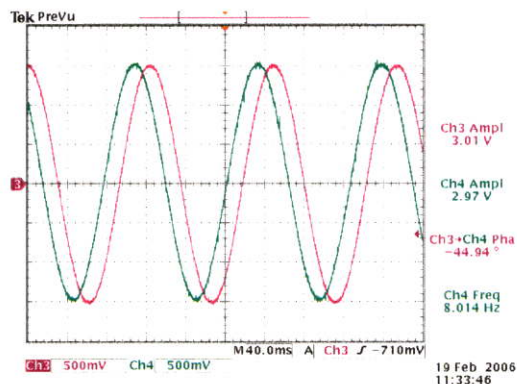
รูปที่ 4.200a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



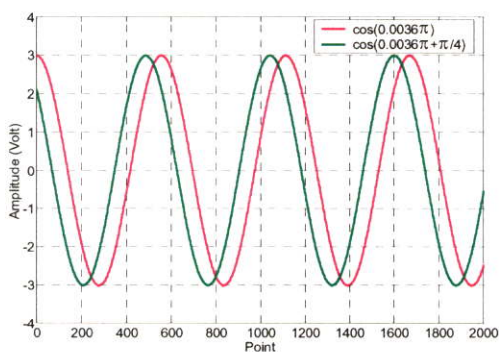
รูปที่ 4.200b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



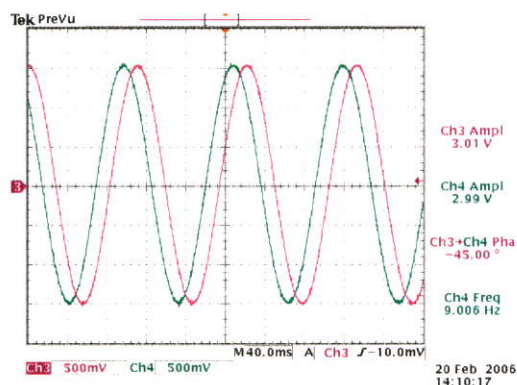
รูปที่ 4.201a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



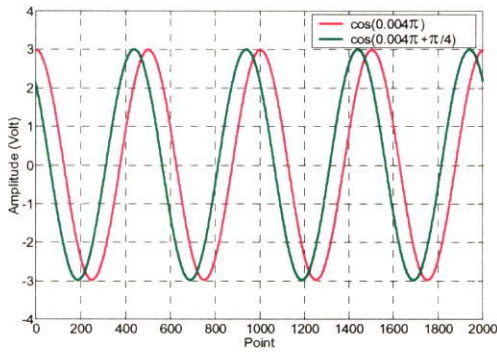
รูปที่ 4.201b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



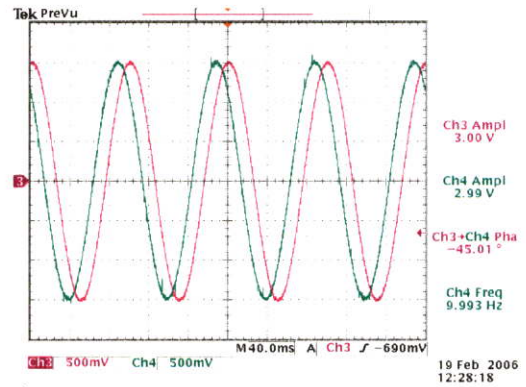
รูปที่ 4.202a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



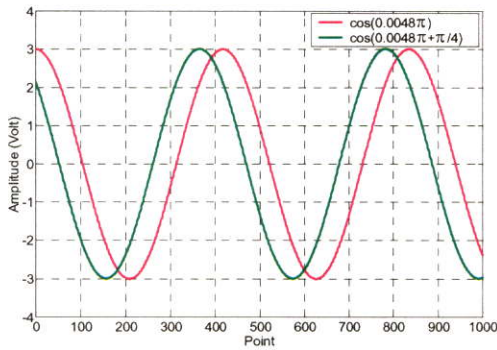
รูปที่ 4.202b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



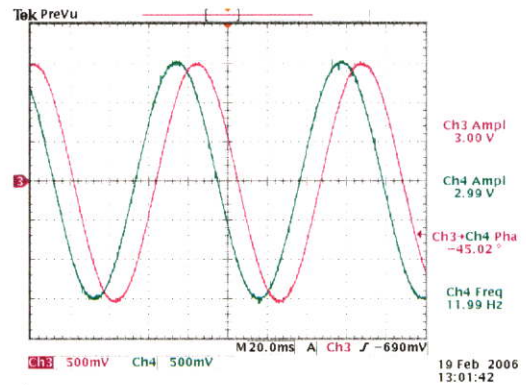
รูปที่ 4.203a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



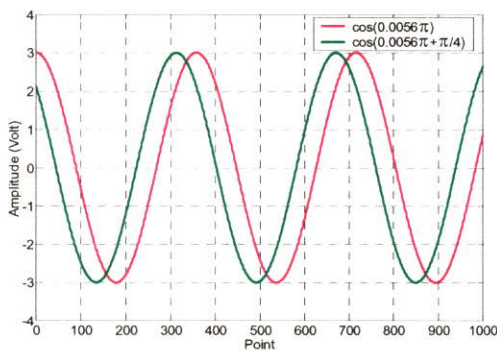
รูปที่ 4.203b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



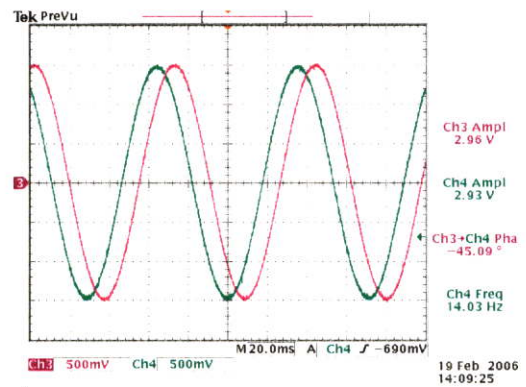
รูปที่ 4.204a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



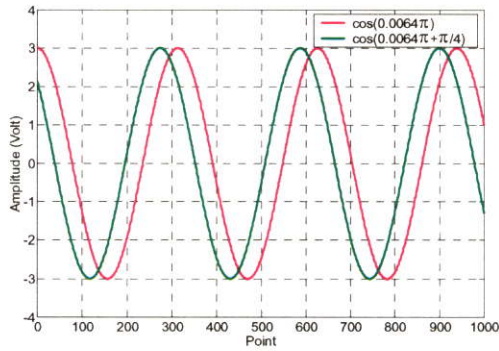
รูปที่ 4.204b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



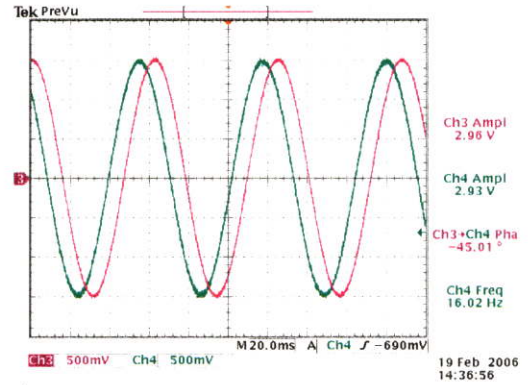
รูปที่ 4.205a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



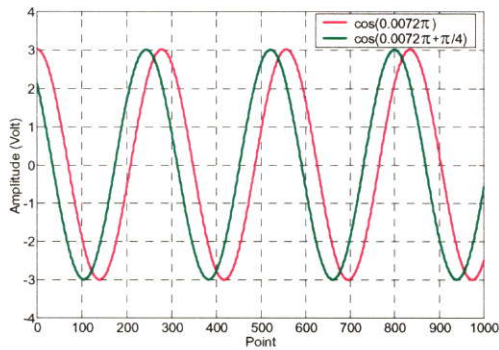
รูปที่ 4.205b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



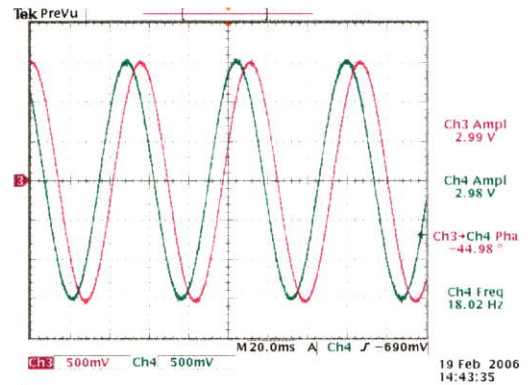
รูปที่ 4.206a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



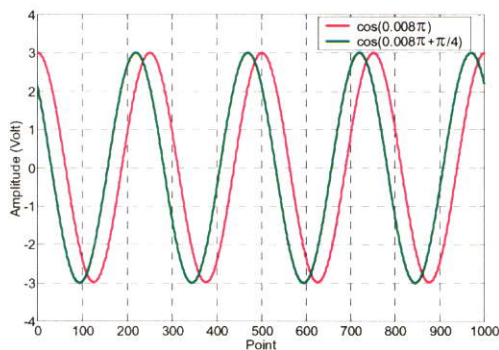
รูปที่ 4.206b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



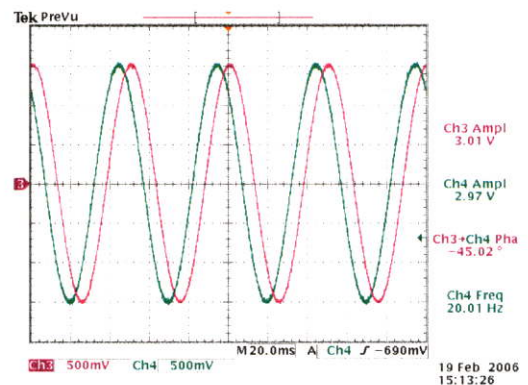
รูปที่ 4.207a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



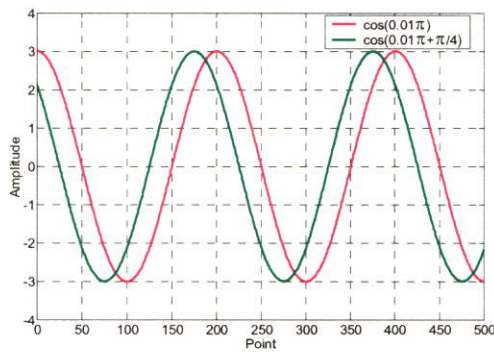
รูปที่ 4.207b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



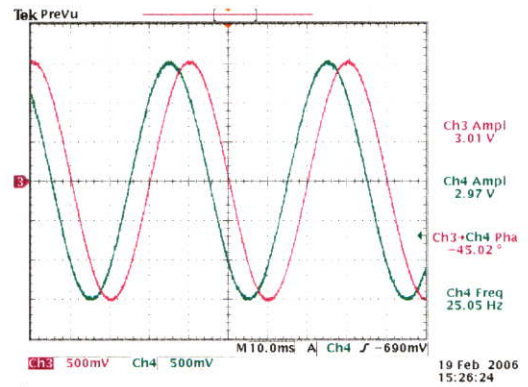
รูปที่ 4.208a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



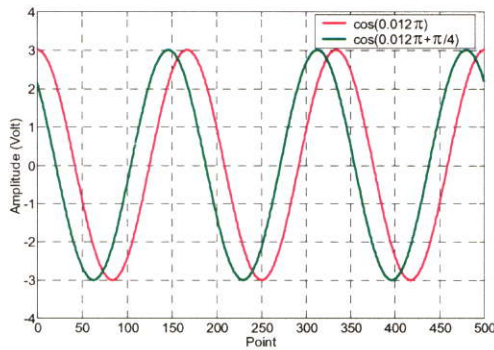
รูปที่ 4.208b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



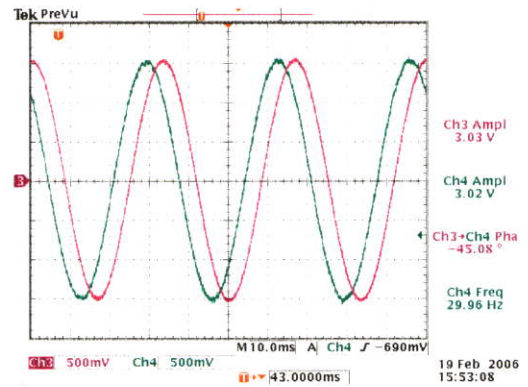
รูปที่ 4.209a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



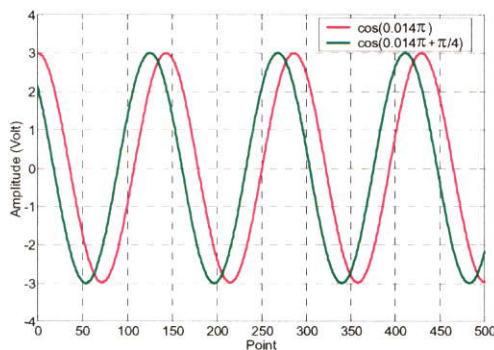
รูปที่ 4.209b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



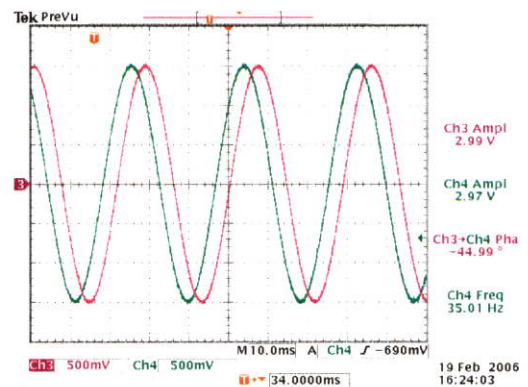
รูปที่ 4.210a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



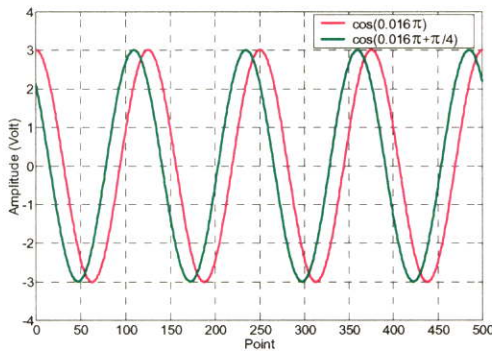
รูปที่ 4.210b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



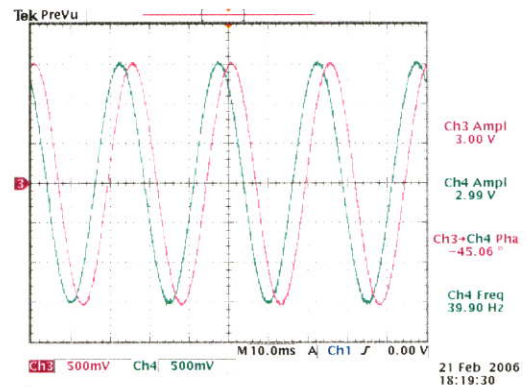
รูปที่ 4.211a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



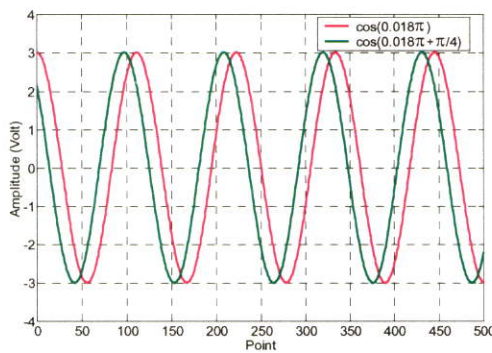
รูปที่ 4.211b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



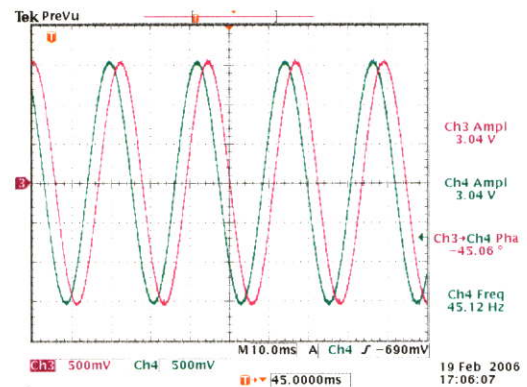
รูปที่ 4.212a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



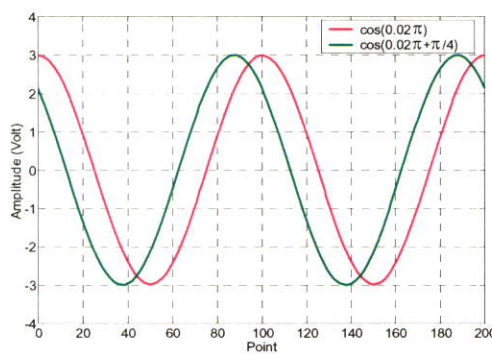
รูปที่ 4.212b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



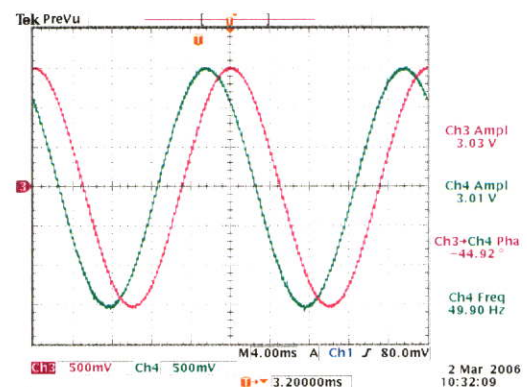
รูปที่ 4.213a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



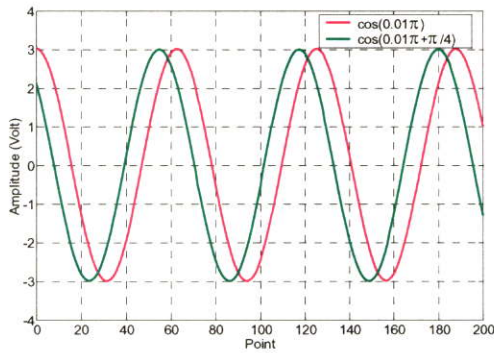
รูปที่ 4.213b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



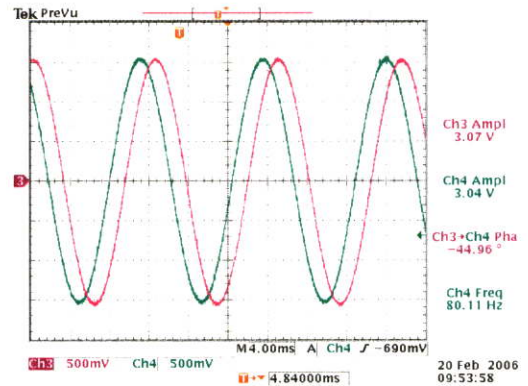
รูปที่ 4.214a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



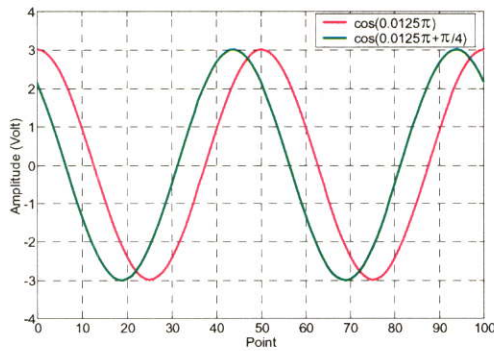
รูปที่ 4.214b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



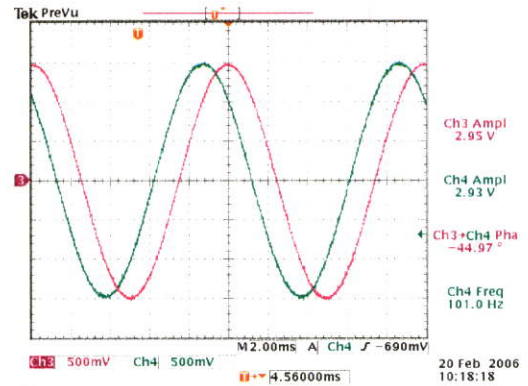
รูปที่ 4.215a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



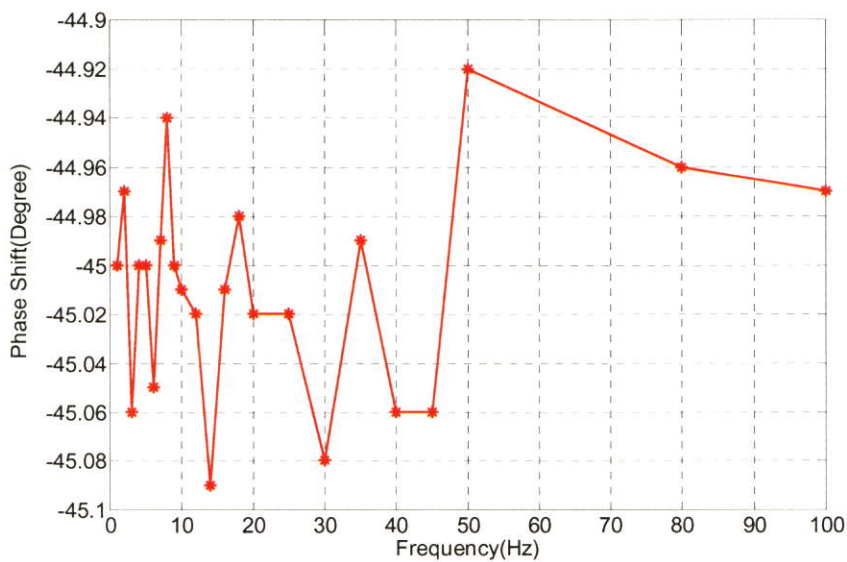
รูปที่ 4.215b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.216a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



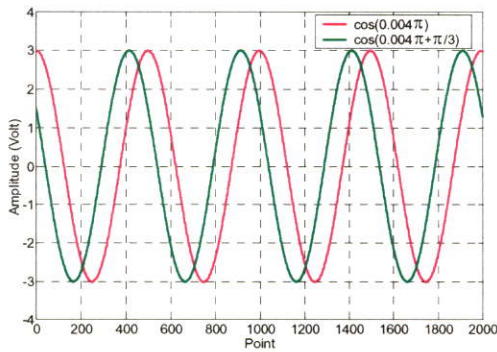
รูปที่ 4.216b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



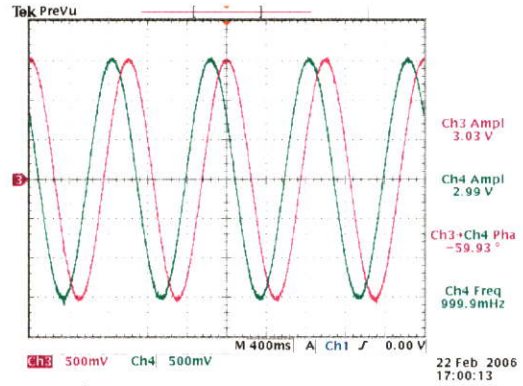
รูปที่ 4.217 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = -\frac{\pi}{4}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 10 ความถี่ของสัญญาณขาในอยู่ในช่วง 1-100Hz,  $\phi = -\frac{\pi}{3}$  และความถี่สุ่มมีค่า

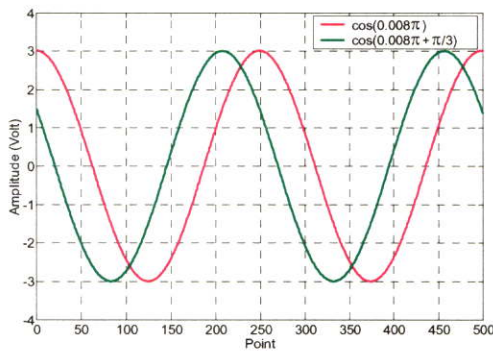
$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$



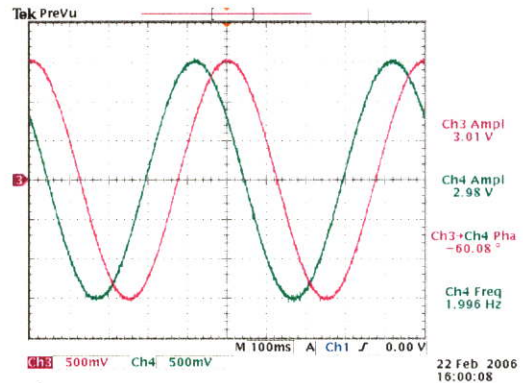
รูปที่ 4.218a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



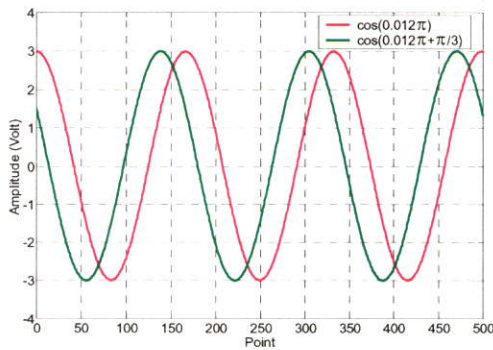
รูปที่ 4.218b ผลการสร้างจริงด้วยTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



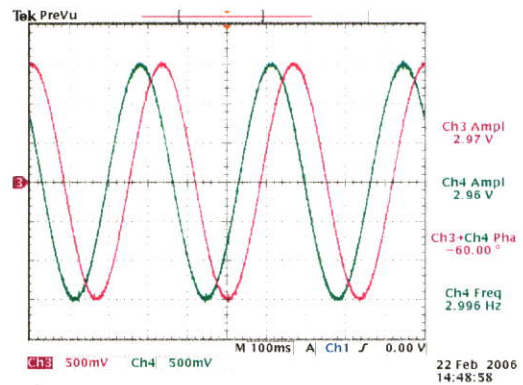
รูปที่ 4.219a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



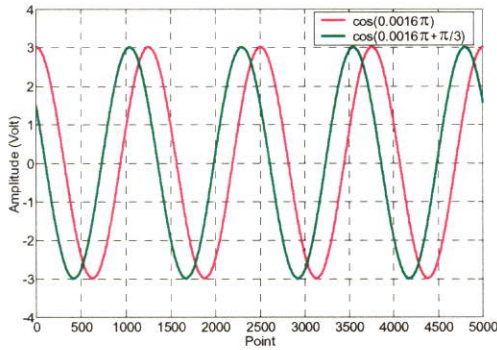
รูปที่ 4.219b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



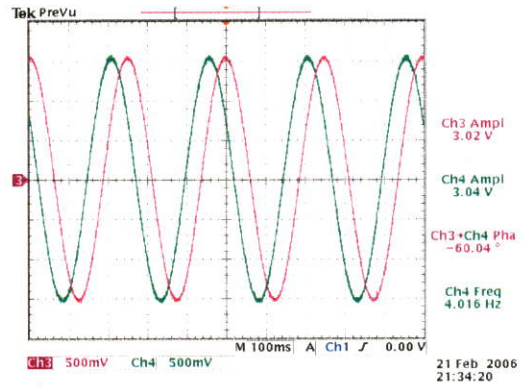
รูปที่ 4.220a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



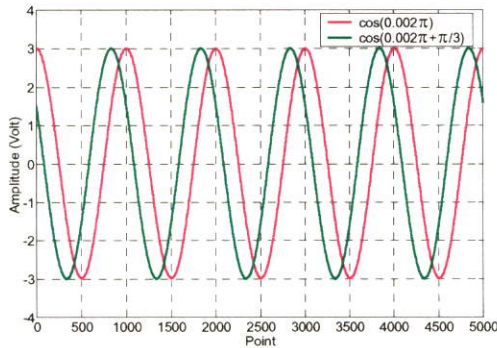
รูปที่ 4.220b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



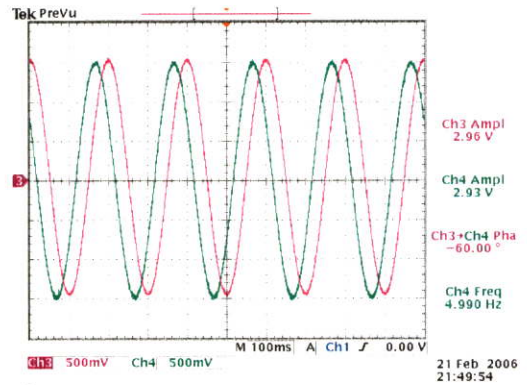
รูปที่ 4.221a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



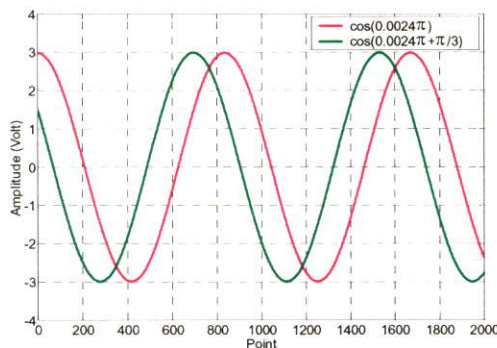
รูปที่ 4.221b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



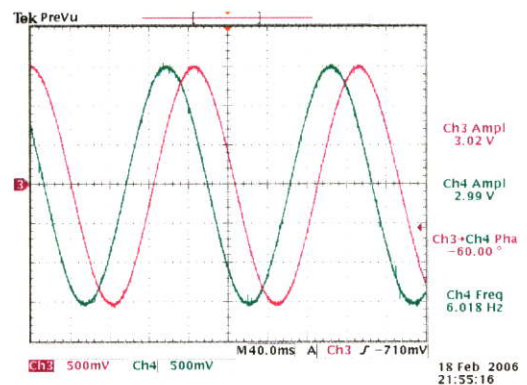
รูปที่ 4.222a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



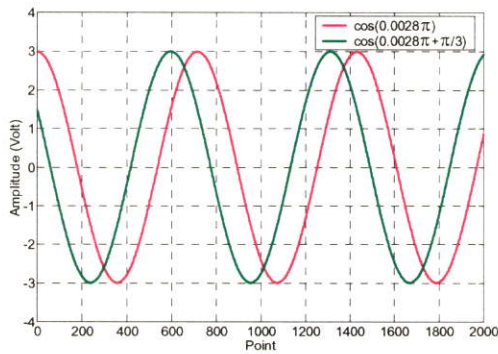
รูปที่ 4.222b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



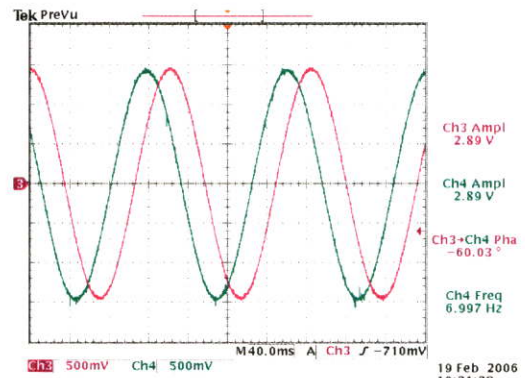
รูปที่ 4.223a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



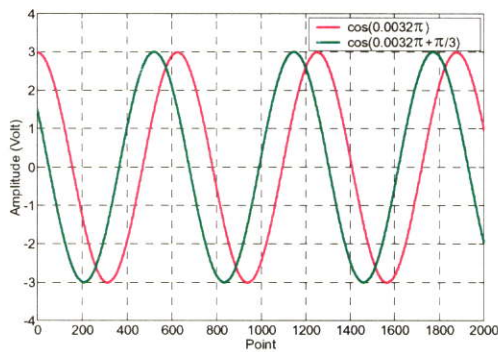
รูปที่ 4.223b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



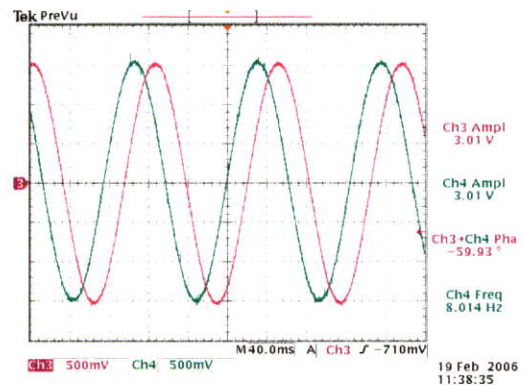
รูปที่ 4.224a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



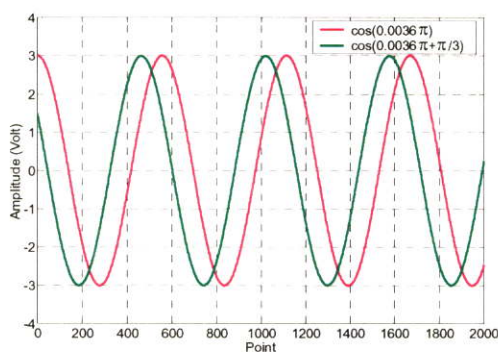
รูปที่ 4.224b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



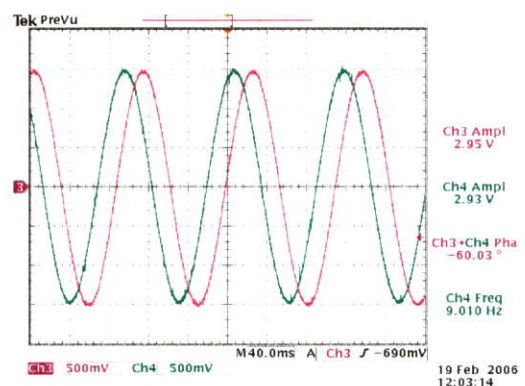
รูปที่ 4.225a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



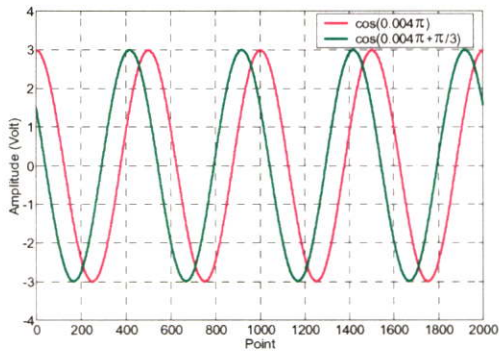
รูปที่ 4.225b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



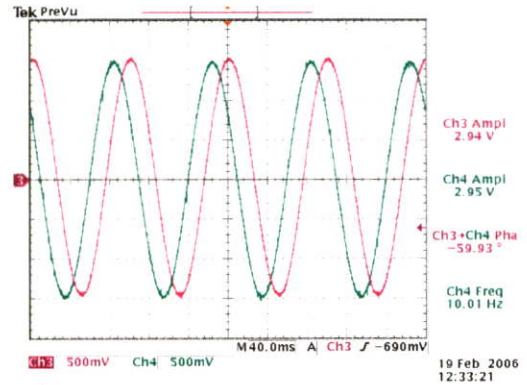
รูปที่ 4.226a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



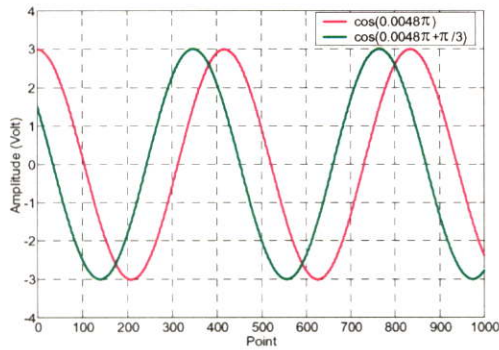
รูปที่ 4.226b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



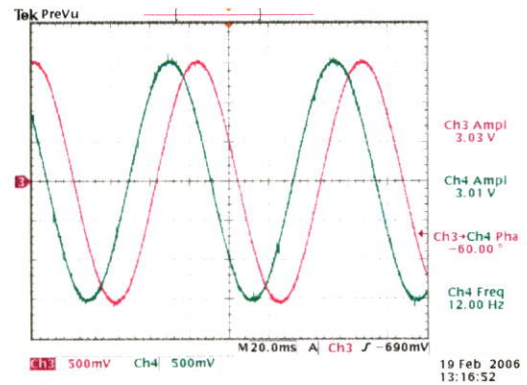
รูปที่ 4.227a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



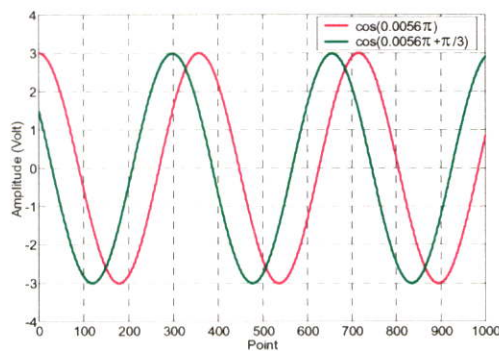
รูปที่ 4.227b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



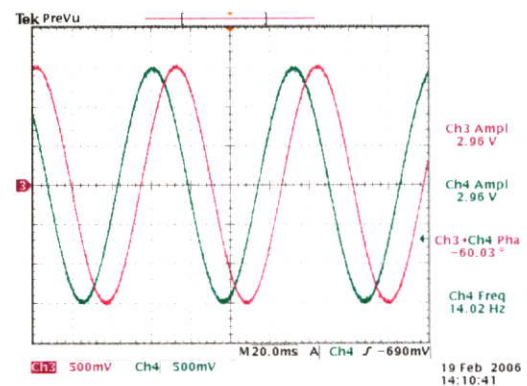
รูปที่ 4.228a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



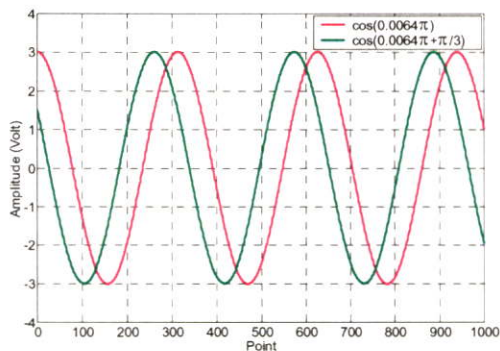
รูปที่ 4.228b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



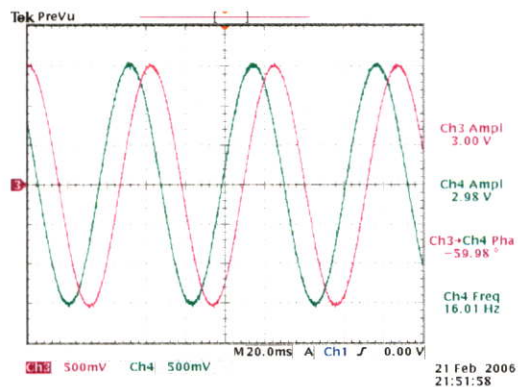
รูปที่ 4.229a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



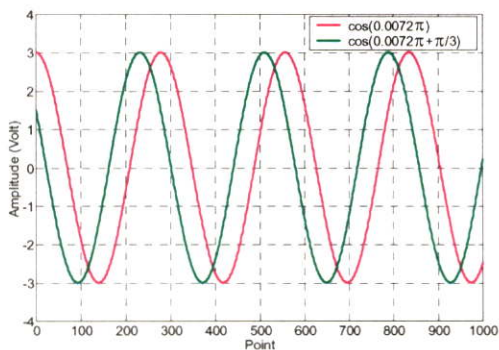
รูปที่ 4.229b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ดTMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



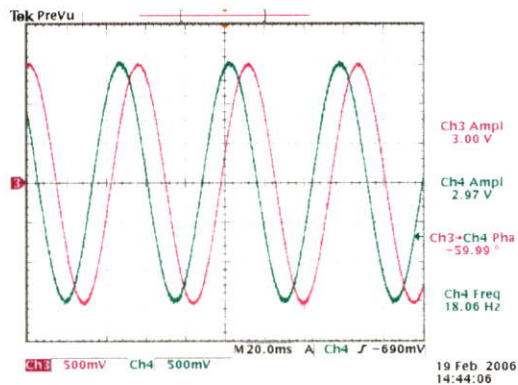
รูปที่ 4.230a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



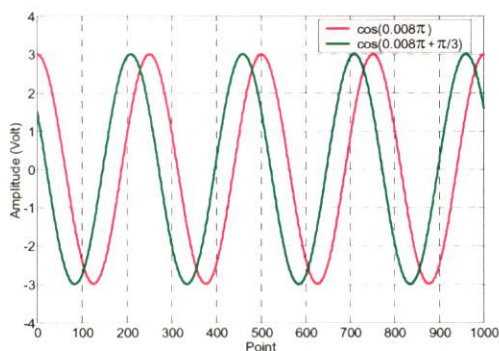
รูปที่ 4.230b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



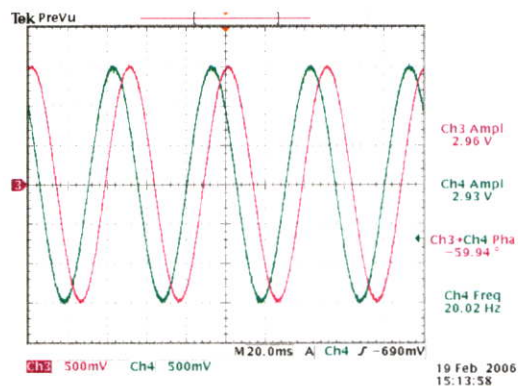
รูปที่ 4.231a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



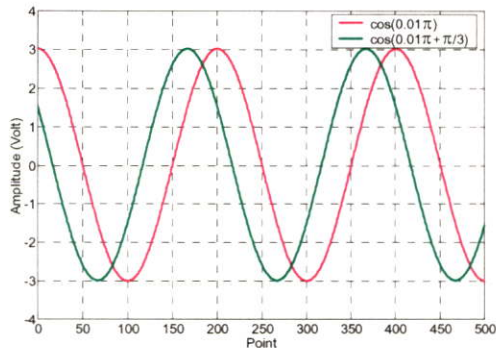
รูปที่ 4.231b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



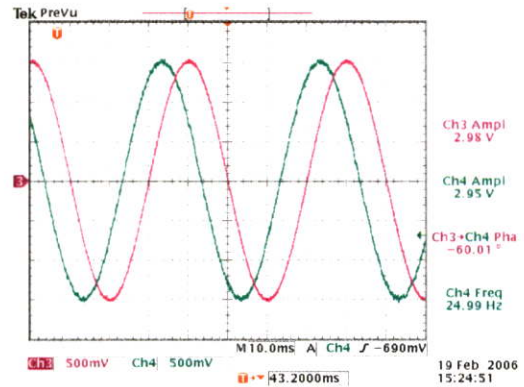
รูปที่ 4.232a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



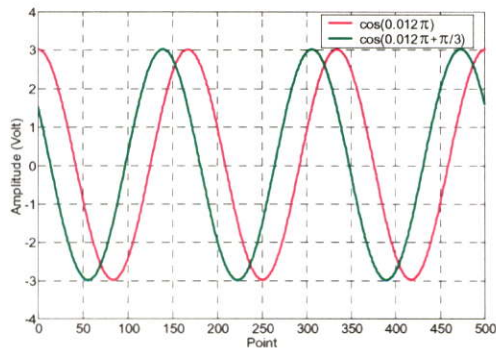
รูปที่ 4.232b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



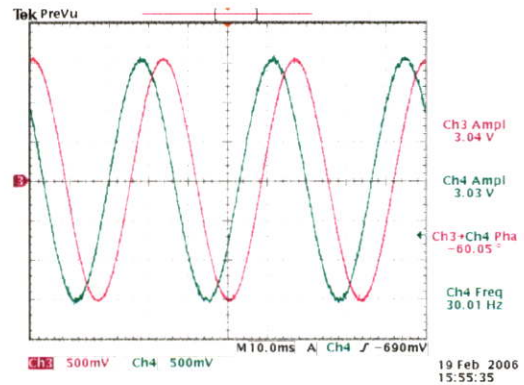
รูปที่ 4.233a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



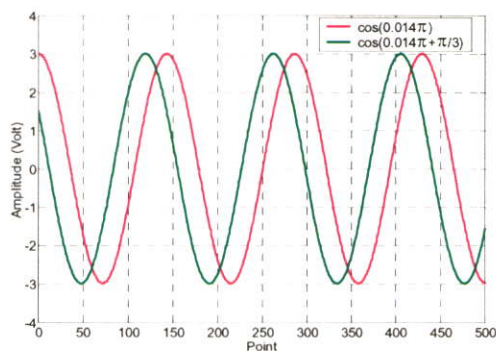
รูปที่ 4.233b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



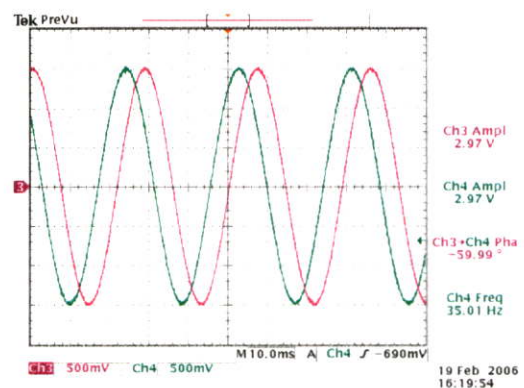
รูปที่ 4.234a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



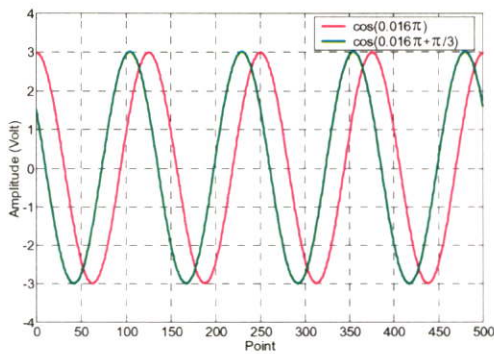
รูปที่ 4.234b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



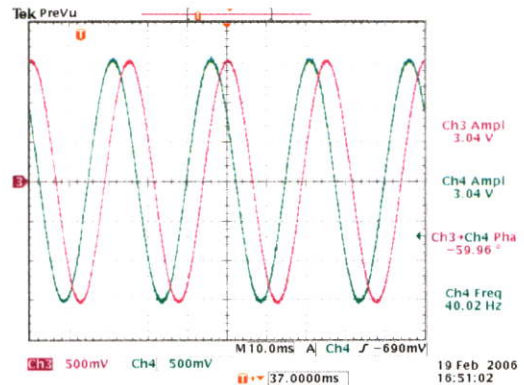
รูปที่ 4.235a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



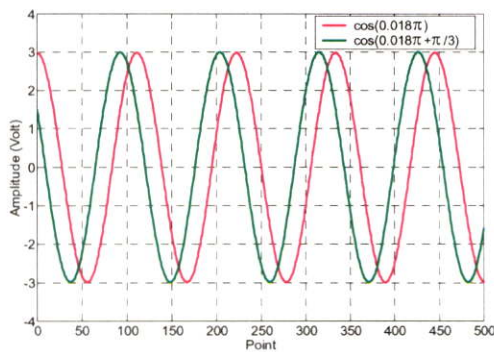
รูปที่ 4.235b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



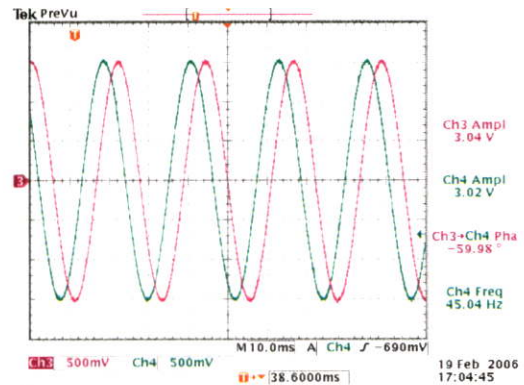
รูปที่ 4.236a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



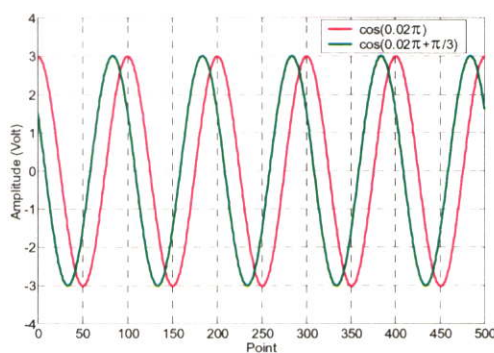
รูปที่ 4.236b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



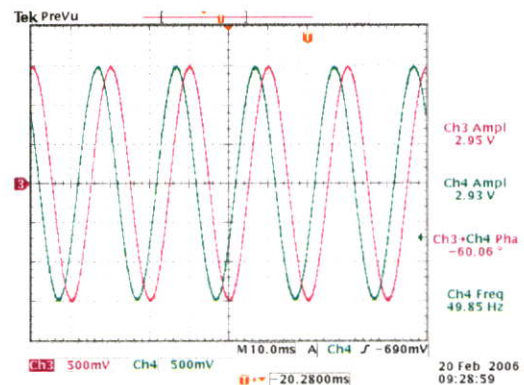
รูปที่ 4.237a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



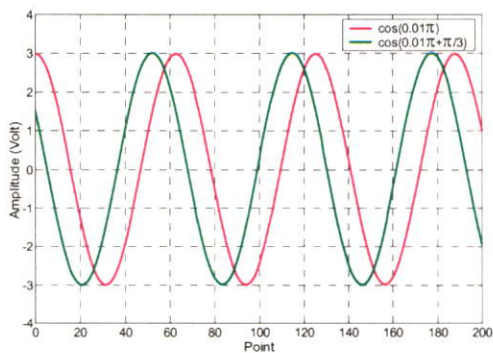
รูปที่ 4.237b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



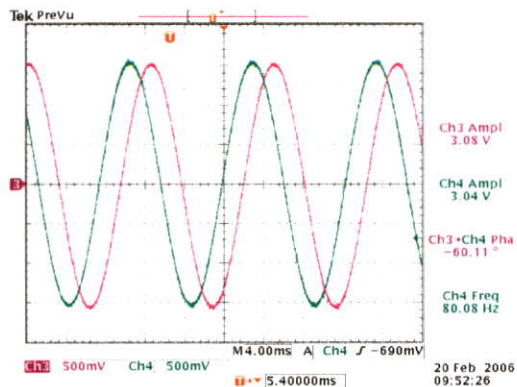
รูปที่ 4.238a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



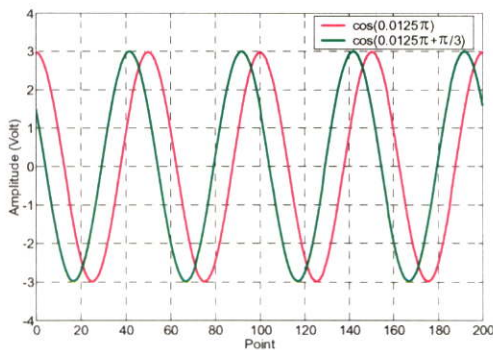
รูปที่ 4.238b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



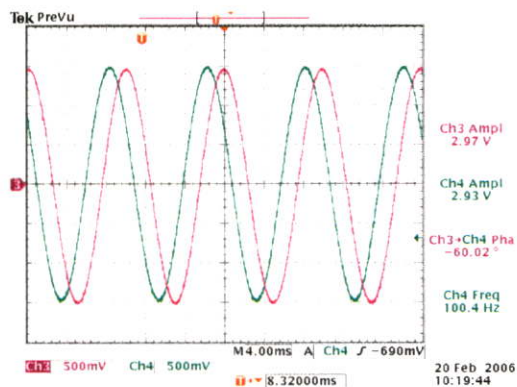
รูปที่ 4.239a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



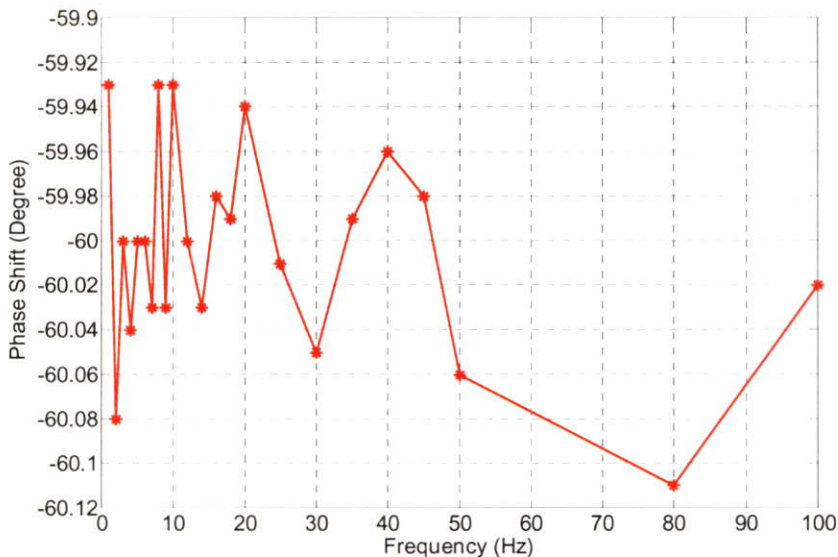
รูปที่ 4.239b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.240a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



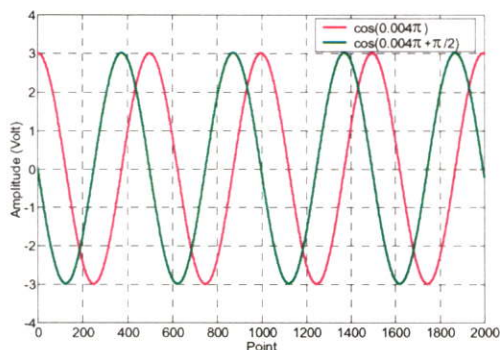
รูปที่ 4.240b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



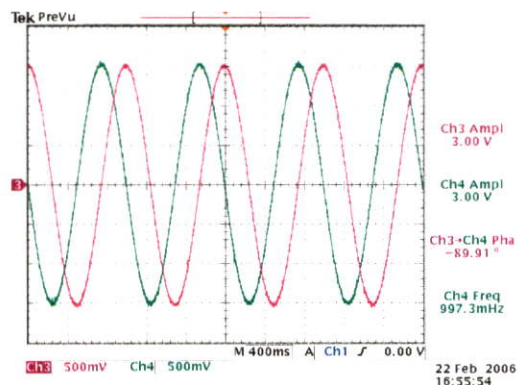
รูปที่ 4.241 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายนที่มีกรเลื้อนเฟส  $\phi = -\frac{\pi}{3}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 11 ความถี่ของสัญญาณชายน้อยอยู่ในช่วง 1-100Hz,  $\phi = -\frac{\pi}{2}$  และความถี่สุ่มมีค่า

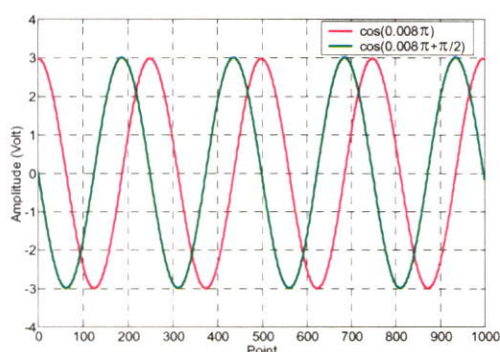
$$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$$



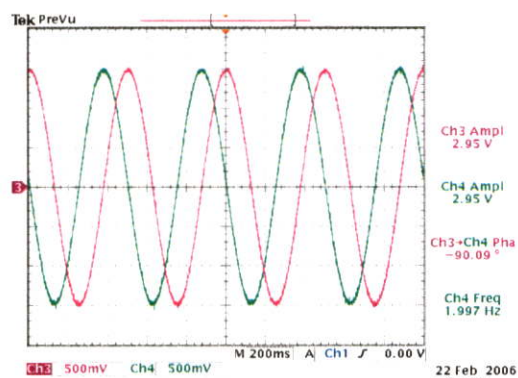
รูปที่ 4.242a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



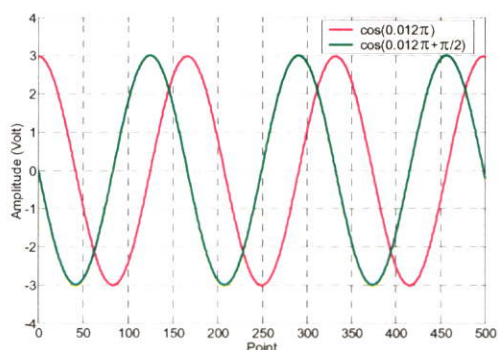
รูปที่ 4.242b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



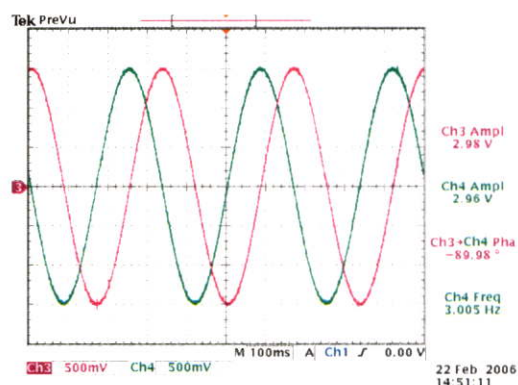
รูปที่ 4.243a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



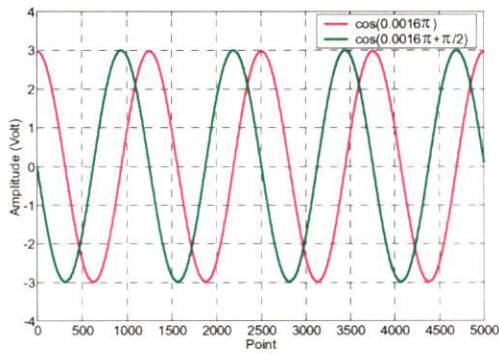
รูปที่ 4.243b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



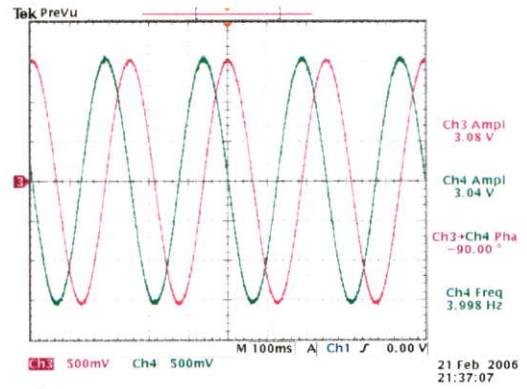
รูปที่ 4.244a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



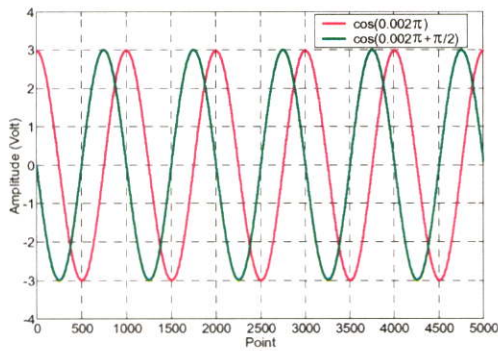
รูปที่ 4.244b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



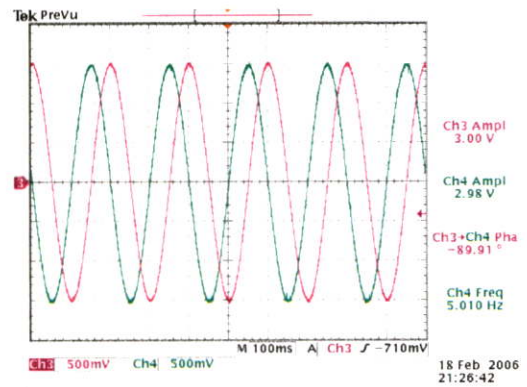
รูปที่ 4.245a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



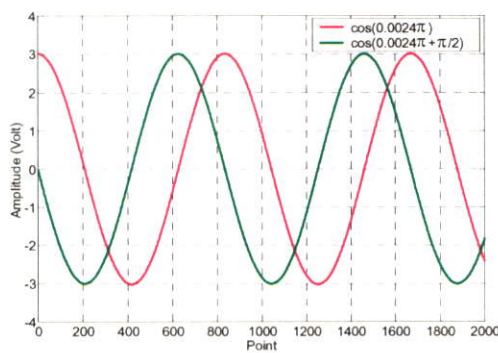
รูปที่ 4.245b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



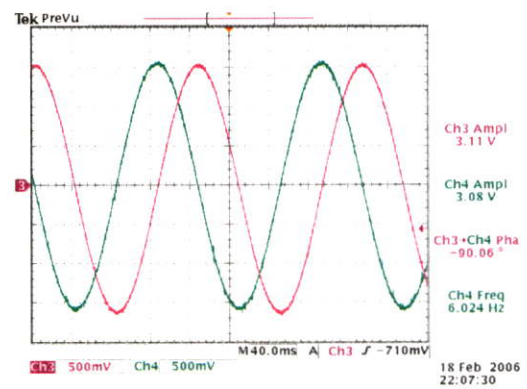
รูปที่ 4.246a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



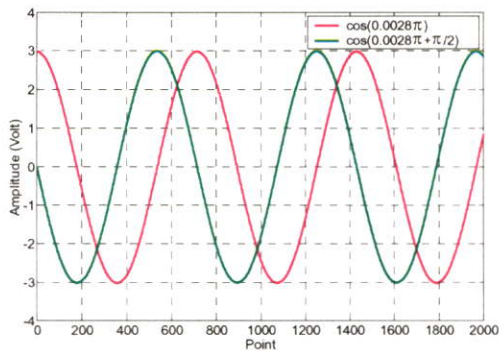
รูปที่ 4.246b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



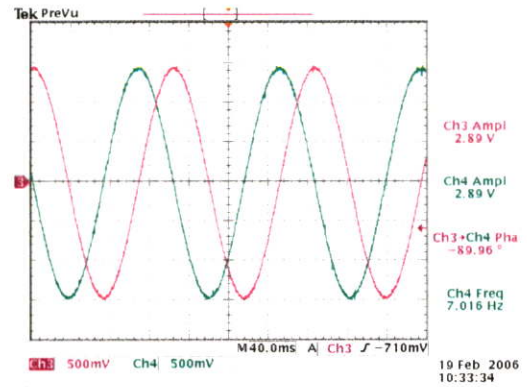
รูปที่ 4.247a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



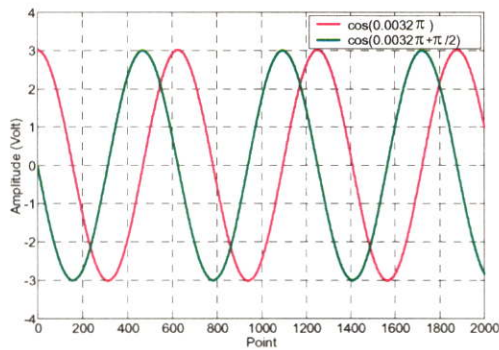
รูปที่ 4.247b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



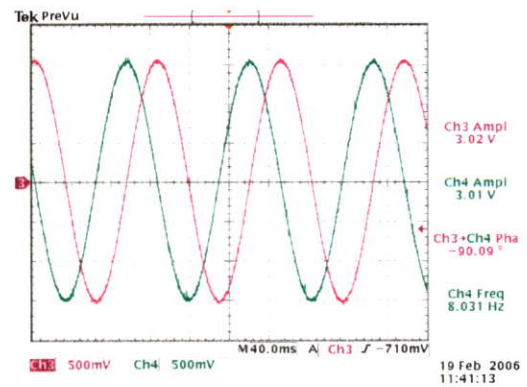
รูปที่ 4.248a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



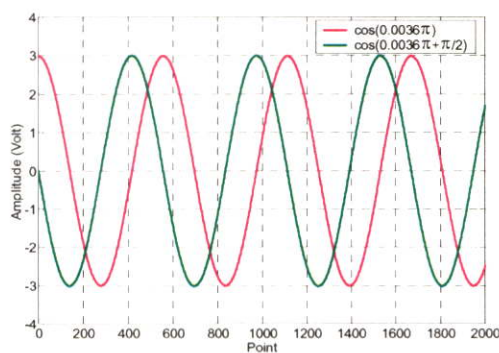
รูปที่ 4.248b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



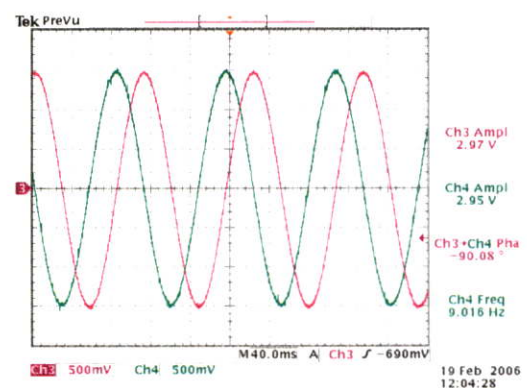
รูปที่ 4.249a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



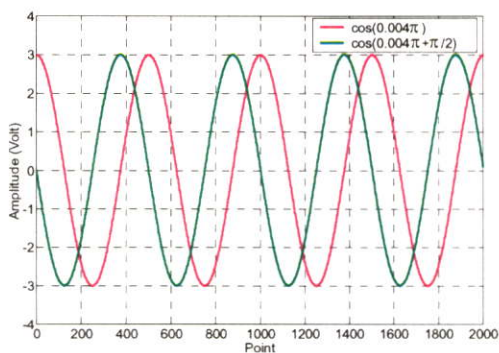
รูปที่ 4.249b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



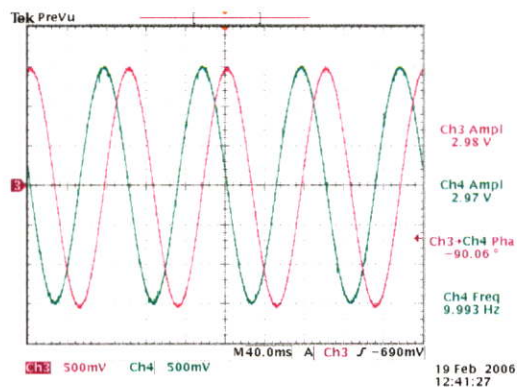
รูปที่ 4.250a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



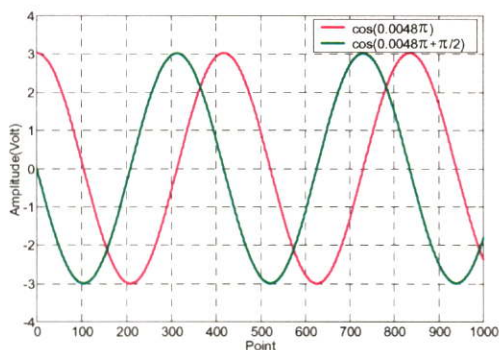
รูปที่ 4.250b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



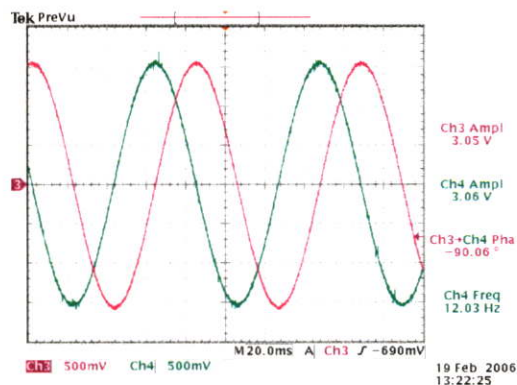
รูปที่ 4.251a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



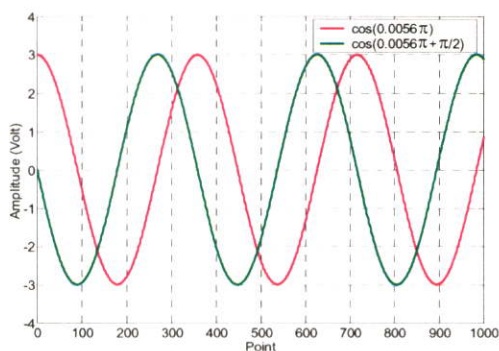
รูปที่ 4.251b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



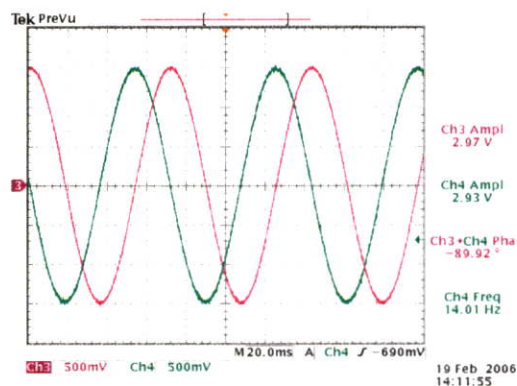
รูปที่ 4.252a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



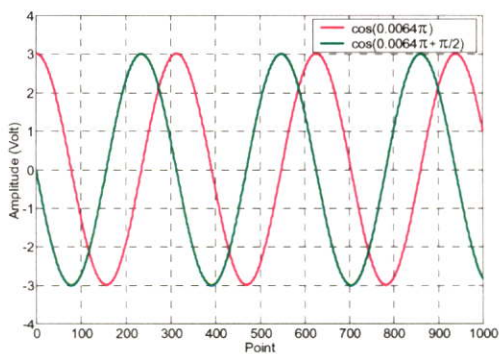
รูปที่ 4.252b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



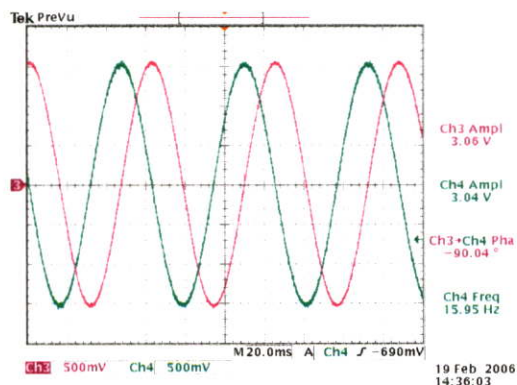
รูปที่ 4.253a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



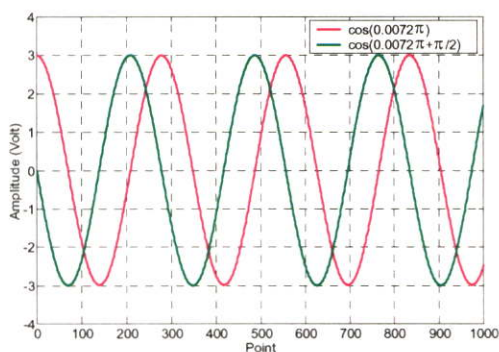
รูปที่ 4.253b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



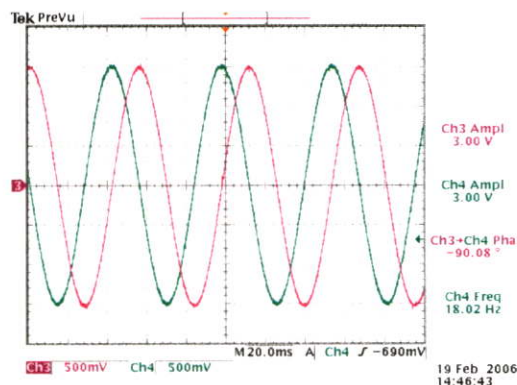
รูปที่ 4.254a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



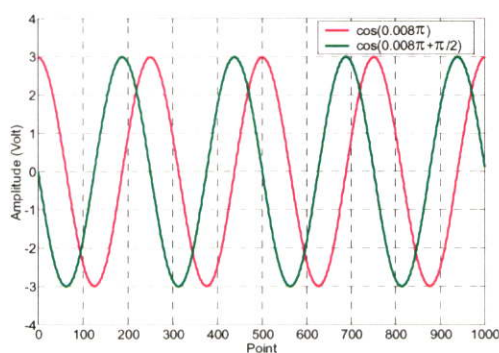
รูปที่ 4.254b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



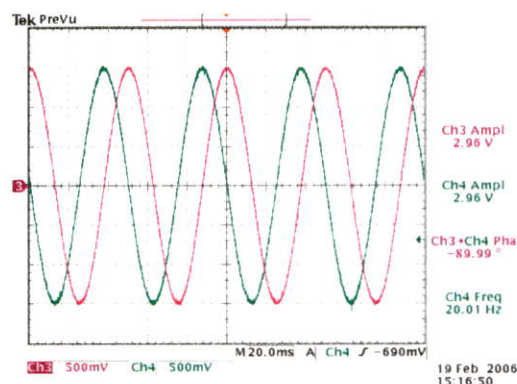
รูปที่ 4.255a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



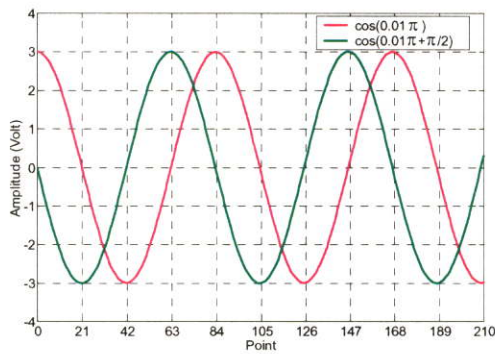
รูปที่ 4.255b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



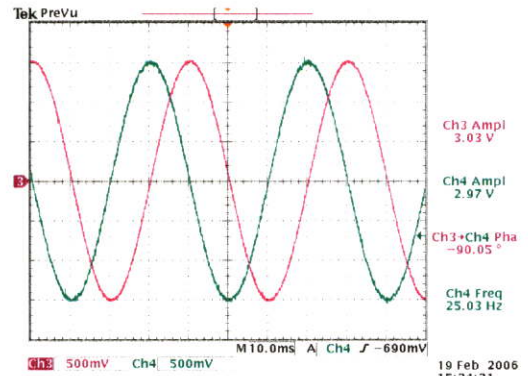
รูปที่ 4.256a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



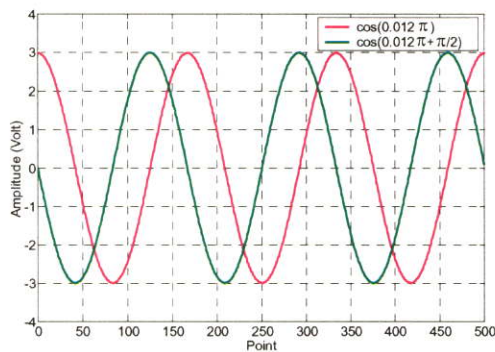
รูปที่ 4.256b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



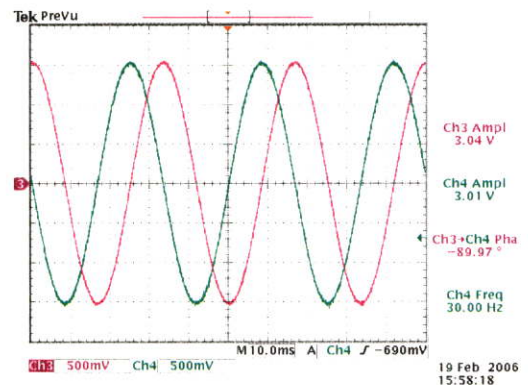
รูปที่ 4.257a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



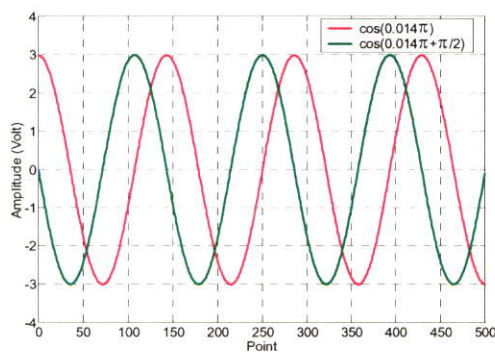
รูปที่ 4.257b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



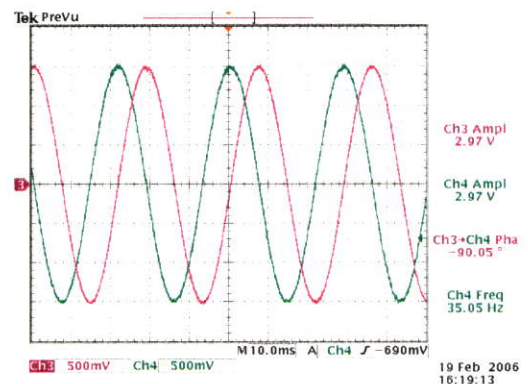
รูปที่ 4.258a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



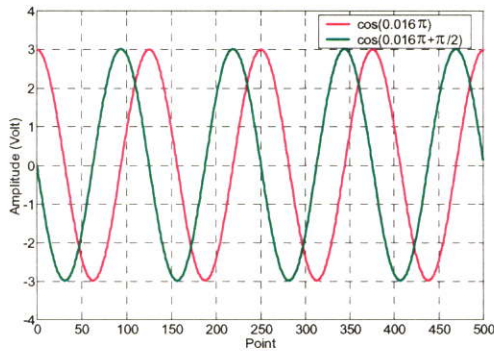
รูปที่ 4.258b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



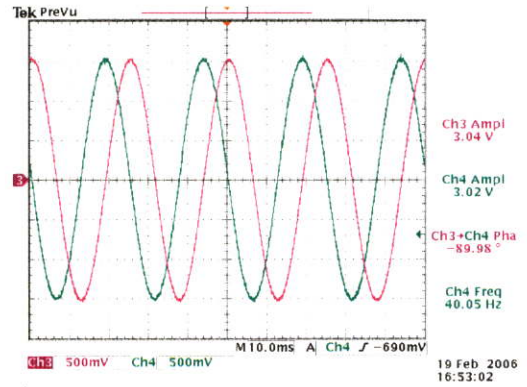
รูปที่ 4.259a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



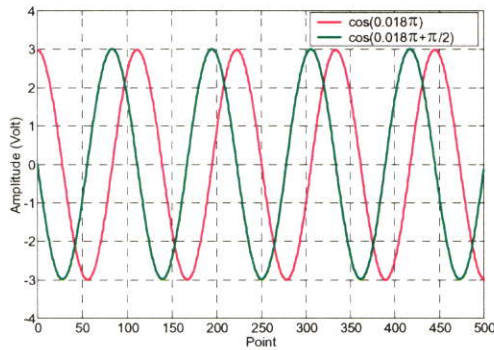
รูปที่ 4.259b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



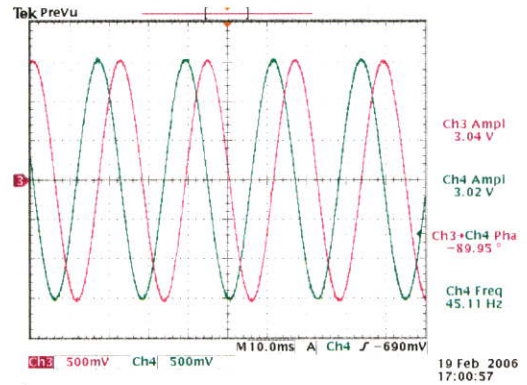
รูปที่ 4.260a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



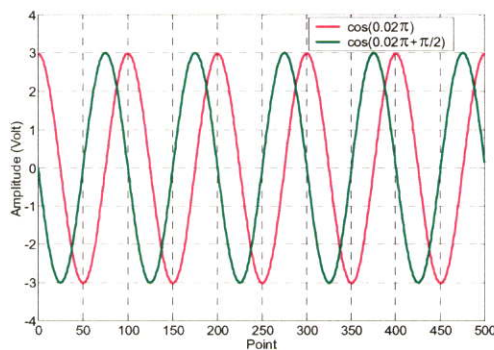
รูปที่ 4.260b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



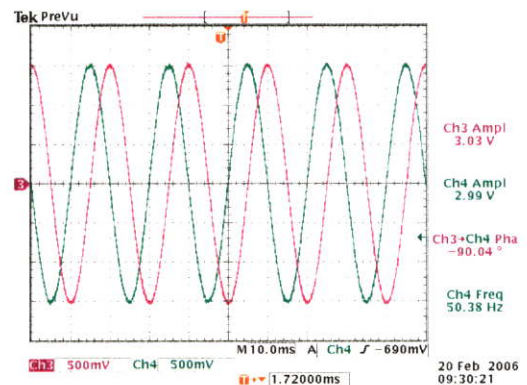
รูปที่ 4.261a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



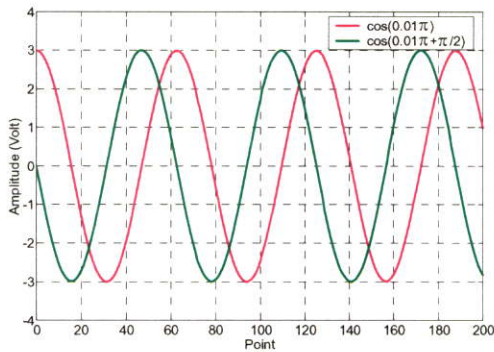
รูปที่ 4.261b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



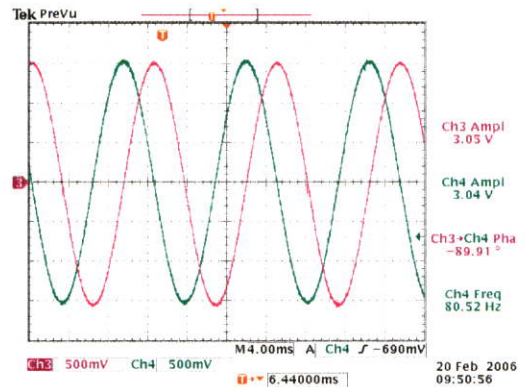
รูปที่ 4.262a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



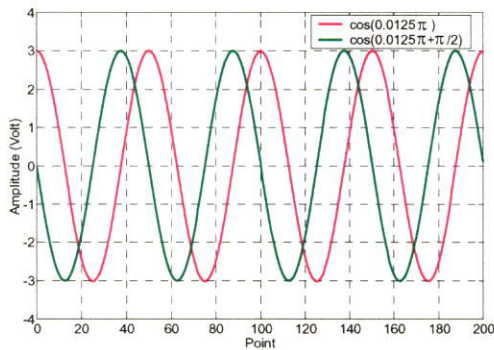
รูปที่ 4.262b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



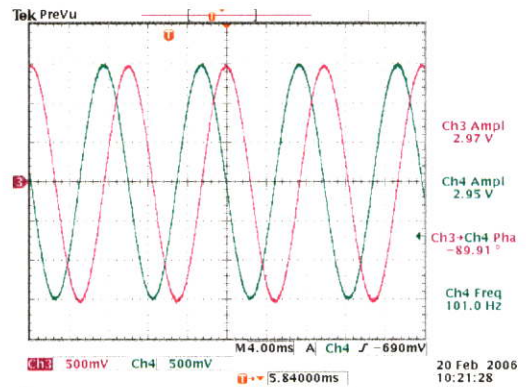
รูปที่ 4.263a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



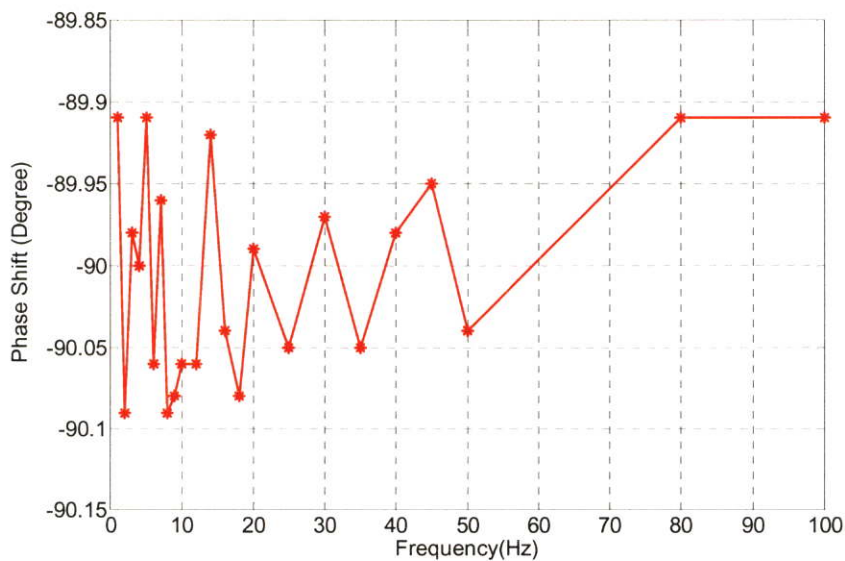
รูปที่ 4.263b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.264a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



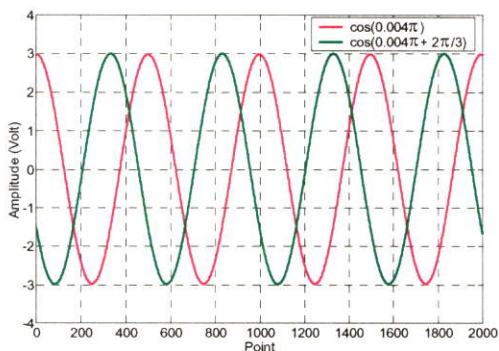
รูปที่ 4.264b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



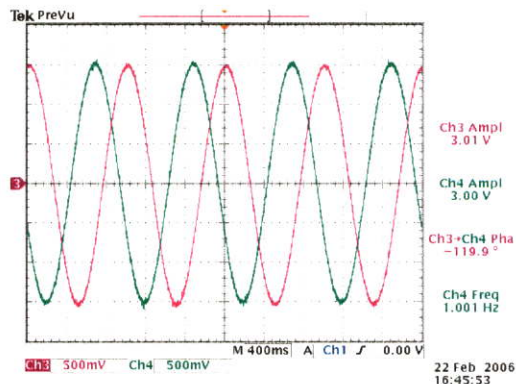
รูปที่ 4.265 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = -\frac{\pi}{2}$  ณ. ความถี่ใดๆ

ผลการทดลองที่ 12 ความถี่ของสัญญาณขาในอยู่ในช่วง 1-100Hz,  $\phi = -\frac{2\pi}{3}$  และความถี่สุ่มมีค่า

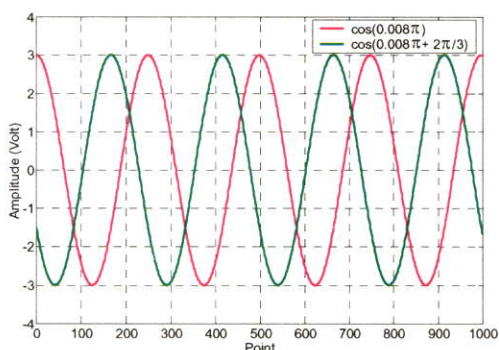
$$f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$$



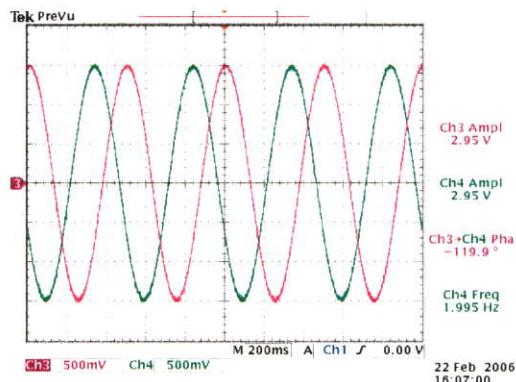
รูปที่ 4.266a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



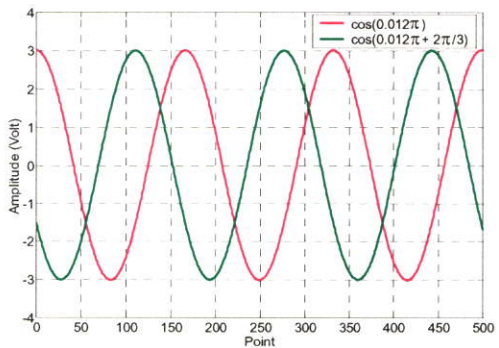
รูปที่ 4.266b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



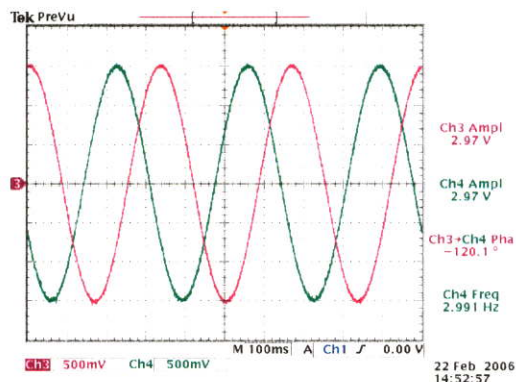
รูปที่ 4.267a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



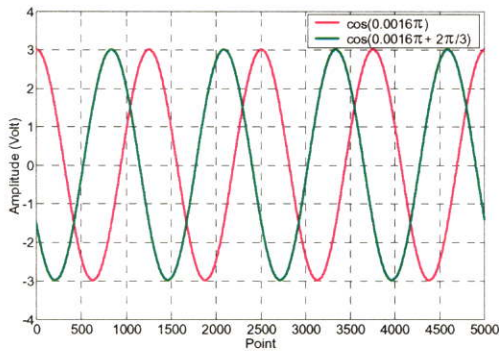
รูปที่ 4.267b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



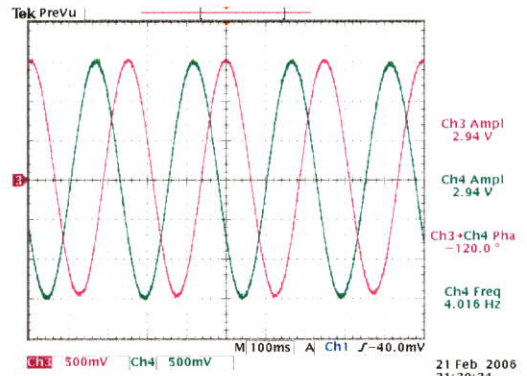
รูปที่ 4.268a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



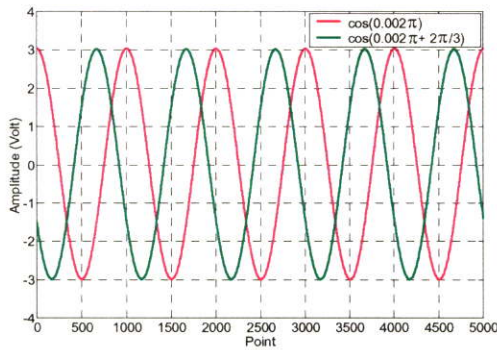
รูปที่ 4.268b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}$ ,  $f_s = 500\text{ Hz}$



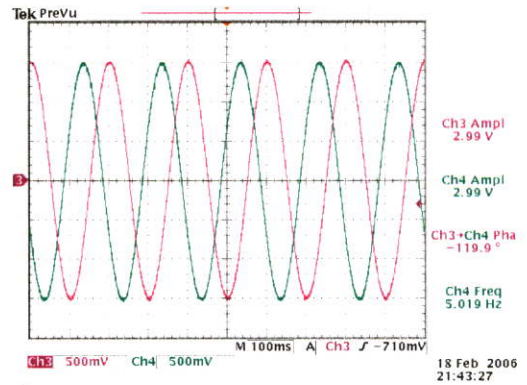
รูปที่ 4.269a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



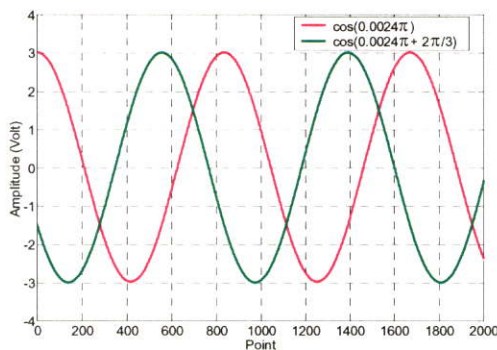
รูปที่ 4.269b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



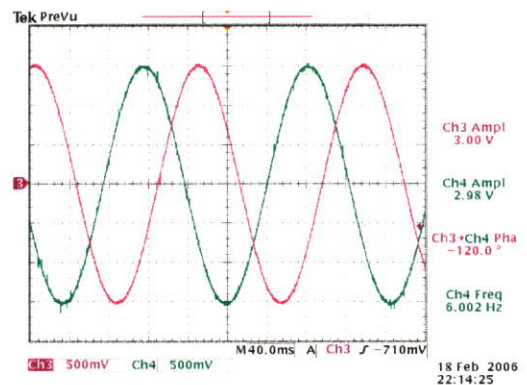
รูปที่ 4.270a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



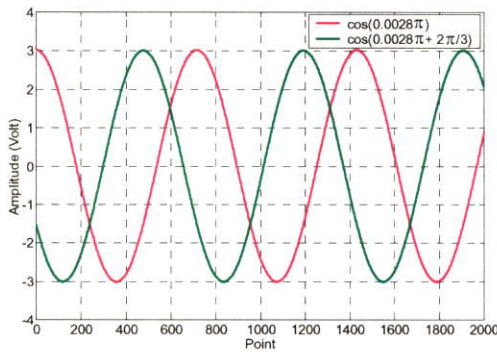
รูปที่ 4.270b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



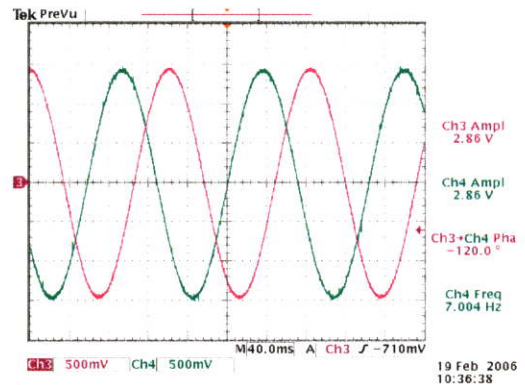
รูปที่ 4.271a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



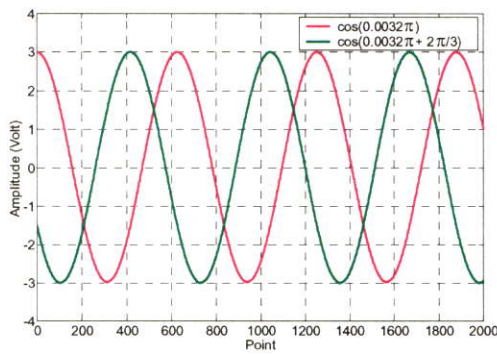
รูปที่ 4.271b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



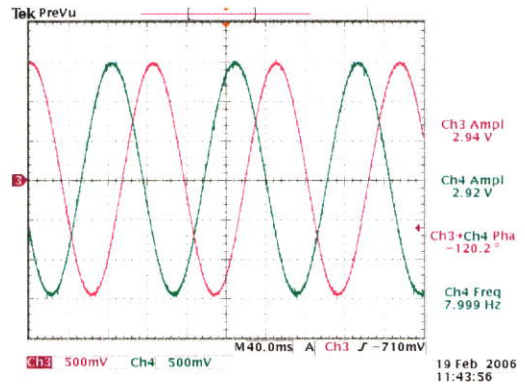
รูปที่ 4.272a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



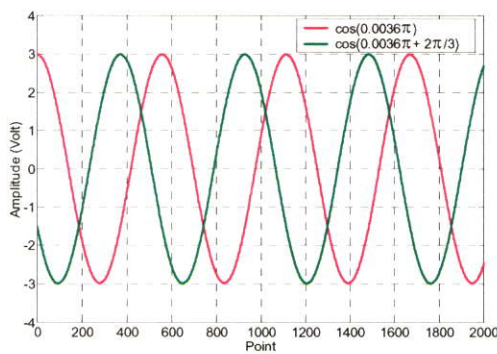
รูปที่ 4.272b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



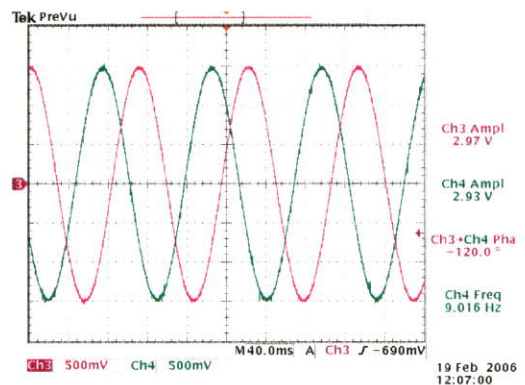
รูปที่ 4.273a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



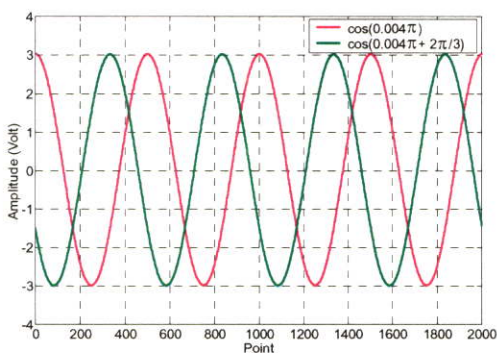
รูปที่ 4.273b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



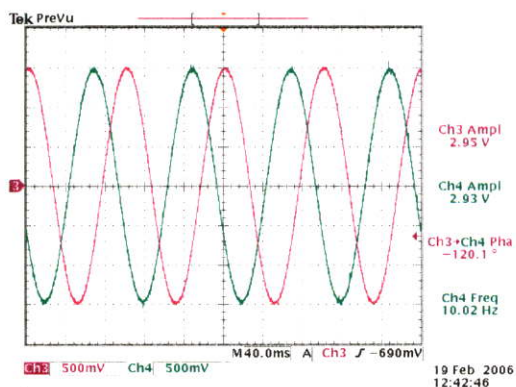
รูปที่ 4.274a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



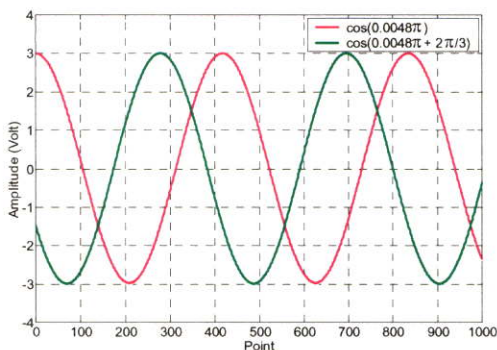
รูปที่ 4.274b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



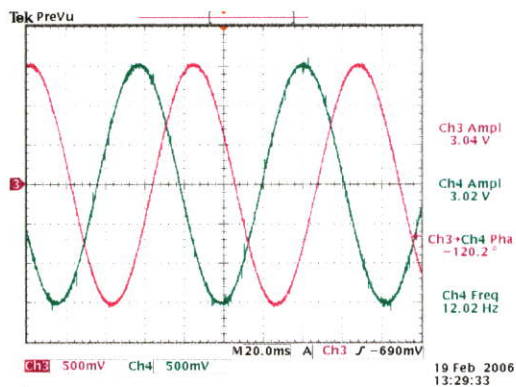
รูปที่ 4.275a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



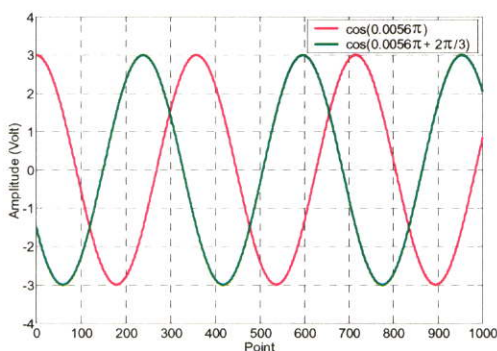
รูปที่ 4.275b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



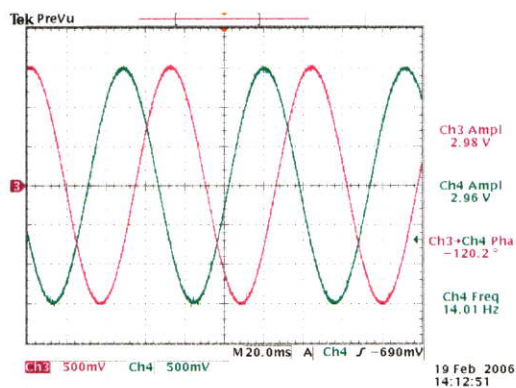
รูปที่ 4.276a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



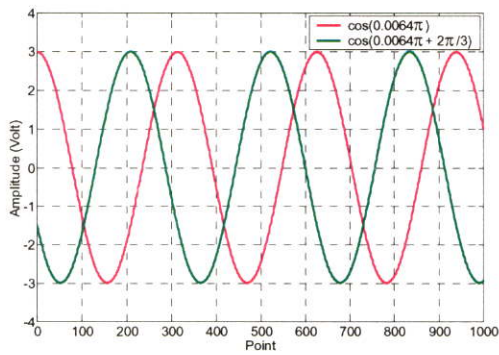
รูปที่ 4.276b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



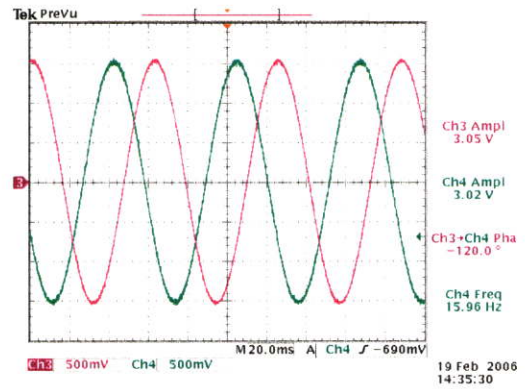
รูปที่ 4.277a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



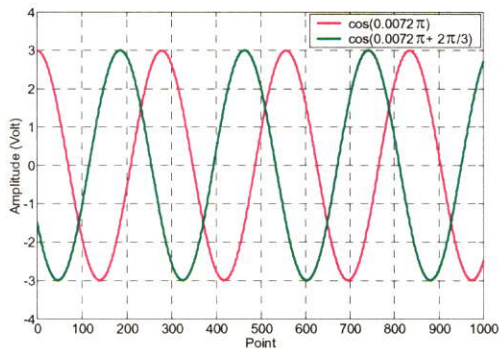
รูปที่ 4.277b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



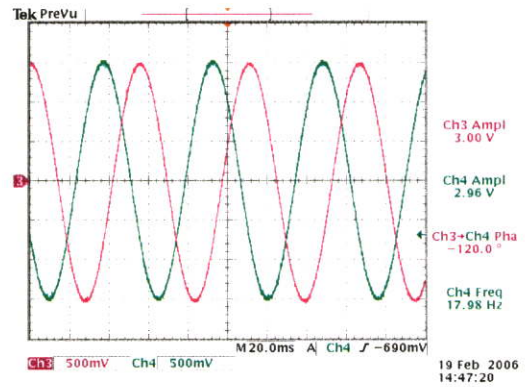
รูปที่ 4.278a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



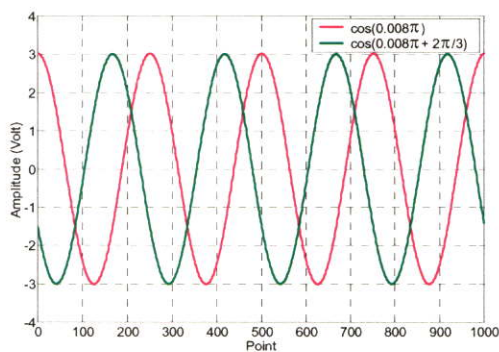
รูปที่ 4.278b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



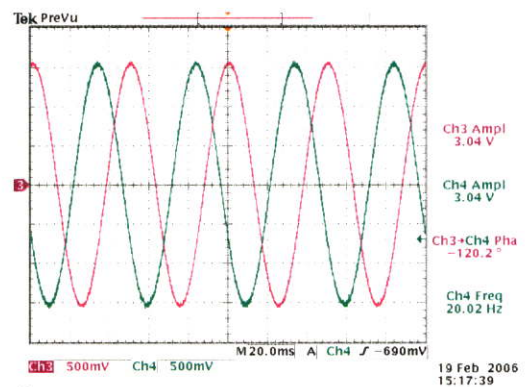
รูปที่ 4.279a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



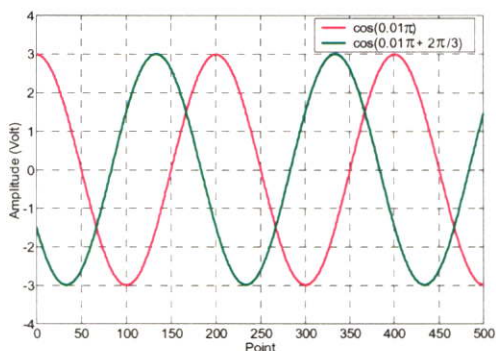
รูปที่ 4.279b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



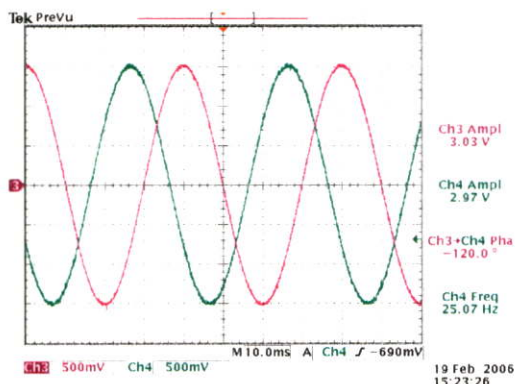
รูปที่ 4.280a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



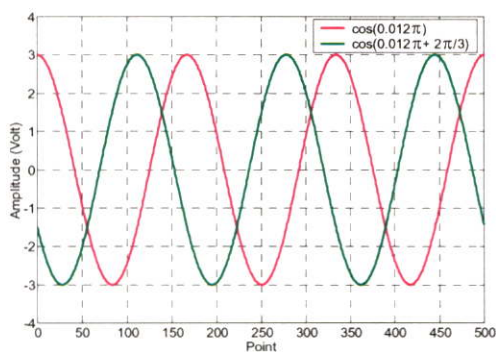
รูปที่ 4.280b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



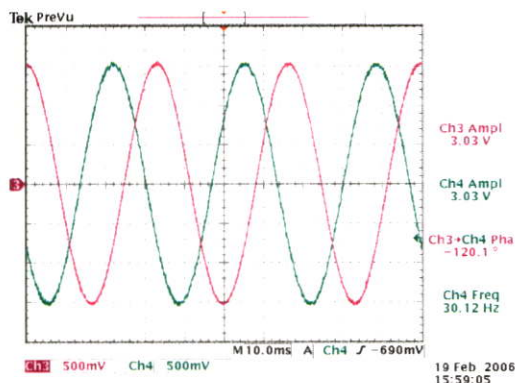
รูปที่ 4.281a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



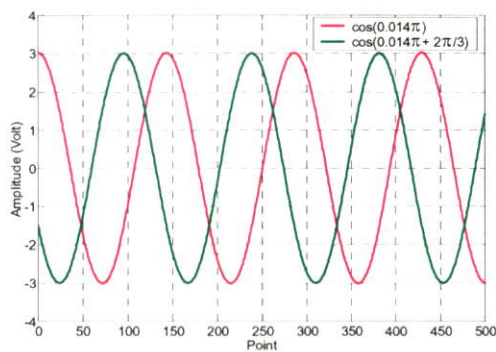
รูปที่ 4.281b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



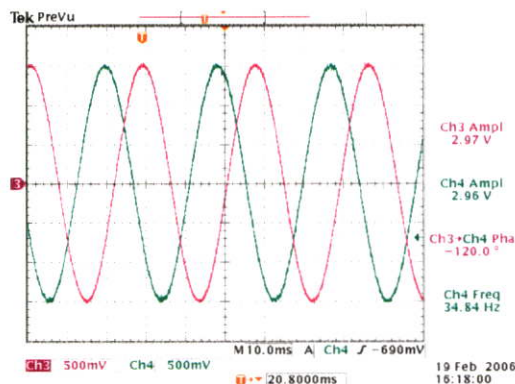
รูปที่ 4.282a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



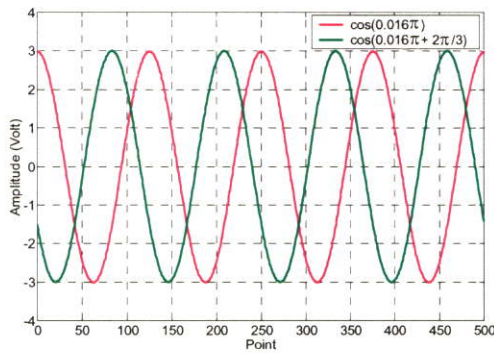
รูปที่ 4.282b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



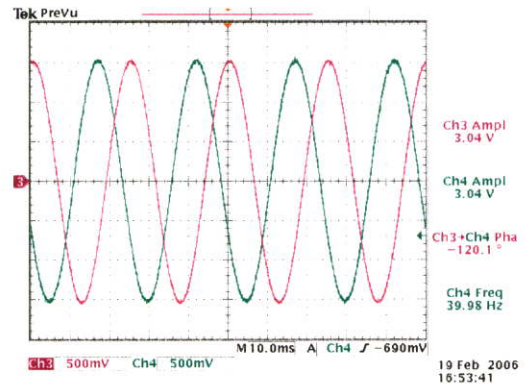
รูปที่ 4.283a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



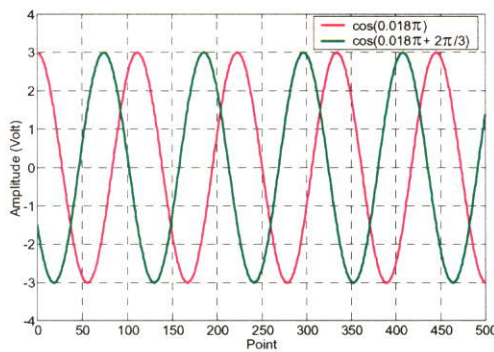
รูปที่ 4.283b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



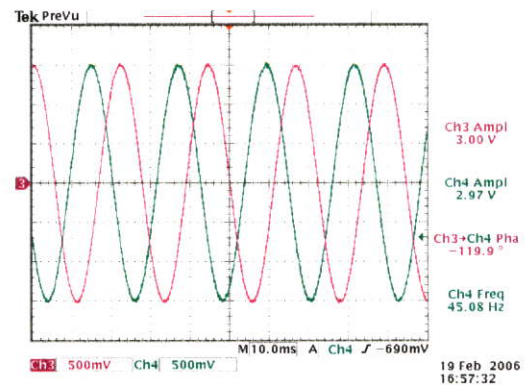
รูปที่ 4.284a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



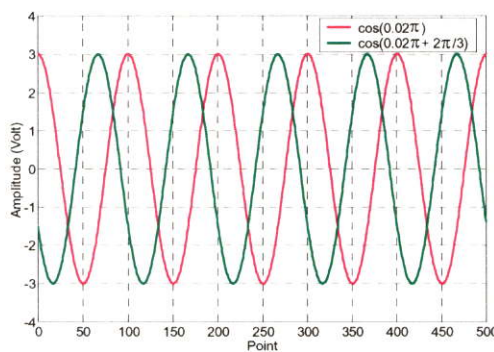
รูปที่ 4.284b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



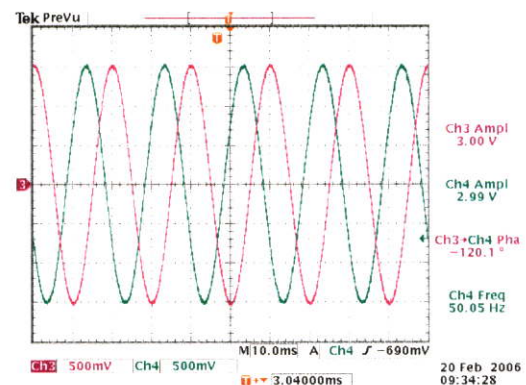
รูปที่ 4.285a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



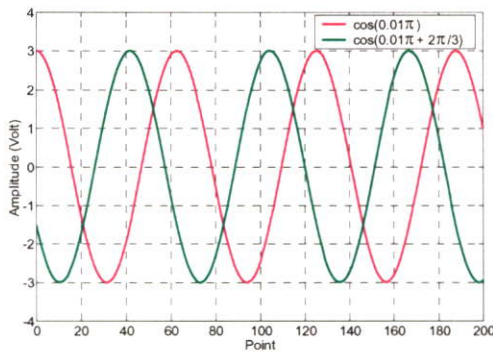
รูปที่ 4.285b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



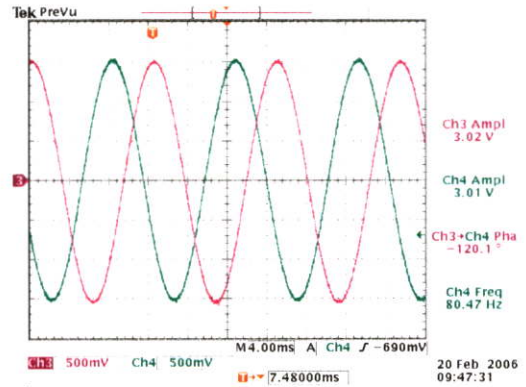
รูปที่ 4.286a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



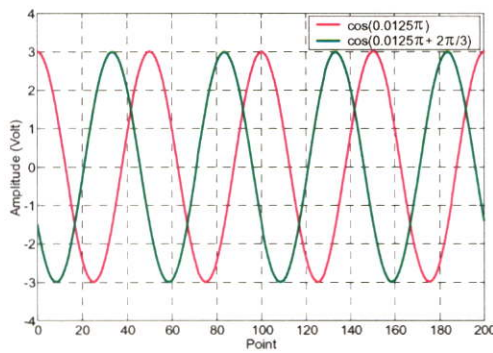
รูปที่ 4.286b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



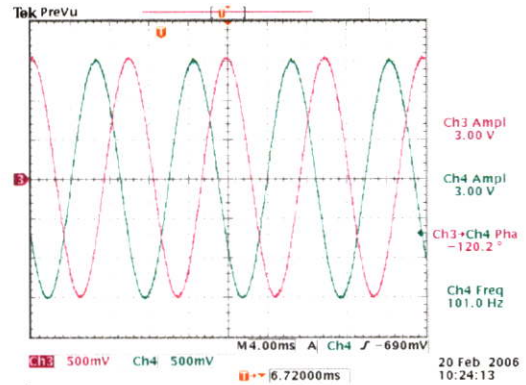
รูปที่ 4.287a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



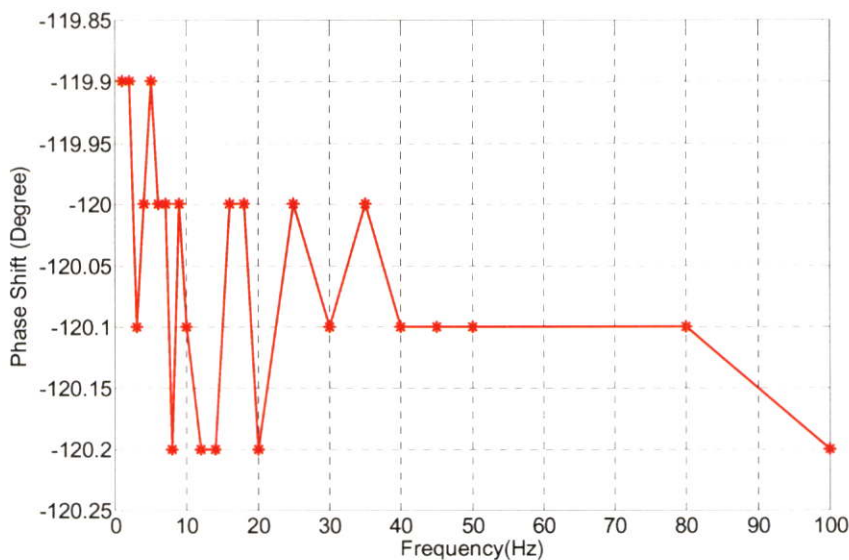
รูปที่ 4.287b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.288a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$

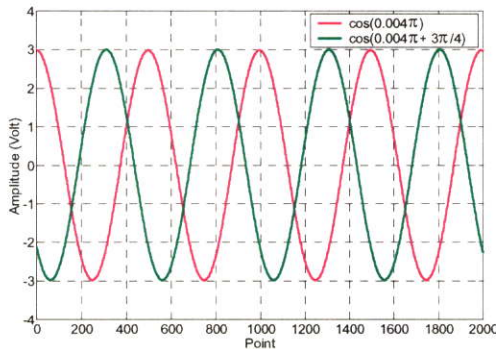


รูปที่ 4.288b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$

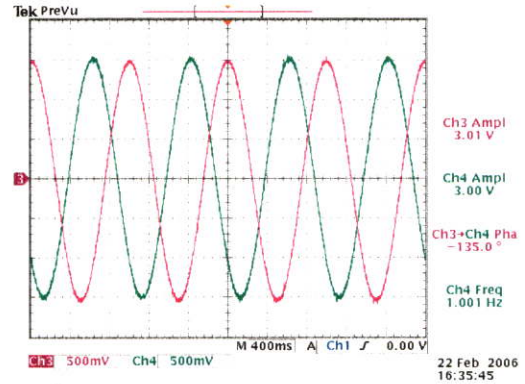


รูปที่ 4.289 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซายน์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = -\frac{2\pi}{3}$  ณ. ความถี่ใดๆ

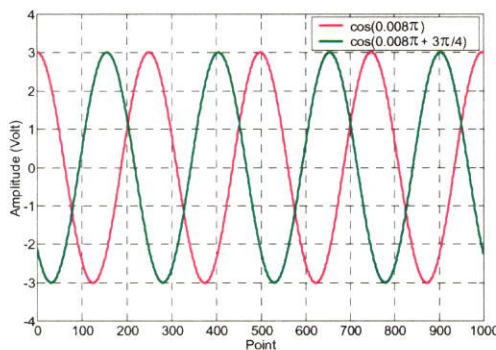
ผลการทดลองที่ 13 ความถี่ของสัญญาณขาในอยู่ในช่วง 1-100Hz,  $\phi = -\frac{3\pi}{4}$  และความถี่สุ่มมีค่า  $f_s = 500\text{Hz}, 5\text{ kHz}, 16\text{ kHz}$



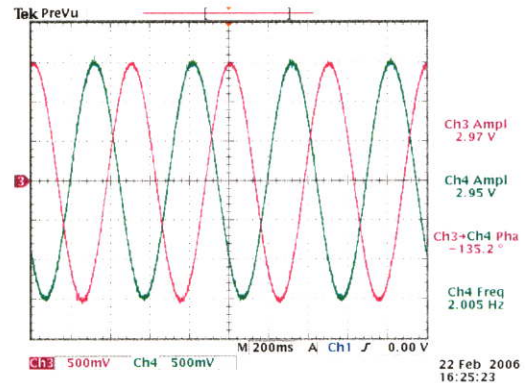
รูปที่ 4.290a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



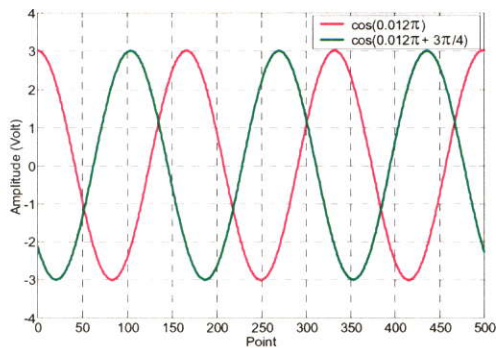
รูปที่ 4.290b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 1\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



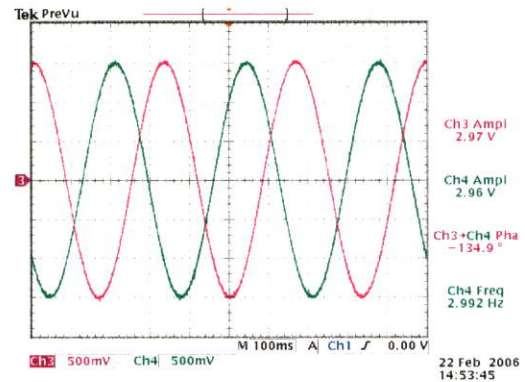
รูปที่ 4.291a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



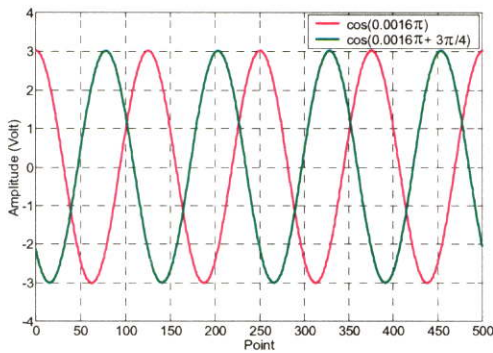
รูปที่ 4.291b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 2\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



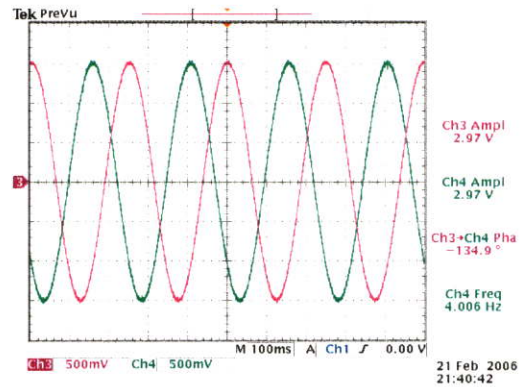
รูปที่ 4.292a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



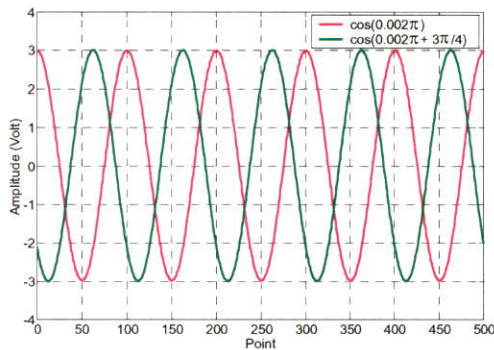
รูปที่ 4.292b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 3\text{ Hz}, f_s = 500\text{ Hz}$



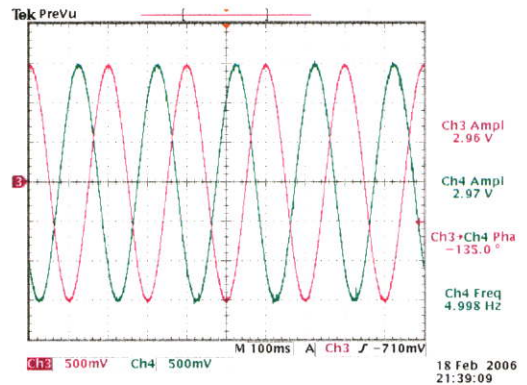
รูปที่ 4.293a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



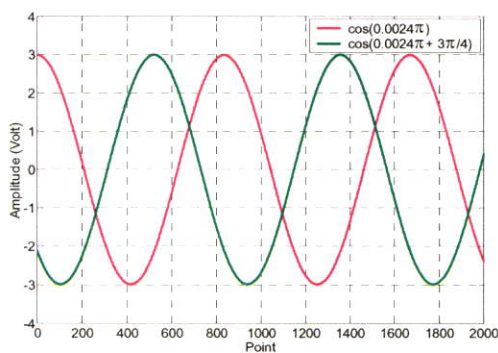
รูปที่ 4.293b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 4 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



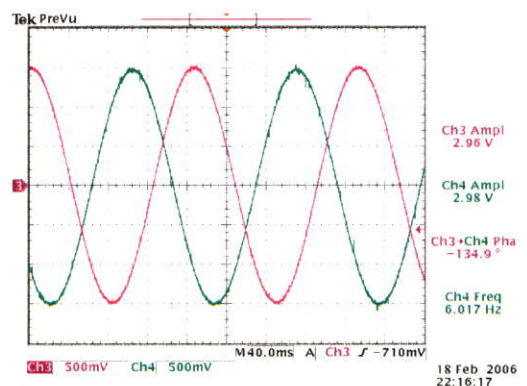
รูปที่ 4.294a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



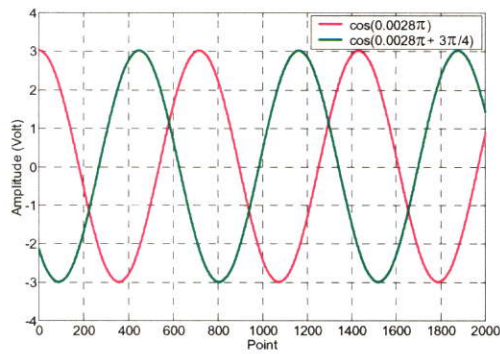
รูปที่ 4.294b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 5 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



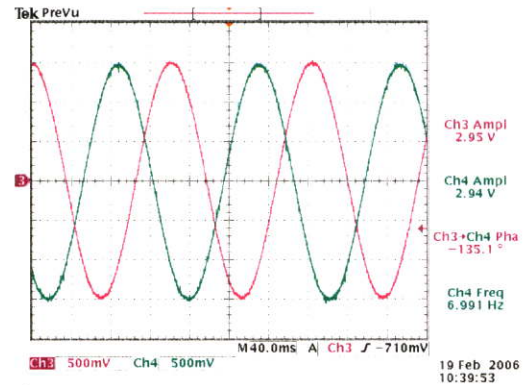
รูปที่ 4.295a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



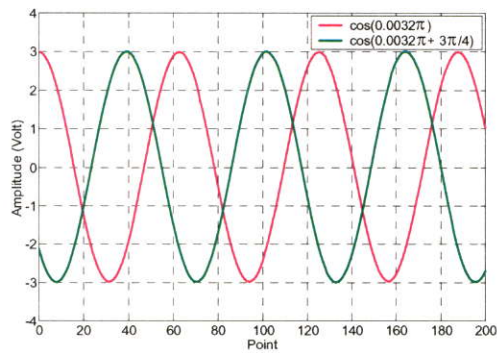
รูปที่ 4.295b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 6 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



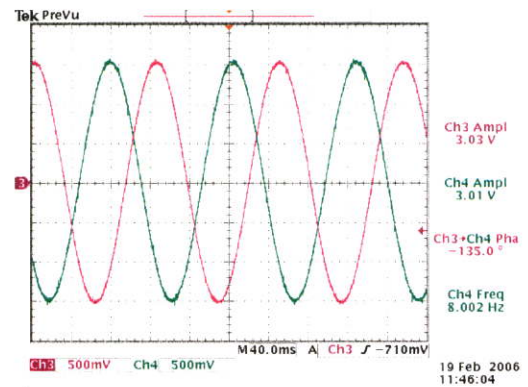
รูปที่ 4.296a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



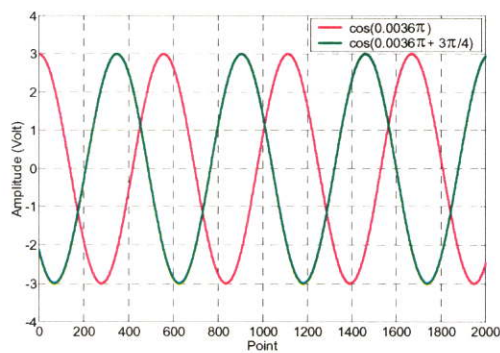
รูปที่ 4.296b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 7 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



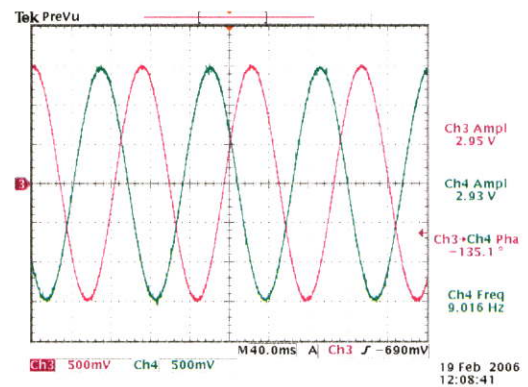
รูปที่ 4.297a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



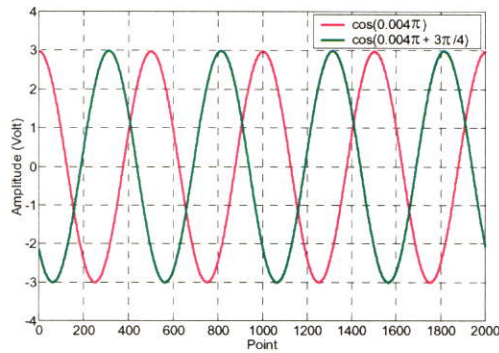
รูปที่ 4.297b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



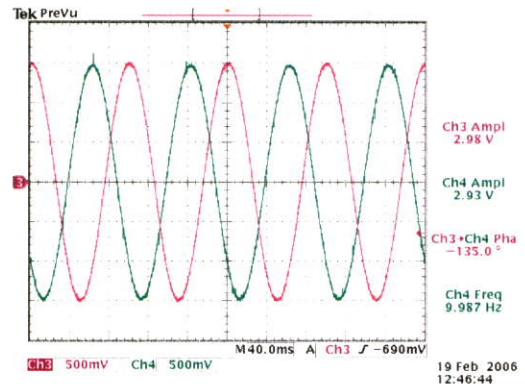
รูปที่ 4.298a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



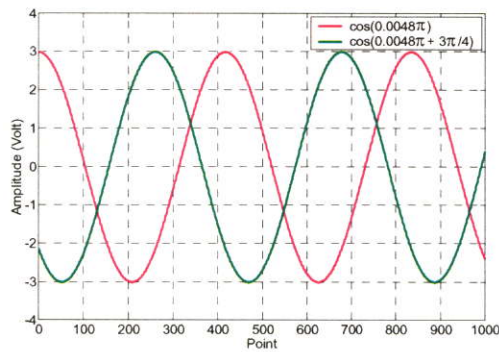
รูปที่ 4.298b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 9 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



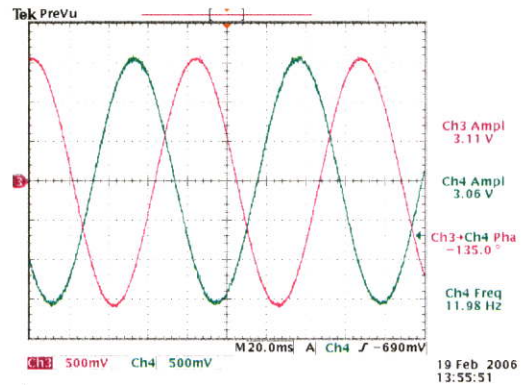
รูปที่ 4.299a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



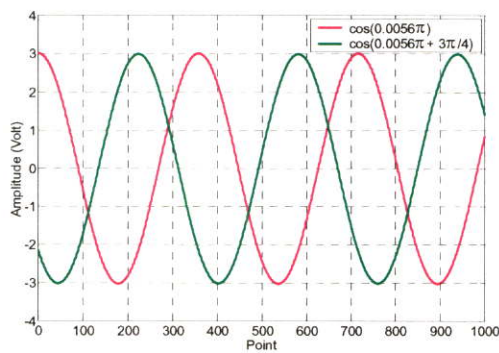
รูปที่ 4.299b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 10 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



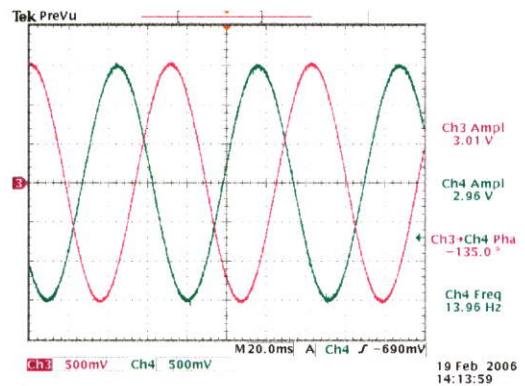
รูปที่ 4.300a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



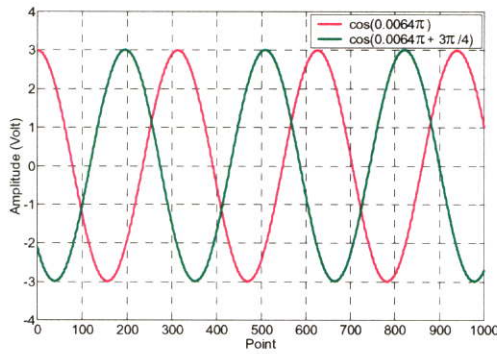
รูปที่ 4.300b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 12 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



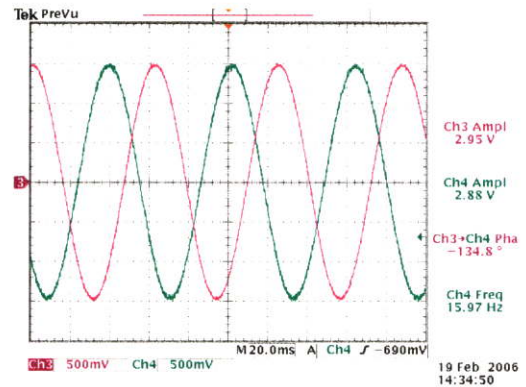
รูปที่ 4.301a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



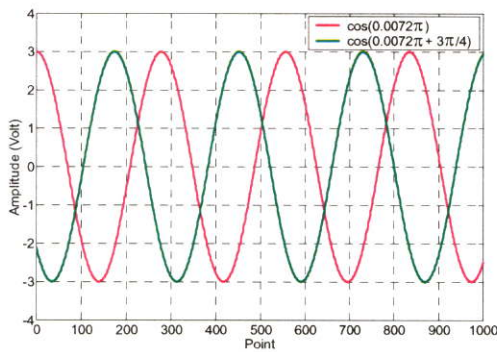
รูปที่ 4.301b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 14 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



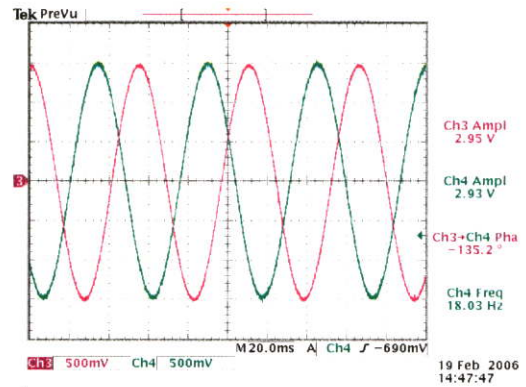
รูปที่ 4.302a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



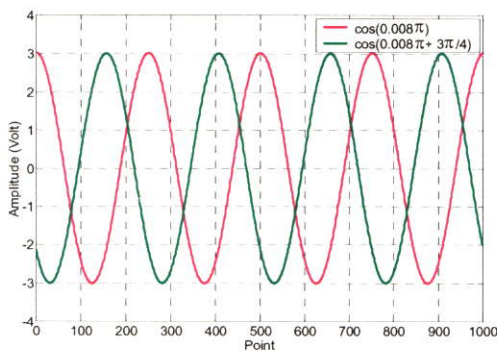
รูปที่ 4.302b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 16 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



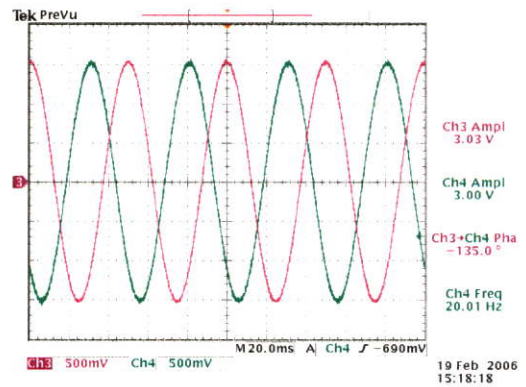
รูปที่ 4.303a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



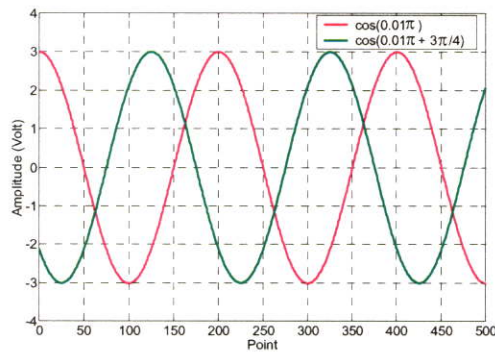
รูปที่ 4.303b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 18 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



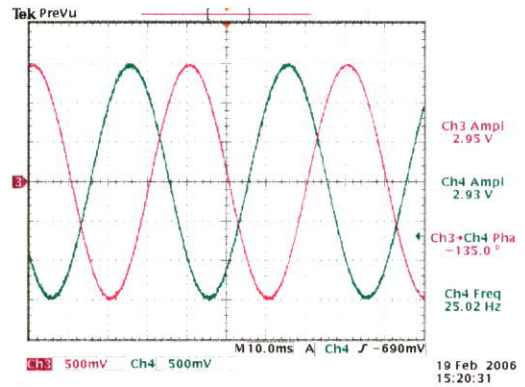
รูปที่ 4.304a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



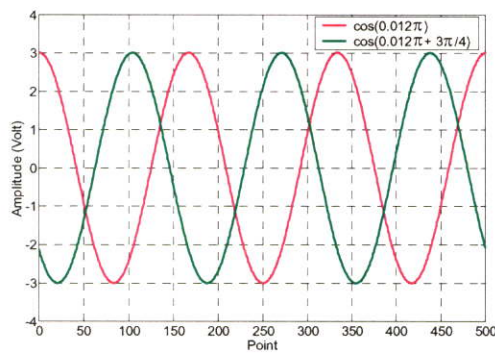
รูปที่ 4.304b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31  
ที่ความถี่  $f = 20 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



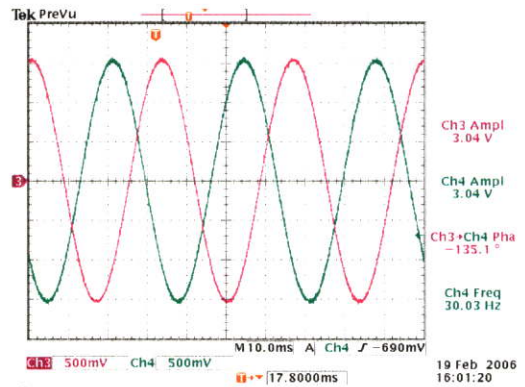
รูปที่ 4.305a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



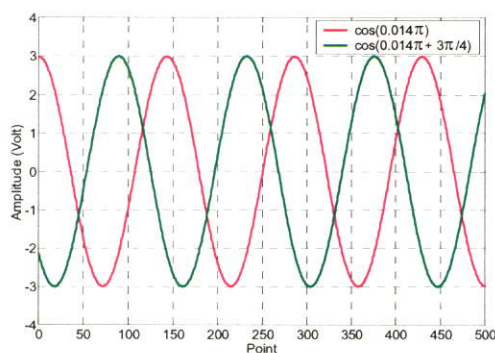
รูปที่ 4.305b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 25 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



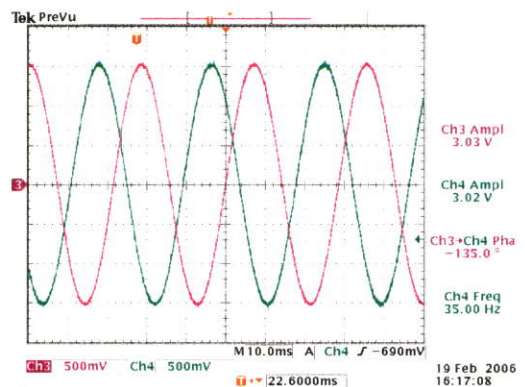
รูปที่ 4.306a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



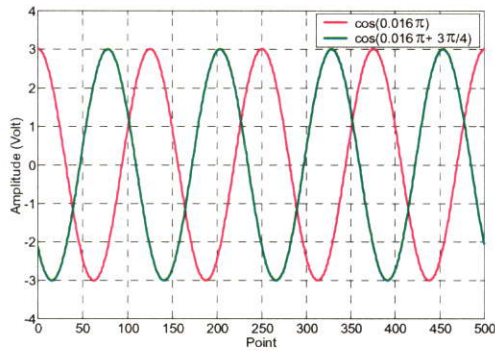
รูปที่ 4.306b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 30 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



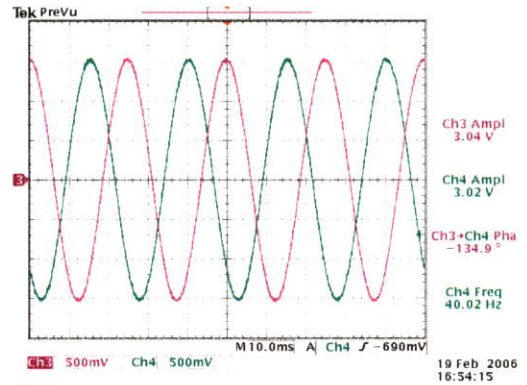
รูปที่ 4.307a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



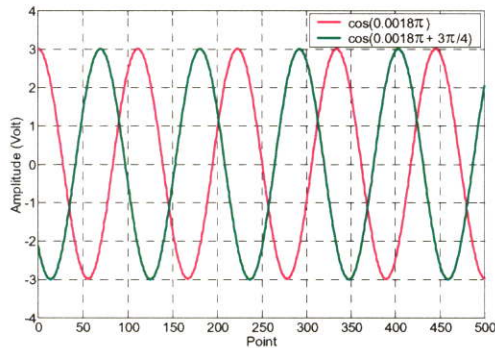
รูปที่ 4.307b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 35 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



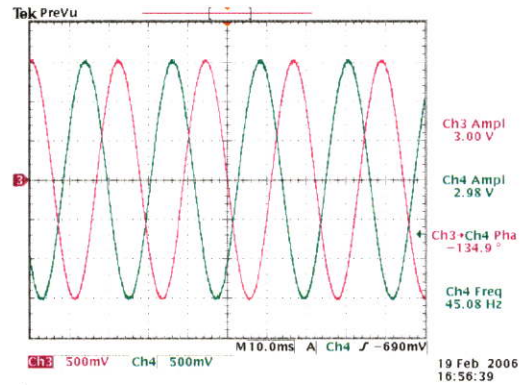
รูปที่ 4.308a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



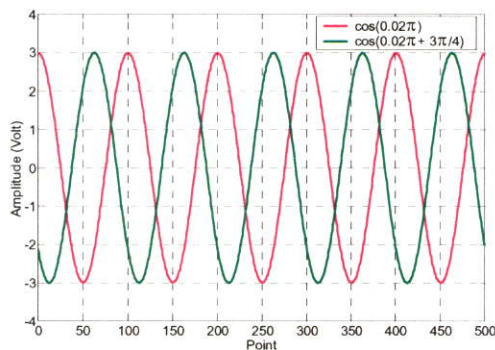
รูปที่ 4.308b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 40 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



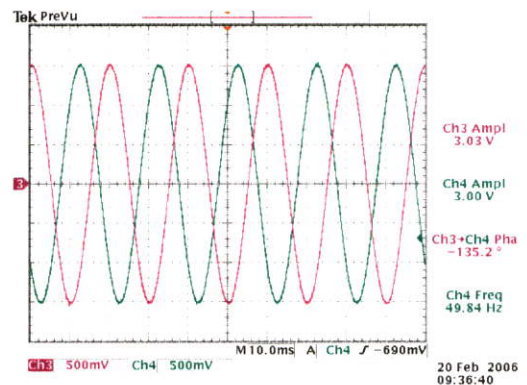
รูปที่ 4.309a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



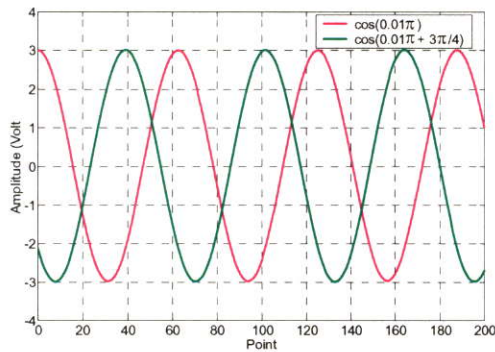
รูปที่ 4.309b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 45 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



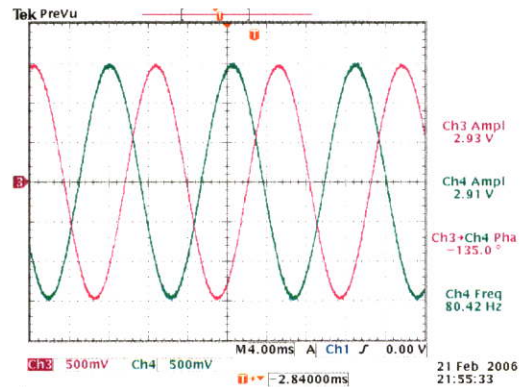
รูปที่ 4.310a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



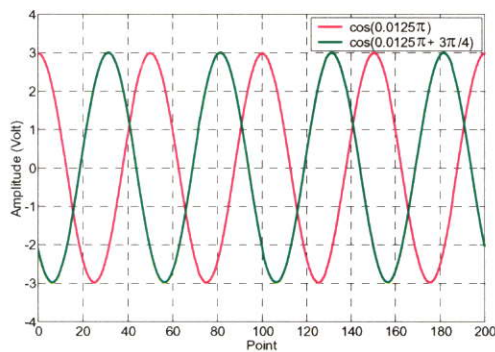
รูปที่ 4.310b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 5000 \text{ Hz}$



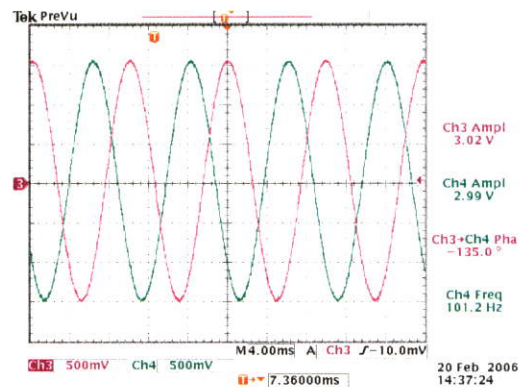
รูปที่ 4.311a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



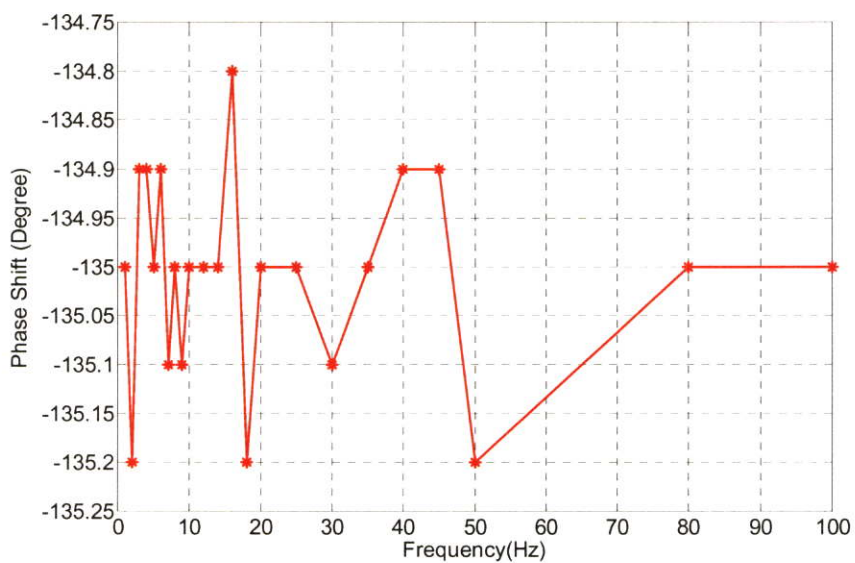
รูปที่ 4.311b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 80 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.312a ผลจำลองการทำงานด้วย MATLAB ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



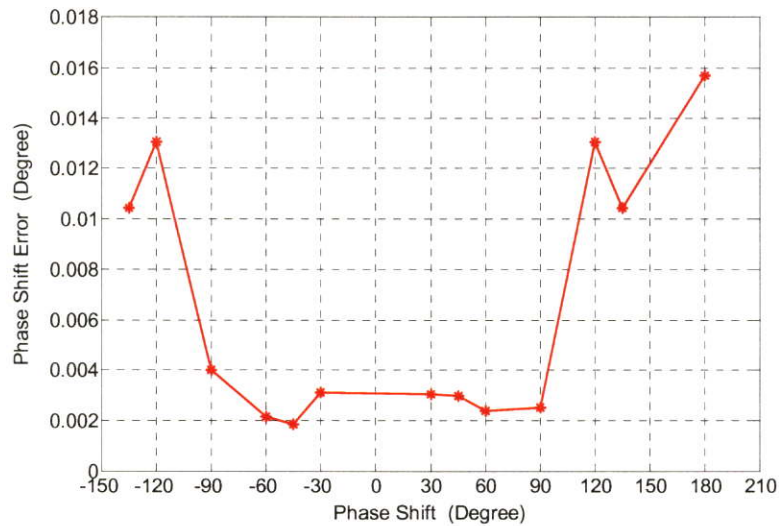
รูปที่ 4.312b ผลการสร้างจริงด้วยบอร์ด TMS320C31 ที่ความถี่  $f = 100 \text{ Hz}$ ,  $f_s = 16 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.313 ค่าความผิดพลาดของสัญญาณซามป์ที่มีการเลื่อนเฟส  $\phi = -\frac{3\pi}{4}$  ณ. ความถี่ใดๆ

## 4.2 ผลการหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวม

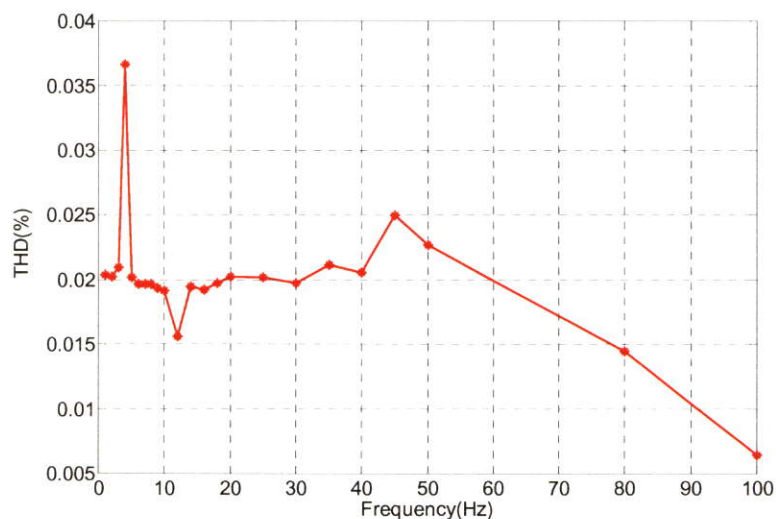
จากผลการทดลองที่ 1 - 13 สามารถหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวม (Mean Square Error: MSE) ของตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัลที่มีการเลื่อนเฟส ณ. ความถี่ใดๆ ได้จากสมการที่ 3.29 ซึ่งผลการหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.314



รูปที่ 4.314 ความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของสัญญาณซายน์ที่ต้องการเลื่อนกับค่าความผิดพลาดเฉลี่ยรวม

## 4.3 ผลการหาความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วม

ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วม (Total Harmonic Distortion: THD) ที่เกิดจากการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณซายน์แบบดิจิทัลด้วยบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.315



รูปที่ 4.315 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกสร่วม

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าสัญญาณชายน้แบบดิจิทัลที่ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นตามหลักการที่นำเสนอสามารถกำหนดขนาดของสัญญาณและค่าการเลื่อนเฟสได้ตามต้องการและมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ยังมีค่าความผิดพลาดของสัญญาณต่ำ ในการทดลองได้กำเนิดสัญญาณชายน้ด้วยตัวประมวลผลสัญญาณเชิงเลข TMS320C31 ในช่วงความถี่ 1 Hz ถึง 100 Hz และทุกๆ ค่าความถี่กำหนดให้มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณชายน้ในช่วง  $-135$  ถึง  $+180$  องศา โดยเทียบกับสัญญาณชายน้ที่ไม่มี การเลื่อนเฟส ค่าความผิดพลาดของเฟสที่เลื่อนไปมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.016 องศา ซึ่งค่าผิดพลาดของการเลื่อนเฟสตามหลักการที่นำเสนอนี้เมื่อนำไปเทียบกับค่าผิดพลาดของการเลื่อนเฟสของสัญญาณชายน้แบบดิจิทัลที่ถูกสร้างด้วยวิธีการเปิดตารางจะพบว่าหลักการที่นำเสนอนี้มีค่าผิดพลาดของการเลื่อนเฟสต่ำกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดเฟสของสัญญาณชายน้สามารถกระทำได้ทุกจุดในช่วง  $-180$  องศา ถึง  $+180$  องศา ส่วนค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.038 % ซึ่งค่าความผิดพลาดของสัญญาณชายน้สามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนบิตของตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก

สำหรับการประยุกต์ใช้งานนั้น ตัวกำเนิดสัญญาณชายน้แบบดิจิทัลที่สามารถปรับการเลื่อนเฟสสัญญาณได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภทตัวอย่างเช่น งานทางด้าน Power Electronic ได้แก่ Motor control Heater control โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณที่ใช้สำหรับควบคุม งานทางด้านกรวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัด Impedance [5, 6, 7] เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J.G. Proakis, D.G. Manolakis. **Digital Signal Processing Principle, Algorithms, and Applications.** New JERSEY : Prentice Hall, 1996.
- [2] A.V. Oppenheim and R.W. Schaffer. **Discrete-Time Signal Processing.** New JERSEY : Prentice Hall, 1999.
- [3] S.K. Mitra. **Digital Signal Processing.** New York : McGraw-Hill, 2001.
- [4] C.S. Turner. 2003. "Recursive Discrete-Time Sinusoidal Oscillators." **IEEE Signal Processing Magazine.** May 2003.
- [5] S.S. Awad, N. Narasimhamurthi, W.H. Ward, "Analysis, Design, and Implementation of an AC Bridge for Impedance Measurements." **IEEE Trans, Instrum. Meas.** vol43. No. 6, Dec. 1994.
- [6] L. Callegaro, G. Galzerano and C. Svelto. "A multiphase direct-digital-synthesis sinewave generator for high-accuracy impedance comparison." **IEEE Trans, Instrum. Meas.** vol50. pp.926-929, Aug. 2001.
- [7] L. Callegaro and V. D'Elia. "A Synchronized two-phase sinewave generator for AC metrology system compensations." **IEEE Trans, Instrum. Meas.,** vol43. No. 6, Dec. 1994.
- [8] K.-S. Lin, Editor. **Digital Signal Processing Applications with The TMS320 Family.** New JERSEY: Prentice Hall, 1987.
- [9] G.J. Batlaglia. "**Mean Square Error.**" [Online]. Available : <http://www.amp.com> 2006.
- [10]Purcbits Inc. "**Total Harmonic Distortion Measurement.**" [Online] .Available: <http://www.purcbits.com/appnotcr.html>. 2006.
- [11]R. Chassaing. **Digital Signal Processing Laboratory Experiments Using C and TMS320C31 DSK.** Canada : John Wiley & SONS, INC., 1999
- [12]R.V. Churchill, J.W. Brown. **Complex Variables and Applications.** New York Mcgraw-Hill International Edition, 1990

ภาคผนวก ก.

**บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31**

**DSP Starter Kit**

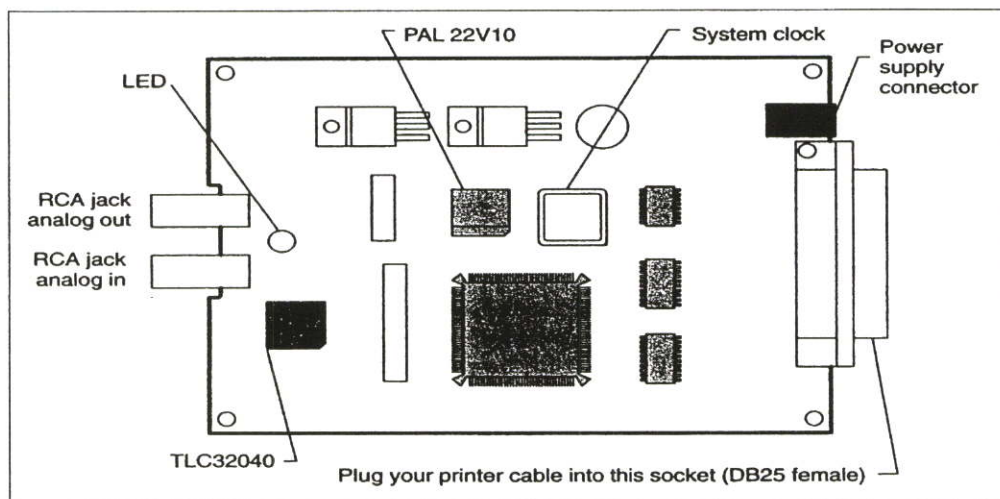
## บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล TMS320C31 DSP Starter Kit

บอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit (DSK) เป็นบอร์ดพัฒนาโปรแกรมแบบ Stand – Alone สามารถประมวลผลแบบเวลาจริง (Real-time) ได้โดยเราสามารถที่จะสั่งให้โปรแกรมทำงาน หรือหยุดทำงานได้โดยผ่านพอร์ตของคอมพิวเตอร์และสามารถต่อบอร์ดอินเตอร์เฟซแบบต่าง ๆ เข้ากับบอร์ด DSK ได้

### 1. ลักษณะของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit (DSK)

ฮาร์ดแวร์ของบอร์ด TMS320C31 DSK มีส่วนประกอบพื้นฐานที่ประกอบด้วย

- ชิป DSP TMS320C31
- ชิป A/D - D/A TLC32040
- พอร์ต Input/Output
- พอร์ตขนานของพริ้นเตอร์
- LED แบบ 3 สี



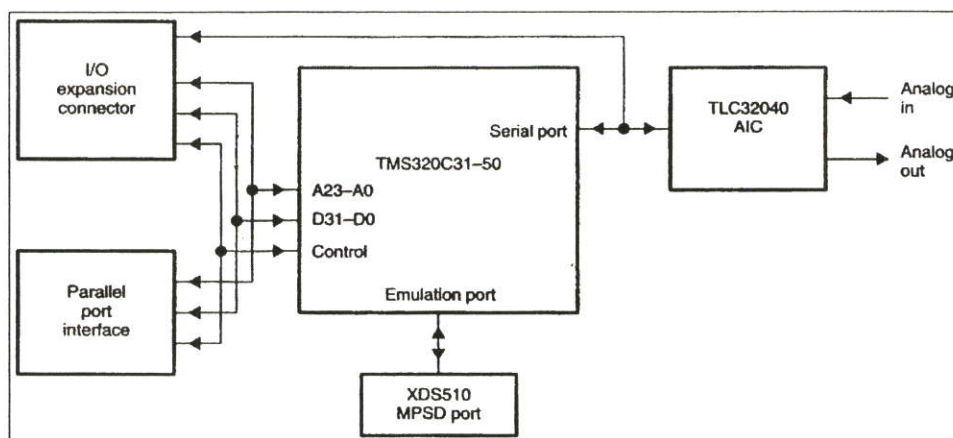
รูปภาคผนวกที่ ก.1 ฮาร์ดแวร์ของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

จากรูปภาคผนวกที่ 1 จะเห็นว่าอุปกรณ์บนบอร์ด DSK จะประกอบด้วย

- Header ขนาด 32 pin จำนวน 4 แถว สัญญาณทุกเส้นของ TM320C31 DSK ที่ ส่งออกไปภายนอกบอร์ดจะต้องผ่าน Header ชุดนี้ซึ่งประกอบด้วย JP2 JP3 JP5 JP6
- Jumper block header ขนาด 11 pin (JP4) จะทำหน้าที่ควบคุมการส่งข้อมูลของพอร์ตอนุกรมของวงจรมัลติเพล็กซ์อินเตอร์เฟซ TLC32040

- Host Interface Logic จะใช้ PLA 22V10Z และ 74ACT245 ควบคุมการสื่อสารระหว่างบอร์ด DSK กับ Host ของคอมพิวเตอร์
- ออสซิลเลเตอร์ บนบอร์ด TMS320C31 DSK จะใช้สัญญาณนาฬิกาขนาด 50 MHz เพื่อป้อนให้ชิป TMS320C31
- RCA Jack จะทำหน้าที่รับสัญญาณ Analog Input และส่งสัญญาณ Analog Output ของบอร์ด TMS320C31 DSK โดยจะต่ออยู่กับขา I/O ของชิป TLC32040
- ชิป TLC32040 จะทำหน้าที่เป็น A/D และ D/A ของบอร์ด TMS320C31 DSK
- ชิป TMS320C31 เป็นตัวประมวลผลขนาด 32 บิต แบบจุดทศนิยมลอย (Floating Point)
- Voltage Regulators ของบอร์ด DSK สามารถใช้ไฟ 7-12 Vdc หรือ 6-9 Vac โดยไฟ DC และ AC จะต้องผ่าน IC Regulator เบอร์ LM7805 และ LM7905 ซึ่งจะได้อไฟ DC +5V และ -5V ตามลำดับ ไฟ DC ที่ได้จะใช้เลี้ยงอุปกรณ์ต่างๆภายในบอร์ดตลอดเวลาที่บอร์ดยังทำงานอยู่
- XDS Emulator Port เป็น Header ขนาด 12 Pin (JP1) ใช้สำหรับการ Upgrade โปรแกรม XDS debugger ในอนาคต

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงเป็นรูปบล็อกไดอะแกรมได้ ดังรูปภาคผนวกที่ 2



รูปภาคผนวกที่ ก.2 บล็อกไดอะแกรมของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

## 2. คุณสมบัติของบอร์ด TMS320C31 DSP STARTER KIT

- ใช้ชิป TMS320C31 เป็นตัวประมวลผลขนาด 32 บิต แบบ Floating-Point
- ใช้เวลาในการประมวลผลคำสั่ง 40ns ต่อ 1 คำสั่ง หรือ 50 MFLOP และ 25 MIPS

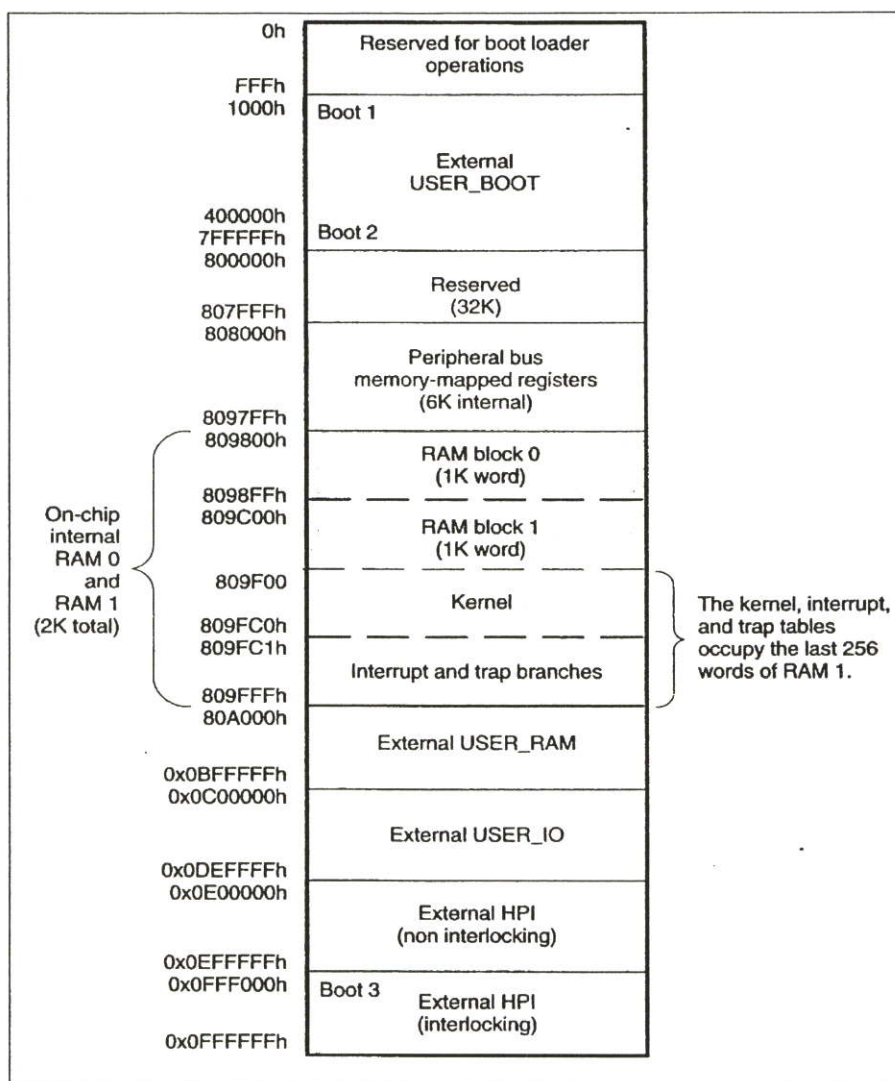
MFLOP : Million Floating-point Intention Per Second

MIPS : Million Intention Per Second

- บอร์ด TMS320C31 DSK สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ ได้โดยใช้พอร์ตขนานของพรีนเตอร์หรือใช้ Host ของคอมพิวเตอร์
- ใช้ชิป TLC32040 ขนาด 14 บิต อัตราการสุ่มสัญญาณ 20,000 ครั้งต่อวินาที
- ใช้ RCA Jack เป็น Jack มาตรฐานสำหรับการต่อสายสัญญาณ Analog Input และ Analog Output

### 3. การจัดหน่วยความจำบนบอร์ด TMS320C31 DSP STARTER KIT

บอร์ด TMS320C31 DSK ได้จัดแบ่งหน่วยความจำให้อยู่ในโหมด Microcomputer/Boot Loader ดังรูปภาคผนวกที่ 3



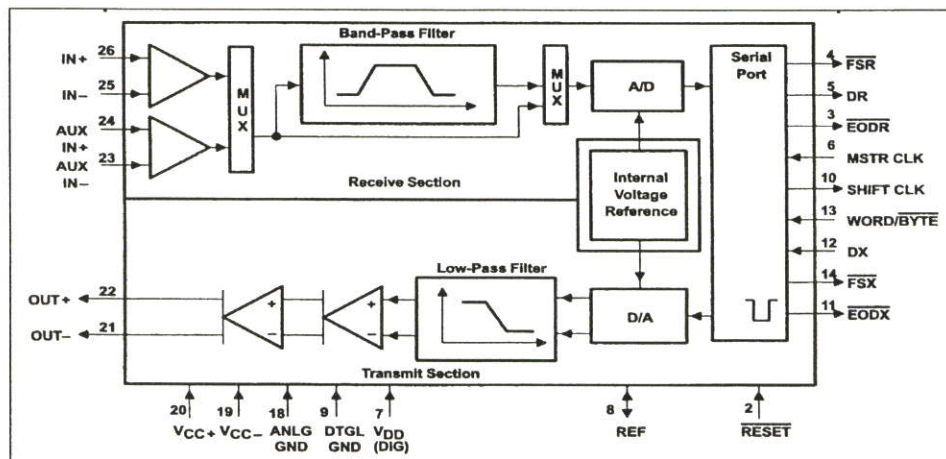
รูปภาคผนวกที่ ก.3 การจัดแบ่งหน่วยความจำในโหมด Microcomputer/Boot Loader ของบอร์ด TMS320C31 DSP Starter Kit

#### 4. วงจรอินเทอร์เฟซสัญญาณอนาล็อก TLC32040

TLC32040 เป็นชิป Analog Interface Circuit (AIC) ที่ใช้เชื่อมต่อกับชิป TMS320C31 ในการทำงานประมวลผลด้าน DSP โดยมีลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เทคโนโลยีการผลิต Advanced LinCMOS
- ความละเอียดของ ADC และ DAC เป็น 14 บิต
- สามารถเปลี่ยนอัตราการสุ่มสัญญาณของ ADC และ DAC ได้ถึง 20,000 ครั้ง/วินาที
- มี Switched Capacitor Antialiasing Input Filter และ Output Reconstruction Filter
- มีพอร์ตอนุกรมสำหรับติดต่อโดยตรงกับ TMS320C11, TMS320C17, TMS320C20, TMS320C25 Digital Signal Processing
- สามารถปรับอัตราการแปลงของ ADC และ DAC ได้โดยใช้โปรแกรมควบคุม

ฟังก์ชันไดอะแกรม ดังรูปภาคผนวกที่ 4



รูปภาคผนวกที่ ก.4 ฟังก์ชันไดอะแกรมของชิป TLC32040

#### 5. การควบคุมวงจรมวจรอนาล็อกอินเทอร์เฟซ

การส่งผ่านข้อมูลในวงจรมวจรอนาล็อกอินเทอร์เฟซ (AIC) จะกระทำกันในรีจิสเตอร์สำหรับการรับข้อมูล (Data Receive: DR) และรีจิสเตอร์สำหรับการส่งข้อมูล (Data Transmit: DX) รีจิสเตอร์ทั้ง 2 จะทำการส่งข้อมูลในแบบอนุกรม ในการควบคุมรีจิสเตอร์การส่งผ่านข้อมูลของ AIC จะใช้บิตล่าง 2 บิต (LSBs) เป็นตัวกำหนดการติดต่อเมื่อบิตทั้ง 2 มีค่าเป็น 0 จะเป็นการส่งผ่านแบบปกติ เมื่อบิตทั้ง 2 มีค่าเป็น 1 จะเป็นการติดต่อระดับ 2 การควบคุมการติดต่อระดับ 2 นี้ AIC จะยอมให้ส่งผ่านข้อมูลครั้งแรกก่อน

รีจิสเตอร์ A และ B บน AIC จะเป็นตัวควบคุมการทำงานของ AIC โดยรีจิสเตอร์ A ประกอบด้วย TA, RA และเครื่องหมายที่ใช้ควบคุมตัวกรอง (Represent Filter Control) รีจิสเตอร์ B

จะประกอบด้วย TB, RB และเครื่องหมายที่ใช้ควบคุม A/D และ D/A รีจิสเตอร์เหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของการตั้งค่าเวลาภายใน

ตำแหน่งบิตที่ใช้สำหรับควบคุมการส่งและรับของรีจิสเตอร์ TA และ RA เป็น

|           |        |                |
|-----------|--------|----------------|
| บิต 0-1   | —————> | 0, 0           |
| บิต 2-6   | —————> | RA             |
| บิต 7-8   | —————> | don't care (x) |
| บิต 9-13  | —————> | TA             |
| บิต 14-15 | —————> | don't care (x) |

ตำแหน่งบิตที่ใช้สำหรับควบคุมการส่งและรับของรีจิสเตอร์ TB และ RB เป็น

|          |        |                |
|----------|--------|----------------|
| บิต 0-1  | —————> | 0, 1           |
| บิต 2-7  | —————> | RB             |
| บิต 8    | —————> | don't care (x) |
| บิต 9-14 | —————> | TB             |
| บิต 15   | —————> | don't care (x) |

AIC สามารถกำหนดค่าความถี่สุ่มและค่าเบนควัด โดยการใชการติดต่อดระดับ 2 โดยให้ตั้งค่าเป็น 1 ใน 2 บิตแรก (LSBs) ทำให้การติดต่อดระดับ 2 มีค่าเหมือนการติดต่อดระดับ 1 ถ้าดับข้อมูลจะถูกโหลดจากรีจิสเตอร์ส่งข้อมูลพอร์ดอนุกรม และเซต LSBs ทั้ง 2 เป็น 1 สำหรับการติดต่อดระดับ 2 ในแต่ละครั้งมีดังนี้

1. 0x3 (3h) ใช้เรียกการติดต่อดระดับ 2
2. ค่าที่รีจิสเตอร์ A
3. 0x3 เรียกการติดต่อดระดับ 2 ครั้งที่ 2
4. ค่าที่รีจิสเตอร์ B
5. 0x3 เรียกการติดต่อดระดับ 2 ครั้งที่ 3
6. ค่าที่เซตรีจิสเตอร์ควบคุม

สามารถหาค่า A และ B เพื่อออกแบบค่าความถี่สุ่มและค่าเบนควัด (BW)

#### 6. การคำนวณหาค่า A และ B เพื่อออกแบบค่าความถี่สุ่มและค่าเบนควัด

บอร์ด TMS320C31 DSK มี Input Clock (CLKIN) เป็น 50 MHz สามารถกำเนิดความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงสุด (Timer Frequency) เป็น  $MCLK = (CLKIN/4) = 12.5 \text{ MHz}$  ซึ่งสูงกว่า

Master Clock Frequency ของ AIC ที่มีค่าเท่ากับ 10 MHz AIC Master Clock (MCLK) ที่เข้ามาสามารถวัดสัญญาณได้จากขา 8 ใน JP1 สัญญาณสูงสุดที่ได้จาก AIC สามารถหาได้จาก Input Clockหารด้วย 8 หรือ

$$MCLK = CLKIN/8 = (50 \text{ MHz} / 8) = 6.25 \text{ MHz}$$

Switched – Capacitor Filter Frequency (SCF) เป็นความสัมพันธ์จากรีจิสเตอร์การส่งของ A

$$SCF = MCLK / (2 \times TA) \quad (1)$$

และความถี่สุ่มเป็นความสัมพันธ์จาก การส่งค่าในรีจิสเตอร์ของ A และ B

$$F_s = MCLK / (2 \times TA \times TB) \quad (2)$$

Input Filter Bandwidth หรือ Cutoff Frequency ตั้งค่าที่ 3600 MHz สำหรับ SCF ที่ 288 kHz ค่า SCF ใหม่จะได้ค่า BW นำไปคำนวณในตัวอย่าง และหาค่า A และ B เพื่อไปตั้งค่า AIC

### 6.1 ออกแบบ $F_s = 8 \text{ kHz}$

การออกแบบ Cutoff Frequency ของ Input Antialiasing filter เป็น 3600 Hz ที่ SCF 288 kHz จากสมการที่ (1)

$$\begin{aligned} TA &= MCLK / (2 \times SCF) = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 288 \text{ kHz}) \\ &= 10.85 \approx 11 = (01011)_b \end{aligned} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} TB &= MCLK / (2 \times TA \times F_s) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 8000) \\ &= 35.51 \approx 36 = (100100)_b \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ SCF (ปฏิบัติ) เป็น

$$SCF = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times TA)$$

$$= 284.09 \text{ kHz}$$

Cutoff Frequency หรือ Input Filter Bandwidth

$$\begin{aligned} \text{BW} &= 3600 \text{ (New SCF / Set SCF)} \\ &= 3600(284.09 \text{ KHz} / 288 \text{ KHz}) \\ &= 3551.14 \text{ Hz} \end{aligned}$$

จะได้ความถี่สุ่มเป็น

$$\begin{aligned} F_s &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times \text{TA} \times \text{TB}) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 36) \\ &= 7891.41 \text{ Hz} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3) จะได้ตำแหน่งบิตที่ใช้ ในการรีจิสเตอร์ควบคุม และตั้งค่า TA = RA ซึ่ง TA มี 5 บิต, TB มี 6 บิต และ xx จะไม่สนใจ (don't care) เช่น

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} 00 & 01011 & 00 & 01011 & 00 \\ \hline xx & \text{TA} & xx & \text{RA} & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 162\text{Ch}$$

แยกบิตที่จะนำไปใช้เป็น 4 กลุ่มโดยค่า A = 162Ch TB = RB ก็เช่นเดียวกัน

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} 0 & 100100 & 0 & 100100 & 10 \\ \hline x & \text{TB} & x & \text{RB} & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 4892\text{h}$$

## 6.2 ออกแบบ $F_s = 10 \text{ kHz}$

ใช้ Cutoff frequency หรือ BW สำหรับ Input Antialiasing Filter เหมือนกับ  $F_s = 8 \text{ kHz}$ , TA = 11 จะได้

$$\begin{aligned} \text{TB} &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 10000) \\ &= 28.41 \approx 28 = (011100)_6 \end{aligned}$$

ความถี่สุ่มเป็น

$$\begin{aligned} F_s &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times T_A \times T_B) \\ &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 11 \times 28) \\ &= 10146 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ค่า B ได้

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} 0 & 0111100 & 0 & 0111100 & 10 \\ x & TB & x & RB & \end{array} \quad \longrightarrow \quad 3872h$$

หรือ  $B = 3872h$

### 6.3 ออกแบบ $F_s = 20 \text{ kHz}$

ออกแบบ  $BW = 8000 \text{ Hz}$  จาก

$$BW = 3600 \text{ (New SCF / Set SCF)}$$

ค่า Switched – Capacitor Filter Frequency ค่าใหม่ เป็น

$$SCF = 8000(288 \text{ K}) / 3600 = 640 \text{ KHz}$$

ค่า  $T_A$  และ  $T_B$  เป็น

$$\begin{aligned} T_A &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 640 \text{ k}) \\ &= 4.88 \approx 5 = (00101)_b \\ T_B &= 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5 \times 20000) \\ &= 31.25 \approx 31 = (011111)_b \end{aligned}$$

ได้ SCF (ปฏิบัติ) เป็น

$$SCF = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5) = 625 \text{ kHz}$$

ได้ Bandwidth (ปฏิบัติ) เป็น

$$\begin{aligned} BW &= 3600(625 \text{ k} / 288 \text{ k}) \\ &= 7812.5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

ความถี่สุ่ม (ปฏิบัติ) เป็น

$$F_s = 6.25 \text{ MHz} / (2 \times 5 \times 31) = 20161.29 \text{ Hz}$$

ค่า A จะได้

$$\begin{array}{c} 00|00101|00|00101|00 \\ xx|TA|xx|RA| \end{array} \quad \Rightarrow \quad 0A14h$$

หรือ  $A = 0A14h$

$$\begin{array}{c} 0|011111|0|011111|10 \\ x|TB|x|RB| \end{array} \quad \Rightarrow \quad 3E7Eh$$

หรือ  $B = 3E7Eh$

ดังนั้นสามารถสรุปค่าของรีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่าดังตารางภาคผนวกที่ 1

**ตารางภาคผนวกที่ ก.1** ค่ารีจิสเตอร์ที่ความถี่สุ่มแตกต่างกัน 4 ค่า

| $F_s$ (ออกแบบ), Hz | $F_s$ (ปฏิบัติ) | A      | B      |
|--------------------|-----------------|--------|--------|
| 8000               | 7891.41         | 0x162C | 0x4892 |
| 10000              | 10146           | 0x162C | 0x3872 |
| 16000              | 15943           | 0x0E1C | 0x3872 |
| 20000              | 20161.29        | 0x0A14 | 0x3E4E |

ภาคผนวก ข.

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Sawitree Klunium, Sukanya Praesombool, Watcharapong Hinjit, Surapun Yimman and Kobchai Dejhan, “**Adjustable Phase, Discrete Time Sinewave Generator.**” International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2004), pp. 277-281, The Shangri-La Hotel, Bangkok, THAILAND, Aug. 25-27, 2004.
2. Sawitree Klunium, Phayung Desyoo, Surapun Yimman, Chusit Pradubpet and Kobchai Dejhan, “**The Implementation of an Adjustable Phase Digital Sine Wave Oscillator.**” 2005 RISP International Workshop on Nonlinear Circuit and Signal Processing (NCSP'05), pp. 215-218, Hawaii, USA, Mar. 4-6, 2005.



ICCAS '04

# ICCAS 2004

Final Program & Abstract Book

## International Conference on Control, Automation and Systems

August 25-27, 2004

The Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand

Organized by:

Research Center for Communications and Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

The Institute of Control, Automation, and Systems Engineers, Korea



ICASE

In association with:



## Adjustable Phase, Discrete Time Sinewave Generator

Sawitree Klunium\*\*, Sukunya Praesombool\*\*, Watcharapong Hinjit\*, Surapun Yimman\*, and Kobchai Dejhan\*\*

\* Department of Industrial Physic & Medical Instrumentation,  
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800, Thailand  
(Tel : +66-2-913-2500; E-mail: sym, wph@kmitnb.ac.th)

\*\*Faculty of Engineering and Research Center for Communication and Information Technology,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

**Abstract:** The following paper proposes the new design of digital sine wave generator which allows users to define the phase shift of the out put sinewave according to user's demands. This new sinewave generator will have 2 outputs,  $\cos(\omega_0 n)$  and  $\cos(\omega_0 n + \phi)$ . The design of the new system starts from the construction of discrete time system with impulse response as  $\cos(\omega_0 n)$  in a pair of conjugate complex poles and a pair of zeros at the origin and the real axis. If users want to make a phase shift of sign wave, users can change the position of zero at the real axis. The results of the experiment have shown that the new design of sign wave generator has generated sine wave with the correct phase shift according to the theory.

**Keywords:** direct form, measurement system, phase shift, sinewave

### 1. INTRODUCTION

Digital sine oscillator is constructed as the impulse response of the discrete time system with a pair of conjugate complex pole on the circumference of unit circle. There are 2 kinds of structure of digital sign wave oscillator that can be described as follows;

1. Direct Form Structure with single output and the impulse response as  $\sin(\omega_0 n)$  or  $\cos(\omega_0 n)$  [1]
2. Coupled-form Structure with double outputs with the impulse response as  $\sin(\omega_0 n)$  and  $\cos(\omega_0 n)$  [1,2]

After making an assessment on the output from both sets of digital sine generator structure, the researchers found that both sets of structure cannot generate digital sine wave with phase shift according to the users' demands. Direct form structure will generate only single output while couple form structure will generate double output with phase difference of  $90^\circ$  since one output is  $\sin(\omega_0 n)$  while the other output is  $\cos(\omega_0 n)$ .

Therefore, the new digital sin oscillator that can change the phase shift according to the user's demands will be introduced. The discrete time system with the result as  $\cos(\omega_0 n)$  will be used for the design and then the system will be cascaded with another discrete time system to change the zero position on the real axis. This will make output response of cascaded discrete time system will have a phase shift after comparing with  $\cos(\omega_0 n)$ .

### 2. THEORY AND PRINCIPLES

#### 2.1 Previous Design

Direct form structure of digital sine oscillator is shown in Fig. 1 and the output response or impulse response of the system after using  $\delta(n)$  as an input will be shown in Eq. (1)

$$y(n) = \sin(n+1)\omega_0 \quad (1)$$

The coupled-form structure will be displayed in Fig. 2 and 2 output equations of the system will be shown in Eqs. (2) and (3).

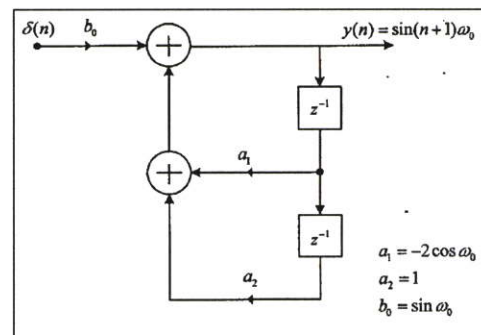


Fig. 1 Structure of Direct Form Digital Sine Oscillator

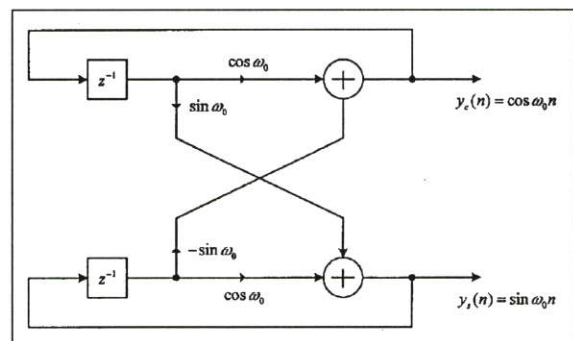


Fig. 2 Structure of Coupled-Form Digital Sine Oscillator

$$y(n)_c = (\cos \omega_0)y_c(n-1) - (\sin \omega_0)y_s(n-1) \quad (2)$$

$$y(n)_s = (\sin \omega_0)y_c(n-1) + (\cos \omega_0)y_s(n-1) \quad (3)$$

The output generated from the oscillator with direct form structure will give the output as a sine wave which cannot be compared with phase-shift sine waves. The output generated from the oscillator with coupled form as shown in Eq. (2) will give cosine signal while the other output will be shown as sine wave which states that both outputs have fixed  $90^\circ$  or  $\left(\frac{\pi}{2}\right)$  and phase shift which cannot shift the phase to fit the users' demands.

**2.2 Proposed Design**

Data sequence is defined as  $x_1(n) = \cos(\omega_0 n)$  as shown in Fig. 3 and z-transform [3] of  $x(n)$  will be defined as (4)

$$X_1(z) \equiv Z\{x_1(n)\}$$

$$X_1(z) = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (4)$$

If the discrete time system has the transfer function as shown in Eq. (4), it can be rewritten into Eq. (5) with pole-zero placements as shown in Fig. 4. If defining the input for discrete time system mentioned in Eq. (5) as  $\delta(n)$ , the output response or impulse response  $h_1(n)$  will be shown in Eq. (6)

$$H_1(z) = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (5)$$

$$h_1(n) = \cos(\omega_0 n) \quad (6)$$

Fig. 4 shows that the discrete time system will have 2 zeros with one zero at the origin while the other zero will be on the real axis. If defining the sequence shown in Fig. 5 as  $x_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi)$ , z-transform of  $x_2(n)$  will be shown in (7) as follows

$$X_2(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (7)$$

Define the transfer function of discrete time system as

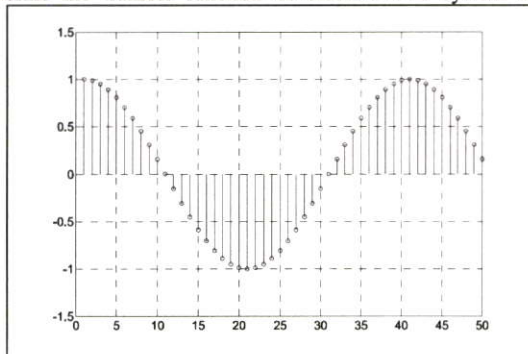


Fig. 3 Sequence of  $x_1(n) = \cos(\omega_0 n)$

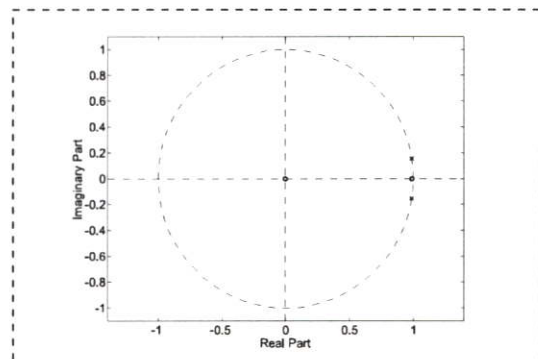


Fig. 4 Pole-Zero Plot of  $H_1(z)$

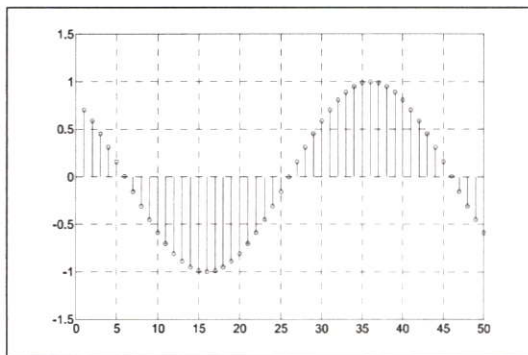


Fig. 5 Sequence of  $x_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi)$

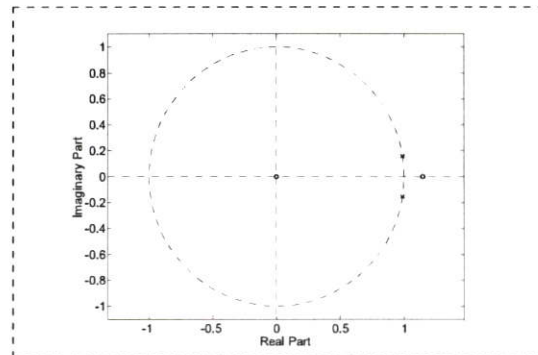


Fig. 6 Pole-Zero Plot of  $H_2(z)$

shown in (7), users can be rewrite the equation to become (8) and the pole-zero position of the new system will be shown in Fig. 6. If define the input of discrete time system as  $\delta(n)$  on (8), the output response or impulse response  $h_1(n)$  will be shown in (9)

$$H_2(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (8)$$

$$h_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi) \quad (9)$$

Pole-zero plot in Fig. 4 and Fig. 6 show that the zero position changes in the real axis result in the phase shift of  $\cos(\omega_0 n)$ . The implementation of sinusoidal signal generator system with phase shift will be started from rewriting transfer function of discrete time system in Eq. (5) into the direct form as shown in Fig. 7, and then changing the position of zeros on the real axis by constructing another first order discrete time system with transfer function according to Eq. (10) with the structure as shown in Fig. 8. After cascading both discrete time systems, the new system will be shown in Fig. 9.

$$H(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}} \quad (10)$$

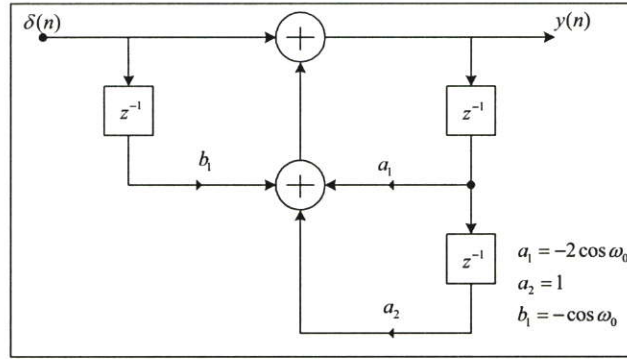


Fig. 7 Structure of Direct Form Digital Sine Oscillator

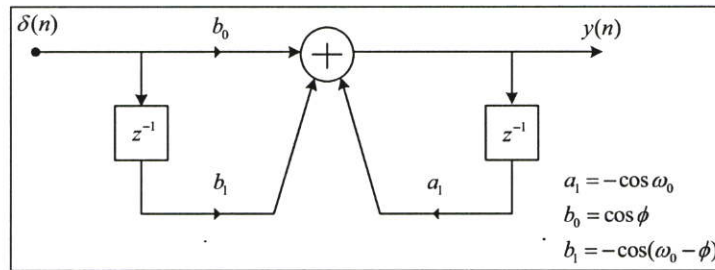


Fig. 8 First Order Discrete Time System

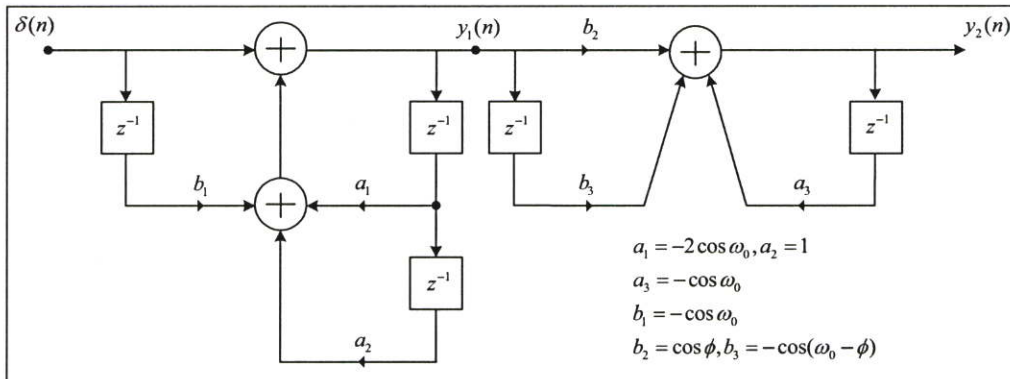


Fig. 9 Structure of Two-phase Digital Sine Oscillator

Fig. 9 has shown that after feeding input into the discrete system as impulse, the output response or impulse response of the system  $y_1(n)$  will be shown in (12). Where  $x_1(n) = \delta(n)$ .

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (11)$$

$$y_1(n) = h_1(n) = \cos(\omega_0 n) \quad (12)$$

and  $y_2(n)$  will be shown in (14)

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \left[ \frac{1 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \right] \left[ \frac{b_2 + b_3 z^{-1}}{1 + a_3 z^{-1}} \right] \quad (13)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \left[ \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \right] \left[ \frac{\cos\phi - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}} \right]$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \frac{\cos\phi - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}}$$

$$y_2(n) = h_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi) \quad (14)$$

### 3. DESIGN EXAMPLES

The design examples have specified the frequency at  $\omega_0 = 0.02\pi$ ,  $\phi = \pi, \frac{\pi}{3}$  and  $\frac{2}{3}\pi$  in the proposed design by applying the factors into Eqs. (11) and (13),  $b_1, a_1, a_2, b_2, b_3$  and  $a_3$  as shown in Table1.and difference equations shown in Eqs (15)-(20).

Table 1 The result from proposed design.

|       | $\omega_0 = 0.02\pi$<br>$\phi = \pi$ | $\omega_0 = 0.02\pi$<br>$\phi = \frac{\pi}{3}$ | $\omega_0 = 0.02\pi$<br>$\phi = \frac{2}{3}\pi$ |
|-------|--------------------------------------|--|---|
| $b_1$ | -0.9980                              | -0.9980  | -0.9980   |
| $a_1$ | -1.9961                              | -1.9961  | -1.9961   |
| $b_2$ | -1                                   | 0.5000   | -0.5000   |
| $a_2$ | 1                                    | 1  | 1   |
| $b_3$ | 0.9980                               | -0.5534  | 0.4446  |
| $a_3$ | -0.9980                              | -0.9980  | -0.9980   |

The 1<sup>st</sup> Design will define  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = \pi$

$$y_1(n) = \delta(n) - \cos(0.02\pi)\delta(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_1(n-1) - y_1(n-1) \quad (15)$$

$$y_2(n) = \cos(\pi)y_1(n) - \cos(0.02\pi - \pi)y_1(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (16)$$

The 2<sup>nd</sup> Design defines  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = \frac{\pi}{3}$

$$y_1(n) = \delta(n) - \cos(0.02\pi)\delta(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_1(n-1) - y_1(n-1) \quad (17)$$

$$y_2(n) = \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)y_1(n) - \cos\left(0.02\pi - \frac{\pi}{3}\right)y_1(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (18)$$

The 3<sup>rd</sup> Design will define  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = \frac{2}{3}\pi$

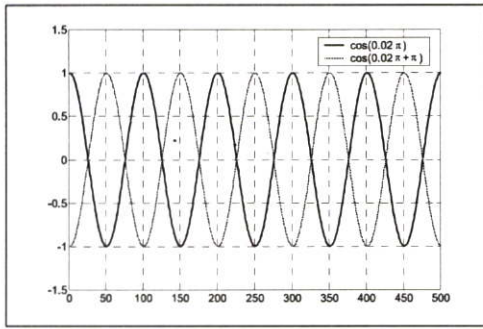
$$y_1(n) = \delta(n) - \cos(0.02\pi)\delta(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_1(n-1) - y_1(n-1) \quad (19)$$

$$y_2(n) = \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right)y_1(n) - \cos\left(0.02\pi - \frac{2}{3}\pi\right)y_1(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (20)$$

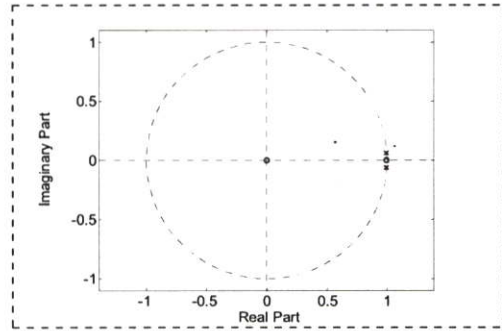
After that, rewrite expression (15) to (20) into the simulation program in Matlab.

#### 4. RESULTS OF EXPERIMENT

The results from Matlab simulation for the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, and 3<sup>rd</sup> design will be shown on Fig. 10, 11 and 12 respectively.

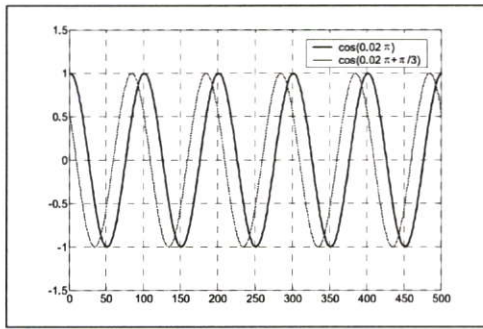


a) Output Response

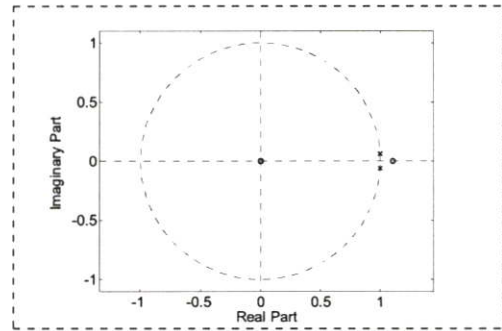


b) Pole-Zero plot

Fig. 10  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = \pi$

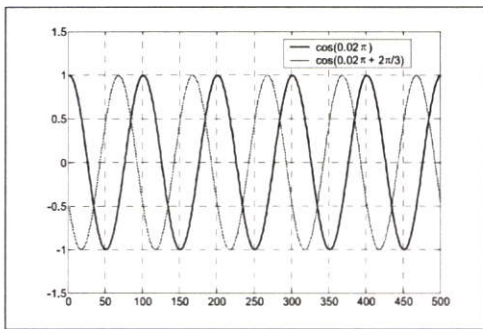


a) Output Response

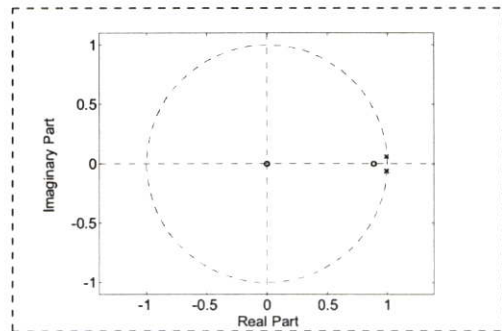


b) Pole-Zero plot

Fig. 11  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = \frac{\pi}{3}$



a) Output Response



b) Pole-Zero plot

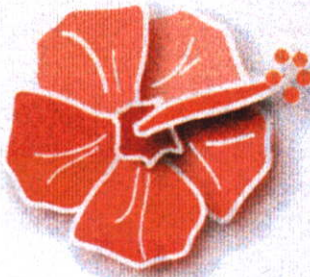
Fig. 12  $\omega_0 = 0.3\pi$  and  $\phi = \frac{2}{3}\pi$

## 5. CONCLUSION

The researchers have found that the new designs of sine wave generator according to the proposed principles will give the output as sign wave with correct phase shift according to users demands. This digital sine wave generator with adjustable phase shift will have the applications on digital sign oscillators to measurement system [4,5], control power electronic instruments and machines such as motors, heaters. Further development will create multiple phase digital sine oscillators by cascading at least 2 discrete systems and then applying the numerical methods to find out the optimal coefficients for discrete time system.

## REFERENCES

- [1] J. G. Proakis, D.G. Manolakis, *Digital Signal Processing Principle, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall, 1996.
- [2] K. Dejhan, S. Yimmun, A. Trirat and F. Cheevasuvit, "TMS320C31-based narrow-band noise rejection Kalman filter implementation," *Proc. 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT'02)*, Bangkok, Thailand, December 11-14, 2002.
- [3] Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, 1999.
- [4] L. Callegaro and V. D'Elia, "A Synchronized two-phase sinewave generator for AC metrology system compensations," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.49, pp. 320-324, Apr. 2000.
- [5] L. Callegaro, G. Galzerano and C. Svelto, "A multiphase direct-digital-synthesis sinewave generator for high-accuracy impedance comparison," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.50, pp.926-929, Aug. 2001.



# NCSP'05

Proceedings of the  
2005 RISP International Workshop  
on Nonlinear Circuits and Signal Processing

Waikiki Beach Marriott Resort  
Honolulu, Hawaii, USA  
March 4 - 6, 2005

Organizer:

The Research Institute of Signal Processing Japan (RISP)

Printed in Japan. © Research Institute of Signal Processing, Japan  
office@risp.jp <http://www.risp.jp/>

## The Implementation of an Adjustable Phase Digital Sine Wave Oscillator

Sawitree Klunium\*\*, Phayung Desyoo\*, Surapun Yimman\*, Chusit pradubpet\*\*\*, Kobchai Dejhan\*\*

\* Department of Industrial Physic & Medical Instrumentation,  
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800, Thailand.  
(Tel : +66-2-913-2500; E-mail: sym\_imi@yahoo.com)

\*\*Faculty of Engineering and Research Center for Communication and Information Technology,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.

\*\*\*Department of Industrial Technology Faculty of Science and Technology,  
Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Phranakhon Si Ayutthata 13000, Thailand.

### Abstract

This paper proposes a new design of digital sine wave generator which is widely used for instrumentation application. The proposed digital sine wave generator is able to define the phase shift of the output signal as  $\cos(\omega_0 n)$  and  $\cos(\omega_0 n + \phi)$ . This generator is implemented with the discrete time system which has impulse response as  $\cos(\omega_0 n)$  in a pair of conjugate complex poles and a pair of zeros at the origin and the real axis. The phase shift of sine wave is able to be carried out by changing the position of zero at the real axis. The experimental results have been shown that the proposed design of sine wave generator produces correct phase shift sine wave, compared to direct look up table (LUT). The designed sine wave generator give less error than direct look up table, especially in low frequency area.

### 1. Introduction

Digital sine wave generator can be implemented based on the impulse response of the discrete time system with a pair of conjugate complex pole on the circumference of unit circle. There are two types of structure of digital sine wave generator; direct form structure with single output (the impulse response as  $\sin(\omega_0 n)$  or  $\cos(\omega_0 n)$ ) and the coupled-form structure with double output (the impulse response as  $\sin(\omega_0 n)$  and  $\cos(\omega_0 n)$ ) [1-4]. The direct form structure generates only single output while the couple form structure is able to generate the double output with  $90^\circ$  phase difference since one output is  $\sin(\omega_0 n)$  while the other is  $\cos(\omega_0 n)$ . Therefore, the new proposed digital sine wave oscillator with desired adjustable phase shift is presented. The discrete time system with  $\cos(\omega_0 n)$  is used for this design and the system will be cascaded with another discrete time system in order to change the zero position on the real axis. The output response of cascaded discrete time system will have a phase shift when compared with  $\cos(\omega_0 n)$ .

### 2. Theory

#### 2.1 Previous Design

The output response or impulse response of the direct form digital sine oscillator [1] after using  $\delta(n)$  as an input will be shown in Eq. (1).

$$y(n) = \sin(n+1)\omega_0 \quad (1)$$

The output response of the coupled-form digital sine oscillator [1] will be shown in Eqs. (2) and (3).

$$y(n)_c = (\cos \omega_0) y_c(n-1) - (\sin \omega_0) y_s(n-1) \quad (2)$$

$$y(n)_s = (\sin \omega_0) y_c(n-1) + (\cos \omega_0) y_s(n-1) \quad (3)$$

The output generated from the oscillator with direct form structure will give the output as a sine wave which cannot be compared with phase-shift sine waves. The output generated from the oscillator with coupled form as shown in Eq. (2) will give cosine signal while the other output will be shown as sinewave which states that both outputs have fixed  $90^\circ$  or  $(\pi/2)$  and phase shift which cannot shift the phase to fit the users' demands.

#### 2.2 Proposed Design

Data sequence is defined as  $x_1(n) = \cos(\omega_0 n)$  as shown in Fig. 1 and z-transform [3] of  $x(n)$  will be defined as Eq. (4).

$$X_1(z) \equiv Z\{x_1(n)\} \\ X_1(z) = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (4)$$

If the discrete time system has the transfer function as shown in Eq. (4), it can be rewritten into Eq. (5) with pole-zero placements as shown in Fig. 2. If defining the input for discrete time system mentioned in Eq. (5) as  $\delta(n)$ , the output response or impulse response  $h_1(n)$  will be shown in Eq. (6).

$$H_1(z) = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (5)$$

$$h_1(n) = \cos(\omega_0 n) \quad (6)$$

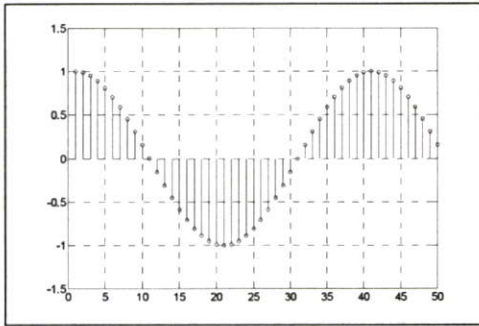
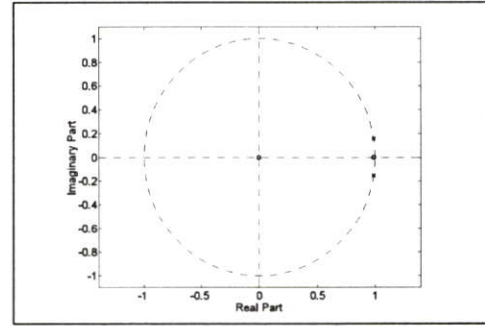
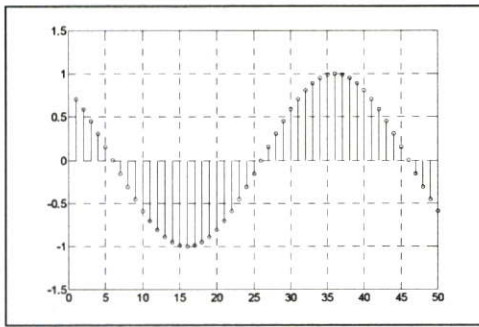
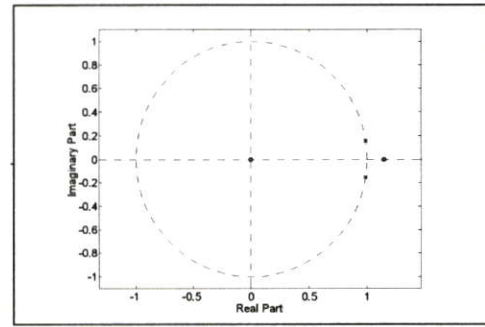
Fig. 1. Sequence of  $x_1(n) = \cos(\omega_0 n)$ Fig. 2. Pole-Zero Plot of  $H_1(z)$ Fig. 3. Sequence of  $x_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi)$ Fig. 4. Pole-Zero Plot of  $H_2(z)$ 

Fig. 2 shows that the discrete time system will have 2 zeros with one zero at the origin while the other zero will be on the real axis. If defining the sequence shown in Fig. 3 as  $x_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi)$ , z-transform of  $x_2(n)$  will be shown in Eq. (7) as follows

$$X_2(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (7)$$

Define the transfer function of discrete time system as shown in Eq. (7), users can be rewrite the equation to become Eq. (8) and the pole-zero position of the new system will be shown in Fig. 4. If define the input of discrete time system as  $\delta(n)$  on Eq. (8), the output response or impulse response  $h_2(n)$  will be shown in Eq. (9).

$$H_2(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (8)$$

$$h_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi) \quad (9)$$

Pole-zero plot in Fig. 2 and Fig. 4 show that the zero position changes in the real axis result in the phase shift of  $\cos(\omega_0 n)$ .

The implementation of sinusoidal signal generator system with phase shift will be started from rewriting transfer function of discrete time system in Eq. (5) into the direct form as shown in Fig. 5, and then changing the position of zeros on the real axis by constructing another first order discrete time system with transfer function according to Eq. (10) with the structure as shown in Fig. 6.

After cascading both discrete time systems, the new system will be shown in Fig. 7.

$$H(z) = \frac{\cos(\phi) - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}} \quad (10)$$

Fig. 7 has shown that after feeding input into the discrete system as impulse, the output response or impulse response of the system  $y_1(n)$  will be shown in Eq. (12).

Where  $x_1(n) = \delta(n)$

$$\frac{Y_1(z)}{X_1(z)} = \frac{1 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (11)$$

$$y_1(n) = h_1(n) = \cos(\omega_0 n) \quad (12)$$

and  $y_2(n)$  will be shown in Eq. (14).

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \left( \frac{1 + b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \right) \left( \frac{b_2 + b_3 z^{-1}}{1 + a_3 z^{-1}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \left( \frac{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \right) \left( \frac{\cos \phi - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - \cos(\omega_0)z^{-1}} \right)$$

$$\frac{Y_2(z)}{X_1(z)} = \frac{\cos \phi - \cos(\omega_0 - \phi)z^{-1}}{1 - 2\cos(\omega_0)z^{-1} + z^{-2}} \quad (14)$$

$$y_2(n) = h_2(n) = \cos(\omega_0 n + \phi)$$

### 3. Phase Error Estimation

The error of phase shifting is estimated by phase comparison of the standard cosine signal and the LUT [5] generated cosine signal and the cosine signal which

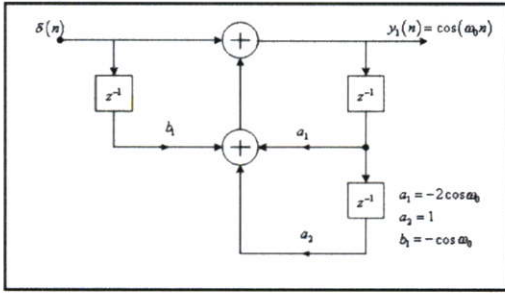


Fig. 5. Structure of Direct Form Digital Sine Oscillator

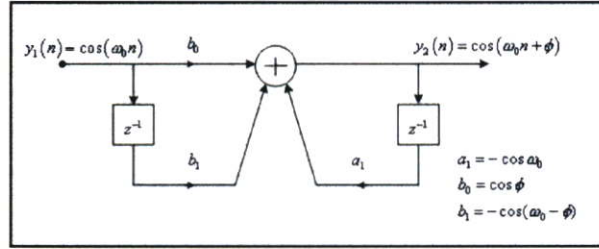


Fig. 6. First Order Discrete Time System

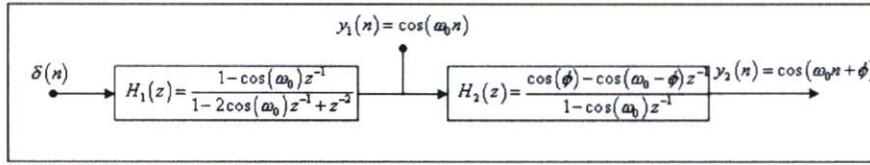


Fig. 7. Structure of Two-phase Digital Sine Oscillator

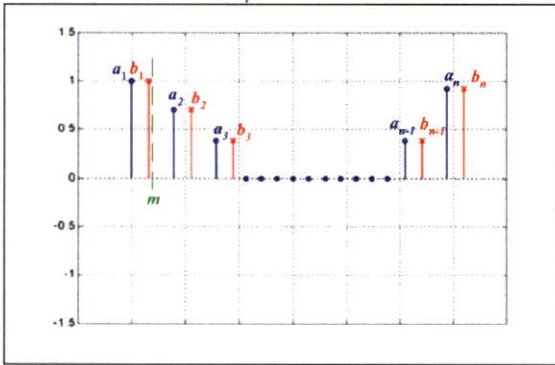


Fig. 8. Phase error estimation

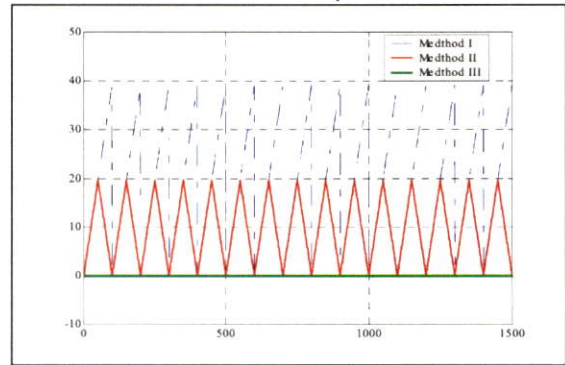


Fig. 9. Estimated error of three methods

generated by the presented method. The error estimations are divided in 3 ways.

**3.1 Method I: Compared with fixed phase on LUT**

In this error estimation, we compare between point  $a$  and point  $b$  as shown in Fig. 8. However, the phase shifting in this method is limited only in the pre-assigned phase values in the table. The estimated error are calculated by Eq.(15).

$$e_n = |a_n - b_n| \tag{15}$$

Which  $a$  is the phase value which pre-assigned in the table.

$b$  is the target point which we want to shift the phase to.

**3.2 Method II: Compared with selectable phase on LUT**

In this error detection method, we select the shifted phase value from the table with the closest criteria as

shown in Fig. 8. The estimated error will be shown in Eqs. (16) and (17).

$$e_n = \begin{cases} |a_n - b_n| & ; b_n < m \\ |a_{n+1} - b_n| & ; b_n > m \end{cases} \tag{16}$$

$$m = \frac{a_{n+1} - a_n}{2} \tag{17}$$

**3.3 Method III: Compared with proposed design**

To find the error value, we find out the amplitude of the desired signal by phase shifting which depended on the principle of Eq.(18).Then, we compare that amplitude with the phase shifted standard signal by Eq.(19) and estimated error will be shown in Eq. (20). The estimated error for three methods are shown in the Fig.9.

$$y_{ac}(n) = \cos(\omega_0 n + \phi_{ac}) \tag{18}$$

$$y(n) = \cos(\omega_0 n + \phi) \tag{19}$$

$$e_n = |y_{ac}(n) - y(n)| \tag{20}$$

#### 4. Design Examples

The design examples have specified the frequency at  $\omega_0 = 0.02\pi$ ,  $\phi = \pi$ ,  $\pi/3$  and  $2\pi/3$  in the proposed design by applying the factors into Eqs.(11) and (13) and difference equations shown in Eqs.(21)-(26).

The 1<sup>st</sup> Design will define  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = \pi$

$$y_1(n) = \delta(n) - \cos(0.02\pi)\delta(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_1(n-1) - y_1(n-1) \quad (21)$$

$$y_2(n) = \cos(\pi)y_1(n) - \cos(0.02\pi - \pi)y_1(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (22)$$

The 2<sup>nd</sup> Design defines  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = \pi/3$

$$y_1(n) = \delta(n) - \cos(0.02\pi)\delta(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_1(n-1) - y_1(n-1) \quad (23)$$

$$y_2(n) = \cos\left(\frac{\pi}{3}\right)y_1(n) - \cos\left(0.02\pi - \frac{\pi}{3}\right)y_1(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (24)$$

The 3<sup>rd</sup> Design will define  $\omega_0 = 0.02\pi$  and  $\phi = 2\pi/3$

$$y_1(n) = \delta(n) - \cos(0.02\pi)\delta(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_1(n-1) - y_1(n-1) \quad (25)$$

$$y_2(n) = \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right)y_1(n) - \cos\left(0.02\pi - \frac{2}{3}\pi\right)y_1(n-1) + 2\cos(0.02\pi)y_2(n-1) - y_2(n-2) \quad (26)$$

After that, rewrite expression Eqs. (21) to (26) into the simulation program in MATLAB.

#### 5. Results of Experiment

The results from MATLAB simulation for the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, and 3<sup>rd</sup> design will be shown on Fig. 10.

#### 6. Conclusion

The researchers have found that the new designs of sine wave generator according to the proposed principles will

give the output as sign wave with correct phase shift according to users demands. This digital sine wave generator with adjustable phase shift will have the applications on digital sign oscillators to measurement system [6-8], control power electronic instruments and machines such as motors, heaters.

#### Reference

- [1] J. G. Proakis, D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing Principle, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall, 1996.
- [2] K. Dejhan, S. Yimmun, A. Trirat and F. Cheevasuvit, "TMS320C31-based narrow-band noise rejection Kalman filter implementation," Proc. 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand, December 11-14, 2002.
- [3] Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, 1999.
- [4] Clay S. Turner, "Recursive Discrete-Time Sinusoidal Oscillators," IEEE Signal Processing Magazine, May, 2003.
- [5] Kun-Shan Lin, Editor, *Digital Signal Processing Applications with The TMS320 Family*, vol.1, Prentice Hall, 1987.
- [6] Selim S. Awad, N. Narasimhamurthi, William H. Ward, "Analysis, Design, and Implementation of an AC Bridge for Impedance Measurements," *IEEE Trans, Instrum. Meas.*, vol43, No. 6, Dec. 1994.
- [7] L. Callegaro, G. Galzerano and C. Svelto, "A multiphase direct-digital-synthesis sinewave generator for high-accuracy impedance comparison," *IEEE Trans, Instrum. Meas.*, vol50, pp.926-929, Aug. 2001.
- [8] L. Callegaro and V. D'Elia, "A Synchronized two-phase sinewave generator for AC metrology system compensations," *IEEE Trans, Instrum. Meas.*, vol49, pp. 320-324, Apr. 2000.

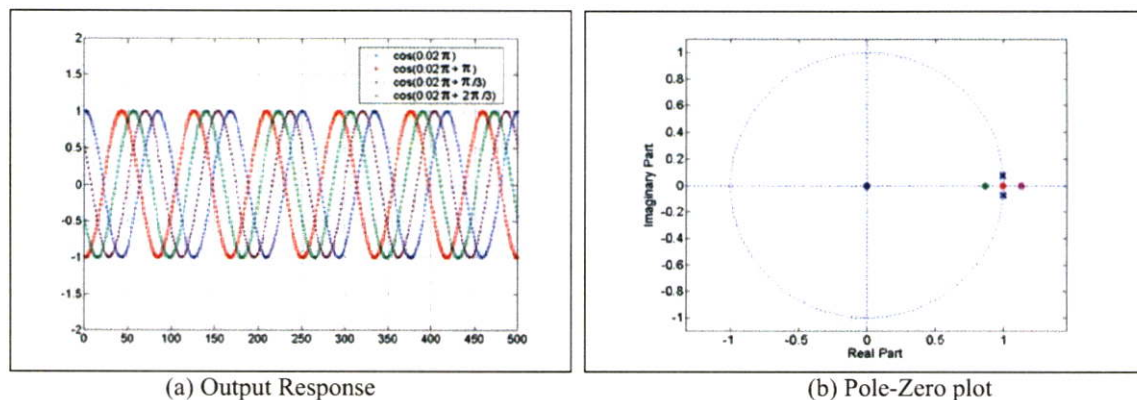


Fig. 10. Result of adjustable phase digital sinewave oscillator with  $\omega_0 = 0.02\pi$

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวสาวิตรี กลั่นเอี่ยม เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรม จากภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2545 และได้เข้ารับการศึกษาคือในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547

โดยปี พ.ศ. 2548 ได้เข้าทำงานตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ สังกัดภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ