# บทที่ 6
# วงจรเชื่อมต่อสำหรับการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดสัญญาณรูปไซน์และวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์

ระหว่างการดำเนินการวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนาวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูดผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาวงจรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่วงจรเชื่อมต่อ (Interface Circuit) สำหรับการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณรูปไซน์ เพื่อนำผลการตรวจวัดไปแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ และการพัฒนาวงจรดีมอดูเลเตอร์สำหรับสัญญาณรีโซลเวอร์ (Resolver Demodulator) ซึ่งถือว่าเป็นการนำหลักการของวงจรหาค่าแอมพลิจูดไปประยุกต์ใช้งาน

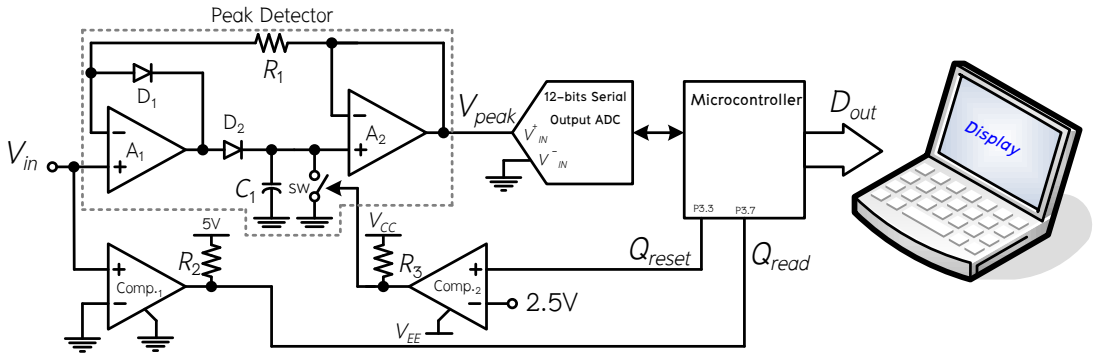
## 6.1 วงจรเชื่อมต่อสำหรับการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดสัญญาณรูปไซน์

### 6.1.1 หลักการทำงานของวงจร

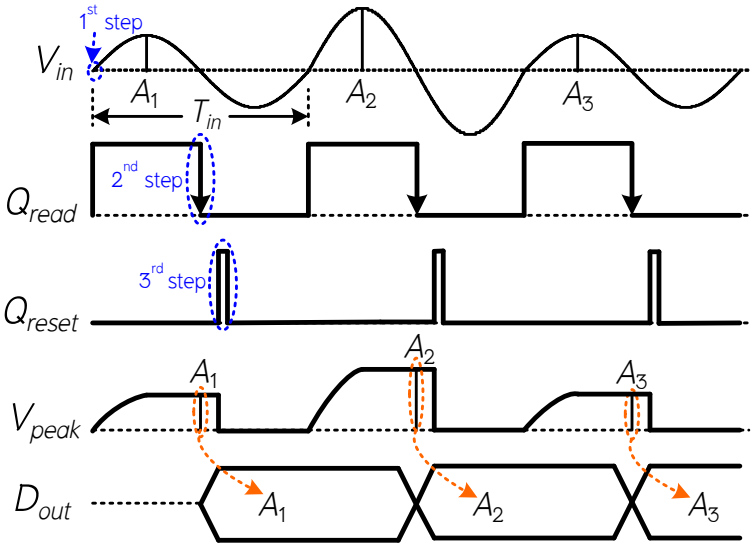
บล็อกไดอะแกรมของวงจรเชื่อมต่อสำหรับการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณรูปไซน์ ($V_{in}$) ที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้นดังแสดงในภาพ 6.1(ก) โครงสร้างของวงจรประกอบด้วย วงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณ (Peak Detector) ต่อร่วมกับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter; ADC) วงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า ($C_1$ และ $C_2$) และไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตรูปไซน์ $V_{in}$ จะถูกตรวจวัดและคงค่าให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟตรง ต่อจากนั้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยวงจร ADC ทั้งนี้จะเป็นการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับเป็นตัวควบคุมการทำงานและใช้สำหรับการส่งผ่านข้อมูลไปแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ต่อไป ภาพ 6.1(ข) แสดงแผนภาพเวลาของสัญญาณต่างๆ ที่สำคัญเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันอินพุตของวงจร โดยในที่นี้สมมุติให้แรงดันไฟฟ้าอินพุต $V_{in}$ ของวงจรคือ

$$V_{in} = A_1 \sin 2\pi f_{in} t = A_1 \sin(2\pi t / T_{in}) \qquad (6.1)$$

เมื่อ $A_1$, $f_{in}$ และ $T_{in}$ คือค่าแอมพลิจูด ค่าความถี่ และค่าคาบเวลาของสัญญาณอินพุตตามลำดับ




(ก) บล็อกไดอะแกรมของวงจร




(ข) แผนภาพเวลาสัญญาณของวงจร

ภาพ 6.1 วงจรเชื่อมต่อสำหรับการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณรูปไซน์

ในสภาวะเริ่มต้น ($t$=0) ถือว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณมีค่าเป็น $V_{peak}$ = 0 V และสัญญาณลอจิก $Q_{reset}$ = 0 การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ

ลำดับที่ 1: สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต $V_{in}$ เริ่มมีค่ามากกว่า 0 V ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณลอจิก $Q_{read}$ มีสถานะลอจิกเป็น 1 ต่อจากนั้นหลังจากช่วงเวลา $t = T_{in}/4$ เป็นต้นไปค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณ ($V_{peak}$) จะมีค่าเท่ากับ

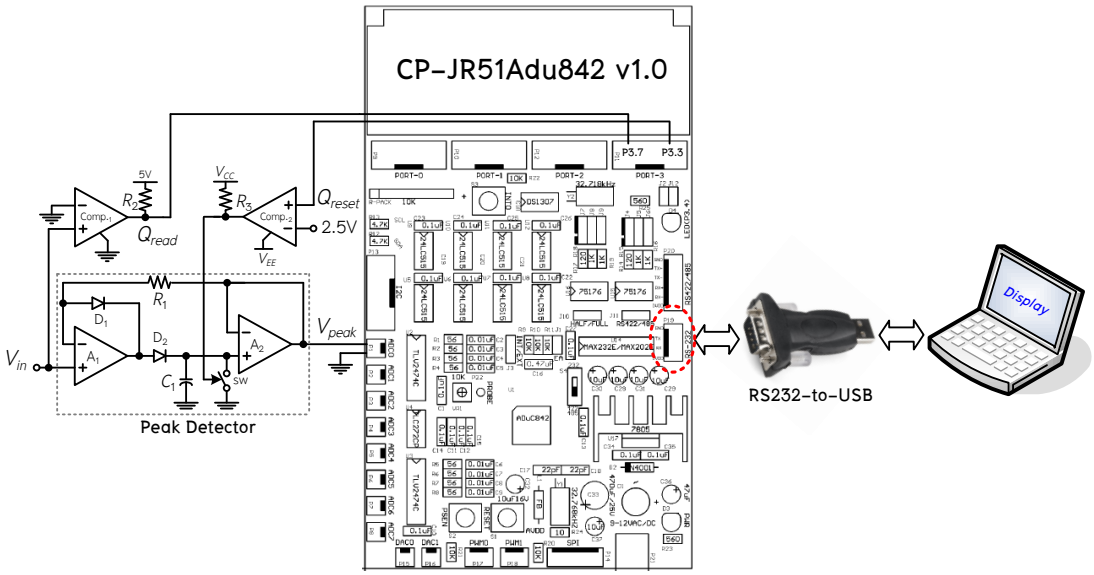
$$V_{peak} = A_1 \qquad (6.2)$$

ลำดับที่ 2: สัญญาณแรงดันไฟฟ้าอินพุต $V_{in}$ มีค่าลดลงต่ำกว่า 0 V ซึ่งจะมีผลทำให้สัญญาณลอจิก $Q_{read}$ เปลี่ยนสถานะจากลอจิก 1 เป็นลอจิก 0 ซึ่ง ณ จังหวะการเปลี่ยนสถานะ (ขอบขาลง) ของ $Q_{read}$ นี้จะไปกระตุ้นการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ต่อจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณควบคุมไปให้วงจร ADC เริ่มทำงาน ตัววงจร ADC จะทำการเปิดรับและแปลงสัญญาณ $V_{peak}$ ไปเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิตเพื่อส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งไปแสดงผลต่อไป

ลำดับที่ 3: เมื่อวงจร ADC ทำการแปลงสัญญาณเสร็จและไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับข้อมูลครบถ้วน ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณลอจิก $Q_{reset}$ = 1 ไปควบคุมให้วงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณทำการรีเซ็ตค่าแอมพลิจูดเดิมที่ตรวจวัดได้และคงค่าไว้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการตรวจวัดในรอบการทำงานใหม่ถัดไป

### 6.1.2 การทดสอบการทำงานของวงจร

การทดสอบหลักการทำงานของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณที่ออกแบบขึ้นในที่นี้ได้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น CP-JR51Adu842 v1.0 ซึ่งภายในบอร์ดดังกล่าวนี้ประกอบด้วย วงจร ADC ขนาด 12 บิต (รับสัญญาณแอนะล็อกอินพุตได้ 8 ช่อง) และช่องพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรมให้ใช้งาน โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ADuC842 เป็นตัวควบคุมการประมวลผล การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างไมโครคอนโทรลกับคอมพิวเตอร์กระทำผ่านตัวแปลงสัญญาณแบบ RS-232 เพื่อเข้าพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์โน๊ตบุค การพัฒนาโปรแกรมเพื่อแสดงผลการตรวจวัดกระทำโดยใช้โปรแกรมภาษา Visual Basic 6.0 สำหรับส่วนของวงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณได้ใช้ออปแอมป์รุ่น LM741 และรุ่น LF351 สำหรับใช้เป็น $A_1$ และ $A_2$ ตามลำดับ ไดโอดที่ใช้คือ 1N4148 สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ (sw) ที่ใช้คือรุ่น CD4066 วงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า (Comp.$_1$ และ Comp.$_2$) ที่ใช้คือออปแอมป์รุ่น LM311 เลือกใช้ $R_1$=$R_2$=$R_3$=1k$\Omega$ และตัวเก็บประจุ $C_1$ = 1 nF แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรเท่ากับ ±7 V ค่าแรงดันเต็มสเกลของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 5 V ซึ่งจะทำให้ได้ความละเอียดของสัญญาณเท่ากับ 1.22 mV

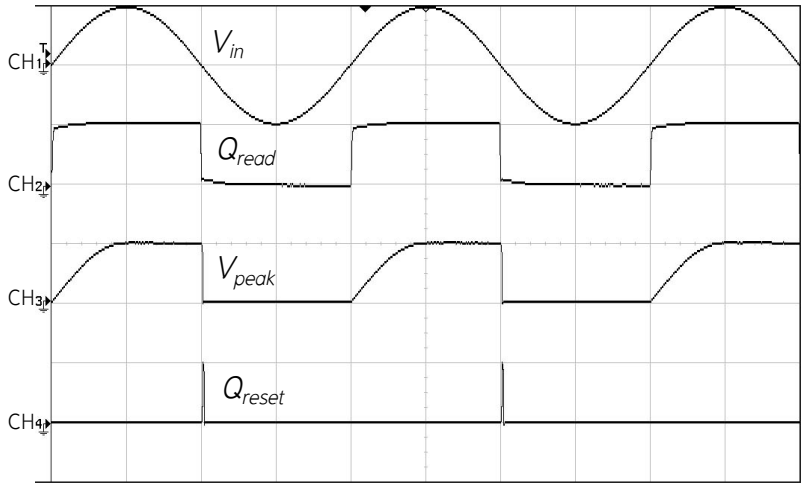



ภาพ 6.2 การต่อวงจรเชื่อมต่อสัญญาณโดยใช้บอร์ดรุ่น CP-JR51Adu842 v1.0

### 6.1.3 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรและการอภิปรายผล

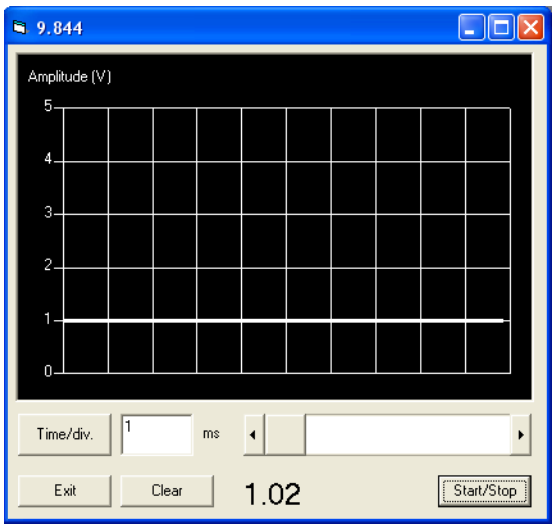
ภาพ 6.3 แสดงผลการทำงานของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณที่ได้พัฒนาขึ้น เมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตมีค่าคงเท่ากับ 1 V ความถี่ของสัญญาณอินพุตเท่ากับ 1 kHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้โดยใช้ออสซิลโลสโคป (ภาพ 6.3(ก)) มีรูปแบบที่ตรงกับแผนภาพสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ในภาพ 6.1(ข) และจากภาพหน้าต่างแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟตรงโดยมีขนาดคงที่ประมาณเท่ากับ 1 V ภาพ 6.4 แสดงค่าแอมพลิจูดที่ตรวจวัดได้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นผลจากการแปรค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต จาก 0 V ถึง 5 V ซึ่งพบว่าวงจรสามารถตรวจจับค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตได้ต่ำสุดประมาณ 150 mV และพบว่าการทำงานของวงจรมีค่าความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 1 % จากค่าเต็มสเกล (5V) สำหรับภาพ 6.5 และภาพ 6.6 แสดงผลการทำงานของวงจรเมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต ($V_{in}$) เปลี่ยนแปลงเป็นรูปสามเหลี่ยมและรูปไซน์ ตามลำดับ โดยที่สัญญาณอินพุตได้จากการมอดูเลตกันทางขนาดระหว่างสัญญาณรูปไซน์ ($V_{carrier}$) ความถี่ 1 kHz กับสัญญาณความถี่ต่ำ ($V_{datar}$) ความถี่ 0.5 Hz ผลจากการทำงานทั้งสองภาพจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ (แสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์) จะเป็นสัญญาณที่มีรูปร่างตรงกับค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ $V_{in}$ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการดีมอดูเลตสัญญาณ $V_{in}$

นอกจากนี้ผลจากการทดลองแปรค่าความถี่ของสัญญาณอินพุต (กำหนดแอมพลิจูดคงที่เท่ากับ 5 V) พบว่าค่าความถี่ใช้งานสูงสุดของสัญญาณอินพุตจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 23 kHz ซึ่งหนึ่งรอบของการตรวจวัดจะใช้เวลามากกว่า 1 คาบเวลาของสัญญาณอินพุต แต่สำหรับในกรณีที่ต้องการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตให้เสร็จสิ้นภายในเวลา 1 คาบเวลาของสัญญาณอินพุต ค่าความถี่สูงสุดของสัญญาณอินพุตจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.1 kHz



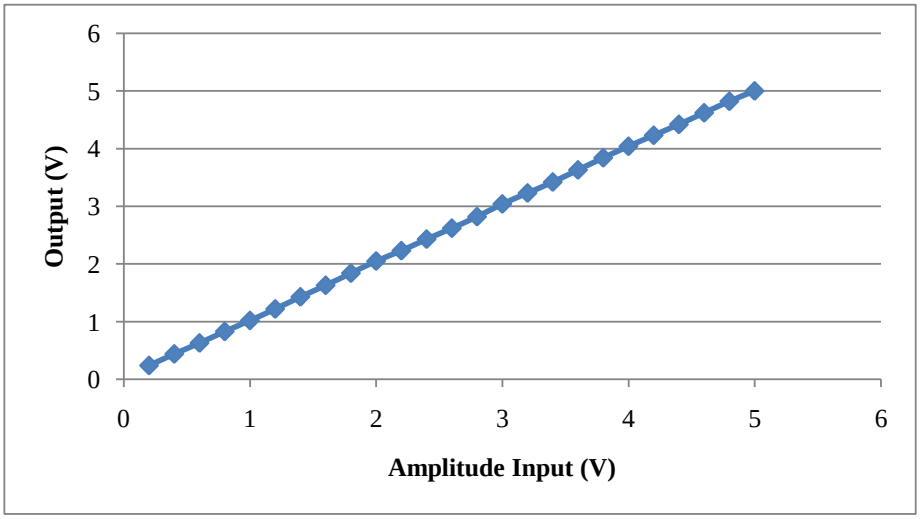

(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 1 V/div., 5 V/div., 1 V/div., และ 5 V/div. ตามลำดับ; สเกลแนวนอน 250 ms/div.)

(ก) สัญญาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้โดยออสซิลโลสโคป

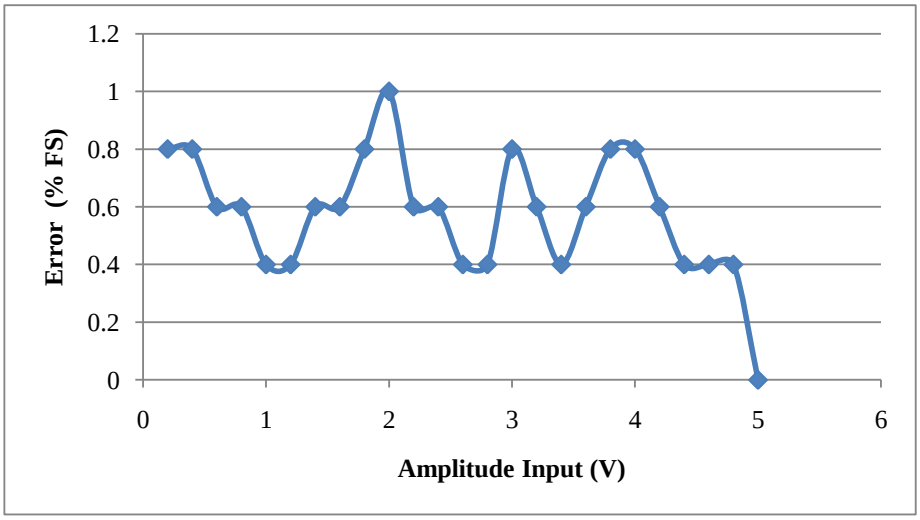



(ข) หน้าต่างแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

ภาพ 6.3 ผลการทำงานของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ เมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตมีค่าคงที่

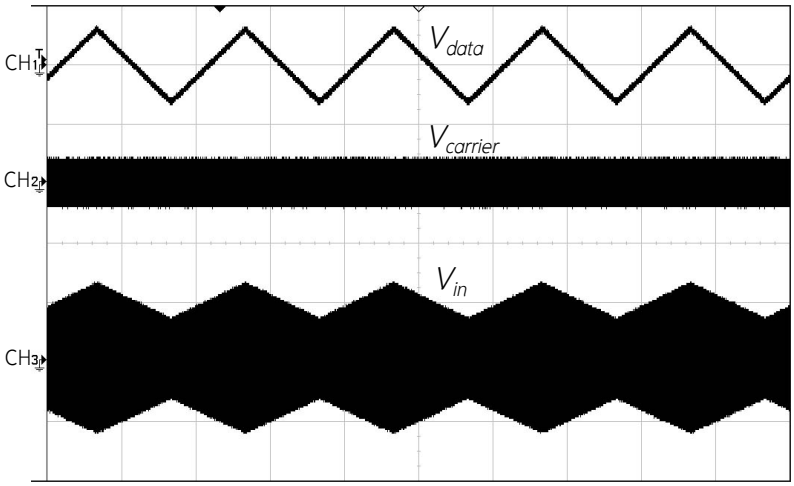



(ก) ค่าแอมพลิจูดที่ตรวจวัดได้



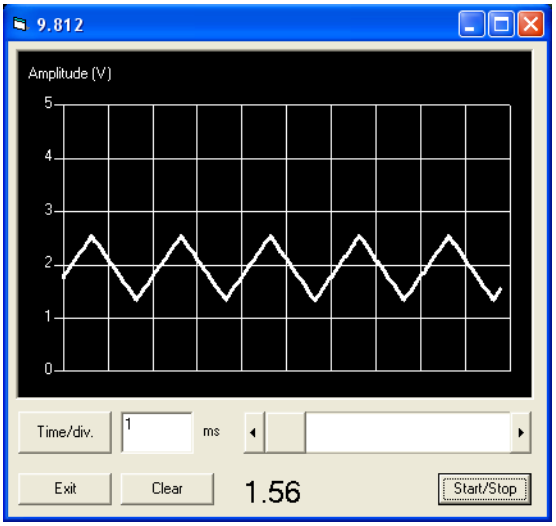

(ข) ค่าผิดพลาดในการทำงานของวงจร

ภาพ 6.4 ผลการแปรค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต



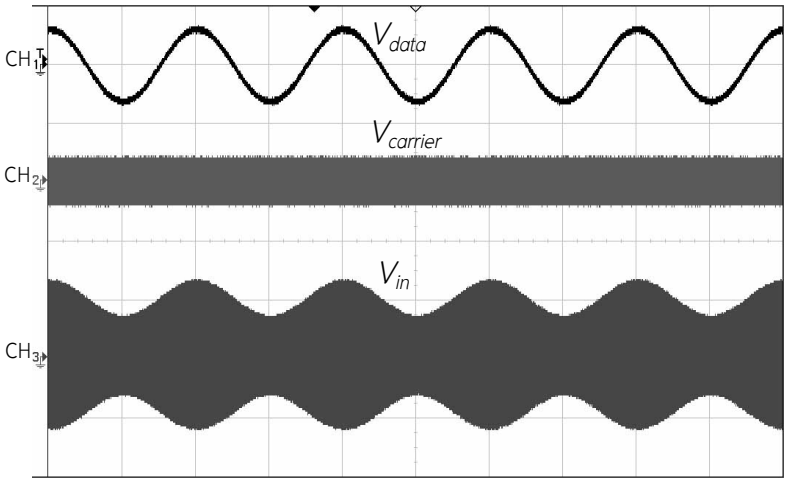

(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 5 V/div., 5 V/div., และ 2 V/div. ตามลำดับ; สเกลแนวนอน 1 s/div.)

(ก) สัญญาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้โดยออสซิลโลสโคป



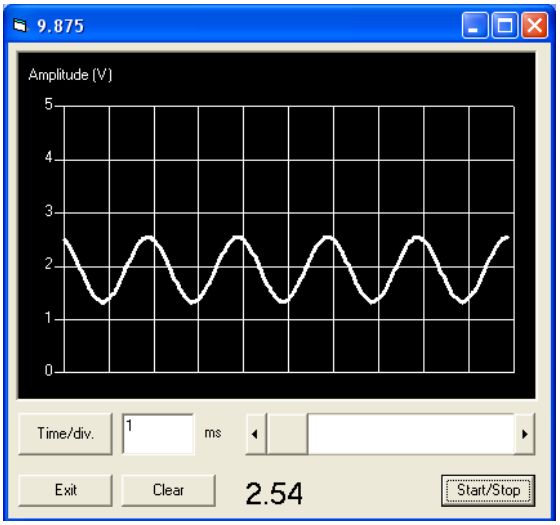

(ข) หน้าต่างแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

ภาพ 6.5 ผลการทำงานของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ เมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงเป็นรูปสามเหลี่ยม




(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 5 V/div., 5 V/div., และ 2 V/div. ตามลำดับ; สเกลแนวนอน 1 s/div.)

(ก) สัญญาณต่างๆ ที่ตรวจวัดได้โดยออสซิลโลสโคป




(ข) หน้าต่างแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

ภาพ 6.6 ผลการทำงานของวงจรเชื่อมต่อสัญญาณ เมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงเป็นรูปไซน์

## 6.2 วงจรดีมอดูเลเตอร์สำหรับสัญญาณรีโซลเวอร์

### 6.2.1 หลักการทำงานของรีโซลเวอร์

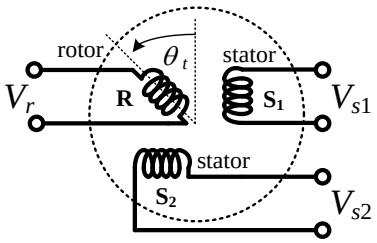
รีโซลเวอร์ (resolver) เป็นทรานสดิวเซอร์ (transducer) ที่ใช้สำหรับวัดค่าความเร็วและตำแหน่งมุมแกนหมุนของอุปกรณ์ที่มีแกนหมุน ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ และเพลาของเครื่องจักรกล เป็นต้น สมบัติการทำงานที่ดีของรีโซลเวอร์คือมีความน่าเชื่อถือสำหรับเกือบทุกสภาวะแวดล้อมการใช้งานเช่น ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าปกติ ในสถานที่ที่มีหมอกควันหรือฝุ่นละออง หรือแม้แต่ในสภาวะที่มีความสั่นสะเทือน รีโซลเวอร์มีความเหมาะสมสำหรับงานวัดตำแหน่งมุมหรือความเร็วรอบที่มีอัตราเร็วรอบต่ำ แต่มีความต้องการความถูกต้องแม่นยำในการทำงานสูง เช่น ในระบบแกนหมุนของเรดาร์ เสาอากาศ ดาวเทียม ในระบบแขนกล ในรถถัง และในปีกเครื่องบิน ปกติรูปร่างของรีโซลเวอร์จะดูคล้ายกับมอเตอร์ขนาดเล็กดังแสดงในภาพ 6.7(ก) ภายในรีโซลเวอร์มีขดลวดที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ ซึ่งจะให้ค่าอัตราการส่งผ่านสัญญาณความต่างศักย์ระหว่างขดลวดโรเตอร์ (rotor) และขดลวดสเตเตอร์ (stator) ผันแปรไปตามค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ โดยภาพ 6.7(ข) แสดงสัญลักษณ์วงจรภายในอย่างง่ายของรีโซลเวอร์ การประยุกต์ใช้งานสามารถทำได้โดยการต่อแกนหมุนของอุปกรณ์ที่ต้องการวัดมุมเข้ากับแกนหมุนของรีโซลเวอร์หรืออาจใช้กลไกเช่นเฟืองหรือสายพานเป็นตัวกลางขับเคลื่อน ส่วนใหญ่นิยมใช้ขดลวดโรเตอร์เป็นขดลวดปฐมภูมิโดยจะใช้สัญญาณรูปไซน์เป็นสัญญาณกระตุ้น ($V_r = V_{ex}$) ผลที่ได้คือตัวรีโซลเวอร์จะให้สัญญาณความต่างศักย์เอาต์พุตออกมาที่ขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งมีอยู่สองขดวางตั้งฉากกัน ซึ่งขดลวดแรกจะเป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ (sine) ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์คูณอยู่กับสัญญาณกระตุ้น ($V_{s1}$) ขดลวดสเตเตอร์ขดที่สองจะให้สัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ (cosine) ค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์คูณอยู่กับสัญญาณกระตุ้น ($V_{s2}$) โดยสามารถเขียนเป็นสมการเพื่อแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$V_r = V_{ex} = A_{ex} \sin(\omega_{ex} t) \tag{6.3}$$

$$V_{s1} = kV_{ex} \sin(\theta_t) = kA_{ex} \sin(\omega_{ex} t)\sin(\theta_t) \tag{6.4}$$

$$V_{s2} = kV_{ex} \cos(\theta_t) = kA_{ex} \sin(\omega_{ex} t)\cos(\theta_t) \tag{6.5}$$

เมื่อ $A_{ex}$ และ $\omega_{ex}$ คือค่าแอมพลิจูดและค่าอัตราเร็วเชิงมุมของสัญญาณกระตุ้น ( $V_{ex}$) ตามลำดับ โดย $\theta_t$ คือค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ และ $k$ คือค่าอัตราการส่งผ่านระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับขดลวดโรเตอร์




(ก) รูปร่างภายนอก (ข) สัญลักษณ์วงจรภายในอย่างง่าย

ภาพ 6.7 รีโซลเวอร์

จากสมบัติดังกล่าวนี้จะเห็นได้ว่าสัญญาณความต่างศักย์เอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์ไม่เป็นเชิงเส้นกับค่ามุมของแกนหมุน ดังนั้นการนำรีโซลเวอร์ไปประยุกต์ใช้งานจึงจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับอุปกรณ์หรือวงจรซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากรีโซลเวอร์ให้เป็นเชิงเส้นกับค่ามุมของแกนหมุน โดยอุปกรณ์หรือวงจรดังกล่าวนี้จะถูกเรียกว่าตัวแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์ (resolver converter) ที่ผ่านมานักวิจัยในต่างประเทศมีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาออกแบบตัวแปลงสัญญาณรีโซลเวอร์ซึ่งมีทั้งการนำเสนอผลงานการออกแบบผ่านทางวารสารวิชาการ และการจดสิทธิบัตรสำหรับการผลิตเป็นวงจรรวมหรือไอซีเพื่อประโยชน์ทางการค้า โดยในหลาย ๆ วิธีที่ได้มีการนำเสนอไว้จะใช้วงจรดีมอดูเลเตอร์ต่อไว้เป็นภาคแรกของระบบเพื่อกำจัดสัญญาณกระตุ้นออกไปก่อนที่จะดำเนินการในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไป สำหรับการออกแบบวงจรดีมอดูเลเตอร์ที่เคยนำมาใช้กัน เช่น การออกแบบโดยใช้วงจรคูณต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หรือวิธีการใช้วงจรเรียงกระแสต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยทั้งสองวิธีการดังกล่าวนี้ ถือได้ว่าเป็นวิธีการพื้นฐานที่ทราบกันโดยทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามวิธีการทั้งสองแบบนี้จะเกิดปัญหาด้านการเลื่อนเฟสของสัญญาณอันเนื่องมาจากการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วิธีการอื่นที่น่าสนใจเช่น การใช้วงจรเลื่อนเฟสคงที่ 90 องศาต่อร่วมกับวงจรโมโนสเตเบิล (monostable) สำหรับสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ

สำหรับภายในงานนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาออกแบบวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์ขึ้นใหม่ โดยได้นำหลักการของวงจรหาค่าแอมพลิจูดมาประยุกต์ใช้ ซึ่งจะเป็นทางเลือกสำหรับผู้ที่ต้องการนำไปใช้งานต่อไป ในส่วนของรายละเอียดการออกแบบและการทดสอบสมบัติการทำงานต่าง ๆ ของวงจรจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

### 6.2.2 หลักการของวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์

บล็อกไดอะแกรมของวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์ที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพ 6.8 โดยที่แผนภาพเวลาสัญญาณที่สำคัญของวงจรแสดงดังภาพ 6.9 ส่วนประกอบของวงจรประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier), วงจรหาค่าแอมพลิจูด (Amplitude Detector), วงจรขยาย ± 1 เท่า (± unity-gain amplifier) อย่างละสองวงจร ต่อร่วมกับส่วนของวงจรสร้างสัญญาณลอจิกควบคุม เมื่อ $V_{ex}$ คือสัญญาณความต่างศักย์ที่ใช้กระตุ้นหรือใช้เป็นอินพุต ($V_r$) ให้กับขดลวดโรเตอร์ โดยที่ $V_{s1}$ และ $V_{s2}$ คือสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากขดลวดสเตเตอร์ของรีโซลเวอร์ขดแรกและขดที่สอง ตามลำดับ

จากสมการที่ (6.4) และสมการที่ (6.5) จะเห็นได้ว่าสัญญาณ $V_{s1}$ และ $V_{s2}$ มีลักษณะเป็นการมอดูเลตสัญญาณเชิงขนาดกันระหว่างสัญญาณกระตุ้นกับฟังก์ชันไซน์และฟังก์ชันโคไซน์ของค่ามุมแกนหมุนของรีโซลเวอร์ตามลำดับ โดยในที่นี้ได้พิจารณาว่าพจน์ $kA_{ex}\sin(\theta_t)$ และพจน์ $kA_{ex}\cos(\theta_t)$ คือค่าแอมพลิจูดของฟังก์ชัน $\sin(\omega_{ex}t)$ ของแต่ละสมการ ซึ่งสัญญาณทั้งสองนั้นจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกรณีได้แก่ กรณีแรกคือการมีเฟสตรงกับสัญญาณ $V_{ex}$ (ขณะที่แต่ละฟังก์ชันดังกล่าวมีค่าเป็นบวก) และกรณีที่สองคือการมีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณ $V_{ex}$ (ขณะที่แต่ละฟังก์ชันดังกล่าวมีค่าเป็นลบ) ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันจังหวะการทำงานที่ผิดพลาดของวงจรหาค่าแอมพลิจูด ในที่นี้ได้ใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นสำหรับกลับเฟสของสัญญาณทั้งสองให้ได้เฉพาะค่าที่เป็นบวก ก่อนที่จะนำไปเป็นอินพุตให้กับวงจรหาค่าแอมพลิจูด ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทั้งสอง ($|V_{s1}|$ และ $|V_{s2}|$) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\left|V_{s1}\right| = kA_{ex}\left|\sin(\omega t)\sin(\theta_t)\right| \tag{6.6}$$

$$\left|V_{s2}\right| = kA_{ex}\left|\sin(\omega t)\cos(\theta_t)\right| \tag{6.7}$$

พิจารณาวงจรย่อยส่วนของวงจรหาค่าแอมพลิจูดทั้งสอง ซึ่งแต่ละส่วนใช้วงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณต่อร่วมกับวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณ โดยที่ส่วนของการสร้างสัญญาณลอจิกเพื่อควบคุมจังหวะการทำงานนั้นจะใช้ร่วมกัน ทั้งนี้เป็นการอาศัยเจเคฟลิปฟลอปสำหรับเป็นตัวหารความถี่ของสัญญาณ $\phi_{C1}$ (ได้จากการนำสัญญาณ $V_{ex}$ ไปผ่านวงจรตรวจจับผ่านศูนย์) ซึ่งจะนำไปสร้างสัญญาณ $\phi_1$ และ $\phi_2$ ต่อไป (ดังภาพ) แต่ละรอบการทำงานของวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูดในงานนี้จะใช้เวลาเท่ากับ 2 คาบของสัญญาณ $V_{ex}$ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการใช้งานรีโซลเวอร์โดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่าความถี่ของสัญญาณ $V_{ex}$ มีค่าสูงกว่าค่าอัตราเร็วรอบแกนหมุนของรีโซลเวอร์มาก ดังนั้นจึงถือได้ว่าสัญญาณเอาต์พุต ($V_{A1}$ และ $V_{A2}$) ที่ได้จากวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูดทั้งสอง มีค่าดังนี้ คือ

$$V_{A1} = \begin{cases} kA_{ex}\sin\theta_t & for \quad 0^\circ \le \theta_t < 180^\circ \\ -kA_{ex}\sin\theta_t & for \quad 180^\circ \le \theta_t < 360^\circ \end{cases} \tag{6.8}$$

$$V_{A2} = \begin{cases} kA_{ex}\cos\theta_t & for \quad 0^\circ \le \theta_t < 90^\circ \\ -kA_{ex}\cos\theta_t & for \quad 90^\circ \le \theta_t < 270^\circ \\ kA_{ex}\cos\theta_t & for \quad 270^\circ \le \theta_t < 360^\circ \end{cases} \tag{6.9}$$

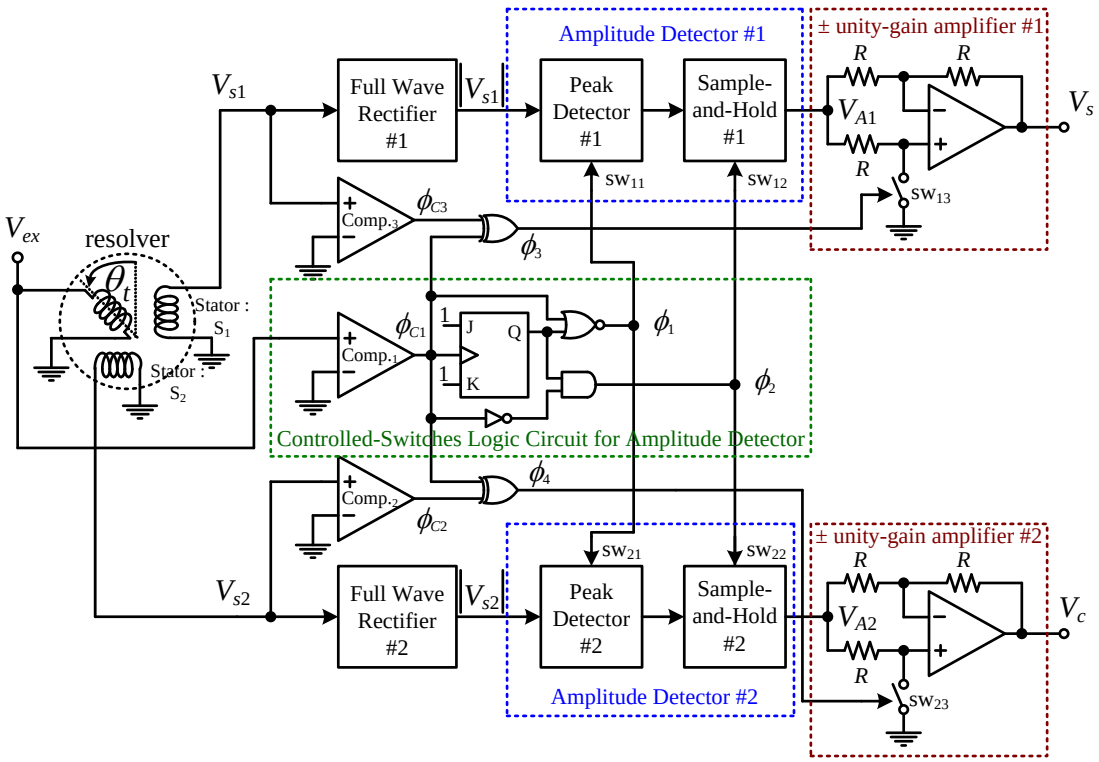
จากสมการที่ (6.8) ในช่วงมุม $180^\circ \le \theta_t < 360^\circ$ สัญญาณ $V_{A1}$ ที่ได้จะมีค่าตรงข้ามกับ $kA_{ex}\sin(\theta_t)$ และจากสมการที่ (6.9) ในช่วงมุม $90^\circ \le \theta_t < 270^\circ$ สัญญาณ $V_{A2}$ ที่ได้จะมีค่าตรงข้ามกับ $kA_{ex}\cos(\theta_t)$ ซึ่งภายในงานนี้ได้ใช้วงจร ± unity-gain amplifier สำหรับกลับค่าของสัญญาณทั้งสองในช่วงมุมดังกล่าว พิจารณาวงจร ± unity-gain amplifier #1 การทำงานของวงจรจะแบ่งออกได้เป็นสองกรณีคือกรณีที่สัญญาณ $V_{s1}$ และ $V_{ex}$ มีเฟสตรงกันดังภาพ 6.9(ก) โดยสัญญาณควบคุม $\phi_3$ จะมีสถานะตรรกะ 0 ซึ่งวงจรจะให้สัญญาณเอาต์พุต ($V_s$) มีค่าเป็น $(+)V_{A1}$ และกรณีที่สองสัญญาณ $V_{s1}$ และ $V_{ex}$ มีเฟสตรงข้ามกัน สัญญาณควบคุม $\phi_3$ จะมีสถานะตรรกะ 1 ซึ่งวงจรจะให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็น $(-)V_{A1}$ โดยทั้งสองกรณีสามารถนำมาเขียนเป็นสมการเพื่อแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$V_s = \begin{cases} (+)V_{A1} & ;\phi_3 = 0 \\ (-)V_{A1} & ;\phi_3 = 1 \end{cases} \quad = \quad kA_{ex}\sin(\theta_t) \tag{6.10}$$

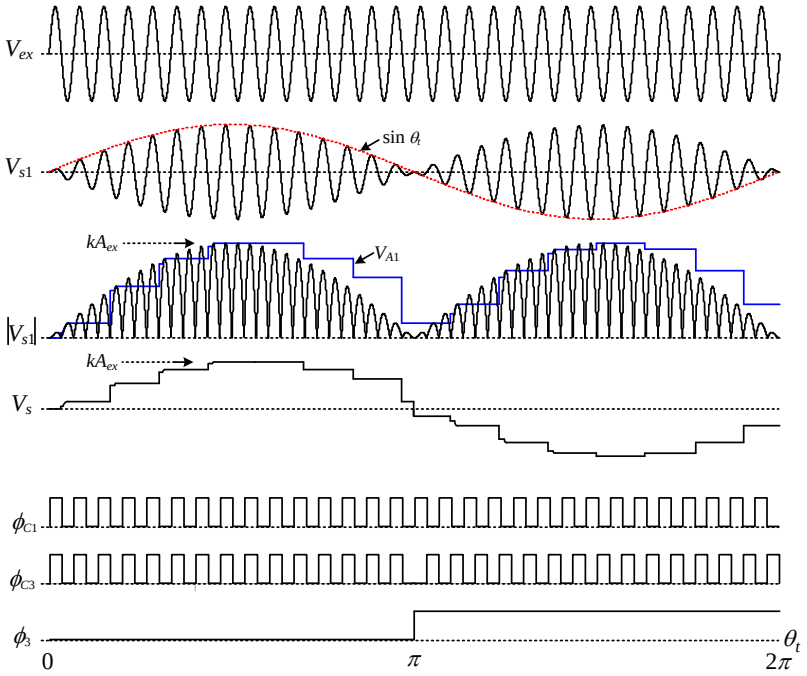
ในทำนองเดียวกัน จะสามารถเขียนสมการของสัญญาณ $V_c$ ซึ่งได้จากวงจร ± unity-gain amplifier #2 ได้เป็น

$$V_c = \begin{cases} (+)V_{A2} & ;\phi_4 = 0 \\ (-)V_{A2} & ;\phi_4 = 1 \end{cases} = kA_{ex}\cos(\theta_t) \qquad (6.11)$$

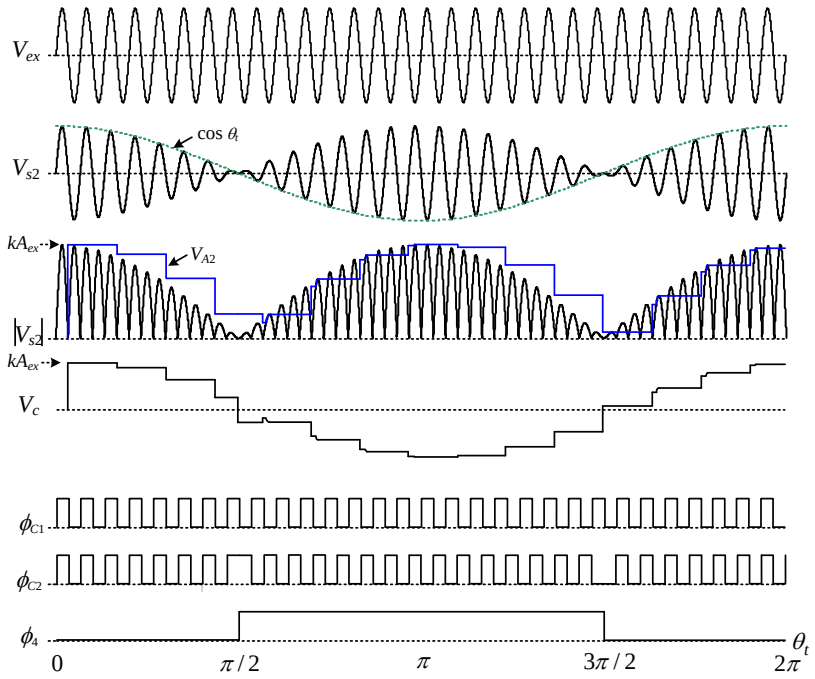
จากสมการที่ (6.10) และสมการที่ (6.11) สัญญาณเอาต์พุตทั้งสอง ($V_s$ และ $V_c$) ที่ได้จากวงจรในภาพ 6.8 คือค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ $V_{s1}$ และ $V_{s2}$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าวงจรดังกล่าวนี้ทำหน้าที่เป็นวงจรดีมอดูเลเตอร์สำหรับสัญญาณรีโซลเวอร์ (สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากขดลวดสเตเตอร์ทั้งสองของรีโซลเวอร์)




ภาพ 6.8 บล็อกไดอะแกรมของวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์




(ก) สำหรับ $V_{s1}$




(ข) สำหรับ $V_{s2}$

ภาพ 6.9 แผนภาพเวลาสัญญาณที่สำคัญของวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์

**6.2.3 การทดสอบการทำงานของวงจร**

จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรในภาพ 6.8 การทดสอบหลักการทำงานของวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์ที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้นในครั้งนี้ได้วงจรย่อยในแต่ละส่วนดังแสดงในภาพ 6.10 รีโซลเวอร์ที่นำมาใช้ทดสอบคือรุ่น Sanyo Denki, 101-4100 การจ่ายสัญญาณกระตุ้นให้กับขดลวดโรเตอร์ของรีโซลเวอร์ได้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) ในห้องปฏิบัติการคือรุ่น GWINSTEK SFG – 2104 โดยใช้สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปไซน์ความถี่ 3 kHz เป็นตัวกระตุ้น และใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีอัตราเร็วรอบเท่ากับ 7.5 รอบต่อนาทีเป็นตัวขับเคลื่อนแกนหมุนของรีโซลเวอร์ สำหรับวงจรย่อยที่ใช้ออปแอมป์ในการออกแบบจะใช้แรงดันไฟเลี้ยงวงจรมีค่าเท่ากับ ±12 V และแรงดันไฟเลี้ยง 5 V สำหรับวงจรสร้างสัญญาณลอจิกควบคุม ซึ่งวงจรย่อยในแต่ละส่วนได้แยกอธิบายรายละเอียดการใช้วัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

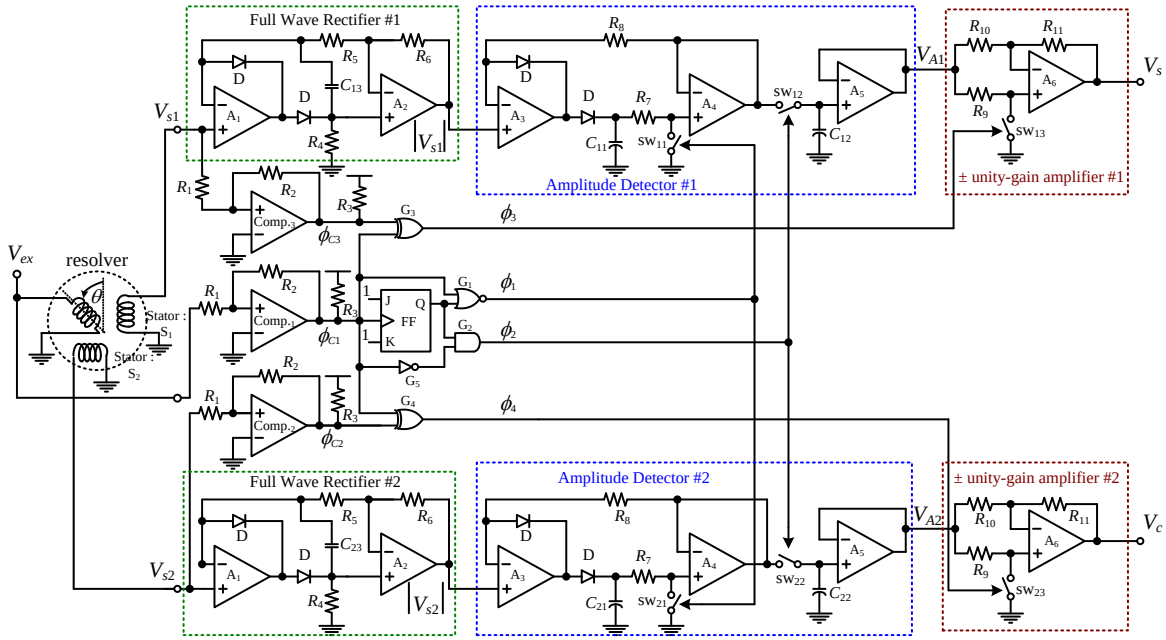
ส่วนของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทั้งสองได้ใช้ออปแอมป์ $A_1$ และ $A_2$ คือเบอร์ OP07 ต่อร่วมกับไดโอด (D) เบอร์ D1N4148 ตัวต้านทาน $R_4$ มีค่าเท่ากับ 100 kΩ และตัวต้านทาน $R_5$ ถึง $R_6$ มีค่าเท่ากับ 1 kΩ ตัวเก็บประจุ $C_{13}$ และ $C_{23}$ ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 100 pF

วงจรหาค่าแอมพลิจูดทั้งสองทั้งสองได้ใช้ออปแอมป์ $A_3$, $A_4$ และ $A_5$ คือเบอร์ OP07 ต่อร่วมกับไดโอดเบอร์ D1N4148 ตัวต้านทาน $R_7$ และ $R_8$ ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 1 kΩ และ 10 kΩ ตามลำดับ ในส่วนของตัวเก็บประจุ $C_{11}$=$C_{21}$ และ $C_{12}$=$C_{22}$ มีค่าเท่ากับ 10 nF และ 22 nF ตามลำดับ และสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ (sw) ทุกตัวที่ใช้คือเบอร์ MC14066BCP

วงจรขยาย ± 1 เท่า ออกแบบโดยใช้ออปแอมป์คือเบอร์ OP07 ต่อร่วมกับตัวต้านทาน $R_9$–$R_{11}$ ขนาด 1 kΩ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ MC14066BCP

ในส่วนของวงจรสร้างสัญญาณลอจิกควบคุม ออปแอมป์ที่ใช้สำหรับเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรตรวจจับผ่านศูนย์ Comp.$_1$– Comp.$_3$ คือเบอร์ LM319N ตัวต้านทาน $R_1$, $R_2$ และ $R_3$ มีค่าเท่ากับ 1 kΩ, 100 kΩ และ 1 kΩ ตามลำดับ เจเคฟลิปใช้เบอร์ HD74LS76AP ลอจิกเกต $G_1$, $G_2$, $G_3$, $G_4$, และ $G_5$ ที่ใช้คือเบอร์ SN74LS02N, SN74LS08N, SNJ5486J, SNJ5486J, และ HD74LS04P ตามลำดับ

ลำดับการทดสอบการทำงานของวงจรในเบื้องต้นได้ทำการตรวจสอบสมบัติการทำงานของวงจรย่อยในส่วนของวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูด โดยจะได้ตัวอย่างผลการทดสอบการทำงานดังแสดงในภาพ 6.11 ต่อจากนั้นได้ทำการตรวจสอบสมบัติการทำงานของวงจรทั้งหมดซึ่งจะได้ตัวอย่างผลการทดสอบการทำงานดังแสดงในภาพ 6.12 ถึงภาพ 6.15

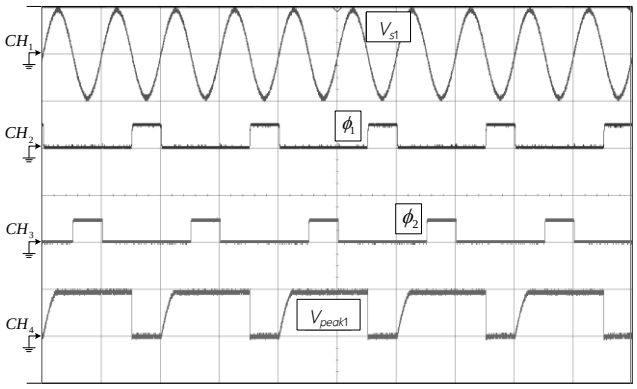



ภาพ 6.10 วงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์ที่พัฒนาขึ้น

### 6.2.4 ผลการทดสอบการทำงานของวงจรและการอภิปรายผล

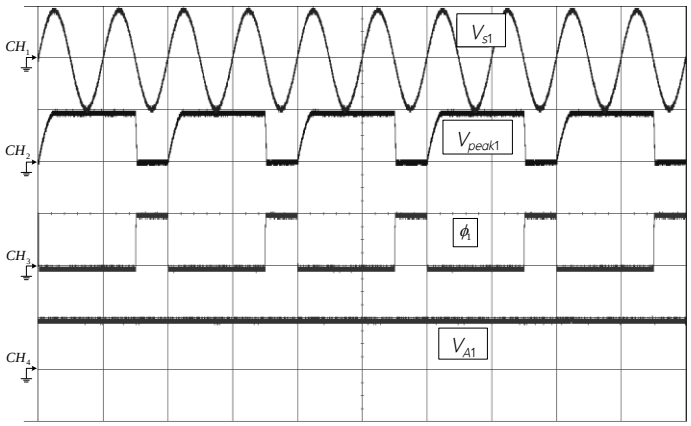
พิจารณาภาพ 6.11 ซึ่งแสดงตัวอย่างผลการทำงานของวงจรย่อยในส่วนของวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูดวงจรที่ 1 (Amplitude Detector #1) โดยที่กำหนดให้ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ $V_{s1}$ มีค่าคงที่เท่ากับ 1 V สำหรับสัญญาณ $V_{peak1}$ และ $V_{A1}$ คือสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรตรวจจับค่ายอดสัญญาณภายใน และเอาต์พุตของวงจรสุ่มและคงค่าสัญญาณที่จ่ายออกมาภายนอก ตามลำดับ ผลจากการทำงานจะเห็นได้ว่า 1 รอบของการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตจะใช้เวลาเท่ากับ 2 คาบของสัญญาณอินพุต (เท่ากับ 2 คาบของสัญญาณ $V_{ex}$) วงจรสามารถทำงานได้เป็นไปตามจังหวะการทำงานที่ได้ออกแบบไว้ และสัญญาณ $V_{A1}$ ที่ได้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีการกระเพื่อมต่ำในกรณีที่แอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตมีค่าคงที่

ภาพ 6.12 แสดงค่าความผิดพลาดในการทำงานของวงจร ซึ่งได้ทำการแปรค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต $V_{s1}$ และ $V_{s2}$ อย่างช้า ๆ ด้วยการใช้มือหมุนแกนหมุนของรีโซลเวอร์ ทำการวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุตทั้งสองเปรียบเทียบกับค่าแรงดันเอาต์พุต $V_s$ และ $V_c$ ของวงจร จากผลการทดสอบการทำงานแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองจะมีขนาดสูงสุดประมาณเท่ากับ 60 mV




(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 5 V/div., 10 V/div., 10 V/div., และ 5 V/div. ตามลำดับ; สเกลแนวนอน 1 ms/div.)

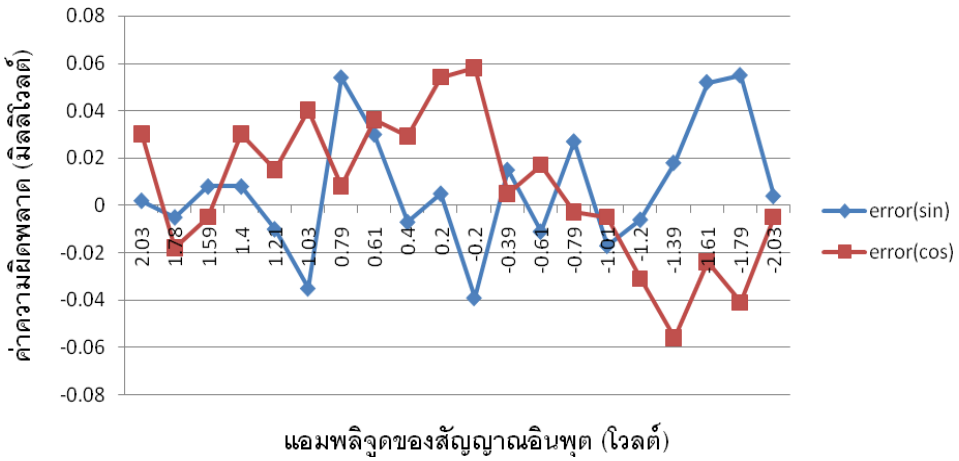
(ก) สัญญาณ $V_{s1}$ เปรียบเทียบกับ สัญญาณ $\phi_1$, $\phi_2$, และ $V_{peak1}$



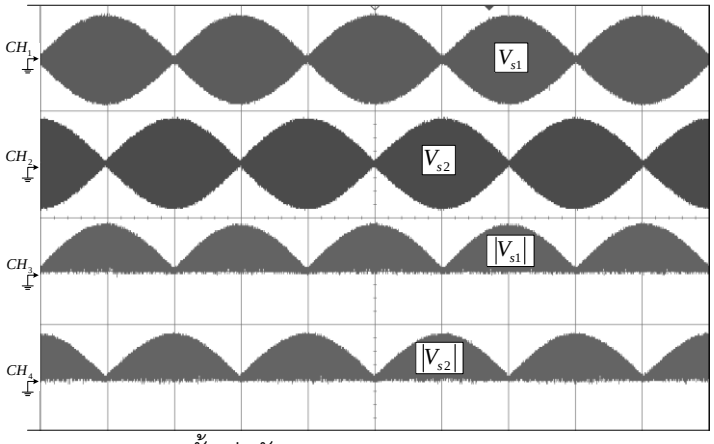

(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 5 V/div.; สเกลแนวนอน 1 ms/div.)

(ข) สัญญาณ $V_{s1}$ เปรียบเทียบกับ สัญญาณ $V_{peak1}$, $\phi_1$, และ $V_{A1}$

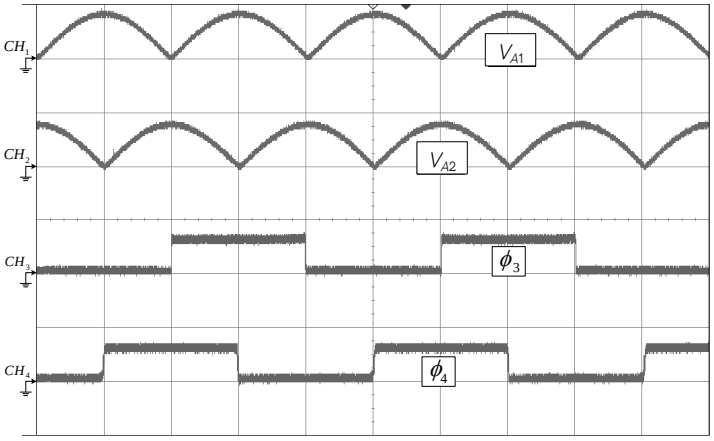
ภาพ 6.11 ผลการทำงานของวงจรดีมอดูเลเตอร์ เฉพาะวงจรย่อยส่วนตรวจวัดค่าแอมพลิจูด



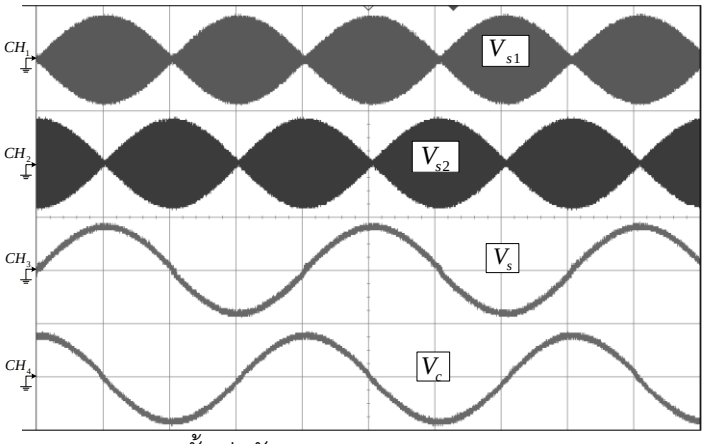

ภาพ 6.12 ผลการแปรค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินพุต




(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 2 V/div.; สเกลแนวนอน 2 s/div.)

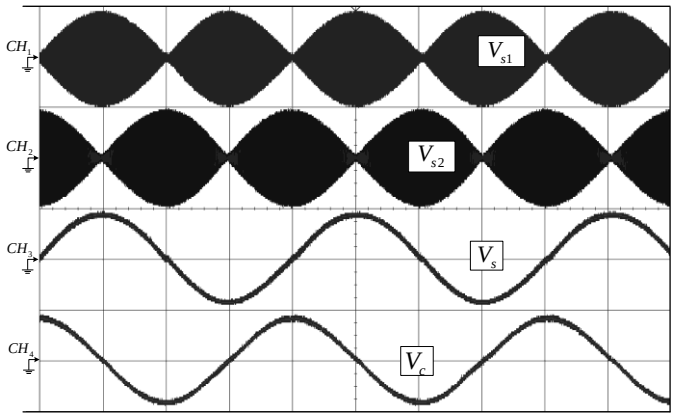



(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 2 V/div., 2 V/div., 10 V/div., และ 10 V/div. ตามลำดับ; สเกลแนวนอน 2 s/div.)



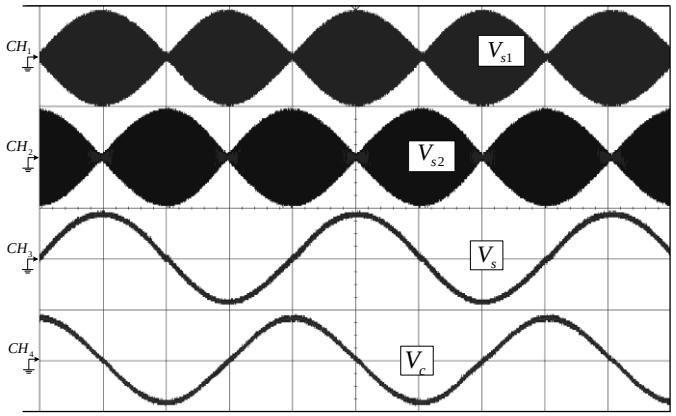

(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 2 V/div.; สเกลแนวนอน 2 s/div.)

ภาพ 6.13 ผลการทำงานของวงจรดีมอดูเลเตอร์ เมื่ออัตราเร็วแกนหมุนเท่ากับ 7.5 รอบ/นาที




(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 2 V/div.; สเกลแนวนอน 2 s/div.)

ภาพ 6.14 ผลการทำงานของวงจรดีมอดูเลเตอร์ เมื่ออัตราเร็วแกนหมุนเท่ากับ 5 รอบ/นาที




(สเกลแนวตั้งเท่ากับ 2 V/div.; สเกลแนวนอน 5 s/div.)

ภาพ 6.15 ผลการทำงานของวงจรดีมอดูเลเตอร์ เมื่ออัตราเร็วแกนหมุนเท่ากับ 3 รอบ/นาที

ตารางที่ 6.1 ผลการวัดค่า THD

| อัตราเร็วรอบของมอเตอร์ (รอบต่อนาที) | ความถี่ของสัญญาณรีโซลเวอร์ (Hz) | THD ของสัญญาณ $V_s$ (%) | THD ของสัญญาณ $V_c$ (%) |
|---|---|---|---|
| 3 | 0.050 | 7.14 | 8.33 |
| 5 | 0.083 | 8.46 | 8.68 |
| 7.5 | 0.125 | 9.78 | 9.97 |

ภาพ 6.13 ถึง ภาพ 6.15 แสดงสัญญาณที่สำคัญของวงจรดีมอดูเลเตอร์ เมื่ออัตราเร็วแกนหมุนของรีโซลเวอร์เท่ากับ 7.5 รอบ/นาที 5 รอบ/นาที และ 3 รอบ/นาที ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรย่อยในแต่ละส่วนมีรูปแบบและจังหวะการทำงานตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าวงจรที่ได้พัฒนาออกแบบขึ้นนี้สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรดีมอดูเลเตอร์สัญญาณรีโซลเวอร์ได้จริง สำหรับตารางที่ 6.1 แสดงผลการตรวจวัดค่า THD ของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสอง โดยจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราเร็วรอบแกนหมุนของรีโซลเวอร์มีค่ามากขึ้นก็จะวัดค่า THD ได้มากขึ้น

## 6.3 สรุป

ภายในบทนี้อธิบายถึงการพัฒนาวงจรที่เกี่ยวข้องกับวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูดที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาออกแบบขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัยหลัก ซึ่งได้แก่วงจรเชื่อมต่อสำหรับการตรวจวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณรูปไซน์ เพื่อนำผลการตรวจวัดไปแสดงผลที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ และการพัฒนาวงจรดีมอดูเลเตอร์สำหรับสัญญาณรีโซลเวอร์ ผลจากการทดสอบการทำงานของวงจรทั้งสองยืนยันได้ว่าวงจรทั้งสองสามารถทำงานได้เป็นไปตามหลักการที่ได้ออกแบบและได้อธิบายไว้ โดยที่วงจรเชื่อมต่อสัญญาณนั้นสามารถใช้งานกับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปไซน์ที่มีความถี่สูงสุดประมาณเท่ากับ 23 kHz ช่วงปฏิบัติการทางขนาดคือ 175 mV – 5 V สำหรับการพัฒนาวงจรดีมอดูเลเตอร์สำหรับสัญญาณรีโซลเวอร์นั้นถือว่าเป็นการนำหลักการของวงจรหาค่าแอมพลิจูดไปประยุกต์ใช้งาน และเนื่องจากรีโซลเวอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สัญญาณกระตุ้นการทำงานไม่สูง (โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 1 kHz–15 kHz) โดยรีโซลเวอร์รุ่นที่นำมาทดสอบการทำงานของวงจรคือรุ่น Sanyo Denki, 101–4100 ซึ่งใช้ความถี่ของสัญญาณกระตุ้นเท่ากับ 3 kHz ดังนั้นการทำงานของวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูดซึ่งเป็นวงจรย่อยภายในวงจรดีมอดูเลเตอร์จึงสามารถทำงานได้ทัน (ค่าผิดพลาดสูงสุดที่ตรวจวัดได้ประมาณเท่ากับ 60 mV) อย่างไรก็ตามวงจรตรวจวัดค่าแอมพลิจูดที่ใช้ในครั้งนี้เป็นแบบที่ใช้เวลาถึง 2 คาบของสัญญาณแรงดันกระตุ้นต่อ 1 รอบการทำงาน ซึ่งเป็นส่วนที่ควรจะปรับปรุงต่อไปในอนาคต