

# วงจรตรรกะแบบพื้นฐานในการสร้างตัวตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณ สำหรับเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์

## Basic Logic Circuits in Realizing Differencing Frequency Detector for Beat-Frequency-Oscillator-Based Metal Detector

อนุชา แก้วพูลสุข<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการประยุกต์ใช้วงจรตรรกะแบบพื้นฐานในการสร้างตัวตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณภายในเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ จุดเด่นของวิธีการดังกล่าวนี้คือความเรียบง่ายในการต่อวงจร นอกจากนี้วงจรตรรกะแบบพื้นฐานยังเป็นวงจรที่มีการผลิตเป็นไอซีสำเร็จรูปที่มีราคาถูกและหาซื้อได้โดยง่าย ภายในเนื้อหาผู้เขียนได้อาศัยหลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์และการสังเคราะห์วงจรเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรรกะแต่ละแบบกับผลต่างความถี่และความต่างเฟสของสัญญาณอินพุตทั้งสอง และเพื่อให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้นผู้เขียนได้ใช้ผลจากการเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE ประกอบการอธิบาย

**คำสำคัญ:** เครื่องตรวจจับโลหะ ความถี่บีตส์ ตัวตรวจวัดผลต่างความถี่

### Abstract

This article presents an application of basic logic gates in realizing a differencing frequency detector in a beat frequency oscillator-based metal detector. Advantages of the proposed method are

simplification of circuit implementation, commercial availability and low cost of the components. Logic circuit output signal depends on frequency differences and phase differences of two input signals. Theoretical approach to the analysis is via of Fourier series. In addition, PSPICE simulation results demonstrating validity of the proposed technique are included.

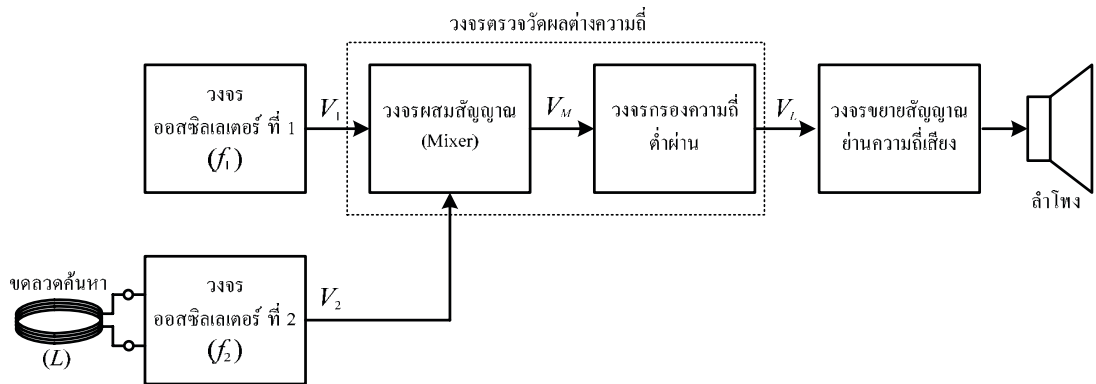
**Keywords:** Metal Detector, Beat Frequency Oscillator, Differencing Frequency Detector

### 1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันว่าในกรณีที่มีคลื่นเสียงสองขบวนที่มีความถี่แตกต่างกันเล็กน้อยเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งเดียวกันอย่างต่อเนื่อง เราจะได้ยินเสียงดัง-เสียงค่อยสลับกัน โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดบีตส์ (Beats) ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงเสียงดัง-เสียงค่อยนี้เรียกว่าความถี่บีตส์ ( $f_{beat}$ ) โดยจะมีค่าเท่ากับผลต่างความถี่ของคลื่นทั้งสองขบวน [1]-[3] หรือ

$$f_{beat} = |f_1 - f_2| \quad (1)$$

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ โทรศัพท์ 0-5596-3501-2  
Email: anuchak@nu.ac.th



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์

เมื่อ  $f_1$  และ  $f_2$  คือความถี่ของคลื่นเสียงขบวนที่ 1 และขบวนที่ 2 ตามลำดับ จากสมการที่ (1) โดยทั่วไปมนุษย์จะสามารถแยกแยะความถี่บีตส์ได้ไม่เกิน 10 เฮิรตซ์ ซึ่งถ้ามีค่าสูงกว่านี้จะไม่สามารถแยกแยะได้ว่าเป็นเสียงเดี่ยวหรือเสียงจากความถี่บีตส์

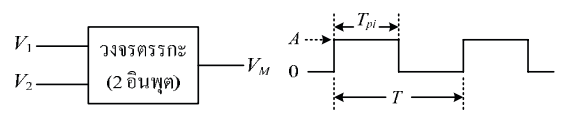
เครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ [4]-[9] คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจหาโลหะหรือวัตถุที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบซึ่งอาศัยหลักการคล้ายการเกิดบีตส์ของคลื่นเสียงสองขบวน แต่ที่แตกต่างกันคือค่าความถี่เริ่มต้นของสัญญาณที่ใช้ภายในวงจรมักถูกกำหนดให้มีความถี่สูงกว่าย่านความถี่เสียงโดยนิยมใช้ตั้งแต่ 100 กิโลเฮิรตซ์ขึ้นไป บล็อกไดอะแกรมวงจรประมวลผลภายในเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 หลักการทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 1 ทำหน้าที่ให้กำเนิดสัญญาณ  $V_1$  ที่มีความถี่เท่ากับ  $f_1$  ให้กับระบบ วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 2 มีขดลวดทองแดงที่เรียกว่าขดลวดค้นหา (Search Coils) ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์ของระบบ ต่อร่วมเป็นส่วนหนึ่งของวงจร โดยสัญญาณ ( $V_2$ ) ที่ได้จากวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ 2 นี้จะมีความถี่ ( $f_2$ ) ขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดค้นหา และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีวัตถุที่เป็นโลหะอยู่ใกล้กับขดลวดค้นหา ทั้งนี้ในสภาวะเริ่มต้น (ยังไม่มีโลหะอยู่

ใกล้) จะมีการออกแบบให้ความถี่ของสัญญาณจากวงจรออสซิลเลเตอร์มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันจากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 ผลจากการใช้งานเมื่อมีวัตถุที่เป็นโลหะอยู่ใกล้กับขดลวดค้นหา ความถี่ของสัญญาณ  $V_2$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะเริ่มต้น ซึ่งจะมีผลทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่ (ในที่นี้คือ  $V_L$ ) เป็นสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับผลต่างความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  (เท่ากับ  $|f_1 - f_2|$ ) โดยค่าความถี่ของสัญญาณ  $V_L$  นี้จะถูกออกแบบให้อยู่ในย่านที่มนุษย์สามารถได้ยินได้ ต่อจากนั้นจะถูกส่งต่อไปขยายกำลังเพื่อขับลำโพงต่อไป สำหรับวิธีการออกแบบวงจรประมวลผลที่สอดคล้องกับหลักการเกิดความถี่บีตส์ของคลื่นเสียงมากที่สุดคือการกำหนดให้สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  เป็นสัญญาณรูปไซน์ [5]-[7] โดยมีวิธีการตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  ที่นิยมคือการนำสัญญาณทั้งสองมาบวกกัน โดยใช้วงจรบวกสัญญาณ ซึ่งจะได้สัญญาณที่มีลักษณะมีองค์ประกอบความถี่สูง (ความถี่เฉลี่ยระหว่าง  $f_1$  และ  $f_2$ ) ผสมอยู่กับองค์ประกอบความถี่ต่ำ (ความถี่เท่ากับ  $|f_1 - f_2|$ ) ต่อจากนั้นจะเป็นการนำสัญญาณไปผ่านวงจรเรียงกระแส และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับการกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงออกไปเหลือเพียงองค์ประกอบความถี่ต่ำ

การใช้งานเครื่องมือในทางปฏิบัตินั้นบ่อยครั้งที่จะมีการกำหนดให้ความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าเริ่มต้นที่มีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยเพื่อเพิ่มความไวให้กับการตรวจวัด เหมือนกับการผสมสัญญาณเอาต์พุตด้วยออฟเซตที่เป็นสัญญาณความถี่ต่ำ (เกือบได้ยีนหรือพอได้ยีน) ด้วยเหตุผลจากวิธีการนำสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มาบวกกัน หรือเพื่อให้สอดคล้องกับการรวมตัวกันของคลื่น หรือด้วยเหตุผลการผสมสัญญาณเริ่มต้นด้วยออฟเซต นักออกแบบวงจรหลายคนจึงใช้ชื่อวงจรในส่วนนี้ว่า วงจรผสมสัญญาณ (Mixer) ในช่วงหลายๆ ปีที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาออกแบบวงจรประมวลผลขึ้นใหม่ เช่น การใช้ดีฟลิปฟลอป (D Flip Flop) ต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่สูงผ่านสำหรับการตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณ [8] และการใช้แนนด์เกต (NAND Gate) ต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นตัวตรวจวัดผลต่างความถี่ [9] โดยทั้งสองวิธีนี้จะใช้สัญญาณจากออสซิลเลเตอร์ทั้งสองเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมสำหรับแนนด์เกตนั้นจัดเป็นวงจรตรรกะแบบพื้นฐานที่มีวงจรภายในเรียบง่ายกว่าดีฟลิปฟลอป โดยผู้เขียนได้ใช้หลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตของแนนด์เกตกับค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตทั้งสองพบว่าสอดคล้องกันจริง ผู้เขียนจึงมีแนวคิดที่จะนำหลักการวิเคราะห์ห้วงจรดังกล่าวนี้ไปประยุกต์ใช้กับวงจรตรรกะพื้นฐานชนิดอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับนักออกแบบวงจรที่ต้องการใช้วงจรตรรกะพื้นฐานชนิดต่างๆ เป็นตัวตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณต่อไป

## 2. หลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์สำหรับวงจรตรรกะแบบพื้นฐาน

วงจรตรรกะแบบพื้นฐานภายในบทความนี้หมายถึงวงจรตรรกะขนาด 2 อินพุต 6 ชนิด ได้แก่ แอนด์เกต (AND Gate) แแนนด์เกต (NAND Gate) ออร์เกต (OR Gate) นอร์เกต (NOR Gate) เอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต (XOR Gate) และเอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกต (XNOR Gate)



รูปที่ 2 วงจรตรรกะ 2 อินพุต

โดยเมื่อกำหนดให้  $V_1$  และ  $V_2$  เป็นสัญญาณตรรกะอินพุตของวงจรที่มีความถี่แตกต่างกันไม่มาก ( $|f_2 - f_1| \ll f_1$  และ  $f_2$  เมื่อ  $f_1$  และ  $f_2$  คือค่าความถี่ของสัญญาณอินพุตทั้งสอง ตามลำดับ) สัญญาณเอาต์พุต ( $V_M$ ) ของวงจรตรรกะจะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ประมาณเท่ากับค่าความถี่เฉลี่ยระหว่างความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  และมีค่าดีวตีไซเคิล (Duty Cycle;  $D$ ) ขึ้นอยู่กับผลต่างเฟสเริ่มต้น และผลต่างความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  จากรูปที่ 2 ค่าดีวตีไซเคิลของสัญญาณ  $V_M$  จะมีค่าเท่ากับ

$$D = \frac{T_{pi}}{T} \quad (2)$$

เมื่อ  $T_{pi}$  คือค่าช่วงเวลาที่เป็พัลส์บวกของสัญญาณ  $V_M$  ณ พัลส์ลำดับที่  $i$  และ  $T$  คือ คาบเวลาของสัญญาณ  $V_M$  ถ้าพิจารณาสัญญาณ  $V_M$  ณ เวลา  $t$  จะได้ว่า

$$V_M = \begin{cases} A & ; 0 < t < T_{pi} \\ 0 & ; T_{pi} < t < T \end{cases} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) สามารถวิเคราะห์หาค่าประกอบทางความถี่ของสัญญาณ  $V_M$  ด้วยหลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$V_M = \frac{1}{T} \int_0^T A dt + \sum_{n=-\infty, n \neq 0}^{+\infty} \left[ \left( \frac{1}{T} \int_0^{T_{pi}} A e^{-jn\omega_0 t} dt \right) e^{jn\omega_0 t} \right] \quad (4a)$$

$$V_M = A \frac{T_{pi}}{T} + \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\sin(n\omega_0 t) - \sin(n\omega_0 t - n\omega_0 T_{pi})}{n} \right) \quad (4b)$$

$$V_M = AD + \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{\sin(n\omega_0 t) - \sin(n\omega_0 t - n\omega_0 DT)}{n} \right) \quad (4c)$$

จากสมการที่ (4b) และสมการที่ (4c) เทอมแรกด้านขวามือของสมการจะเป็นสัญญาณความถี่ต่ำที่ขึ้นอยู่กับค่าความต่างเฟสเริ่มต้นและผลต่างความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  นอกจากนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวงจรตรรกะที่ใช้ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไปสำหรับเทอมที่สองของสมการจะเป็นองค์ประกอบความถี่สูงซึ่งสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

### 3. หลักการสังเคราะห์สมการสำหรับวงจรตรรกะแบบพื้นฐานแต่ละชนิด

พิจารณาค่าความถี่ของสัญญาณที่ใช้ภายในเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ซึ่งมักถูกกำหนดให้มีความถี่สูงกว่า 100 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ทั้งนี้เนื่องมาจากแม้ว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะไม่สามารถกำจัดองค์ประกอบความถี่สูงออกไปได้หมดมนุษย์ก็จะไม่สามารถได้ยินความถี่สูงดังกล่าวได้ แต่เมื่อมีโลหะเข้าใกล้ขดลวดค้นหาจะเกิดความแตกต่างของความถี่ที่เกิดขึ้นในช่วงประมาณ 0.1 – 1 กิโลเฮิร์ตซ์ (มักไม่เกิน 5 กิโลเฮิร์ตซ์) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่เหมาะสมสำหรับขับลำโพงให้ผู้ใช้งานรับรู้เมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่เริ่มต้นกับค่าความถี่ที่เลื่อนไปจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากภายในบทความนี้ได้แยกพิจารณาการทำงานของวงจรตรรกะแต่ละชนิดออกเป็นสองกรณีด้วยกันคือ กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุมเริ่มต้นแตกต่างกัน และกรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันแต่มีค่าความถี่แตกต่างกัน จากสมการที่ (4b) สามารถแยกวิเคราะห์หาค่า  $T_{pi}/T$  จากสัญญาณเอาต์พุต  $V_M$  ของวงจรตรรกะแต่ละชนิดได้ดังนี้คือ

#### แอนด์เกต

โดยกรณีแรกนั้นสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3(ข) เมื่อ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  คือค่ามุมเริ่มต้นของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  ตามลำดับ และ  $\theta = \theta_1 - \theta_2$  พิจารณาความสัมพันธ์

ระหว่างค่า  $T_{pi}/T$  กับค่า  $\theta_i$  ช่วง 0 ถึง  $2\pi$  จะสามารถแยกออกได้เป็นสองช่วงดังนี้คือ

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{\theta_i}{2\pi} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ \frac{\theta_i}{2\pi} - \frac{1}{2} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

กรณีที่สองเป็นการเริ่มพิจารณา ณ เวลาที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันเป็นต้นไป ดังแสดงในรูปที่ 3(ค) เมื่อ  $T_1$  และ  $T_2$  คือคาบเวลาที่เป็นจำนวนตรรกยะของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  ตามลำดับ โดยที่  $T_1 > T_2$  ในแต่ละรอบของสัญญาณ  $V_1$  ค่ามุมเริ่มต้นของสัญญาณ  $V_2$  จะเลื่อนมานำหน้าสัญญาณ  $V_1$  โดยจะใช้จำนวนรอบทั้งหมดเท่ากับ  $m$  รอบ สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  จึงจะกลับมามีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันอีกครั้ง ทั้งนี้จะสามารถหาค่า  $m$  ได้จากความสัมพันธ์

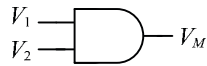
$$m = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{T_1}{\Delta T} \quad (6)$$

จากรูปที่ 3(ค) ณ เวลาเริ่มต้น ค่า  $T_{pi}/T$  จะมีค่ามากที่สุดโดยประมาณเท่ากับ 0.5 เมื่อ  $T_1 \gg \Delta T$  และจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าเวลาที่ทำให้  $n=m/2$  ซึ่งค่า  $T_{pi}/T$  จะมีค่าต่ำที่สุดโดยประมาณเท่ากับ 0 และจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดอีกครั้งที่ตำแหน่ง  $n=m$  ซึ่งคาบเวลาของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ ( $T_{new}$ ) จะสามารถคำนวณได้จาก

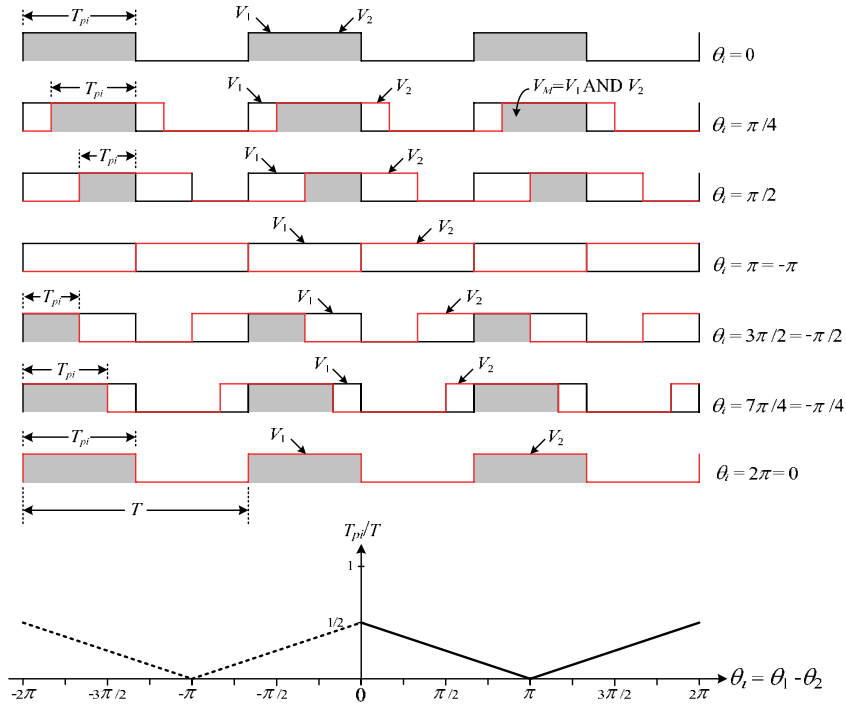
$$T_{new} = (m-1)T_1 = \left(\frac{T_1}{T_1 - T_2} - 1\right)T_1 \quad (7)$$

กำหนดให้  $f_{new} = 1/T_{new}$  คือความถี่ของการเปลี่ยนแปลงค่า  $T_{pi}/T$  ซึ่งจะได้

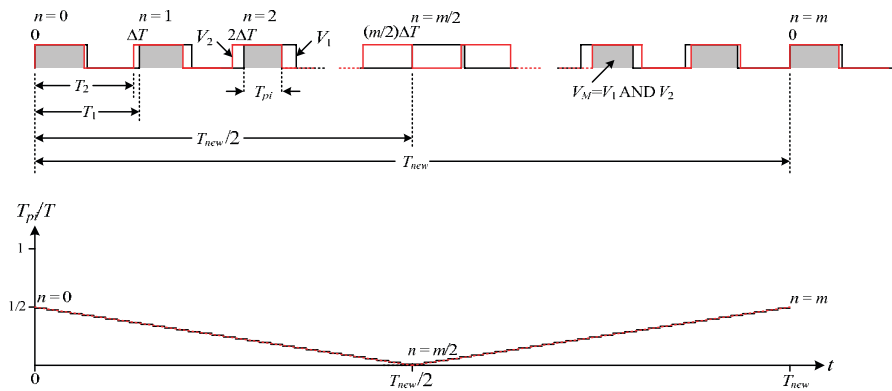
$$f_{new} = f_2 - f_1 \quad (8)$$



(ก) สัญลักษณ์



(ข) การทำงานกรณี  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุมเริ่มต้นแตกต่างกัน



(ค) การทำงานกรณี  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันแต่มีค่าความถี่แตกต่างกัน

รูปที่ 3 แอนด์เกต

จากสมการที่ (7) และสมการที่ (8) เมื่อกำหนดให้  $T_{new} \gg T_1$  และ  $T_1 \gg \Delta T$  จะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่างค่า  $T_{pi}/T$  กับค่าเวลา  $t$  ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง  $T_{new}$  ได้ดังนี้คือ

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{t}{T_{new}} & ; 0 < t < (T_{new}/2) \\ \frac{t}{T_{new}} - \frac{1}{2} & ; (T_{new}/2) < t < T_{new} \end{cases} \quad (9)$$

สำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $T_{pi}/T$  กับค่าผลต่างมุมเริ่มต้น  $\theta_i$  และค่าเวลา  $t$  อันเนื่องมาจากผลต่างค่าความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  ของวงจรตรรกะอีก 5 ชนิดที่เหลืือสามารถอาศัยหลักการเดียวกันกับวิเคราะห์การทำงานของวงจรแอนด์เกตทั้งนี้สามารถแยกออกได้เป็นสองกรณีเช่นเดียวกัน โดยกรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันแต่มีค่าความถี่แตกต่างกันนั้นวงจรตรรกะทุกชนิดที่เหลืือจะให้ความถี่ ( $f_{new}$ ) ในการเปลี่ยนแปลงค่า  $T_{pi}/T$  เท่ากับ  $|f_2 - f_1|$  (เมื่อ  $f_1$  และ  $f_2 \gg |f_2 - f_1|$ ) โดยที่ค่าขนาดของ  $T_{pi}/T$  ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าผลต่างมุมเริ่มต้น  $\theta_i$  และค่าเวลา  $t$  สามารถแยกเขียนได้เป็น

#### แนนด์เกต

กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุมเริ่มต้นแตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\theta_i}{2\pi} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ \frac{3}{2} - \frac{\theta_i}{2\pi} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (10)$$

กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันแต่มีค่าความถี่แตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\theta_i}{2\pi} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ \frac{3}{2} - \frac{\theta_i}{2\pi} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

#### ออร์เกต

กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุมเริ่มต้นแตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{\theta_i}{2\pi} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ \frac{3}{2} - \frac{\theta_i}{2\pi} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (12)$$

กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันแต่มีค่าความถี่แตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{t}{T_{new}} & ; 0 < t < (T_{new}/2) \\ \frac{3}{2} - \frac{t}{T_{new}} & ; (T_{new}/2) < t < T_{new} \end{cases} \quad (13)$$

#### นอร์เกต

กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุมเริ่มต้นแตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{\theta_i}{2\pi} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ \frac{\theta_i}{2\pi} - \frac{1}{2} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (14)$$

กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันแต่มีค่าความถี่แตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{t}{T_{new}} & ; 0 < t < (T_{new}/2) \\ \frac{t}{T_{new}} - \frac{1}{2} & ; (T_{new}/2) < t < T_{new} \end{cases} \quad (15)$$

#### เอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต

กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุมเริ่มต้นแตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{\theta_i}{\pi} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ 2 - \frac{\theta_i}{\pi} & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (16)$$

กรณีที่มีสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุ่มเริ่มต้นเท่ากัน แต่มีค่าความถี่แตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} \frac{2t}{T_{new}} & ; 0 < t < (T_{new}/2) \\ 2 - \frac{2t}{T_{new}} & ; (T_{new}/2) < t < T_{new} \end{cases} \quad (17)$$

#### เอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกต

กรณีที่มีสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่าความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุ่มเริ่มต้นแตกต่างกัน

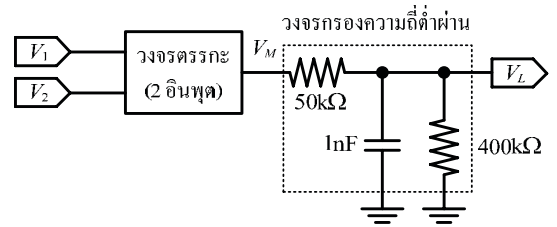
$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} 1 - \frac{\theta_i}{\pi} & ; 0 < \theta_i < \pi \\ \frac{\theta_i}{\pi} - 1 & ; \pi < \theta_i < 2\pi \end{cases} \quad (18)$$

กรณีที่มีสัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุ่มเริ่มต้นเท่ากัน แต่มีค่าความถี่แตกต่างกัน

$$\frac{T_{pi}}{T} = \begin{cases} 1 - \frac{2t}{T_{new}} & ; 0 < t < (T_{new}/2) \\ \frac{2t}{T_{new}} - 1 & ; (T_{new}/2) < t < T_{new} \end{cases} \quad (19)$$

#### 4. การเลียนแบบและผลการเลียนแบบการทำงานของวงจร

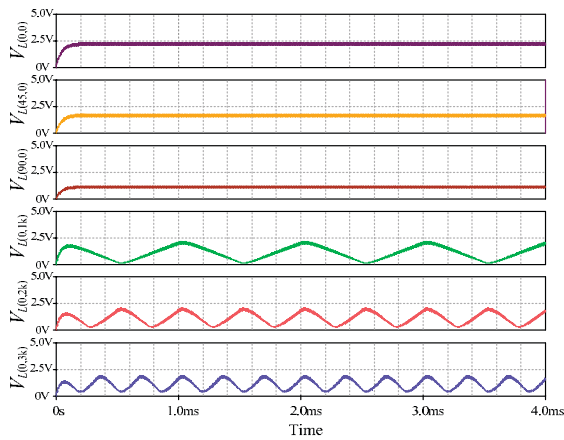
เพื่อเป็นการทดสอบแนวคิดในการประยุกต์ใช้วงจรตรรกะแบบพื้นฐานต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสำหรับทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่ในบทความนี้ได้ใช้โปรแกรม PSPICE เลียนแบบการทำงานของวงจรดังแสดงในรูปที่ 4 โดยวงจรตรรกะ 6 ชนิดที่ใช้ ได้แก่ CD4081B (แอนด์เกต) CD4011B (แนนด์เกต) CD4071B (ออร์เกต) CD4001B (นอร์เกต) CD4030B (เอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต) และ CD4077B (เอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกต) กำหนดให้ค่าความถี่ของสัญญาณ  $V_2$  มีค่าคงที่เท่ากับ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และทำการแปรค่ามุ่มเริ่มต้นและความถี่ของสัญญาณ  $V_1$  โดยจะได้ตัวอย่างผลการการทำงานของวงจรดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6



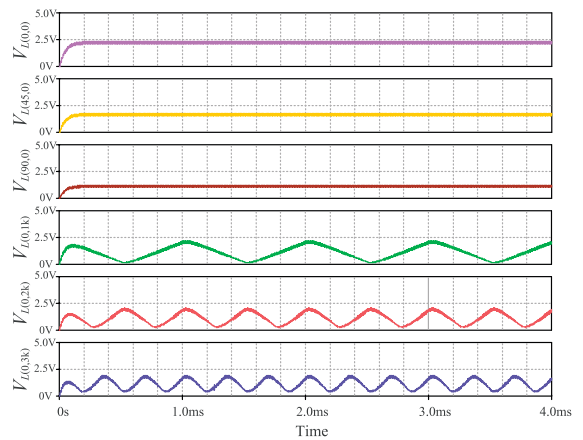
รูปที่ 4 การเลียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE

พิจารณารูปที่ 5 สัญญาณ  $V_{L(0,0)}$   $V_{L(45,0)}$   $V_{L(90,0)}$   $V_{L(0,1k)}$   $V_{L(0,2k)}$  และ  $V_{L(0,3k)}$  คือสัญญาณที่ได้จากการนำสัญญาณเอาต์พุตของวงจรตรรกะแต่ละชนิด ( $V_M$ ) ไปผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านโดย  $V_{L(0,0)}$   $V_{L(45,0)}$  และ  $V_{L(90,0)}$  เป็นผลการทำงานเพื่อใช้เปรียบเทียบกรณีที่กำหนดให้  $V_1$  และ  $V_2$  มีความถี่เท่ากัน (เท่ากับ 100 กิโลเฮิร์ตซ์) แต่มีมุ่มเริ่มต้นแตกต่างกันเท่ากับ 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา ตามลำดับ ในขณะที่สัญญาณ  $V_{L(0,1k)}$   $V_{L(0,2k)}$  และ  $V_{L(0,3k)}$  เป็นผลการทำงานเพื่อใช้เปรียบเทียบกรณีที่กำหนดให้สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุ่มเริ่มต้นเท่ากัน สัญญาณ  $V_2$  มีค่าความถี่คงที่เท่ากับ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ แต่สัญญาณ  $V_1$  แปรค่าความถี่จาก 100 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 103 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ

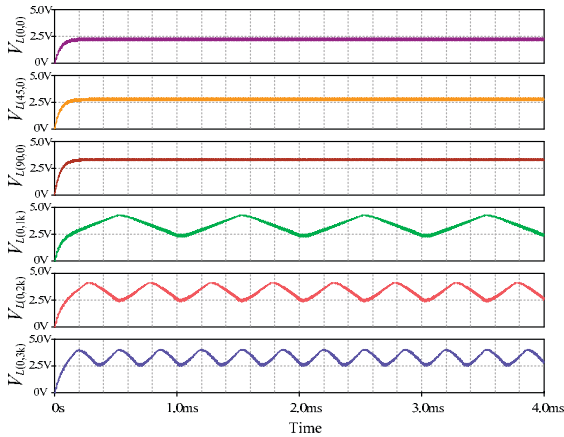
จากตัวอย่างผลการการทำงานของวงจรตามที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีความถี่เท่ากันแต่มีค่ามุ่มเริ่มต้นแตกต่างกัน สัญญาณ  $V_L$  ซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟตรงที่มีขนาดขึ้นอยู่กับค่าผลต่างมุ่มเริ่มต้นของสัญญาณทั้งสอง สำหรับการใช่วงจรตรรกะชนิดแอนด์เกตและนอร์เกตจะให้ผลการทำงานที่มีลักษณะเหมือนกันคือเมื่อผลต่างมุ่มของสัญญาณอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 90 องศา ระดับของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าลดลง ในขณะที่การใช่วงจรตรรกะชนิดแอนด์เกตจะให้ผลการทำงานเหมือนกับการใช้นอร์เกตนั้นคือระดับของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาผลการใช่วงจรตรรกะชนิดเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต และ



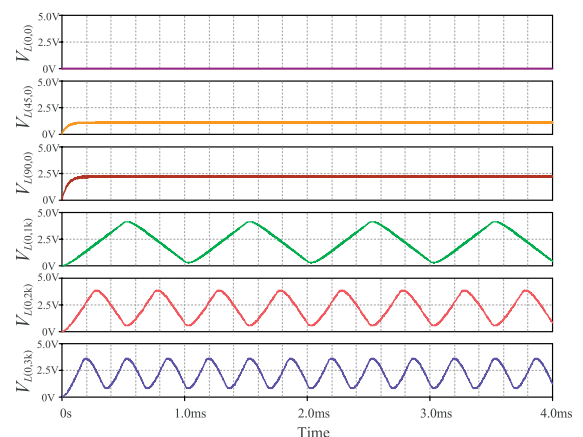
(ก) แอนด์เกต



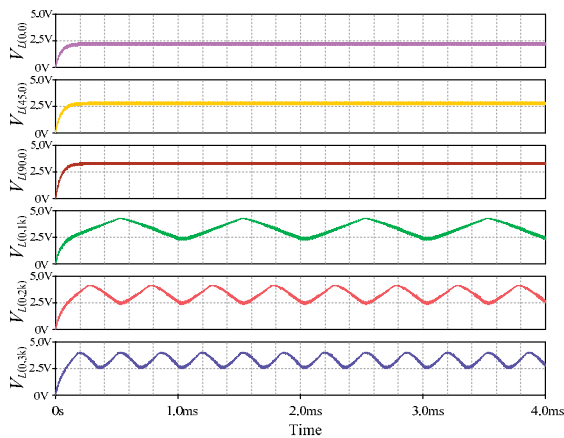
(ง) นอร์เกต



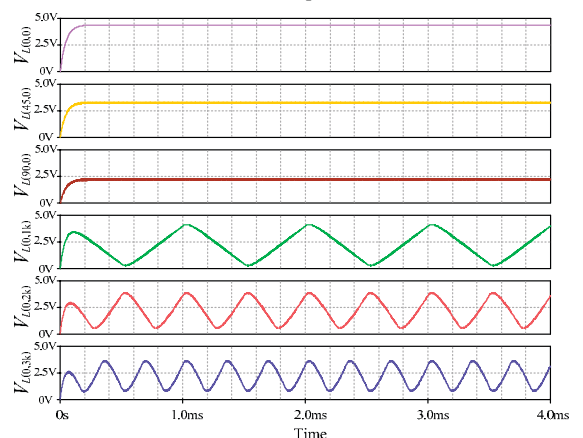
(ข) แอนด์เกต



(จ) เอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต

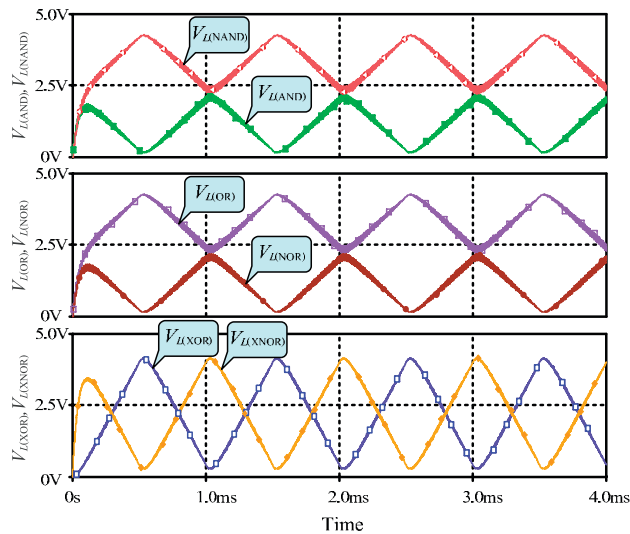


(ค) ออร์เกต



(ฉ) เอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต

รูปที่ 5 ผลการเขียนแบบการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE สำหรับวงจรตรรกะแต่ละชนิด



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลการทำงานของวงจรตรรกะแต่ละชนิด

เอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกต จะให้ผลการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณเอาต์พุตมากกว่าการใช้วงจรตรรกะทั้งสี่ชนิดก่อนหน้านี้ โดยเมื่อผลต่างมุมของสัญญาณอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 90 องศา การใช้เอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกตจะมีผลทำให้ระดับของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้เอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกตจะมีผลทำให้ระดับของสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าลดลง กรณีที่สัญญาณ  $V_1$  และ  $V_2$  มีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากันแต่มีความถี่แตกต่างกัน โดยจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีความถี่ประมาณเท่ากับผลต่างความถี่ของ  $V_1$  และ  $V_2$  เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (8)

สำหรับรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างผลการทำงานในกรณีที่สัญญาณอินพุตของวงจรตรรกะแต่ละชนิดมีค่าความถี่แตกต่างกันเท่ากับ 1 กิโลเฮิรตซ์ เหมือนกัน (มุมเริ่มต้นเท่ากัน) โดยที่  $V_{L(AND)}$   $V_{L(NAND)}$   $V_{L(OR)}$   $V_{L(NOR)}$   $V_{L(XOR)}$  และ  $V_{L(XNOR)}$  คือสัญญาณเอาต์พุต ( $V_L$ ) ของวงจรในรูปที่ 4 เมื่อวงจรตรรกะที่ใช้คือแอนด์เกต แนนด์เกต ออร์เกต นอร์เกต เอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต และเอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกต ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุต

ของวงจรทุกแบบจะมีค่าความถี่เท่ากับ 1 กิโลเฮิรตซ์ สังเกตสัญญาณ  $V_{L(AND)}$  และ  $V_{L(NOR)}$  จะมีลักษณะที่คล้ายกันโดยมีค่าเฉลี่ยของสัญญาณต่ำกว่า 2.5 โวลต์ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 0 ถึง 2.5 โวลต์ ทั้งนี้สอดคล้องกับสมการที่ (9) และสมการที่ (15) สังเกตสัญญาณ  $V_{L(NAND)}$  และ  $V_{L(OR)}$  จะมีลักษณะที่คล้ายกันโดยมีค่าเฉลี่ยของสัญญาณสูงกว่า 2.5 โวลต์ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอยู่ในช่วงประมาณ 2.5 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ ทั้งนี้สอดคล้องกับสมการที่ (11) และสมการที่ (13) สำหรับสัญญาณ  $V_{L(XOR)}$  และ  $V_{L(XNOR)}$  จะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 โวลต์ แต่สัญญาณทั้งสองจะมีลักษณะที่ตรงข้ามกัน ทั้งนี้สอดคล้องกับสมการที่ (17) และสมการที่ (19) ตามลำดับ

จากบล็อกไดอะแกรมของวงจรดังแสดงในรูปที่ 1 การขยายสัญญาณที่ได้จากวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่เพื่อใช้สำหรับขับลำโพงนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วงจรขยายแรงดันโดยทั่วไป การใช้วงจรตามแรงดันหรือบัฟเฟอร์ หรือวิธีการใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดัน [10] เป็นต้น สำหรับวิธีการสุดท้ายนั้นเป็นการ

เปลี่ยนรูปร่างของสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาดประมาณเท่ากับแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร โดยที่ความถี่ยังคงมีค่าเท่าเดิม ข้อสังเกตประการหนึ่งคือการใช้วงจรตามแรงดันซึ่งอาจสร้างโดยการใช้ทรานซิสเตอร์เพียงตัวเดียวได้ แต่ขนาดการสวิงของสัญญาณแรงดันที่จะนำไปใช้ในการขับลำโพงจะมีช่วงที่แคบกว่าวิธีการใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดัน นอกจากนี้แม้ว่าในกรณีที่ยังไม่มีโลหะอยู่ใกล้ทรานซิสเตอร์ก็จะนำกระแสอยู่ตลอดเวลาซึ่งเป็นคุณสมบัติของวงจรขยายคลาสเอโดยทั่วไป ในขณะที่วิธีการใช้วงจรเปรียบเทียบแรงดันมีโอกาสนี้จะไม่มีการจ่ายกระแสให้กับลำโพงเมื่อยังไม่มีโลหะอยู่ใกล้ขั้วหลอดค้นหา การกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงเพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบแรงดันในวิธีการที่สามนั้นสามารถพิจารณาได้จากค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $V_L$  ที่เกิดจากการเลือกใช้วงจรตรรกะแต่ละชนิดดังแสดงในรูปที่ 6

## 5. สรุป

สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรตรรกะพื้นฐานทั้ง 6 ชนิด จะเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีค่าตัวชี้ไขเคลขึ้นอยู่กับค่าผลต่างมุมเริ่มต้นและค่าผลต่างความถี่ของสัญญาณอินพุตทั้งสอง เมื่ออาศัยหลักการกระจายอนุกรมฟูเรียร์ สำหรับสัญญาณดังกล่าวจะได้ความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ (4) โดยสมการที่ได้สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงและส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำ สำหรับส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่สูงนั้นสามารถกำจัดออกไปได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ส่วนที่เป็นองค์ประกอบความถี่ต่ำจะขึ้นอยู่กับค่าตัวชี้ไขเคลของสัญญาณ อาศัยสมบัติการทำงานของวงจรตรรกะแต่ละชนิด ดังแสดงด้วยตัวอย่างของแอนด์เกตในรูปที่ 3 จะสามารถสังเคราะห์สมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์โดยประมาณระหว่างค่าตัวชี้ไขเคล ( $T_{pr}/T$ ) กับค่าผลต่างมุมและค่าผลต่างความถี่ของสัญญาณอินพุตสำหรับวงจรตรรกะแต่ละชนิดดังสมการที่ (5) ถึงสมการที่ (15) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ

การทำงานดังแสดงในรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 แม้ว่าขนาดของสัญญาณต่างๆ ดังกล่าวจะมีขนาดเล็กกว่าค่าตามสมการ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการทำงานของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้ สำหรับการต่อวงจรในทางปฏิบัตินั้นโดยทั่วไปค่ามุมเริ่มต้นของสัญญาณอินพุตทั้งสองจะมีค่าไม่เท่ากันซึ่งจะมีผลทำให้ค่ามุมเริ่มต้นของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมตามสมการที่ (9) ถึงสมการที่ (19) นั้นเลื่อนไป แต่อย่างไรก็ตามการตรวจวัดสัญญาณโดยใช้ออสซิลโลสโคปส่วนใหญ่จะไม่สามารถมองรูปสัญญาณในช่วงเวลาเริ่มต้นได้ทัน ดังนั้นสิ่งที่ควรคำนึงถึงสำหรับการนำหลักการดังกล่าวนี้ไปประยุกต์ใช้คือค่าเฉลี่ยของสัญญาณและช่วงการสวิงของสัญญาณจากการใช้วงจรตรรกะแต่ละชนิด ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้คือ การใช้แอนด์เกตและนอร์เกตซึ่งจะให้สัญญาณที่มีค่าเฉลี่ยและการสวิงอยู่ในช่วงครึ่งล่างของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร การใช้แอนด์เกตและออร์เกตจะให้สัญญาณที่มีค่าเฉลี่ยและการสวิงของสัญญาณอยู่ในช่วงครึ่งบนของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร และกลุ่มสุดท้ายคือการใช้เอ็กซ์คลูซีฟออร์เกตและเอ็กซ์คลูซีฟนอร์เกตซึ่งจะให้สัญญาณที่มีช่วงการสวิงทั้งครึ่งบนและครึ่งล่างของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ผู้เขียนหวังว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับนักออกแบบวงจร ที่ต้องการพัฒนาออกแบบวงจรตรวจวัดผลต่างความถี่ของสัญญาณเพื่อการออกแบบสร้างเครื่องตรวจจับโลหะแบบออสซิลเลเตอร์ความถี่บีตส์ที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งผู้สนใจจะนำหลักการต่างๆ ดังกล่าวนี้อไปประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนาออกแบบวงจรอื่นๆ ต่อไป

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้ให้ทุนและเครื่องมือสนับสนุนในการทำวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Vuille, R. A. Serway, and J. S. Faughn, *College Physics*, 8<sup>th</sup> ed. Brooks/Cole CENGAGE Learning,



- 2009, pp. 484-486.
- [2] J. D. Cutnell and K. W. Johnson. *Physics*, 6<sup>th</sup> ed, John Wiley & Sons, Inc., 2004, pp. 492-494.
- [3] R. A. Serway and J. W. Jewett, Jr. *Physics for Science and Engineers*, 6<sup>th</sup> Edition, THOMSON Brooks/Cole, 2004, pp. 544, 564-565.
- [4] C. W. Moreland. (2010, April 1). *BFO Theory* [Online]. Available: <http://www.geotech1.com/pages/metdet/info/bfotheory/bfo.pdf>
- [5] C. D. Rakes, "Basic Circuitry Metal Detection," *Poptronics*, pp. 59-62, Aug. 2001,
- [6] G. Cheeseman. (2010, April 1). *Metal Detectors (Part 1)*, *Electronics and Beyond*, May 1999 [Online]. Available: [http://www.geotech1.com/pages/metdet/projects/cheeseman\\_cheeseman\\_md1\\_150.pdf](http://www.geotech1.com/pages/metdet/projects/cheeseman_cheeseman_md1_150.pdf)
- [7] Wikipedia. (2010, April 1). *Build your own metal detector* [Online]. Available: <http://www.easytreasure.co.uk/bfo.htm>.
- [8] P. Wait. "Simple, Sensitive Metal Detector," *ETI561: How To Build Gold & Treasure Detectors*, 1981, pp. 22-27.
- [9] FreeCircuitDiagram. (2010, April 1). *A Simple Metal Detector Circuit Using Beat Frequency Oscillator (BFO)* [Online]. Available: <http://freecircuitdiagram.com/2008/11/24/simple-metal-detector-circuit-beat-frequency-oscillator-bfo/>.
- [10] T. L. Floyd, *Electronic Devices : electron flow version*, 8<sup>th</sup> ed. Ohio: PEARSON Prentice Hall, 2008, pp. 256-289, 657-667.