บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงหลักการและการออกแบบทีละขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 จะกล่าวถึงการคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM และขั้นตอนวิธีในการใช้งานไทเมอร์ TIM1 และไทเมอร์ TIM2 หัวข้อที่ 3.3 จะกล่าวถึงการจำลองการทำงานของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่นำเสนอด้วย Simulink ของโปรแกรม MATLAB ส่วนขั้นตอนวิธีในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอและอัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์จะอธิบายในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 รายละเอียดของแต่ละหัวข้อย่อยมีดังนี้

3.1 การคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำไทเมอร์ TIM1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล ARM Cortex M3 Core เบอร์ LPC1768 ขนาด 32 บิตมาใช้งานเพื่อสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ที่ซึ่งสัญญาณ PWM ดังกล่าวจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรเปิด/ปิดพัลส์และขดลวดที่ใช้ในการทดสอบ อีกทั้งยังถูกกำหนดให้มีค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่มีค่าต่างๆ กัน เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองต่อสัญญาณ PWM ที่ค่าความกว้างของพัลส์แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ ยังทำให้ทราบได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีกราฟผลตอบสนองเชิงเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเป็นอย่างไร

ในที่นี้ ค่าความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่ถูกสร้างขึ้นนั้นมีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 1 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 ไปจนถึง 100 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 โดยมีสมการที่ใช้ในการหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM จากการใช้ ARM Cortex M3 Core เบอร์ LPC1768 และใช้ Prescaler (ตัวหารหรือลดทอนความถี่สัญญาณนาฬิกา) มีค่าเท่ากับ 65,535 ดังนี้

$$f_{PULSE} = 100\,MHz/(64 * 65{,}535) = 23.842\ Hz$$

หรือ $$T_{PULSE} = 1/23.842\ Hz = 419.42 * 10^{-4}\ s \qquad (3.1)$$

ในที่นี้ จะแบ่งสเกลออกเป็น 65,535 ส่วน (เนื่องจากใช้ไทเมอร์ TIM1 ที่มีขนาด 16 บิต) ดังนั้นจะหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ไทเมอร์ TIM1 นับได้ โดยความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM พื้นฐานที่มีค่าเท่ากับ 1 หน่วยไทเมอร์ TIM1 นั้น หาค่าได้ดังนี้

$$T_{Unit_PULSE} = 1/65{,}535 * 419.42 * 10^{-4} = 363.81\,\mu s \qquad (3.2)$$

โดยในที่นี้ จะขอแสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ PWM จำนวน 2 ค่า ได้แก่ ขนาด 5 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 และขนาด 100 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 ที่ใช้งานจริงในทางปฏิบัติเท่านั้น ดังนี้

$$W_{5_PWM} = 5/(65{,}535 * 419.42 * 10^{-4}) = 1.82\ ms \qquad (3.3)$$

$$W_{100_PWM} = 100/(65{,}535 * 419.42 * 10^{-4}) = 36.381\ ms \qquad (3.4)$$

ส่วนไทเมอร์ TIM2 ที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มลดลงจนเป็นศูนย์หรือทำการนับจำนวนคล็อคของพัลส์ที่รับได้นั้น จะนำจำนวนคล็อคที่รับได้คูณด้วย 10 ns (ไม่มี Prescaler) ดังแสดงในสมการดังนี้

$$\begin{aligned} T_{Current_Drop} &= No.\ of\ CLKs * (1/100\ MHz) \\ &= No.\ of\ CLKs * 10\ ns \end{aligned} \qquad (3.5)$$

3.2 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานไทเมอร์ TIM1 และไทเมอร์ TIM2

การใช้งานไทเมอร์ TIM1 ในโหมด Fast PWM โดยกำหนดค่า Prescaler มีค่าเท่ากับ 65,535 เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ PWM ให้แก่ขดลวดในงานวิจัยฉบับนี้ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เซต TIMz_CCMR1 ให้มีค่าเพื่อให้ทำงานในการสร้างสัญญาณ PWM โหมด 1 โดยไทเมอร์ TIM1 จะนับขึ้นจาก 0 ถึง 65,535 โดยทำให้พัลส์ On ตอนสตาร์ท แล้วเป็น Off เมื่อไทเมอร์ TIM1 เปรียบเทียบตรงกับค่าในรีจิสเตอร์ TIMx_CCR1 ซึ่งทำให้สามารถปรับความกว้างพัลส์ได้อิสระเพื่อเก็บค่ามาวิเคราะห์ผล

2. การปรับความกว้างพัลส์ช่วง On ด้วยการกำหนดค่าไปที่ รีจิสเตอร์ TIMx_CCR1

3. เปิดการทำงานหน่วยเปรียบเทียบค่าไทเมอร์ TIM1 กับค่าความกว้างพัลส์ช่วง On เมื่อไทเมอร์ TIM1 นับค่าขึ้นจนถึงค่าที่กำหนดใน TIMx_CCR1 จะเกิด Interrupt ซึ่งในส่วนของโปรแกรม เมื่อเกิด Interrupt จะส่งต่อการทำงานให้ไทเมอร์ TIM2 เริ่มจับเวลาที่ค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดจะลดลงจนเป็นศูนย์

4. เริ่มการทำงานและทำการพรีสเกลไทเมอร์ TIM1 ด้วยค่าตัวเลข 65,535

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไทเมอร์ TIM2 มีหน้าที่จับเวลาโดยนับค่าขึ้นไปเรื่อยๆ ทันทีที่กระแส ไฟฟ้าในขดลวดเริ่มมีค่าลดลง และไทเมอร์ TIM1 จะถูก Off จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าในขดลวดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งจากการทดลอง พบว่า หากต่ออุปกรณ์ครบวงจรตามที่ออกแบบไทเมอร์ TIM2 จะไม่นับจนถึงค่า 65,535 โดยเหตุการณ์ที่จะสั่งให้ไทเมอร์ TIM2 หยุดนับ จะเกิดขึ้นจาก External Interrupt ที่เข้ามาทางขา EINT0

ส่วนขั้นตอนการทำงานของไทเมอร์ TIM2 มีดังนี้

1. กำหนดให้ไทเมอร์ TIM2นับขึ้นแบบไม่ใช้ค่าพรีสเกล โดยการเซต TIMz_CCMR2

2. เมื่อไทเมอร์ TIM1 ทำการเปรียบเทียบค่าของ TIMx_CNT ตรงกับค่าใน TIMx_CCR1 จะเกิดการ Interrupt โดยในฟังก์ชัน Interrupt จะสั่งให้ไทเมอร์ TIM2 เริ่มนับ ซึ่งในขณะนั้นกระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มมีค่าลดลงจากค่าสูงสุด

3. ไทเมอร์ TIM2 จะทำการนับขึ้นในรูปแบบปกติและรอจนกว่าจะมี Interrupt เข้ามาทางขา EINT0 ไทเมอร์ TIM2 ก็จะหยุดนับด้วยการรีเซต TIMz_CCMR2

4. หลังจากนั้น จะทำการอ่านค่าที่ได้จากการนับของไทเมอร์ TIM2 ไปเก็บไว้ในฐานข้อมูล แล้วโปรแกรมจะเซตค่าความกว้างพัลส์ On ในไทเมอร์ TIM1 เพื่อเปลี่ยนค่าความกว้างพัลส์ที่ใช้ในการตรวจสอบวัตถุโลหะ แล้วให้ไทเมอร์ TIM1 เริ่มทำงานวนรอบใหม่อีกครั้ง

3.3 การจำลองการทำงานของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่นำเสนอ

ก่อนที่จะสร้างวงจรเปิด/ปิดพัลส์ขึ้นมาใช้งานตรงตามวัตถุประสงค์ของเครื่องตรวจจับโลหะที่นำเสนอนั้น เราจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองการทำงานของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่นำเสนอเสียก่อน เพื่อดูผลตอบสนองเชิงความถี่และระยะเวลาในการตอบสนองของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่ได้รับจากการใช้งานตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน

ในการทดลองนั้น ผู้วิจัยจะนำตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ที่มีขายตามท้องตลาดและมีค่าความเหนี่ยวนำที่แตกต่างกันมาทดสอบ โดยมีค่าแตกต่างกัน 5 ค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความเหนี่ยวนำที่แตกต่างกันที่นำมาใช้ในการทดสอบวงจรตรวจจับโลหะที่นำเสนอ

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่นำทดสอบ (μH)
110
220
330
470
680

โดยในการจำลองวงจรเปิด/ปิดพัลส์ด้วยโปรแกรม MATLAB นั้นจะเริ่มต้นจำลองการทำงานตามวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่เคยนำเสนอเอาไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ของสุทัศน์ แขกระจ่าง (2553) [1] ที่ซึ่งเป็นวงจรปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดเพียง 1 ขดเท่านั้นที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ PWM ออกไปและรับ Eddy Current ที่ส่งกลับมาจากโลหะนั้น หลังจากนั้นจะทำการจำลองวงจรปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดจำนวน 2 ขดที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ PWM ออกไปและรับ Eddy Current ที่ส่งกลับมาจากโลหะนั้น เพื่อที่จะสังเกตุผลการทดสอบที่ได้รับ

โดยในที่นี้ วงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดเพียง 1 ขดนั้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6 หน้า 34 ซึ่งเป็นวงจรที่ถูกนำเสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ของสุทัศน์ แขกระจ่าง (2553) [1] ส่วนวงจรปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดจำนวน 2 ขดที่นำเสนอใหม่ในงานวิจัยฉบับนี้จะมีแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

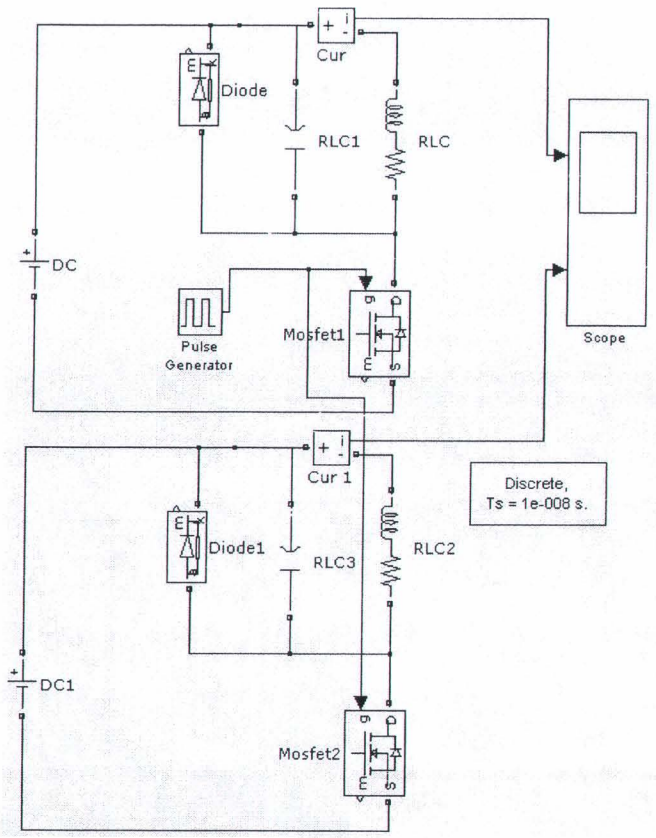
จากการออกแบบและพัฒนาวงจรเปิด/ปิดพัลส์ด้วยโปรแกรม MATLAB พบว่า

1. วงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดจำนวน 2 ขดที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณ PWM ออกไปและรับ Eddy Current ที่ส่งกลับมาจากโลหะนั้น จะให้ผลตอบสนองที่ละเอียดและมีระยะเวลาในการตอบสนองที่เร็วกว่าวงจรปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดเพียง 1 ขดเท่านั้น ซึ่งผลที่ได้รับประเด็นนี้จะนำไปสู่การตรวจจับโลหะที่ได้ระยะทางที่ไกลมากยิ่งขึ้น

2. วงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดจำนวน 2 ขดนั้น จากการจำลองระบบ เมื่อกำหนดให้ค่าความเหนี่ยวนำ (μH) ของขดลวดด้านส่งมีค่าคงที่ ณ ค่าที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 330 μH และเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ (μH) ของขดลวดด้านรับให้มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ พบว่า ยิ่งค่าค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านรับมีค่าสูงขึ้นเท่าใด ระยะทางในการตรวจจับโลหะได้ก็ยิ่งไกลมากขึ้นเท่านั้น

---

[1] สุทัศน์ แขกระจ่าง. (2553). วงจรเปิด/ปิดพัลส์และการโปรแกรมสำหรับตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลาของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต.



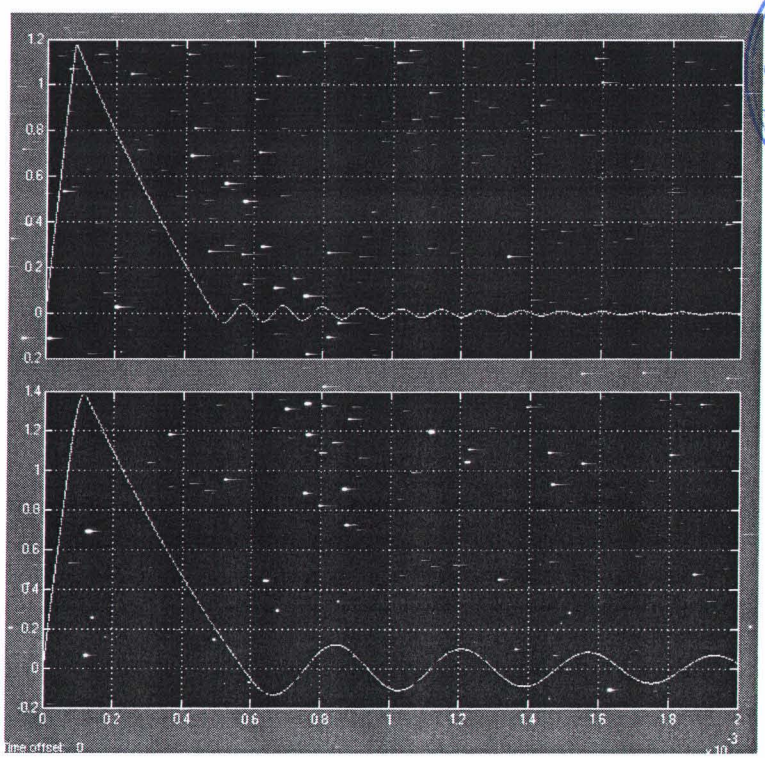
รูปที่ 3.1 วงจรปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดจำนวน 2 ขดที่นำเสนอใหม่ในงานวิจัยฉบับนี้

ในที่นี้ จะแสดงผลการจำลองที่ได้รับจากวงจรปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดจำนวน 2 ขดที่นำเสนอใหม่ในงานวิจัยฉบับนี้เท่านั้น โดยรูปที่ 3.2 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้รับจากขดลวดส่ง (รูปด้านบน) และขดลวดรับ (รูปด้านล่าง) จากการใช้ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับขดลวดทั้ง 2 ขดเท่ากัน คือ มีค่าเท่ากับ 330 μH ซึ่งจะเห็นได้ว่า "Eddy Current ที่ส่งกลับมาจากโลหะนั้นมีค่าแอมพลิจูดที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ PWM ที่ส่งออกไป"

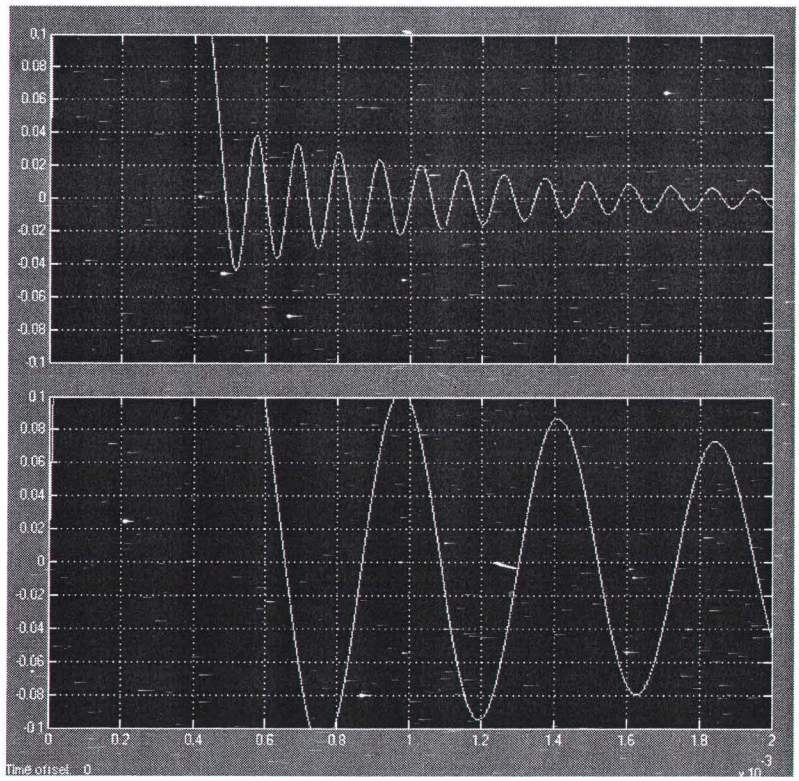
ส่วนรูปที่ 3.3 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้รับจากขดลวดส่งและขดลวดรับ จากการใช้ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับขดลวดทั้ง 2 ขดนั้นมีค่าเท่ากับ 330 กับ 470 μH ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า "สัญญาณ PWM ที่ส่งออกไปและ Eddy Current ที่ส่งกลับมาจากโลหะนั้นมีค่าแอมพลิจูดที่สูงมากขึ้นทั้ง 2 สัญญาณ เมื่อเปรียบเทียบกับผลในรูปที่ 3.4"

ส่วนรูปที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้รับจากขดลวดส่งและขดลวดรับ จากการใช้ตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับขดลวดทั้ง 2 ขดนั้นมีค่าเท่ากับ 330 กับ 680 μH ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า "สัญญาณ PWM ที่ส่งออกไปและ Eddy Current ที่ส่งกลับมาจากโลหะนั้นมีค่าแอมพลิจูดที่สูงมากขึ้นทั้ง 2 สัญญาณ เมื่อเปรียบเทียบกับผลในรูปที่ 3.4 และ 3.5"

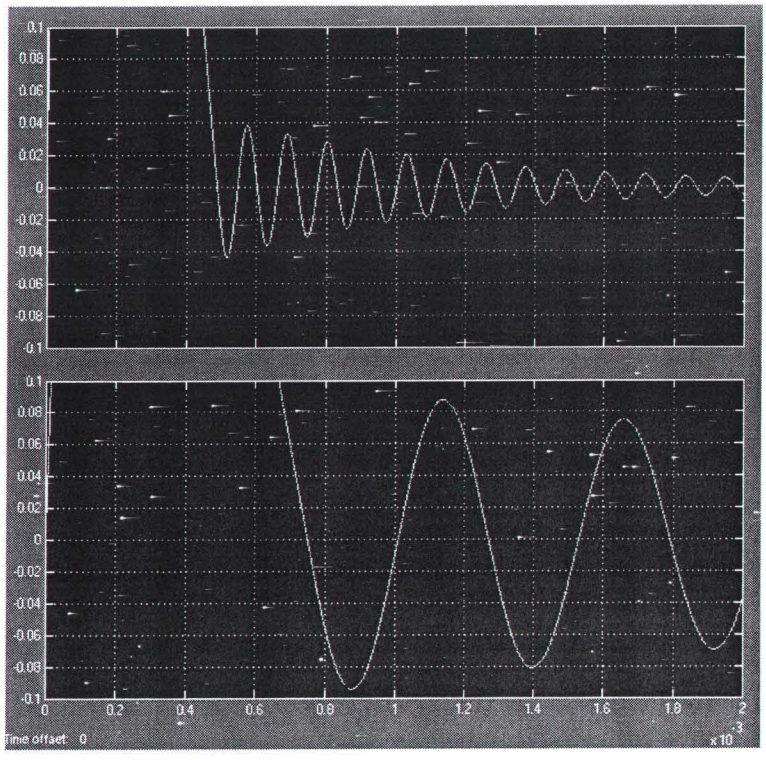
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 3.2 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของขดลวดส่งและรับ เมื่อตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัว มีค่าเท่ากับ 330 μH



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองเชิงความถี่ เมื่อตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัว มีค่า 330 μH กับ 470 μH ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ เมื่อตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัว มีค่า 330 μH กับ 680 μH ตามลำดับ

จากผลการจำลองวงจรปิด/ปิดพัลส์ที่มีขดลวดจำนวน 2 ขดด้วยโปรแกรม MATLAB ดังกล่าว จึงนำไปสู่การออกแบบและสร้างวงจรปิด/ปิดพัลส์ขึ้นมาทดสอบและใช้งานจริง ซึ่งจะแสดงผลการตรวจจับโลหะในบทที่ 4 ต่อไป

3.4 ขั้นตอนวิธีในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอ

ในการทดสอบจะนำโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นทองแดง และแผ่นเหล็ก ที่มีพื้นที่ขนาด 2x2 ตารางนิ้ว และ 4x4 ตารางนิ้ว มาทำการทดลองหาค่าผลตอบสนองเชิงเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจากโลหะชนิดนั้นๆ โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องทำการเซตค่าค่าเริ่มต้นก่อนเสมอ โดยจะเริ่มต้นจากการทดสอบชิ้นงานในสภาวะที่ไม่มีโลหะที่จะตรวจจับ เนื่องจากแต่ละบริเวณที่ทำการทดลองได้รับผลกระทบเนื่องจากสนามแม่เหล็กโลกที่ไม่เท่ากัน เพื่อที่ว่าระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อไม่มีโลหะ (ทดสอบกับอากาศ) จะทำหน้าที่เสมือนเป็นค่าขีดเริ่ม (Threshold) สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่านี้คือ $T_discharge_{air}$ ซึ่งเป็นการทำงานในตอนเริ่มต้นเช่นเดียวกับการใช้งานเครื่องตรวจจับโลหะจริงในปัจจุบันนี้ หลังจากที่ได้ทำการหาค่า $T_discharge_{air}$ ได้แล้ว จะทำการตรวจจับและบันทึกค่าระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดเมื่อมีโลหะ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนค่านี้คือ $T_discharge_{metal}$ ณ ระยะห่าง

ระหว่างขดลวดกับโลหะค่าต่างๆ ตั้งแต่ 1 - 15 ซม. (ระยะห่างเพิ่มขึ้นทีละ 1 ซม.) โดยที่ระยะห่างแต่ละค่า จะทำการหาค่าผลต่างของระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ($\Delta T_discharge$) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (3.6)

$$\Delta T_discharge = T_discharge_{metal} - T_discharge_{air} \quad (3.6)$$

ในการเก็บค่าข้อมูลก่อนที่จะทำการแสดงชนิด ระยะห่างและขนาดของโลหะเพื่อสร้างเป็นเครื่องต้นแบบในการตรวจจับโลหะที่สมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนในการทำงานและมีวิธีการในการบอกชนิด ระยะห่างและขนาดของโลหะ ดังนี้

1. ARM Cortex M3 Core เบอร์ LPC1768 ถูกกำหนดให้สร้างสัญญาณ PWM ที่มีค่าความกว้างของพัลส์ด้านบวกเป็นจำนวนเท่าของ 5 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 โดยมีค่าตั้งแต่ 5 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 (1.82 มิลลิวินาที) ไปจนถึง 100 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 (36.381 มิลลิวินาที) จำนวน 20 พัลส์ ป้อนให้กับวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่ต่อกับขดลวด

2. ทำการปรับค่าระยะห่างระหว่างเครื่องตรวจจับโลหะกับโลหะแต่ละชนิดที่ต้องการทดสอบ โดยมีค่าตั้งแต่ 1 - 15 ซม.

3. หลังจากนั้น ทำการบันทึกค่าข้อมูล "ระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวด" ที่เกิดขึ้นไว้ในหน่วยความจำ ซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่กระแสไฟฟ้าในขดลวดมีค่าสูงสุด แล้วมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งค่าระยะเวลาที่กระแสไฟฟ้าลดลงดังกล่าวจะถูกจัดเก็บทุกๆ ค่าตั้งแต่ระยะห่างมีค่าเท่ากับ 1 - 15 ซม. โดยค่าข้อมูลที่ทดสอบได้จะถูกจัดเก็บและจะถูกใช้งานเสมือนเป็นฐานข้อมูล

4. โดยวิธีการที่นำเสนอเพื่อใช้บอกชนิด ของโลหะ คือ ในการทดสอบใช้งานจริง จะนำเครื่องตรวจจับโลหะที่สร้างขึ้นเสร็จแล้วนำไปทดสอบโดยจะทำการส่งค่าสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของพัลส์ด้านบวกออกไป 15 ค่าและวัดค่าระยะเวลาขอบขาลงของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่ได้ทำการสอบเทียบไว้ก่อนหน้านี้โดยพิจารณาช่วงที่ $\Delta T_discharge$ เป็นลบ เป็นศูนย์ และ เป็นบวก ว่าคล้ายกับโลหะชนิดใดที่ทดสอบ

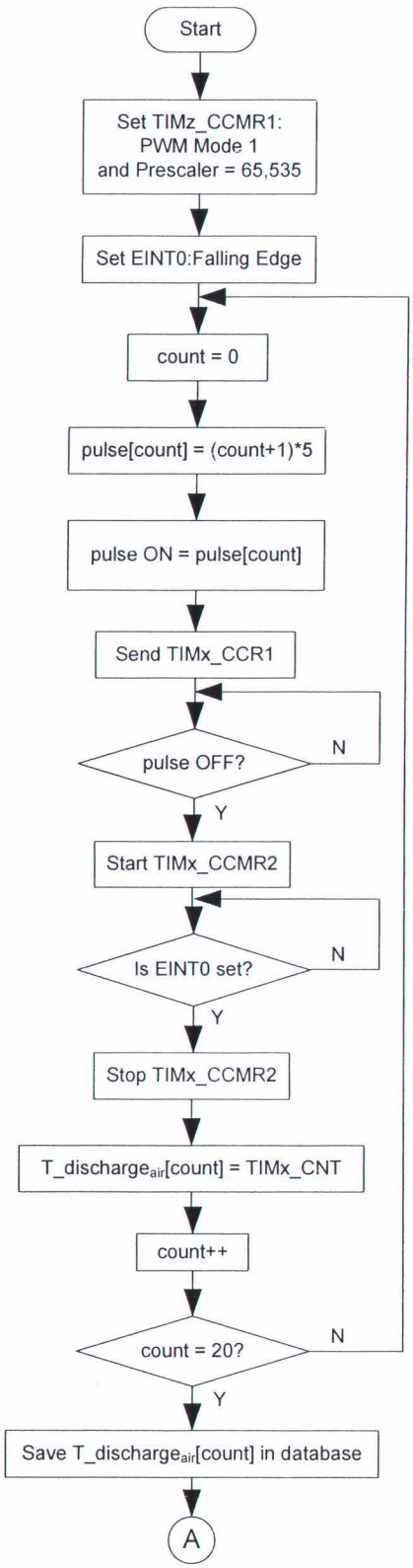
ในการทดสอบและในการใช้งานจริงนั้น จะกำหนดให้สัญญาณพัลส์ PWM มีความกว้างของพัลส์ด้านบวกที่ต่างกันจำนวน 20 พัลส์ และมีค่าเป็น "จำนวนเท่าของ 5 หน่วยของไทเมอร์ TIM1 (หน่วยเวลาเป็น ms)" โดยในที่นี้ จะขอแสดงตัวอย่างค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกในหน่วยของไทเมอร์ TIM1 เพียงบางค่าไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกในหน่วยของไทเมอร์ TIM1 และหน่วยเวลา ms

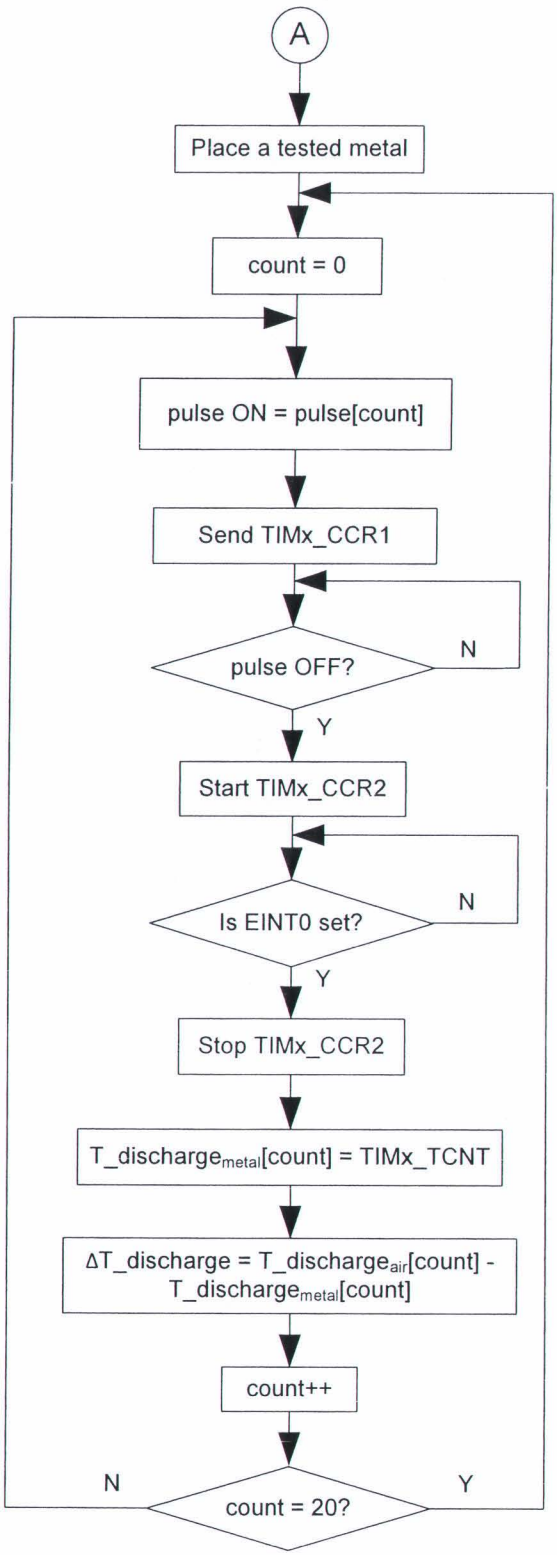
ความกว้างพัลส์ด้านบวก (หน่วยของไทเมอร์ TIM1)	ความกว้างพัลส์ด้านบวก (ms)
5	1.819
10	3.638
15	5.457
20	7.276
25	9.095
30	10.914
35	12.733
40	14.552
45	16.371
50	18.191
60	21.829
70	25.467
80	29.105
90	32.743
100	36.381

3.5 อัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

หลังจากที่ได้อธิบายแนวทางในการใช้งานเครื่องที่นำเสนอแล้ว ในหัวข้อย่อยนี้จะนำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M3 Core เบอร์ LPC1768 ในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 แสดงอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่า $T_discharge_{air}$ และอัลกอริทึมที่ใช้ในการหาค่า $T_discharge_{metal}$ และ $\Delta T_discharge$ ตามลำดับ

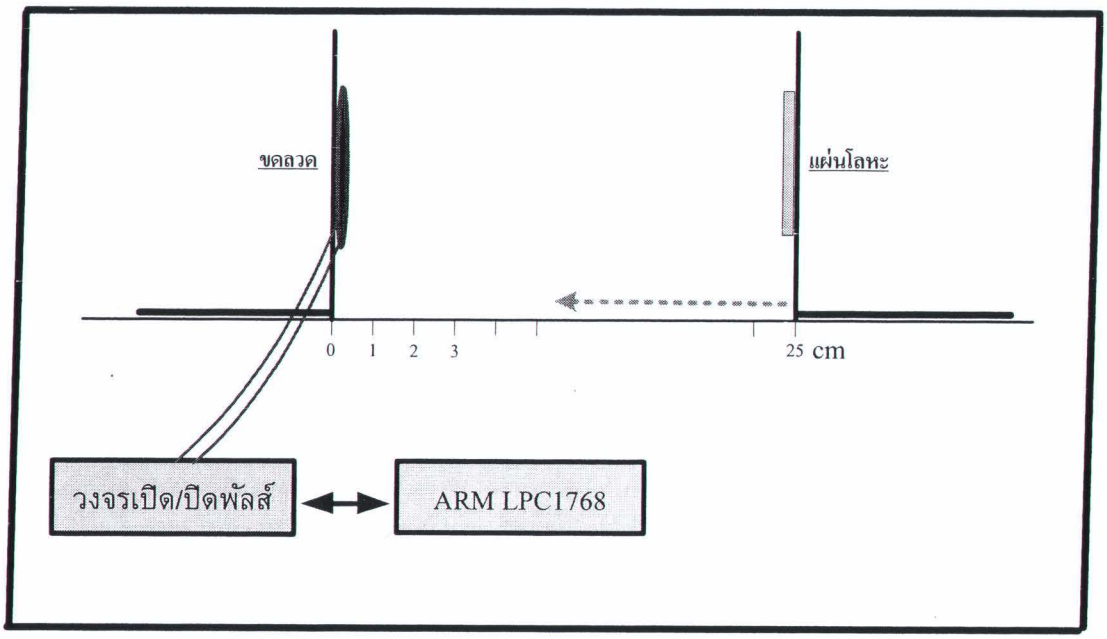


รูปที่ 3.5 อัลกอริทึมหาค่า $T_discharge_{air}$



รูปที่ 3.6 อัลกอริทึมหาค่า $T_discharge_{metal}$ และ $\Delta T_discharge$

โดยลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในอากาศของงานวิจัยที่นำเสนอนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลองและตรวจจับโลหะที่วางในอากาศ