

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวดและการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการตรวจจับผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดจากโลหะโดยใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ ดังนั้นในบทที่ 2 นี้จะประกอบไปด้วยหัวข้อย่อยต่างๆ ดังนี้ หัวข้อที่ 2.1 กล่าวถึงเครื่องตรวจจับโลหะที่มีการขายหรือใช้งานในปัจจุบัน ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ การประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์ร่วมกับสัญญาณพัลส์ PWM และทฤษฎีการพันเส้นลวดเป็นรูปวงกลมจะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.2, 2.3, และ 2.4 ตามลำดับ ส่วนหัวข้อที่ 2.5 และ 2.6 จะกล่าวถึงการตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์และวงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แก่ขดลวด ส่วนหัวข้อสุดท้ายจะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยรายละเอียดของแต่ละหัวข้อย่อยมีดังนี้

2.1 เครื่องตรวจจับโลหะ (Metal Detector)¹

เครื่องตรวจจับโลหะนั้นเป็นเครื่องที่ถูกค้นพบโดยวิศวกรชาวต่างชาติมานานไม่ต่ำกว่า 50 ปีและมีขายในเชิงพาณิชย์มานานนับสิบปี แต่แทบจะไม่มีมีการเปิดเผยข้อมูลหรือเอกสารใดเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะออกสู่สาธารณชนหรือเผยแพร่ข้อมูลทางเทคนิคในการสร้างและออกแบบในอินเทอร์เน็ตเลย มีเพียงงานวิจัยที่ตีพิมพ์หลายสิบปีที่ผ่านมาและวงจรในเครื่องตรวจจับโลหะที่มีขาย (จดสิทธิบัตรแล้ว) ที่นำเสนอเป็นวงจรแอนะล็อกที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC ในการสร้าง ซึ่งเป็นวงจรที่ยุ่งยาก ซับซ้อน ออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน รวมไปถึงพัฒนาต่อเพื่อใช้งานได้ยากมาก ในที่นี้ อาจจะกล่าวได้ว่า แทบจะไม่มีใครทราบได้เลยว่าเครื่องตรวจจับโลหะมีหลักการออกแบบวงจรที่ใช้งานและมีวิธีทดสอบก่อนการใช้งานได้จริงอย่างไร ประเด็นที่ทราบมีเพียงข้อเดียว คือ “วิธีการใช้งานในทางปฏิบัติ เมื่อซื้อเครื่องตรวจจับโลหะมาแล้วเท่านั้น” ซึ่งแน่นอนที่สุด การใช้งานก็จะจะเป็นไปตามคำแนะนำการใช้เครื่องที่กำหนดตายตัว ไม่สามารถพัฒนาต่อไปได้ มีการใช้งานที่จำกัด และที่สำคัญต้องนำเข้าเครื่องจากต่างประเทศเท่านั้น

¹ สิทธิศักดิ์ ลีลาถาวรชัย. เครื่องตรวจหาโลหะ. จาก

อีกทั้ง เนื่องจากการวิจัย ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจจับ โลหะดังกล่าวทำได้ยาก และต้องทดสอบใช้งานได้จริงเป็นเวลานาน จึงแทบจะไม่มีนักวิจัยท่านใดในประเทศไทยให้ความสนใจที่จะวิจัยเพื่อนำเสนอบทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ พัฒนาเครื่องตรวจจับโลหะขึ้นมาใช้งานเอง และขายเองในประเทศไทย ซึ่งแน่นอนที่สุด ประโยชน์ที่ได้รับจากการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ นั้นมีมากมายหลายประการและคุ้มค่าต่อการสร้างขึ้นมาใช้งานเองภายในประเทศ

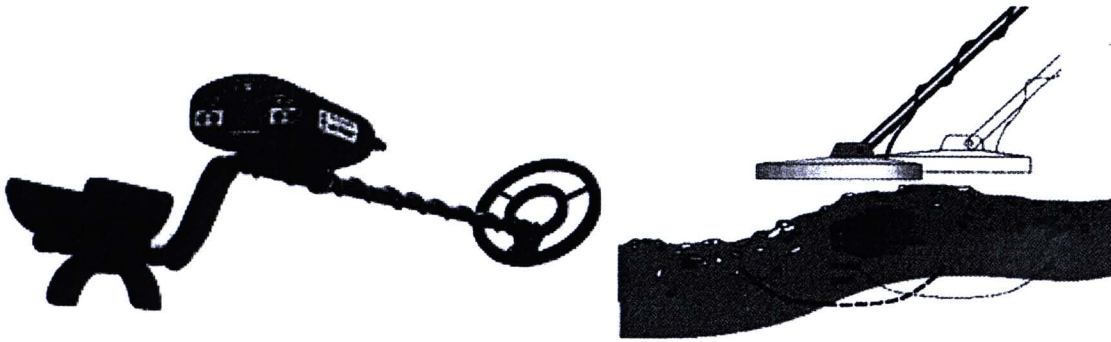
จากการค้นหาและรวบรวมข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะที่มีขายในขณะนี้ และเผยแพร่ข้อมูลทางอินเทอร์เน็ต พบว่า ในปัจจุบันนี้ เครื่องตรวจจับโลหะถูกสร้างออกมาขายมีมากมายหลายชนิด โดยแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในที่นี้ จะอธิบายชนิดของเครื่องตรวจจับโลหะที่ถูกจำแนกออกตามเทคโนโลยีที่ใช้กัน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.1.1 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF (Very Low Frequency)

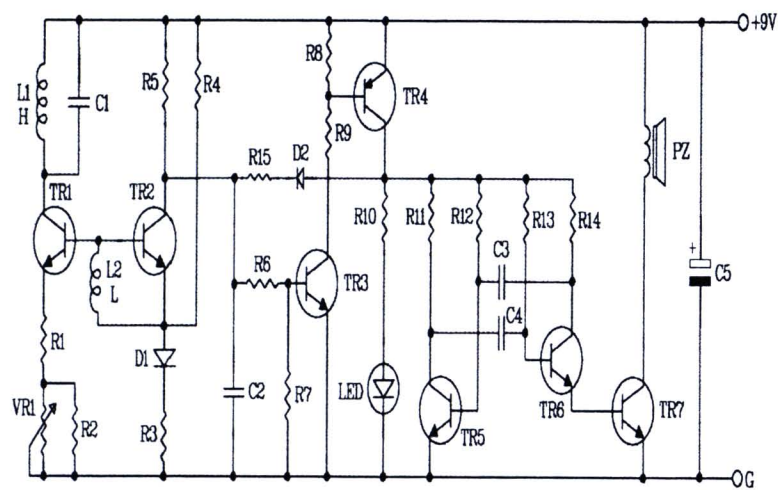
รูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 แสดงรูปร่างและวงจรใช้งานของเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF โดยเป็นเครื่องที่ใช้คลื่นวิทยุย่าน VLF (ย่านความถี่ต่ำมาก) ส่งไปยังโลหะ ส่วนของคอยล์จะประกอบด้วยขดลวดที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน 2 ขด คือ คอยล์ส่ง (transmitter Coil) เป็นขดลวดอยู่รอบนอก ทำหน้าที่ส่งคลื่นที่สร้างจากกระแสไฟฟ้าสลับที่มีความถี่ประมาณ 6.6 kHz คอยล์รับ (Receiver Coil) เป็นขดลวดอยู่รอบใน ทำหน้าที่เสมือนเสาอากาศที่คอยรับสัญญาณ

หลักการทำงาน คือ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในคอยล์ส่ง จะเกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นรอบคอยล์ โดยทิศทางของสนามแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งลงไปยังพื้นดิน เมื่อคลื่นที่ส่งออกไปจากคอยล์ส่งกระทบกับโลหะ จะเกิดการสะท้อนของคลื่นกลับขึ้นมาด้วยทิศทางตรงกันข้ามที่ตรงข้ามกับคลื่นที่ส่งออกไป ทำให้คอยล์รับที่รับได้เฉพาะคลื่นที่มีการโพลาไรซ์ในทิศทางหนึ่งๆ สามารถแยกแยะได้ว่าคลื่นที่รับได้นั้นเป็นคลื่นจากคอยล์ส่ง หรือคลื่นที่สะท้อนมาจากโลหะ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปเข้าวงจรขยายสัญญาณและออกทางลำโพง

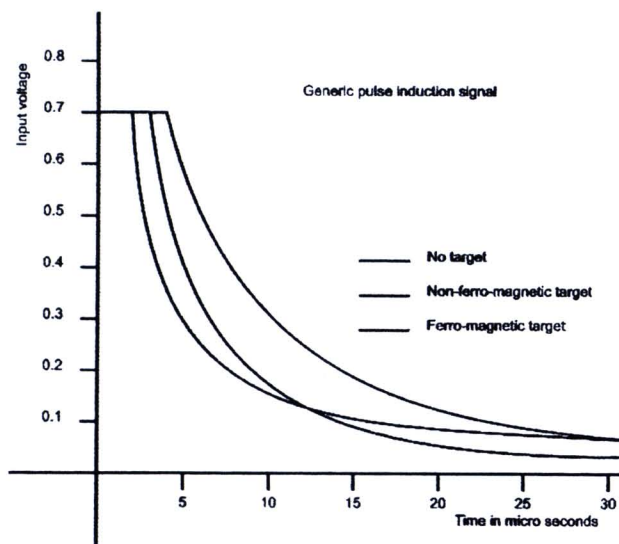
นอกจากนี้ เครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF นี้ยังสามารถแยกแยะชนิดของวัตถุได้โดยอาศัยการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่ส่งออกไป (Phase Shifting) ซึ่งการเลื่อนเฟสนี้เกิดขึ้นจากปัจจัย 2 ประการ คือ ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทาน ซึ่งวัตถุที่นำไฟฟ้าทุกชนิดมีค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานคงที่เสมอ โดยอาศัยหลักการที่ว่า วัตถุที่มีค่าความเหนี่ยวนำสูง จะมีการเลื่อนเฟสได้มาก ส่วนวัตถุที่มีความต้านทานสูง จะมีการเลื่อนเฟสน้อย จึงทำให้สามารถแยกแยะความแตกต่างของโลหะได้ ซึ่งจะตรวจจับสัญญาณว่ามีการเลื่อนเฟสไปเท่าไรและประมวลผลว่าวัตถุที่พบเป็นโลหะหรือขยะ โดยการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อโลหะมีแสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 รูปร่างของเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF



รูปที่ 2.2 วงจรแอนะล็อกที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC ในเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF



รูปที่ 2.3 ลักษณะการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้าที่มีต่อโลหะชนิดต่างๆ

2.1.2 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI (Pulse Induction)

เครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI (Pulse Induction) นี้มีโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 โดยเครื่องดังกล่าวจะประกอบไปด้วยคอยล์หนึ่งขดที่ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและรับ คอยล์จะส่งพลังงานเป็นลูกคลื่นสั้นๆ ออกไป เมื่อแอมพลิจูดของลูกคลื่นกระเพื่อมขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุด มันจะลดความเข้มลง โดยกลับทิศทางอย่างทันทีทันใด เกิดเป็นลูกคลื่นที่มีลักษณะแหลมมาก ขณะที่เครื่องตรวจอยู่เหนือโลหะ ลูกคลื่นจะวิ่งไปกระทบกับวัตถุ และสะท้อนกลับมา เครื่องจะสามารถแยกแยะได้ว่าระยะเวลาของการสะท้อนยาวหรือสั้น ถ้าระยะเวลายาวกว่าปกติ จะแสดงว่า วัตถุที่อยู่ใต้พื้นดินนั้นเป็นโลหะ จากนั้นสัญญาณที่สะท้อนกลับมา จะถูกส่งผ่านไปที่เครื่องขยายเสียง และขับออกทางลำโพง ข้อเสียของเครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI คือ เวลาในการสะท้อนนั้นไม่สามารถแยกแยะชนิดของโลหะได้ แต่มันจะใช้ได้ดีในตัวอย่างที่มีการนำไฟฟ้าสูงและสามารถหาโลหะที่อยู่ใต้ดินลึกๆ ได้ ซึ่งเครื่องตรวจจับโลหะแบบ VLF ทำไม่ได้

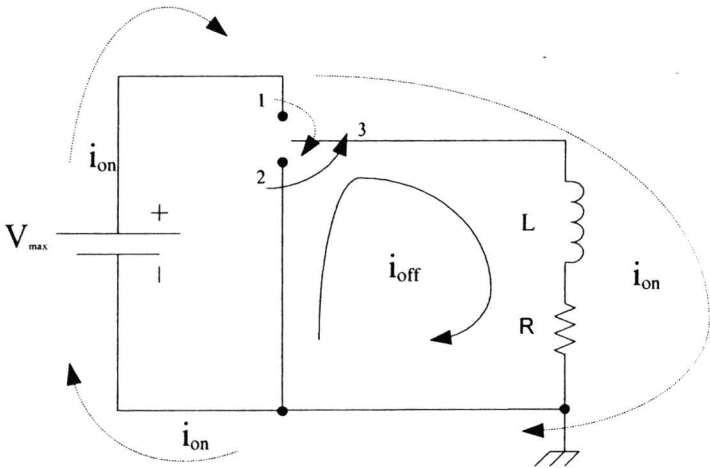


รูปที่ 2.4 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ PI

2.1.3 เครื่องตรวจจับโลหะแบบ BFO (Beat Frequency Oscillation)

เครื่องตรวจโลหะประเภทนี้ ประกอบด้วยคอยล์ 2 ขด ก็คือคอยล์ใหญ่ และคอยล์เล็ก โดยคอยล์อันใหญ่เป็นตัวส่งสัญญาณ ส่วนคอยล์อันเล็กที่อยู่ในกล่องควบคุมจะเป็นตัวรับสัญญาณ คอยล์แต่ละอันจะต่อเข้ากับเครื่องออสซิลเลเตอร์ที่ให้กำเนิดความถี่เท่ากัน

ขณะที่กระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านเข้าไปในคอยล์แต่ละอัน คอยล์ใหญ่จะให้กำเนิดคลื่นวิทยุ และส่งไปที่วัตถุใต้พื้นดิน เมื่อคลื่นกระทบกับวัตถุ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในวัตถุจะทำให้ความถี่ของคลื่นที่สะท้อนกลับเปลี่ยนไปเล็กน้อย เมื่อคอยล์เล็กรับคลื่นที่สะท้อนกลับมา มันจะทำการเปรียบเทียบความถี่ของออสซิลเลเตอร์กับความถี่ที่รับได้ ความแตกต่างของความถี่นี้ทำให้เกิดเสียงบีตขึ้นมาในภายหลัง



รูปที่ 2.5 วงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์แบบใหม่ที่น่าสนใจ

2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวงจรไฟฟ้าแบบใหม่ที่น่าสนใจในงานวิจัยฉบับนี้เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์ โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน¹ ที่ใช้วิเคราะห์กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่ได้ทำการออกแบบ โดยในรูปที่ 2.5 แสดงวงจรไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์แบบใหม่ที่น่าสนใจ และตัวเลข 1, 2 และ 3 เป็นตัวเลขกำกับขาของทรานซิสเตอร์ โดยในที่นี้ เรานำทรานซิสเตอร์มาทำงานในโหมด Switching และต่อใช้งานเป็นแบบ Common Emitter เพื่อทำหน้าที่เปิด/ปิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเสมือนว่าเป็นการชาร์ตและดิสชาร์ตกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า/ออกจากขดลวด ตามลำดับ ดังนั้น เราสามารถวิเคราะห์การทำงานของวงจรดังกล่าวได้ 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 Contact 1 กับ 3 ต่อกัน (ปิดวงจร) กระแสไฟฟ้าที่ไหลมีค่า i_{on} และ กรณีที่ 2 Contact 2 กับ 3 ต่อกัน (เปิดวงจร) กระแสไฟฟ้าที่ไหลมีค่า i_{off}

2.2.1 วิเคราะห์การทำงานในสถานะปิดวงจร

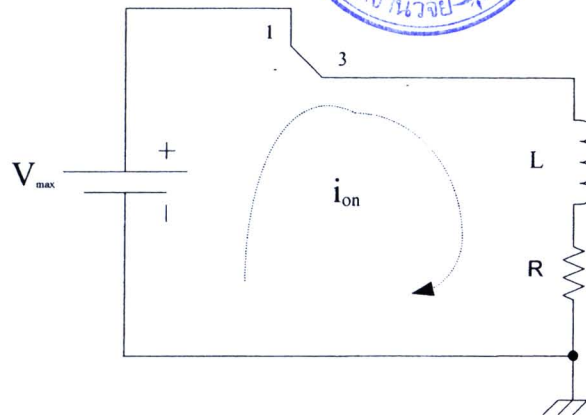
รูปที่ 2.6 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร) โดยจะหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร i_{on} ได้จากการพิจารณาใช้กฎ KVL ดังนี้

$$V_{max} - L \frac{dI}{dt} = IR \tag{2.1}$$

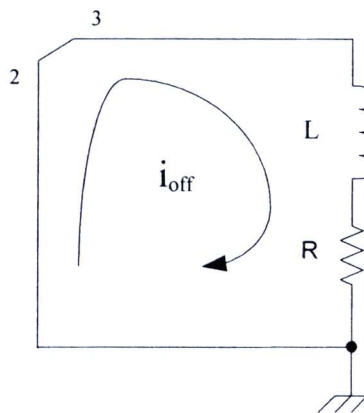
$$I = \frac{V_{max}}{R} (1 - e^{-\frac{Rt}{L}}) \tag{2.2}$$

ดังนั้น $i_{on} = I_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ โดยที่ $\tau = \frac{L}{R}$ และ $I_0 = \frac{V_{max}}{R}$ (2.3)

¹ S.R. Paranjothi. (2010). **Electric Circuit Analysis**. (3rd ed.). New Age Science.



รูปที่ 2.6 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร)



รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 2 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (เปิดวงจร)

2.2.2 วิเคราะห์การทำงานในสถานะเปิดวงจร

รูปที่ 2.7 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 2 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (เปิดวงจร) โดยจะหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร i_{off} ได้จากการพิจารณาใช้กฎ KVL ดังนี้

$$L \frac{dI}{dt} = IR \quad (2.4)$$

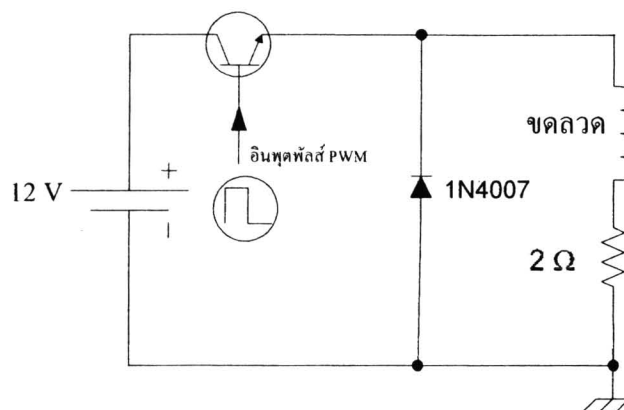
$$I_{off} = e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (2.5)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad i_{off} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{โดยที่} \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (2.6)$$

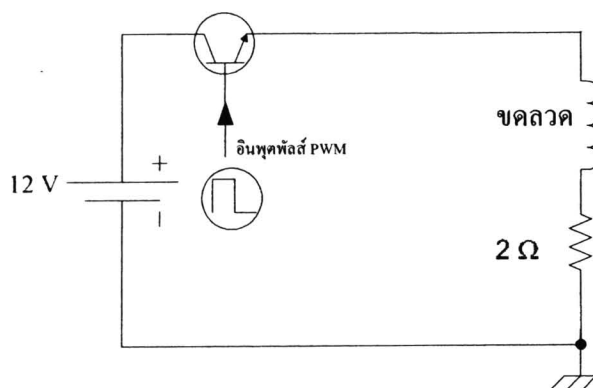
จากการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าทั้ง 2 กรณี พบว่าปัจจัยที่มีผลคือค่าความต้านทาน (R) และค่าความเหนี่ยวนำ (L) จากการทดลองเพื่อวัดค่าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากวงจรไฟฟ้างี้ดกล่าว โดยนำโลหะมาวางอยู่ห่างจากขดลวด ณ ระยะห่างค่าต่างๆ กัน แล้วทำการวัดค่า L เครื่องมือวัดค่า RLC ในห้องปฏิบัติการระบบวัดคุม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ พบว่า ค่า L ที่วัดได้เกิดการเปลี่ยนแปลง สาเหตุหลักที่ทำให้ค่า L เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีวัตถุโลหะมาอยู่ใกล้กับขดลวด นั้นสามารถที่จะอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีสถานแม่เหล็กดังนี้ “เมื่อขดลวดอยู่ใกล้กับโลหะ ค่า μ_r (ค่าสภาพความซึมซาบ หรือ permeability ของขดลวด) มีค่าลดลง ในทางกลับกัน ถ้าวัตถุอยู่ห่างออกไปจากโลหะไปเรื่อยๆ ค่า μ_r จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่า μ_r มีค่าเท่ากับ μ_{air} (ค่าสภาพความซึมซาบของอากาศ)” ซึ่งถ้าเลือกขดลวด (ตัวเหนี่ยวนำหรือสัญลักษณ์ L ในวงจรรูปที่ 2.5) เบอร์ใหญ่ขึ้น แต่จำนวนรอบในการพันมีค่าเท่าเดิม จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าที่สูงขึ้น ความต้านทานในวงจรมีค่าลดลง จะส่งผลคือวงจรเปิด/ปิดพัลส์แบบใหม่ที่น่าสนใจคือ จะทำให้วงจรมีความไว (Sensitivity) ในการตรวจจับโลหะได้ดียิ่งขึ้น

2.3 การประยุกต์ใช้งานทรานซิสเตอร์ร่วมกับสัญญาณพัลส์ PWM

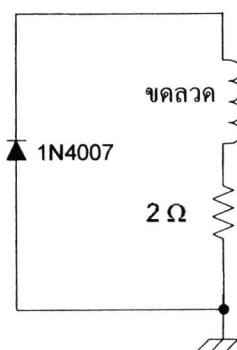
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับสัญญาณพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) ในงานวิจัยฉบับนี้ จึงทำให้วงจรรูปที่ 2.5 ถูกแก้ไขใหม่โดยวางทรานซิสเตอร์และไดโอดเข้าไปเพิ่มเติมในวงจรดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยทรานซิสเตอร์ในวงจรรูปที่ 2.8 นั้นถูกกำหนดให้ทำงานภายใต้สภาวะที่กำหนด 2 ลักษณะ คือ เปิดวงจรกับปิดวงจร ซึ่งเป็นไปตามหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์อยู่แล้ว ซึ่งการทำงานใน 2 ลักษณะดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของสัญญาณพัลส์ PWM ที่ป้อนให้แก่ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะได้อธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 วงจรไฟฟ้าที่พัฒนาเพิ่มขึ้นจากวงจรรูปที่ 2.5 โดยมีการต่อทรานซิสเตอร์และไดโอด



รูปที่ 2.9 ทรานซิสเตอร์ทำงาน โดยอยู่ในสภาวะปิดวงจร



รูปที่ 2.10 ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน อยู่ในสภาวะเปิดวงจร

2.3.1 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในสภาวะปิดวงจร

รูปที่ 2.9 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.8 ในสภาวะที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน (สภาวะปิดวงจร) กล่าวคือ มีระดับแรงดัน 5 โวลต์ป้อนเข้าที่ขาเบส (Base) ของทรานซิสเตอร์ ในที่นี้ก็คือ ความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM (Pulse On) ที่ป้อนเข้าขาเบส นั้นเอง โดยในรูปที่ 2.9 นั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรเป็นแบบลูปปิด จึงทำให้ขดลวด (ตัว L ในวงจรรูปที่ 2.5) เริ่มสะสมพลังงานภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่มีค่าเท่ากับระยะเวลาของความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM ที่ป้อนเข้าขาเบส

2.3.2 หลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ในสภาวะเปิดวงจร

รูปที่ 2.10 แสดงวงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.8 ในสภาวะที่ทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน (สภาวะเปิดวงจร) กล่าวคือ มีระดับแรงดันที่ต่ำประมาณ 0 โวลต์ป้อนเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ ในที่นี้ก็คือ ความกว้างพัลส์ด้านลบของสัญญาณ PWM (Pulse Off) ที่ป้อนเข้าขาเบส นั้นเอง โดยในรูปที่ 2.10 นั้น กระแสไฟฟ้าจะไหลในวงจรเป็นแบบลูปปิดเช่นกัน แต่แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและทรานซิสเตอร์ถูกตัดออกไปจากวงจรในรูปที่ 2.8 นั่นก็หมายความว่า ขดลวด

จะคายพลังงานและในช่วงแรก แรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าคงที่ แต่หลังจากที่ขดลวดคายพลังงานใกล้จะหมด กระแสไฟฟ้าผ่านไดโอดจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้แรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย

จากการทดสอบในทางปฏิบัติ พบว่า โลหะต่างชนิดกันในระยะห่างที่ชิ้นงานรับรู้ได้ พบว่า จะมีค่าความเหนี่ยวนำไม่เท่ากัน เมื่อป้อนค่า Pulse On ที่แตกต่างกัน จะแสดงคุณลักษณะ (Characteristics) ผลตอบสนองตัดศูนย์ของค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวดได้ชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อเราทำการตรวจจับระยะเวลาเมื่อเริ่มเกิด Pulse Off ไปจนถึงแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับ 0

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำโลหะ ทำให้เกิด Eddy Current บนผิวของโลหะ ซึ่งส่งผลต่อค่าความเหนี่ยวนำในเชิงวงจรไฟฟ้าด้วยเช่นกัน โดยจะเป็นการส่งต่อพลังงานจากขดลวดไปสู่ผิวของโลหะที่อยู่ใกล้ๆ ซึ่งชนิดโลหะต่างกันจะมีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่างกันและส่งผลให้ค่า $T_{discharge}$ ต่างกันด้วย โดย $T_{discharge}$ เป็นค่าผลต่างของค่าเวลาดั้งแต่จุดเวลาที่กระแสไฟฟ้าในขดลวดเริ่มที่จะลดลง (เริ่มการส่ง Pulse Off) ไปจนถึงจุดเวลาที่ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์

2.4 ทฤษฎีการพันเส้นลวดเป็นรูปวงกลม

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องตรวจจับโลหะ พบว่า ในงานวิจัย² ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์โดยใช้การประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล จากงานวิจัยดังกล่าวได้นำเส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.40 – 0.80 mm โดยมีค่าคุณสมบัติทางกายภาพในทางทฤษฎีที่คำนวณได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งถึงแม้ว่าขนาดและรูปร่างทางกายภาพของขดลวดจะนำมาพันเป็นรูปวงกลมหรือสี่เหลี่ยมที่แตกต่างกันในการใช้งานก็ตาม แต่ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดแต่ละแบบนั้นก็มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 380 – 406 μH และ 1.6 – 2.3 โอห์ม ตามลำดับ โดยขดลวดที่มีขนาดเล็กกว่า ย่อมจะต้องมีจำนวนรอบของขดลวดที่มากขึ้นด้วย ซึ่งโดยทั่วไป ค่าความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับใช้งานในเครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้หลักการการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ (Pulse Induction Metal Detector) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 300 – 500 μH ซึ่งในงานวิจัย : นี้ก็ได้เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ใช้ในการทดลองเพื่อตรวจจับโลหะที่มีค่าเท่ากับ 400 μH

² Pulse induction metal detector with DSP. from http://www.lammertbies.nl/electronics/PI_metal_detector.html.



Size	Shape	Turns	Wire size	Inductance	Resistance
Ø 120 mm	Round	36	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	405 µH	1.9 Ohm
Ø 150 mm	Round	31	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	394 µH	2.0 Ohm
Ø 175 mm	Round	28	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	387 µH	2.1 Ohm
Ø 200 mm	Round	26	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	406 µH	2.2 Ohm
Ø 250 mm	Round	22	Ø 0.40 mm / 0.14 mm ²	380 µH	2.3 Ohm
Ø 300 mm	Round	20	Ø 0.50 mm / 0.20 mm ²	390 µH	1.6 Ohm
Ø 400 mm	Round	17	Ø 0.50 mm / 0.20 mm ²	396 µH	1.8 Ohm
Ø 500 mm	Round	15	Ø 0.50 mm / 0.20 mm ²	400 µH	2.0 Ohm
1.0 x 1.0 m	Square	10	Ø 0.66 mm / 0.34 mm ²	406 µH	2.0 Ohm
1.4 x 1.4 m	Square	8	Ø 0.66 mm / 0.34 mm ²	387 µH	2.2 Ohm
1.8 x 1.8 m	Square	7	Ø 0.80 mm / 0.50 mm ²	398 µH	1.7 Ohm

รูปที่ 2.11 คุณสมบัติทางกายภาพในทางทฤษฎีที่คำนวณได้ของขดลวดที่มีรูปทรงและขนาดต่างๆ

ดังนั้น ในงานวิจัยที่นำเสนอฉบับนี้จึงได้นำเส้นลวดที่มีขายตามท้องตลาดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.40 mm หรือมีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 0.14 mm² และมีฉนวนหุ้มมาพันเป็นขดลวดรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 cm และกำหนดจำนวนรอบที่พันเป็นเลขลงตัวเท่ากับ 35 รอบ และมีความหนาของขดลวดประมาณ 1 cm เพื่อให้มีคุณสมบัติในการเลือกใช้งานตรงกับกรณีที่ 2 ของรูปที่ 2.13 หลังจากนั้น ทำการวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดที่ใช้ทดสอบดังกล่าว พบว่า มีค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 420 µH และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 2 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดที่ใกล้เคียงกับค่าที่ปรากฏในกับกรณีที่ 2 ของรูปที่ 2.11 จริง อีกทั้งเป็นค่าความเหนี่ยวนำที่ใกล้เคียงกับงานวิจัย¹ ที่เลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดมีค่าเท่ากับ 400 µH ซึ่งในที่นี้ อาจจะกำหนดจำนวนรอบของการพันเส้นลวดเป็นขดลวดที่เป็นรูปทรงอื่นๆ หรือมีจำนวนรอบค่าอื่นๆ ก็ได้ แต่สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเสมอในการใช้งานขดลวดในการตรวจจับโลหะก็คือ ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวดที่ใช้งานจะต้องมีค่าที่ใกล้เคียงกับ 400 µH และ 2 โอห์ม ตามลำดับ

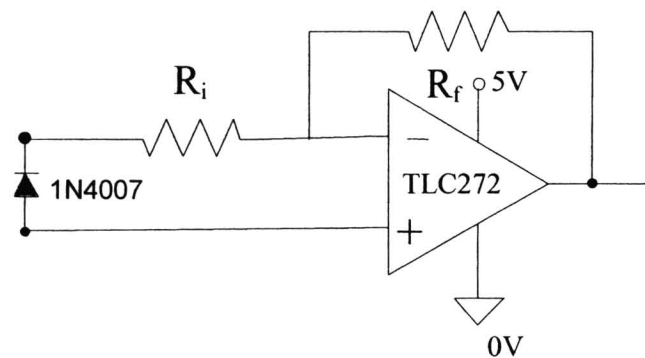
นอกจากนี้ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด 420 µH ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ยังเป็นค่าที่ถูกต้องและสามารถยืนยันที่มาของค่าความเหนี่ยวนำดังกล่าวได้ โดยอาศัยสมการการหาค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.7²

$$L = \frac{(d^2 n^2)}{(l + 0.45d)} \quad (2.7)$$

¹ Pulse induction metal detector with DSP. from http://www.lammertbies.nl/electronics/PI_metal_detector.html.

² Single-layer Coil Inductance and Q. from <http://www.qsl.net/in3otd/indcalc.html>.





รูปที่ 2.12 วงจรไฟฟ้ารูปที่ 2.5 ในสถานะที่ Contact 1 กับ 3 เชื่อมต่อกัน (ปิดวงจร)

กล่าวคือ เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดในการพันขดลวดเข้าไปในสมการที่ 2.7 เราจะค่าความเหนี่ยวนำที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 415 μH

อ้างอิงรูปที่ 2.6 หัวข้อที่ 2.2 ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐาน ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ออกแบบและสร้างวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด พบว่า หลังจากที่ได้ค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้งาน (L) เท่ากับ 420 μH และรู้ค่า Ampere Max ที่ทนได้ของเส้นลวดที่เลือกใช้งาน โดยดูจากคู่มือลวดทองแดง (American Wire Gauge หรือ AWG) แล้วเราก็จะสามารถคำนวณหาค่า R ที่ใช้ในวงจรเปิด/ปิดพัลส์ในรูปที่ 2.6 ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.8) ซึ่งในที่นี้ เราจะแทนค่า V_{max} เท่ากับ 12 โวลต์และ Ampere Max เท่ากับ 6 แอมแปร์ ดังแสดงในสมการที่ (2.9) - (2.10)

$$\frac{V_{\text{max}}}{\text{Ampere Max}} \leq R \tag{2.8}$$

$$\frac{12\text{ V}}{6\text{ A}} \leq R \tag{2.9}$$

$$R \geq 2\ \Omega \tag{2.10}$$

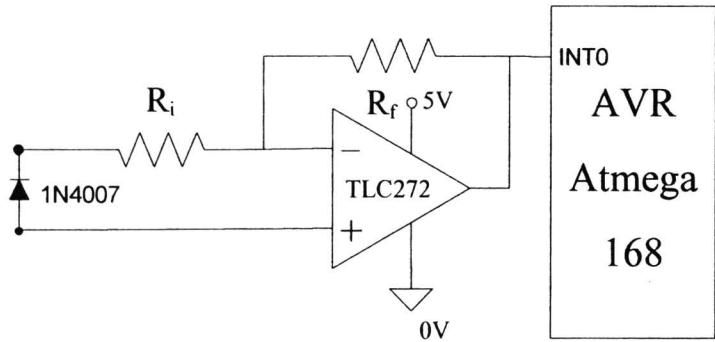
ดังนั้น ตัวต้านทาน R ที่คำนวณได้และนำมาใช้ในวงจรเปิด/ปิดพัลส์นั้นสามารถจะเลือกใช้ค่าใดๆ ก็ได้ แต่จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 โอห์ม ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ เลือกใช้งานค่าความต้านทานที่มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2 โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.14

2.5 การตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับศูนย์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับ 0 โดยนำออปแอมป์ (Operational Amplifier) มาต่อใช้งานเพื่อขยายสัญญาณอินพุตแบบ

Inverting Amplifier ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยในที่นี้ จะเลือกไดโอดที่ทนกระแสไฟฟ้าได้มากกว่าค่า Ampere Max ของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่มีค่าเท่ากับ 6 แอมแปร์ (อธิบายไว้ในหัวข้อที่แล้ว) และในวงจรที่ออกแบบนี้จะมีค่าแรงดันตกคร่อมไดโอด (V_d) ประมาณ 0.3 – 0.8 โวลต์แล้วแต่ชนิดของไดโอดที่ใช้งาน ในที่นี้เราเลือกใช้งานไดโอดเบอร์ 1N4007 ซึ่งเป็นไดโอดที่มีค่า t_{on} กับ t_{off} ต่ำ และมีค่า V_d ประมาณ 0.65 โวลต์ ซึ่งในความเป็นจริงเราจะเลือกใช้ไดโอดเบอร์ใดก็ได้ แต่สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกใช้งานไดโอดในวงจรที่นำเสนอนี้ก็คือ ไดโอดดังกล่าวจะต้องมีค่าทำงานโดยมีค่า t_{on} กับ t_{off} ที่ต่ำ เพื่อที่ว่าวงจรเปิด/ปิดพัลส์จะสามารถตอบสนองหรือทำงานได้อย่างรวดเร็วตามต้องการ รวมถึงมีค่า V_d อยู่ระหว่าง 0.3 – 0.8 โวลต์

เหตุผลที่สำคัญที่เลือกอัตราขยายของออปแอมป์มีค่าเท่ากับ 25 เท่า ก็เพราะว่า “เราต้องการสร้างสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปิด/ปิดพัลส์ (ขาเอาต์พุตของออปแอมป์) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้า จากระดับแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ไปเป็นระดับแรงดันไฟฟ้า 0 โวลต์ เปรียบเสมือนเป็น “สัญญาณพัลส์ขอบขาลง (Falling Edge Trigger)” ที่ชัดเจน ซึ่งเราสามารถนำสัญญาณพัลส์ขอบขาลงดังกล่าวไปกระตุ้นขาอินเทอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 (INT 0) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 เพื่อให้เกิดการอินเทอร์รัปต์และทำงานเพื่อตรวจจับระยะเวลาที่เกิดผลตอบสนองตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรที่ต่อเอาต์พุตของออปแอมป์เข้าขาอินเทอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 ของ ATmega168

จากการที่เราใช้ออปแอมป์ TLC272 มาต่อใช้งานแบบ Inverting Amplifier และกำหนดให้ระดับแรงดันอินพุต V_{in} และระดับแรงดันอินพุต V_{out} มีค่าเท่ากับ 0.2 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ นั้น เราสามารถที่จะหาค่าของ R_i กับ R_f เพื่อนำมาใช้งานวงจรเปิด/ปิดพัลส์ที่นำเสนอซึ่งในรูปที่ 2.13 ได้โดยใช้สมการที่ 2.11 – 2.13 ดังนี้

$$V_{out} = V_m \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \quad (2.11)$$

$$5 = 0.2 * \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \quad (2.12)$$

$$\frac{R_f}{R_i} = 24 \quad (2.13)$$

ในที่นี้ ถ้าเราเลือกใช้งานตัวต้านทาน R_i มีค่าเท่ากับ 1 k Ω และนำค่า R_i นี้ไปแทนลงในสมการที่ (2.13) เราได้ตัวต้านทาน R_f มีค่าเท่ากับ 24 k Ω

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า หลักการทำงานของวงจรตรวจจับค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดมีค่าเท่ากับ 0 โดยนำออปแอมป์มาต่อใช้งานเพื่อขยายสัญญาณอินพุตแบบ Inverting Amplifier ดังแสดงในรูปที่ 2.13 นั้นสามารถนำมาใช้งานได้ดีในงานวิจัยฉบับนี้ โดยสัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์มีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 5 โวลต์กับ 0 โวลต์อย่างชัดเจน ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นสัญญาณพัลส์ที่สามารถนำไปกระตุ้นขาอินเทอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 ของ AVR ATmega168 เพื่อให้เกิดการอินเทอร์รัปต์และ AVR ATmega168 ตรวจจับระยะเวลาที่เกิดผลตอบสนองตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

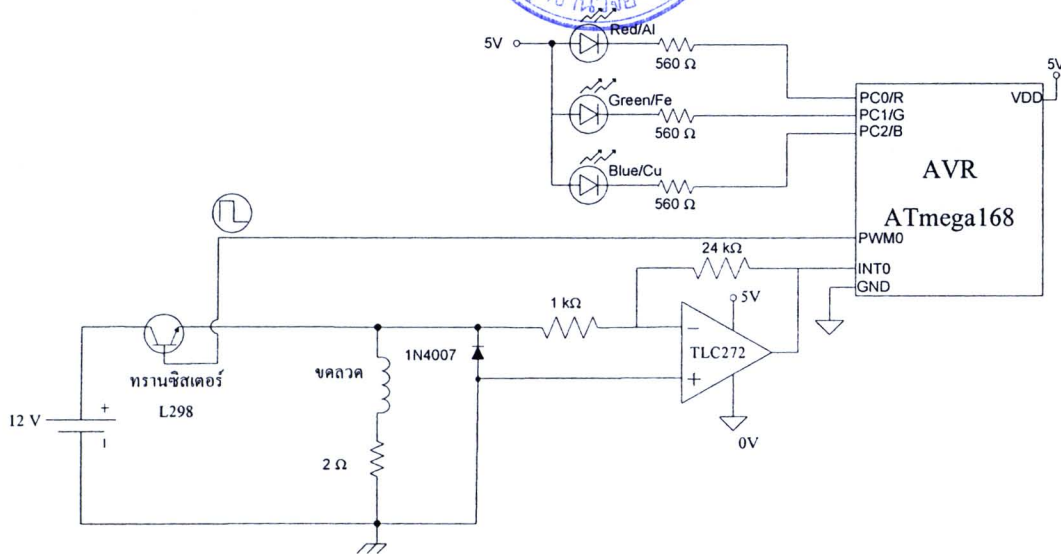
2.6 วงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แกขดลวด

โดยทั่วไป วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แกขดลวด (Coil Driver) ที่มีใช้งานในเครื่องตรวจจับโลหะนั้น^{1,2} มีหน้าที่หลักที่สำคัญคือทำหน้าที่เปิดและปิดสัญญาณพัลส์ PWM ให้แกขดลวดและส่งผ่านผลตอบสนองเชิงเวลาของขดลวดของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ตรวจจับได้จากโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบไปยังวงจรแอนะล็อกที่ทำงานจากอุปกรณ์ RLC หลังจากนั้น จะนำค่าแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าไปประมวลผลและระบุชนิดของโลหะที่ตรวจจับได้ต่อไป โดยเครื่องตรวจจับโลหะที่ขายโดยทั่วไปจะมีวงจรเปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แกขดลวดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับราคาและคุณภาพของเครื่องตรวจจับโลหะ

ในงานวิจัยฉบับนี้จะออกแบบและนำเสนอวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำหน้าที่เปิด/ปิดสัญญาณพัลส์ให้แกขดลวด (Coil Driver) ขึ้นมาใหม่โดยอ้างอิงหลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์และวิธีการใช้งานในทางปฏิบัติ อีกทั้งยังนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมการทำงานและสร้างสัญญาณพัลส์ PWM อีกด้วย ซึ่งในที่นี้ จะนำรูปวงจรที่ 2.8 และ 2.11 มาเชื่อมต่อกันเพื่อที่จะ

¹ J. A. Corbyn. (1980). Pulse Induction Metal Detector – 1 and 2. **Wireless World**.

² DeepTech Metal Detectors. (2007). Coil and Search Head Design – Patents and Utility Models (Part 1). from



รูปที่ 2.14 วงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด (Coil Driver)

ทำหน้าที่เป็นวงจรเปิด/ปิดพัลส์ให้แก่ขดลวด (ตัว L) ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้วงจรเปิด/ปิดพัลส์ใหม่ที่น่าสนใจคือ การออกแบบวงจรกระทำได้ง่าย มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง บำรุงรักษาง่าย โดยลดความยุ่งยากในการปรับจูนวงจรแอนะล็อกแบบเดิมที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนี้

วงจรเปิด/ปิดพัลส์ (Coil Driver) ทำหน้าที่เปิดและปิดสัญญาณพัลส์ PWM ให้แก่ขดลวดและส่งผ่านผลตอบสนองเชิงเวลาตัดศูนย์ของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่ตรวจจับได้จากโลหะแต่ละชนิดที่ทดสอบไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยรูปวงจรที่นำมาเสนอเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบขึ้นมาใหม่โดยอ้างอิงหลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์และวิธีการใช้งานในทางปฏิบัติ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14

2.6.1 หลักการทำงานของวงจรมีดังนี้

(1) เริ่มต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 จะสร้างสัญญาณ PWM โดยใช้ไทมเมอร์ 0 ไปกระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์ L298 ทำงานในสภาวะปิดวงจร ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะไหลผ่านวงจรให้แก่ขดลวดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

(2) เมื่อไทมเมอร์ 0 สร้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกเสร็จสิ้นตามค่าความกว้างพัลส์บวกที่กำหนด ใน ณ ขณะนั้น ทรานซิสเตอร์จะทำงานในสภาวะเปิดวงจร นั่นคือกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดหรือวงจรจะเริ่มลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดมีค่าเท่ากับ 0

(3) ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มมีค่าลดลง AVR ATmega168 จะเริ่มต้นสั่งการให้ไทมเมอร์ 1 ทำการจับระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด ซึ่งเริ่มจับเวลาตั้งแต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดเริ่มมีค่าลดลงไปจนถึงเวลาที่กระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0

(4) เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดมีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้เอาต์พุตของวงจรที่ต่ออยู่กับขาพอร์ตอินเตอร์รัปต์ภายนอกช่องที่ 0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงาน (ในที่นี้ กำหนดโหมดทำงานของสัญญาณอินเตอร์รัปต์เป็นแบบขอบขาลง) ซึ่งจะไปสั่งการให้ไทมเมอร์ 1 หยุดจับเวลา

(5) หลังจากนั้น AVR ATmega168 จะทำการบันทึกค่าระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด โดยในที่นี้ ค่าระยะเวลาที่ตรวจจับได้จะเป็นจำนวนคล็อกที่นับได้ในช่วงเวลาดังกล่าวในหน่วยเวลาของไทมเมอร์ 1 ซึ่งค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณและขั้นตอนวิธี (อัลกอริทึม) ในการเขียนโปรแกรมใช้งานไทมเมอร์ 0 และไทมเมอร์ 1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 จะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบเครื่องตรวจจับโลหะโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ (Pulse Induction <PI> Metal Detector) นั้นได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในหนังสือต่างประเทศที่แต่งขึ้นโดย I. Grant, F.S. และ West, G.F.¹ ต่อมา J. A. Corbyn² ได้พัฒนาและนำเสนอวงจรตรวจจับโลหะขึ้นมาใหม่ ซึ่งประกอบไปด้วยตัว R ตัว, C และทรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมาก ทำให้การทดสอบคุณสมบัติในการใช้งานนั้นกระทำได้ยากมาก ต้องเสียเวลาปรับจูนหลายครั้ง ก่อนที่จะใช้งานได้จริงและมีคุณสมบัติใช้งานที่เป็นไปตามความต้องการ ต่อจากนั้น ยังคงมีนักวิจัยและบริษัทต่างๆ หลายประเทศจำนวนมากได้ทำการวิจัย พัฒนา รวมไปถึงสร้างเพื่อขายเครื่องตรวจจับโลหะออกมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเน้นไปที่การสร้างเพื่อขายและเน้นจดสิทธิบัตรเพื่อขายลิขสิทธิ์ในการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะ โดยในที่นี้ จะขอกกล่าวถึงบทความวิจัยที่สำคัญที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ดังนี้

Dr. Salman *et. al.*³ ได้นำเสนอเครื่องตรวจจับโลหะแบบการเหนี่ยวนำด้วยพัลส์ขึ้นมา โดยเครื่องดังกล่าวประกอบไปด้วยวงจรที่ใช้ในการสร้างพัลส์ที่มีค่าความถี่และความกว้างของพัลส์คงที่โดยใช้ไอซีไทมเมอร์ LM555 4 ตัว, วงจรที่ใช้ในการตรวจจับโลหะโดยใช้วงจรขยายสัญญาณและวงจรอินทิเกรเตอร์, แหล่งกำเนิดไฟฟ้า +5V, -5V และ -10V และขดลวดที่ใช้ตรวจจับ 1 วง

¹ I. Grant, F. S. and West, G. F. (1965). **Interpretation Theory in Applied Geophysics**. McGraw-Hill.

² J. A. Corbyn. (1980). Pulse Induction Metal Detector – 1 and 2. **Wireless World**.

³ Salman Durrani, James Boxall, Stephen Purvis, Garrick Madge, and Tathagat Banerjee. A Pulse Induction Metal Detector (ENGN3227). from http://users.cecs.anu.edu.au/~Salman.Durrani/_teaching/TA5.pdf.

โดยค่าความถี่และความกว้างของพัลส์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการปรับจูนค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ หลักการทำงานคือ หลังจากที่พัลส์ถูกส่งออกไปภาคส่งแล้ว วงจรชักตัวอย่าง (Sampling Circuit) ที่อยู่ในวงจรตรวจจับโลหะจะทำการมอนิเตอร์ตรวจจับระยะเวลาของพัลส์ที่สะท้อนกลับมา (Reflected Pulse หรือ Echo) ซึ่งในสภาวะปกติที่ไม่มีโลหะ ระยะเวลาการลดลง (Delay) ของพัลส์ที่สะท้อนกลับมาและตรวจจับได้ จะถูกกำหนดเป็นค่าระยะเวลาการลดลงที่เริ่ม (Expected Length) ซึ่งมีค่าประมาณ 30 μs แต่ถ้ามีการตรวจจับพบโลหะ ระยะเวลาการลดลงของพัลส์ที่สะท้อนกลับมาและตรวจจับได้จะมีค่าที่มากกว่าค่าระยะเวลาการลดลงที่เริ่มประมาณ 2 – 3 μs โดยได้สรุปประเด็นสำคัญที่น่าเสนอไว้ว่า ถึงแม้ว่า PI Metal Detector จะไม่สามารถใช้งานในการจำแนกชนิดของโลหะได้ แต่ก็มีข้อดีคือสามารถตรวจจับโลหะภายใต้สภาพแวดล้อมหรือพื้นที่ที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงและสามารถตรวจจับโลหะที่อยู่ลึกกว่าเครื่องตรวจจับโลหะชนิดอื่นๆ โดยในงานวิจัยนี้ไม่ได้แสดงผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับเลย นอกจากนี้ ข้อเสียของ PI Metal Detector ที่พบจากการนำเสนอดังกล่าวคือ เครื่องตรวจจับโลหะดังกล่าวประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC และไอซีจำนวนมาก ซึ่งจะเสียเวลาในการปรับจูนเวลานาน จนกระทั่งได้ค่าความถี่และความกว้างพัลส์ตามที่ต้องการ, ต้องใช้ไฟเลี้ยงจำนวน 3 ค่า ซึ่งเป็นการยุ่งยากในการใช้งาน อีกทั้งไม่สามารถแยกแยะโลหะที่ต้องการจะตรวจจับได้

Nina Gajjar ¹ ได้นำเสนอเครื่องตรวจจับโลหะอย่างง่ายที่ใช้อุปกรณ์ RLC ไอซีขยายสัญญาณเสียงออกไอโรว์กับสายอากาศแบบลูป (Loop Antenna) 2 ตัว โดยเครื่องตรวจจับโลหะนี้จะประกอบไปด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ 2 วงจรที่เป็นแบบปรับค่าความถี่ได้และเป็นแบบที่มีค่าความถี่ตายตัว สัญญาณเอาต์พุตของทั้งสองวงจรออสซิลเลเตอร์นี้จะถูกนำมาผสมกันด้วยวงจร Mixer ที่ซึ่งจะสร้างสัญญาณผลต่างออกมาเท่านั้น และในตอนแรก ทั้งสองวงจรมีจะต้องถูกปรับจูนให้มีค่าความถี่ตรงกันเสียก่อน (Zero Beat) โดยใช้วงจรควบคุมการปรับจูนความถี่และจะต้องปรับจูนในสภาวะที่ไม่มีโลหะ ซึ่งจะไม่มีการเกิดเสียงออกไอโรว์เกิดขึ้น แต่ถ้านำไปทดสอบและตรวจจับพบโลหะ ค่า Zero Beat จะไม่เกิดขึ้นและมีเสียงออกไอโรว์เกิดขึ้นที่ลำโพง โดยผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากสิ่งประดิษฐ์นี้ก็เป็นเพียงแต่การตรวจจับพบกับไม่พบโลหะ และมีเสียงเท่านั้น ไม่สามารถแยกชนิดของโลหะที่ตรวจพบได้

Michael R. Starcher ² ได้นำเสนอ Blind Squirrel PI Metal Detector ที่ซึ่งเครื่องตรวจจับโลหะที่นำเสนอประกอบไปด้วยอุปกรณ์ RLC, MOSFET และไอซีจำนวนมาก ได้แก่ LM318, LM555, 4N35 ฯลฯ และขดลวดตรวจจับ 1 วง โดยพัลส์ที่มีช่วงเวลา ON สั้นๆ มีความถี่คงที่และมีค่า

¹ Nina Gajjar. FET Metal detector with IC Audio Amplifier. from <http://nina.foxdelta.com/detector.html>.

² Michael R. Starcher. Blind Squirrel PI Metal Detector. from <http://oldradiobuilder.com/MDET.html>.

กระแสไฟฟ้าสูงได้ถูกสร้างขึ้นตลอดเวลาและส่งไปยังขดลวดโดยใช้ไอซีไทเมอร์ 555 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Dr. Salman *et. al.* แต่ใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน จึงทำให้ความถี่ใช้งานมีค่าไม่เท่ากันด้วย โดยค่าความถี่ที่ใช้งานจะมีค่าอยู่ระหว่าง 75 Hz และ 225 Hz ด้วยค่าความกว้างพัลส์ที่มีค่าประมาณ 100 -175 μ s เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและด้านนอกของขดลวดที่ใช้ในการตรวจจับโลหะมีค่าเท่ากับ 6.5 นิ้ว (16.51 ซม.) และ 9.5 นิ้ว (24.13 ซม.) ตามลำดับ โดยงานวิจัยที่นำเสนอนี้ก็ไม่ได้แสดงผลการทดสอบที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับเช่นกัน แต่เข้าใจว่า เครื่องดังกล่าวสามารถตรวจจับโลหะ แต่ไม่สามารถแยกชนิดของโลหะที่ตรวจพบได้เช่นกัน

นอกจากนี้ จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับโลหะที่มีขายในประเทศไทย พบว่า เครื่องตรวจจับโลหะส่วนใหญ่จะนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีอยู่หลายบริษัท และหลายรุ่น ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการใช้งานและคุณสมบัติในการทำงาน ยกตัวอย่างเช่น

เครื่องตรวจจับโลหะแบบพกพา (Handheld Metal Detector) รุ่น MD-1001¹ เป็นเครื่องตรวจจับโลหะที่สามารถพกพาติดตัวได้เพื่อใช้ในการตรวจจับโลหะในงานรักษาความปลอดภัยตามสถานที่ที่ต้องการปลอดจากอาวุธ อาทิ สถานที่ราชการ สนามบิน สถานีขนส่ง ฯลฯ ซึ่งมีคุณสมบัติในการใช้งานคือ สามารถปรับความไวในการตรวจจับโลหะ เพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะเป้าหมายได้, มีสวิทช์เปิดปิดเพื่อการประหยัดแบตเตอรี่ในกรณีที่พักการใช้งานและมี Buzzer เตือนเมื่อมีการตรวจจับโลหะได้ หลักการทำงานของ Handheld Metal Detector รุ่นนี้ก็คือ ตัวเครื่องจะให้กำเนิดสนามแม่เหล็กออกมา เมื่อมีโลหะที่เป็น Ferrite มาตัดผ่านก็จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าค่าน้อยๆ ขึ้นในวงจรตรวจจับ แล้วส่งเสียงเตือนออกมา โดยปัจจัยที่จะส่งผลต่อการตรวจจับโลหะนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิดของโลหะ, ขนาดของโลหะ และความห่างจากผิวหน้าของเครื่อง

เครื่องตรวจค้นวัตถุโลหะรุ่น Garrett Super Scanner² สามารถตรวจจับวัตถุจำพวก ปืนพกขนาดกลาง, มีดขนาดใหญ่, มีดพก, ฟอยล์ห่อยาเสพติด/เพชรเม็ดเล็กๆ ได้ในระยะทาง 9 นิ้ว, 6 นิ้ว, 3 นิ้ว และ 1 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้งานในอากาศเท่านั้น ยังไม่ทราบผลการตรวจจับโลหะที่วางในพื้นที่ดิน ซึ่งตรงข้ามกับเครื่องตรวจจับโลหะที่ใช้งานในทางทหาร VMH3CS Mine Detector รุ่น VMW1 กับ VMW3 ของบริษัท Vallon³ ที่นำเข้ามาจากประเทศเยอรมนี เพื่อใช้ในการตรวจจับกับดักระเบิดและวัตถุต้องสงสัยที่เป็นโลหะต่างๆ ที่วางอยู่ในพื้นดิน

¹ Handheld Metal Detector (MD-1001). from <http://www.gunkamoy.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=352431&Ntype=4>.

² Garrett Super Scanner (PI Metal Detector). from http://www.garrett.com/security/s_superscanner_specification.pdf.

³ VMH3CS Mine Detector. from http://www.vallon.de/pdf/VMH3CS_leaflet_09_2010.pdf.

ดังนั้น จึงเกิดแนวความคิดที่จะทำการ ศึกษาและออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใหม่เพื่อ ทำหน้าที่เปิด/ปิดวงจรพัลส์ให้แก่เครื่องตรวจจับโลหะแบบที่ใช้การเหนี่ยวนำด้วยพัลส์และเขียน โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega168 ขึ้นมาเพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ PWM แทนการใช้อุปกรณ์ RLC และไอซีจำนวนมากที่มีการนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้ รวมถึงจัดเก็บค่า ระยะเวลาการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดที่เกิดจากโลหะแต่ละชนิด โดยจะทำการ ตรวจจับโลหะทั้งที่วางในอากาศและที่วางในพื้นดิน รวมถึงเสนอแนวความคิดใหม่ที่จะทำการปรับ ค่าความกว้างพัลส์ด้านบวกของสัญญาณ PWM (T_{on}) โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แทนการปรับจูน ค่าความกว้างของพัลส์โดยใช้อุปกรณ์ RLC ที่มีการนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้

โดยความกว้างพัลส์ของสัญญาณ PWM ด้านบวกที่ถูกสร้างขึ้นนี้มีค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 3 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น $9.636 \mu s$) ไปจนถึง 50 หน่วยของไทมเมอร์ 0 (คิดเป็น $160.6 \mu s$) เพื่อที่จะทำให้รู้ได้ว่าโลหะแต่ละชนิดมีผลตอบสนองต่อค่าความกว้างของพัลส์แต่ละค่าอย่างไร อีก ทั้ง เนื่องจากเทคโนโลยีการสร้างเครื่องตรวจจับโลหะมักจะถูกปิดบังเป็นความลับและถูกจด สิทธิบัตร จึงทำให้กราฟผลตอบสนองเชิงเวลาขอบขาของกระแสไฟฟ้าในขดลวดที่เกิดขึ้นจาก โลหะแต่ละชนิดที่ได้รับจากการทำวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบผลการ ทดสอบของชิ้นงานนี้กับเครื่องอื่นๆ ที่ขายหรือที่ปรากฏในวารสารและบทความเชิงวิชาการต่างๆ ได้ แต่ทั้งนี้ ผลการทดสอบหรือเป้าหมายที่ต้องการจะได้รับจะเหมือนกันก็คือ นำผลการทดสอบที่ ได้รับจากงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อเนื่องและนำไปสร้างชิ้นงาน เครื่องตรวจจับโลหะที่สามารถบอก ชนิดและระยะห่างระหว่างขดลวดกับโลหะที่ตรวจจับได้