

### บทที่ 3

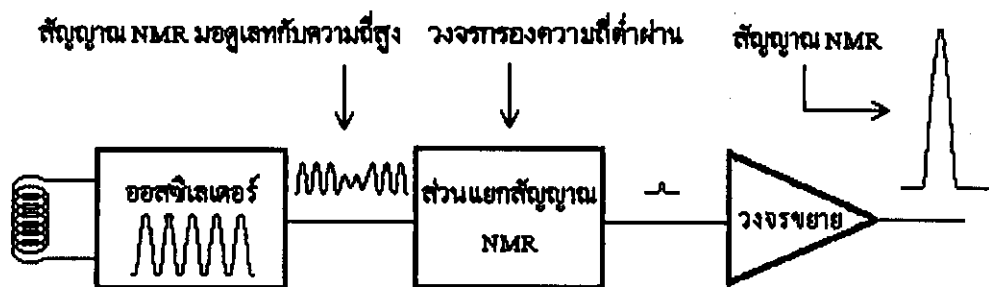
#### การออกแบบวงจร

วงจรเครื่องมือเพื่อวัดปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพด โดยวิธีนิวเคลียร์แกมมาเนติกเรโซแนนซ์ที่ทำการออกแบบหรือปรับแต่งใหม่มีดังนี้

- |   |            |
|---|------------|
| 1. วงจร โรบินสันคิตเตอร์                        | มีอยู่แล้ว |
| 2. วงจรเครื่องนับความถี่สูงย่านวิทยุ 1 - 20 MHz | สร้างขึ้น  |
| 3. แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแม่เหล็กไฟฟ้า               | สร้างขึ้น  |
| 4. แม่เหล็กไฟฟ้า                                | มีอยู่แล้ว |
| 5. วงจรมอดูเลทสนามแม่เหล็ก                      | สร้างขึ้น  |
| 6. วงจรขยายสัญญาณ NMR                           | สร้างขึ้น  |
| 7. วงจรแปลงสัญญาณ NMR เป็นปริมาณน้ำมันข้าวโพด   | สร้างขึ้น  |
| 8. วงจรไมโครคอมพิวเตอร์                         | สร้างขึ้น  |

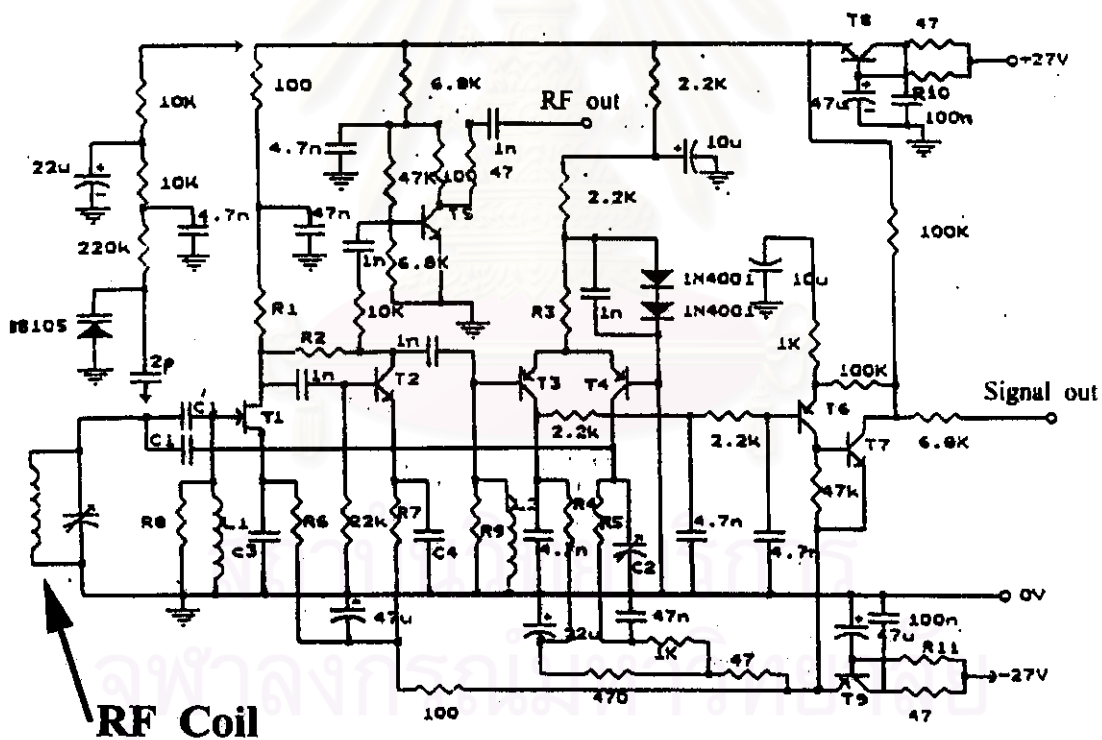
#### 3.1 วงจรโรบินสันคิตเตอร์

วงจรโรบินสันคิตเตอร์เป็นวงจรที่สร้างความถี่สูงย่านอาร์เอฟ และวงจรตรวจจับการดูดกลืนพลังงานของสารตัวอย่างเนื่องจากการเรโซแนนซ์ อยู่ในวงจรเดียวกัน วงจรนี้จะทำการแยกเฉพาะพิกสัญญาณ NMR ออกมาจากความถี่สูงโดยแปลงพิกสัญญาณให้ดูได้ทางจอออกสซิโลสโคป เขียนรูปแสดงส่วนต่างๆ ของวงจร ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนต่างๆ ของวงจรโรบินสันดีเทคเตอร์อย่างคร่าวๆ

วงจรโรบินสันดีเทคเตอร์ได้รับการออกแบบอย่างสมบูรณ์ดังรูปที่ 3.2

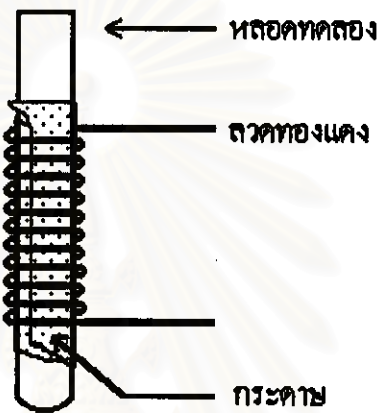


รูปที่ 3.2 แสดงวงจร โรบินสันดีเทคเตอร์ที่ได้รับการออกแบบอย่างสมบูรณ์

วงจรนี้ได้รับการพัฒนาปรับเปลี่ยนทรานซิสเตอร์เพื่อให้หาซื้อได้ง่ายในประเทศไทย

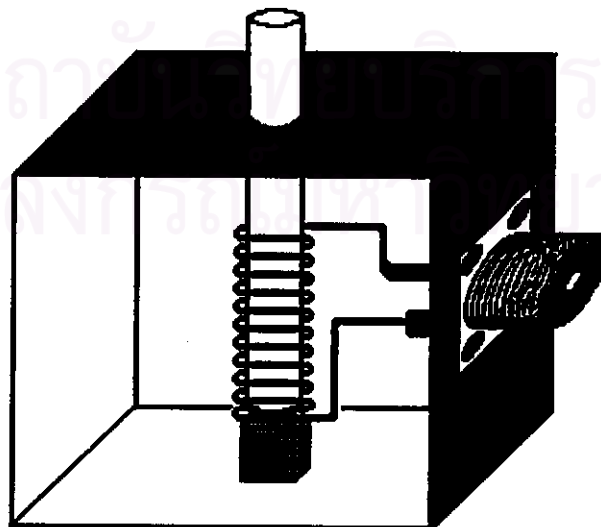
(สุรศักดิ์ เชียงกา, 2536)

สำหรับการพันขดลวดทองแดงอาร์เอฟทำได้โดยการนำหลอดทดลองขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร หุ้มด้วยกระดาษบางๆ 1 รอบแล้วนำเส้นลวดทองแดงอบน้ำยาเบอร์ 20 เส้นผ่านศูนย์กลาง 34/1000 นิ้ว พันรอบๆ จำนวน 10 ถึง 15 รอบ โดยเว้นระยะห่างระหว่างขดลวดเล็กน้อยดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การพันขดลวดทองแดงอาร์เอฟ

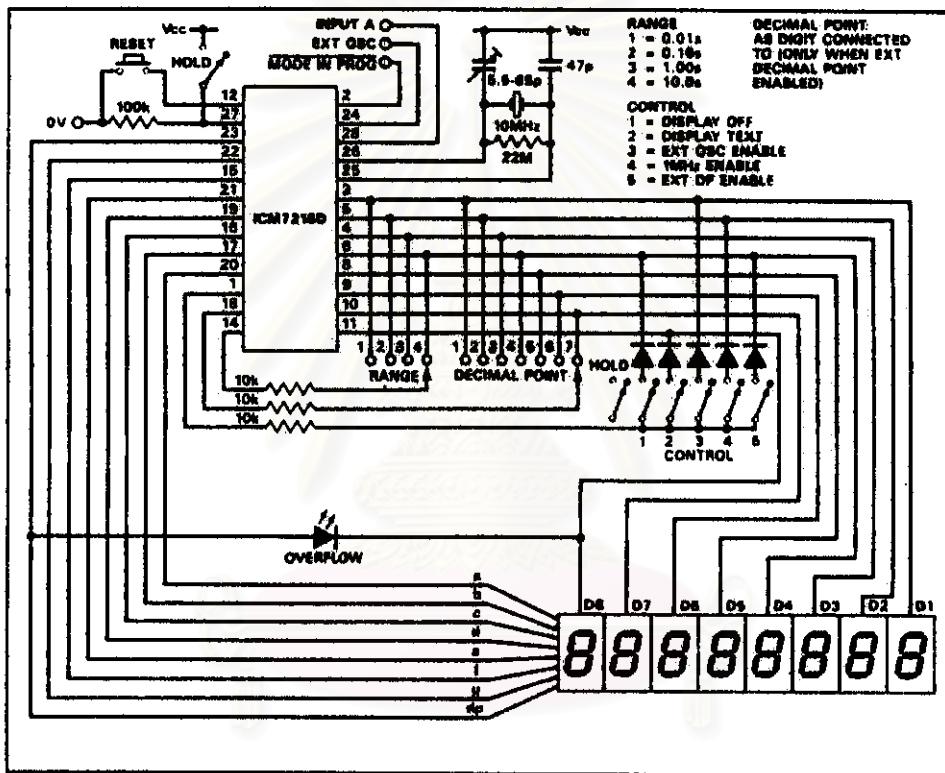
จากนั้นใช้ อาติลิก เชื่อมขดลวดทองแดงให้อยู่ตัวเพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดทองแดงเกิดการเปลี่ยนแปลง แล้วนำใส่ในกล่องทองแดงที่เจาะรูด้านบนเพื่อใส่หลอดทดลองโดยวางขดลวดทองแดงให้ตรงรูที่เจาะไว้แล้วเชื่อมขั้วทองแดงทั้งสองเข้าแฉีกเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โพรบอาร์เอฟอย่างสมบูรณ์

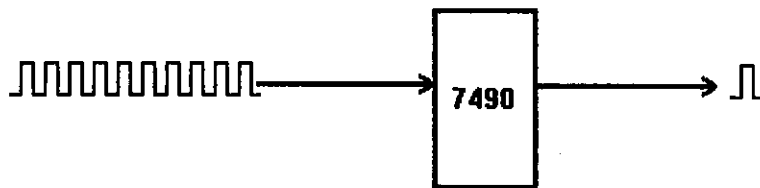
### 3.2 วงจรนับความถี่สูงย่านวิทยุ 1 - 20 MHz

วงจรมีใช้ไอซีเบอร์ ICL7216D เป็นไอซีเดียวที่สามารถนับความถี่ได้สูงสุด 10 MHz แสดงผลได้ 8 หลัก โดยใช้จอ LED 7 segment ดังรูปที่ 3.5 อย่างไรก็ตามถ้าหากความถี่ที่ต้อง



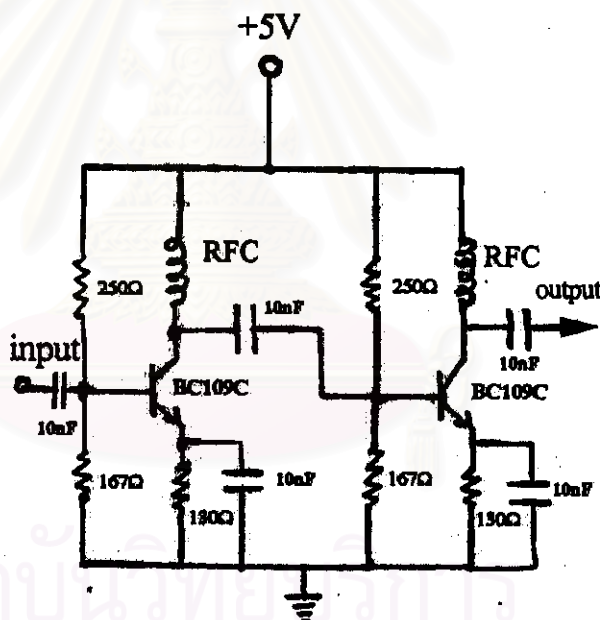
รูปที่ 3.5 แสดงการต่อวงจรประยุกต์ของไอซีเบอร์ ICL7216D เพื่อเป็นวงจรมับความถี่

การวัดลง 10 เท่าโดยใช้ไอซีหารความถี่ ก็จะสามารถนับความถี่ที่ต้องการวัดซึ่งมากกว่า 10 MHz ได้ สำหรับวงจรมหารความถี่นั้นจะใช้ไอซี TTL เบอร์ 7490 ซึ่งเป็นไอซีหาร 10 ที่สามารถทำงานที่ความถี่อินพุตสูงสุดได้ถึง 30 MHz นำมาออกแบบ (ถ้าใช้เบอร์ 74LS90 จะได้ความถี่อินพุตถึง 50 MHz) เนื่องจากไอซี TTL ซึ่งเป็นไอซีดิจิทัลนั้นความต่างศักย์อินพุตสำหรับระดับที่เป็น "1" ต้องมีความต่างศักย์ต่ำสุด 2 โวลต์ แต่เนื่องจากความสูงของสัญญาณความถี่



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรหารสิบ

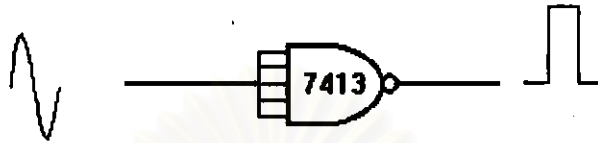
จากโรบิ้นตันออกสซิทเลเตอร์มีขนาดเพียง 0.2 โวลต์ จึงต้องทำการขยายสัญญาณให้อยู่ในระดับที่นำไปหารความถี่ได้ จึงได้ออกแบบวงจรขยายดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรขยายแบบแคคเคดโดยใช้ทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 3.7 เป็นวงจรขยายแบบแคคเคด (Cascade) ซึ่งเป็นวงจรขยายสองภาคต่อกัน โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BC109C ทรานซิสเตอร์เบอร์นี้ทำงานได้จนถึงความถี่ 30 MHz ควรเลือกทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราขยายกระแสไม่ต่ำกว่า 200 เพราะจะมีสมบัติทางความถี่สูงดีกว่า ทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราขยายกระแสต่ำ เมื่อขยายสัญญาณความถี่แล้วจะนำสัญญาณเข้าไอซีเบอร์

74LS13 เป็น NAND gate แบบขมิตริกเกอร์ เพื่อสร้างพัลส์ที่มีช่วงเวลาดำขึ้น (rise time) น้อยกว่า 10 นาโนวินาที (ns) ทำให้วงจรหารความถี่ทำงานได้แน่นอนขึ้น ดังรูปที่ 3.8

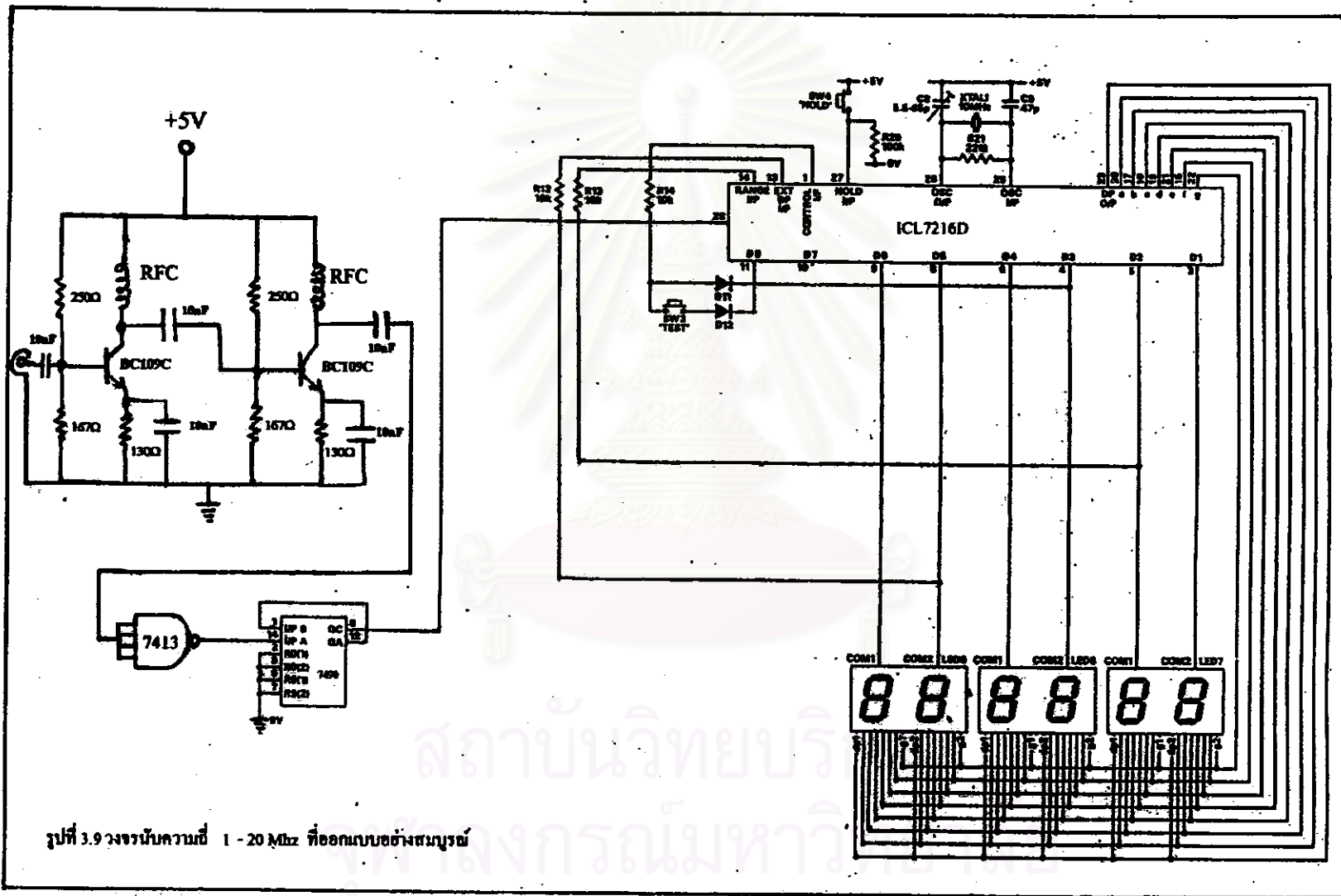


รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสร้างพัลส์รูปสี่เหลี่ยมจากคลื่นรูป sine โดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS13

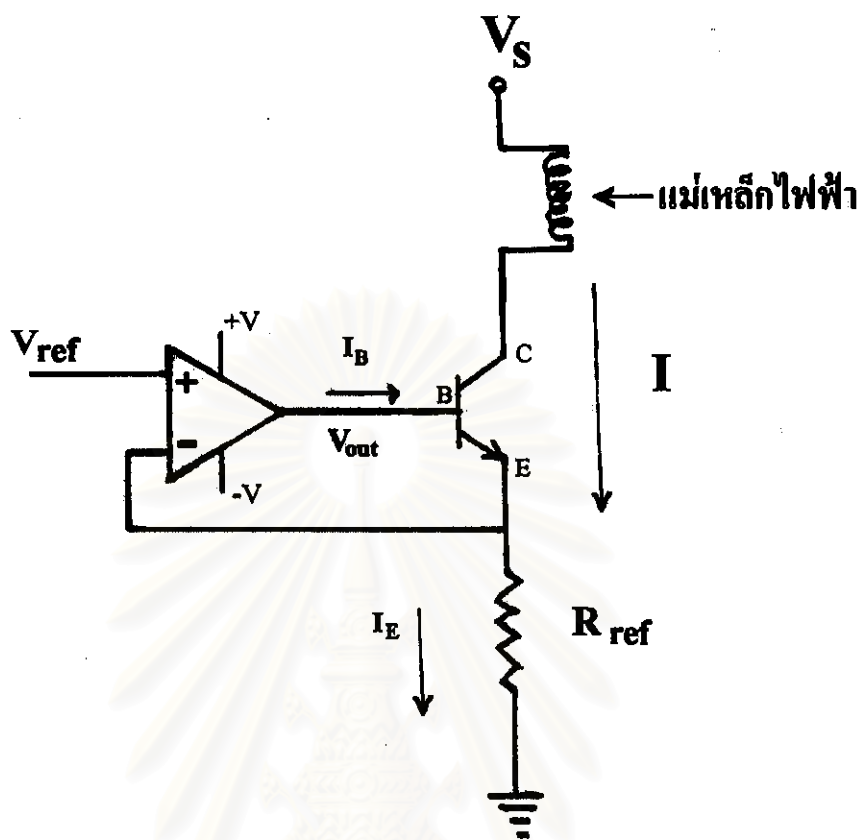
จากวงจรในรูป 3.5 , 3.6 , 3.7 และ 3.8 รวมเป็นวงจรสมบูรณ์สำหรับวงจรนับความถี่ 10 - 20 MHz ได้ดังรูปที่ 3.9

### 3.3 แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแม่เหล็กไฟฟ้า

ความเข้มและความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นกับกระแสที่ไหลผ่านแม่เหล็ก สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบอย่างดี ถ้ากระแสไหลผ่านแม่เหล็กไฟฟ้ามากความเข้มของสนามแม่เหล็กก็สูง ส่วนความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กนั้นขึ้นกับความเรียบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ถ้ากระแสที่ไหลผ่านแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเรียบมากก็จะมีคามสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กไปกับเวลาสูง ซึ่งทั้งความเข้มและความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับเครื่องมือนี้เพราะสนามแม่เหล็กเป็นเงื่อนไขสำคัญของการเกิดเรโซแนนซ์ จึงทำการออกแบบวงจรจ่ายกระแสคงที่โดยใช้โวลเตจคงที่ควบคุมกระแสให้ไหลคงที่ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 วงจรนับความถี่ 1 - 20 Mhz ที่ออกแบบอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.10 วงจรจ่ายกระแสคงที่

จากรูปที่ 3.10 ความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน  $R_{ref}$  จะมีค่าเท่ากับความต่างศักย์เอาต์พุต ( $V_{out}$ ) ของออปแอมป์ หรือความต่างศักย์ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์เทียบกับกราวด์ และมีค่าเท่ากับความต่างศักย์อินพุตของออปแอมป์ ( $V_{ref}$ ) ถ้า  $V_{ref}$  คงที่ กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R_{ref}$  จะมีค่า ดังสมการที่ 3.1

$$I_E = I_B + I \quad (3.1)$$

แต่กระแส  $I_B$  มีค่าน้อยมากอยู่ในระดับไมโครแอมป์เมื่อเทียบกับ  $I$  จะได้ว่า

$$I_E \approx I \quad (3.2)$$



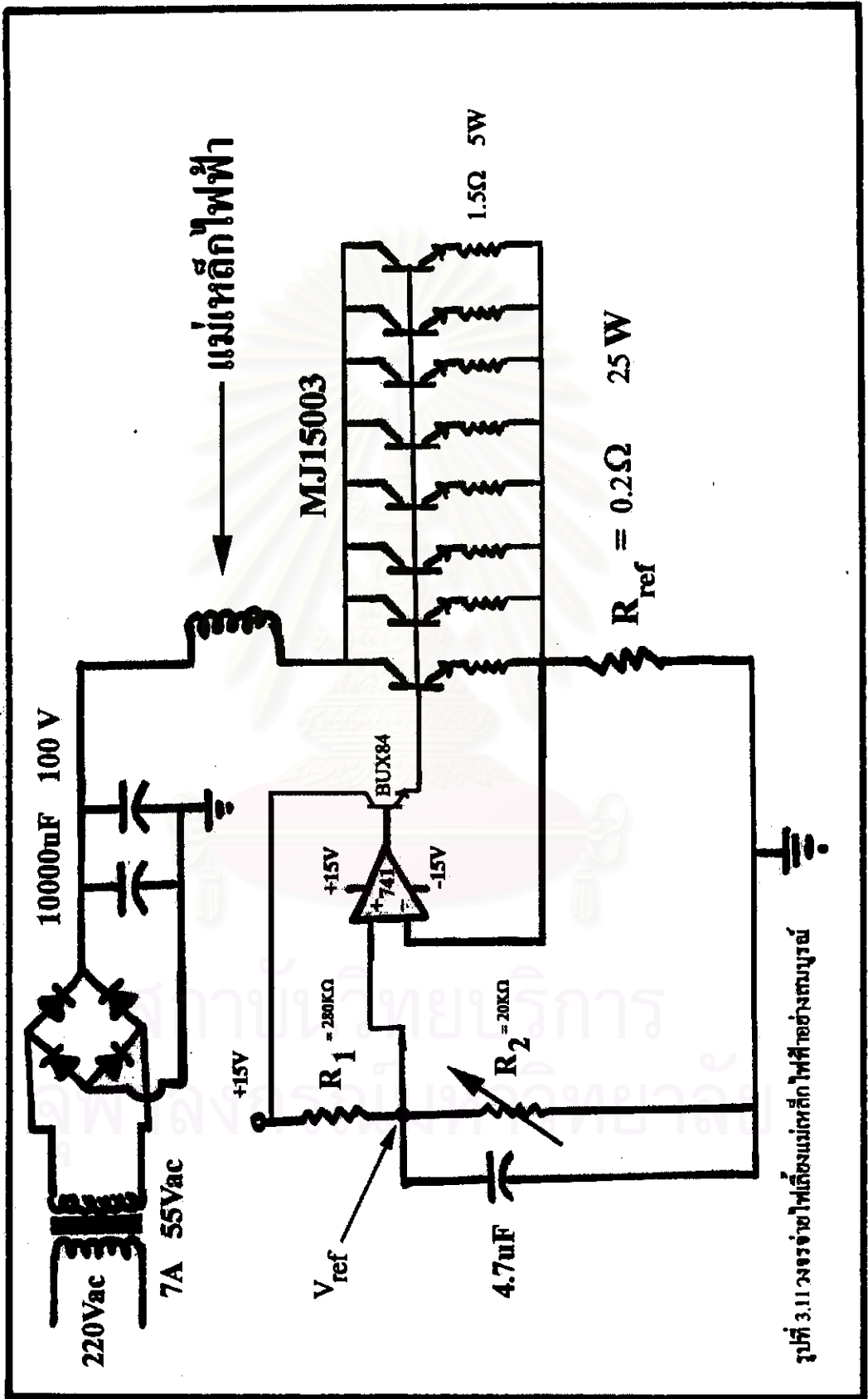
ดังนั้นเราสามารถควบคุมกระแสให้ไหลผ่านแม่เหล็กได้โดยกระแสที่ไหลผ่านแม่เหล็กมีค่าเป็น

$$I \approx \frac{V_{ref}}{R_{ref}} \quad (3.3)$$

กระแส  $I$  จะไหลผ่านแม่เหล็กไฟฟ้าตามเงื่อนไขของสมการที่ 3.3 ดังนั้นแหล่งจ่ายกระแสตรงจะต้องจ่ายกระแสได้มากกว่ากระแส  $I$  สูงสุดและความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายกระแส  $V_S$  จะต้องสูงพอที่จะบังคับให้กระแสไหลได้ตามเงื่อนไข ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม ถ้าแม่เหล็กมีความต้านทานเป็น  $R_{MAGNET}$  ทรานซิสเตอร์มีความต้านทานเป็น  $R_{TRANSISTOR}$  ดังนั้นถ้าจะให้กระแสไหลผ่านแม่เหล็กตามเงื่อนไขได้นั้นจะต้องเป็นดังสมการที่ 3.4

$$V_S > I(R_{MAGNET} + R_{TRANSISTOR} + R_{ref}) \quad (3.4)$$

เนื่องจากทรานซิสเตอร์เบอร์ที่ใช้ในรูปที่ 3.10 ตัวเดียวไม่สามารถดึงกระแสให้ไหลมากได้ตามต้องการ ดังนั้นต้องใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีอัตราขยายกระแสเท่าๆ กันนำมาขนานกันหลายๆ ตัว และนำความต้านทานค่าน้อยๆ ประมาณ 1.5 โอห์มมาต่อที่ขาอิมิตเตอร์ เพื่อเฉลี่ยกระแสให้ไหลผ่านแต่ละตัวเท่าๆ กัน ส่วนความต่างศักย์  $V_{ref}$  ที่ใช้ควบคุมกระแสได้จากวงจรหารความต่างศักย์ (Voltage divider) โดยการปรับค่าความต้านทานปรับค่าได้ เมื่อ  $V_{ref}$  เปลี่ยนไปกระแส  $I$  ที่ไหลผ่านแม่เหล็กก็จะเปลี่ยนไปตามสมการที่ 3.3 สำหรับวงจรไฟเลี้ยงแม่เหล็กไฟฟ้าออกแบบอย่างสมบูรณ์ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรจ่ายไฟเลี้ยงมอเตอร์ไฟฟ้าสามขั้ว

สำหรับสมบัติของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงแม่เหล็กไฟฟ้านั้นได้นำแอมป์มิเตอร์ทดสอบวัดกระแสหลายๆค่าปรากฏว่าได้ค่า  $\Delta I$  เท่ากับ 0.001 A ซึ่งเป็นค่าความเรียบของกระแสนั้นเอง

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกระแส  $I$  ที่ไหลผ่านแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็ก  $B$  ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นดังสมการ

$$B \propto I \quad (3.5a)$$

หรือ

$$B = MI \quad ; M \text{ คงที่}$$

ซึ่ง  $M$  เป็นสมบัติเฉพาะของแม่เหล็กไฟฟ้า ขึ้นกับ จำนวนรอบของขดลวดหรือแผ่นทองแดง แกนเหล็กที่ใช้ ระยะห่างของขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า และปริมาณอื่นๆ ทางกลศาสตร์ที่ประกอบขึ้นเป็น ตัวแม่เหล็กซึ่งมีผลกับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ในการทดลองสามารถหาค่า  $M$  โดยนำ เครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาวัดสนามแม่เหล็ก  $B$  ขณะทำการป้อนกระแสให้ไหลผ่านแม่เหล็ก อัตราส่วนระหว่างค่าสนามแม่เหล็ก  $B$  ต่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแม่เหล็ก คือ ค่า  $M$  ดังสมการ

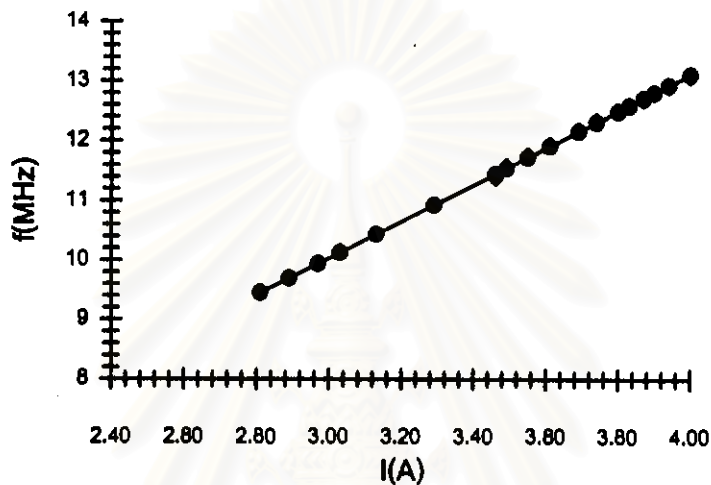
$$M = \frac{B}{I} \quad (3.5b)$$

จากสมการเราสามารถคำนวณหาค่ากระแส  $I$  ที่จะป้อนให้แม่เหล็กเพื่อที่จะได้สนามแม่เหล็ก  $B$  ตามต้องการ ในการทดลองหาค่า  $M$  ได้ประมาณ  $707 \times 10^{-4}$  tesla/ampere

อีกวิธีหนึ่งที่สามารถหาค่า  $M$  ก็จากการทดลองทางเอ็นเอ็มอาร์ จากสมการที่ 2.11 ในบทที่ 2 ถ้าแทนสมการที่ 3.5a จะได้

$$f = \gamma MI \quad (3.6a)$$

ทำการทดลองโดยวัดสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์หลายๆ ครั้งที่มีความถี่ต่างๆ กันก็จะได้กระแสที่ให้แม่เหล็กต่างกันแล้วนำความถี่  $f$  และ กระแส  $I$  มาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 3.11b ซึ่งได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.11b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกระแสที่ผ่านแม่เหล็กซึ่งทำให้เห็นสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ได้จากจอออสซิลอโคป

จากรูปที่ 3.11b ค่า  $\Delta f / \Delta I$  ก็คือความชันของกราฟนั่นเองซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.073 MHz/ampere ดังนั้นสามารถหาค่า  $M$  จากสมการที่ 3.6 คือ

$$M = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta I} = \frac{\text{slope}}{\gamma} \quad (3.6b)$$

$$= 722 \times 10^{-4} \text{ tesla/ampere}$$

สำหรับค่า  $M$  ที่ได้จากการทดลองโดยวิธีเอ็นเอ็มอาร์นั้นมีความผิดพลาดซึ่งเกิดจากสนามมอดูเลท โดยตำแหน่งที่เกิดสัญญาณจะเป็นดังสมการ

$$f = \gamma(B \pm B_s) \quad , \quad 0 \leq B_s \leq B_m \quad (3.6c)$$

โดย  $B_s$  คือสนามแม่เหล็กมอดูเลทที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์

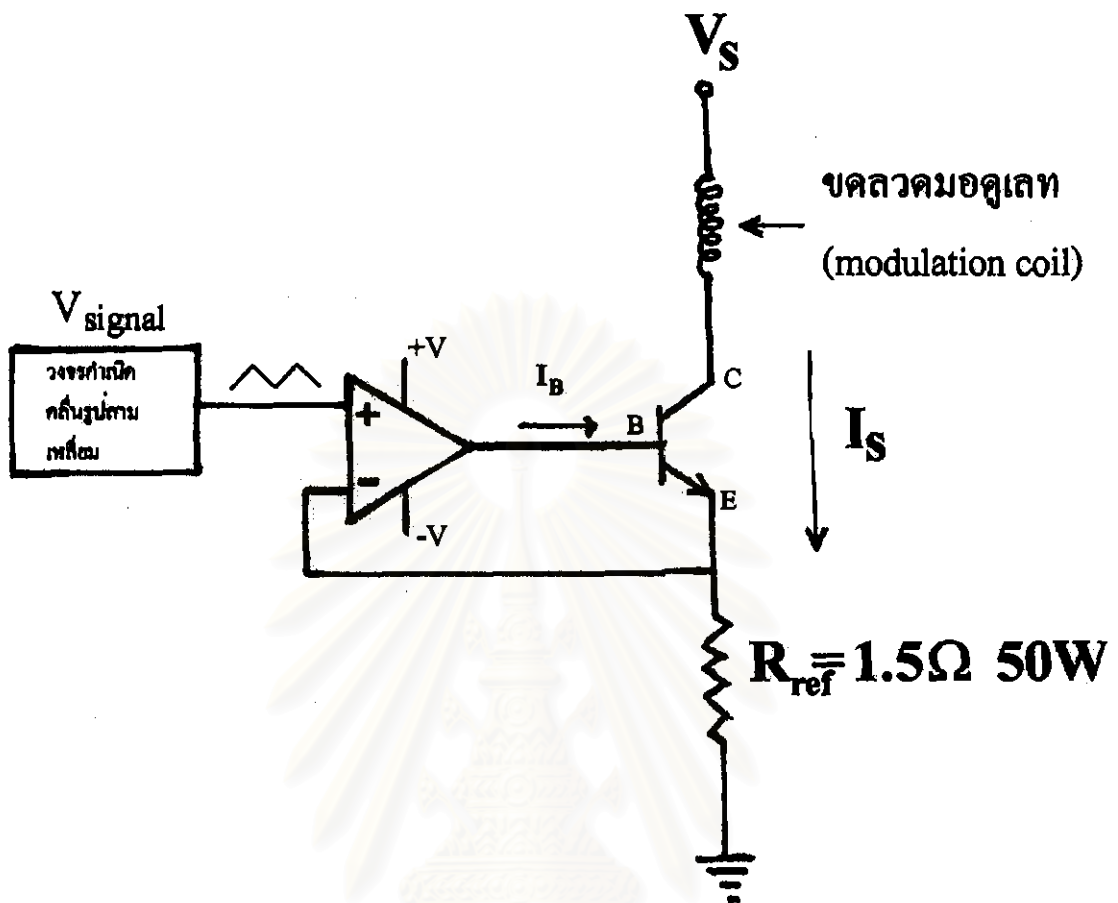
เนื่องจากในการทดลองได้ทำการปรับเลื่อนพิกัดสัญญาณให้อยู่ตรงขอบของการมอดูเลทซึ่งจะทำให้  $B_s$  มีค่าใกล้ศูนย์ จึงทำให้ค่า  $M$  ที่ได้มีความผิดพลาดน้อยมาก สังเกตได้จาก รูปที่ 3.11b ทำให้สามารถหาค่า  $M$  ได้ถูกต้องกว่า

### 3.4 แม่เหล็กไฟฟ้า

แม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้สร้างขึ้นโดยรองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย จากภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า (เจ้าคุณทหาร) ลาดกระบัง โดยวัสดุที่ใช้สร้างสามารถหาได้ในประเทศไทย เป็นแม่เหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขั้ว 4 นิ้วสามารถปรับความขนานของขั้วแม่เหล็กทั้งสองได้ ซึ่งใช้ในการทดลองทางเอ็นเอ็มอาร์ได้ดีมาก

### 3.5 วงจรมอดูเลทสนามแม่เหล็ก

เป็นวงจรที่ป้อนกระแสรูปสามเหลี่ยมให้ไหลผ่านขดลวดมอดูเลท ออกแบบโดยใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวตั้งกระแส และให้สัญญาณความต่างศักย์รูปสามเหลี่ยมไปควบคุมกระแสเพื่อให้กระแสไหลเป็นรูปสามเหลี่ยม มีลักษณะคล้ายกับวงจรจ่ายกระแสคงที่ต่างกันว่าสัญญาณความต่างศักย์ควบคุมกระแส ดังรูปที่ 3.12 เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดมอดูเลททำให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดเล็กไปมอดูเลทกับสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กไฟฟ้าตามที่เรากำลังต้องการ



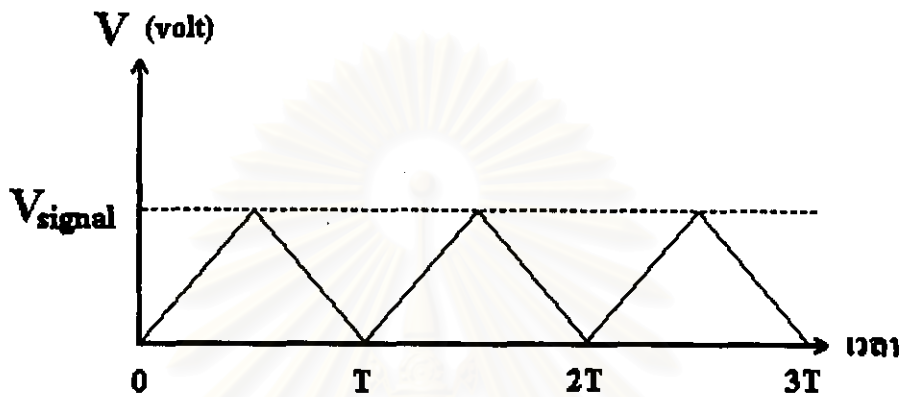
รูปที่ 3.12 วงจรจ่ายกระแสรูปสามเหลี่ยมให้กับขดลวดมอดูเลต

จากรูปที่ 3.12 สัญญาณความต่างศักย์คร่อมตัวต้านทาน  $R$  เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R$  เป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม ดังสมการที่ 3.7

$$I = \frac{V_{\text{signal}}}{R} \quad (3.7)$$

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R$  มีค่าเท่ากับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดมอดูเลต  $I$  รวมกับกระแสไบแอส  $I_B$  แต่เนื่องจากกระแสไบแอส  $I_B$  มีค่าน้อยมาก จึงประมาณให้กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน  $R$  มีค่าเท่ากับกระแสที่ผ่านขดลวดมอดูเลต  $I_S$  เราสามารถกำหนดกระแสให้ไหลผ่านขดลวดมอดูเลตเป็นรูปสามเหลี่ยมได้ตามเงื่อนไขสมการที่ 3.7 โดยการ

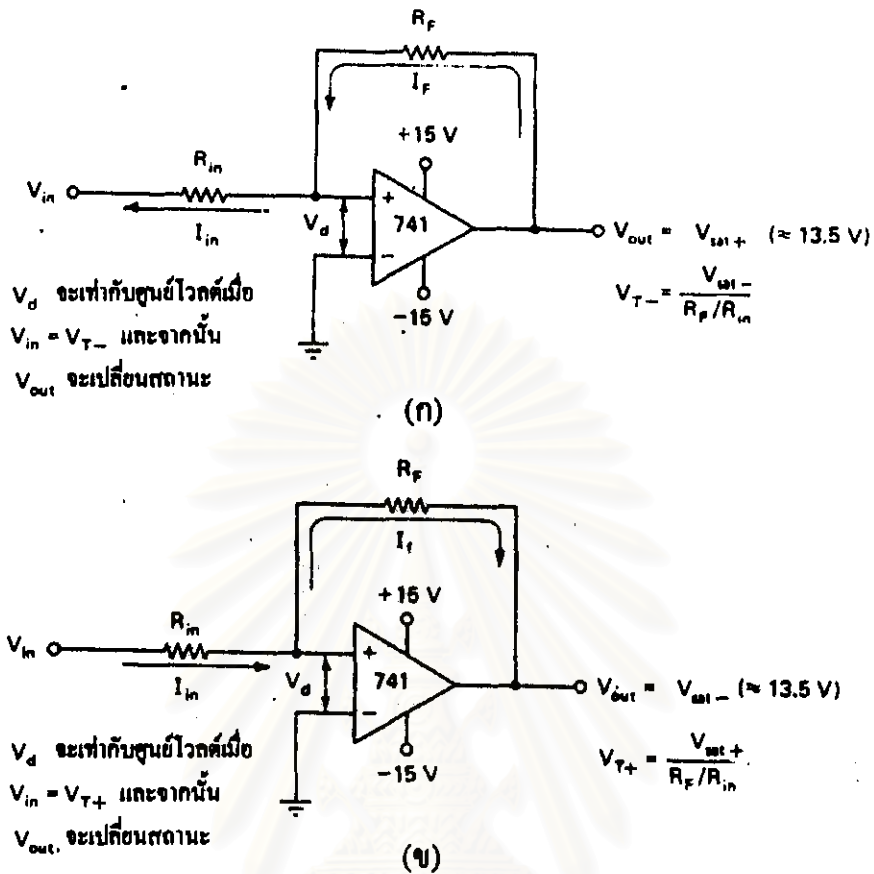
สร้างสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยมที่มีศักย์ต่ำสุด 0 โวลต์และสูงสุดขึ้นกับกระแสที่เราต้องการให้ไหลผ่านสูงสุดตามสมการที่ 3.7 ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงคลื่นรูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากวงจรกำเนิดคลื่นรูปสามเหลี่ยม

วงจรที่ออกแบบเพื่อสร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 3.13 ได้จากการรวมวงจรอินทิเกรเตอร์กับวงจรคอมพาราเรเตอร์ เพื่อความเข้าใจวงจรดีขึ้นจะอธิบายหลักการของออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับแบบบวก ดังรูปที่ 3.14 สัญญาณอินพุตของวงจรมีถูกป้อนเข้าที่ขั้วอินพุตบวก ทำให้อาต์พุตที่ได้มีเฟสตรงกับอินพุต ดังนั้นเมื่อป้อนสัญญาณจากเอาต์พุตกลับมายังอินพุตแรงดันรวมก็จะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงแรงดันอิ่มตัว  $V_{sat+}$  หรือ  $V_{sat-}$

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.14 แสดงการทำงานของออปแอมป์ที่มีการป้อนกลับแบบบวก  
 (ฟิสิกส์เซินเตอร์, (ม.ป.ป))

จากรูปเมื่อเริ่มจ่ายไฟแก่ให้กับออปแอมป์แรงดันค่าน้อยๆ ระหว่างขาอินพุต  $V_d$  หรือแรงดันออปเซ็ทจะเป็นผลให้เอาต์พุตอ้อมตัวทันที จากรูปที่ 3.14 (ก)  $V_{out}$  มีค่าเท่ากับ  $V_{sat+}$  และจะอยู่ในสถานะนั้นจนกระทั่งแรงดันที่อินพุตมีค่าต่ำลงถึงแรงดันค่าหนึ่งเรียกว่า แรงดันขีดเริ่ม  $V_{T-}$  ซึ่งจะทำให้ศักย์ที่ขาอินพุตบวกเทียบกับขาอินพุตลบซึ่งต่อกับกราวน์มีค่าเป็นลบเป็นผลให้  $V_{out}$  เปลี่ยนสถานะเป็น  $V_{sat-}$  ซึ่งเป็นสมบัติของคอมพาราเรเตอร์ และในการเปลี่ยนสถานะของเอาต์พุตให้กลับมาเป็น  $V_{sat+}$  อีกครั้ง แรงดัน  $V_{in}$  จะต้องเพิ่มค่าเป็น  $V_{T+}$  เสียก่อนซึ่งทำให้ศักย์ที่ขาบวกมีค่าสูงกว่ากราวน์ อาจอธิบายโดยพิจารณากระแสผ่านตัวต้านทานต่างๆ ให้  $V_{in}$  ในขณะเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์เพราะว่ามีกระแสออปเซ็ทไหลผ่าน  $R_{in}$  ทำให้เกิด  $V_d$  ขึ้น เราสามารถคำนวณกระแส  $I_{in}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $I_f$  จากกฎของโอห์ม



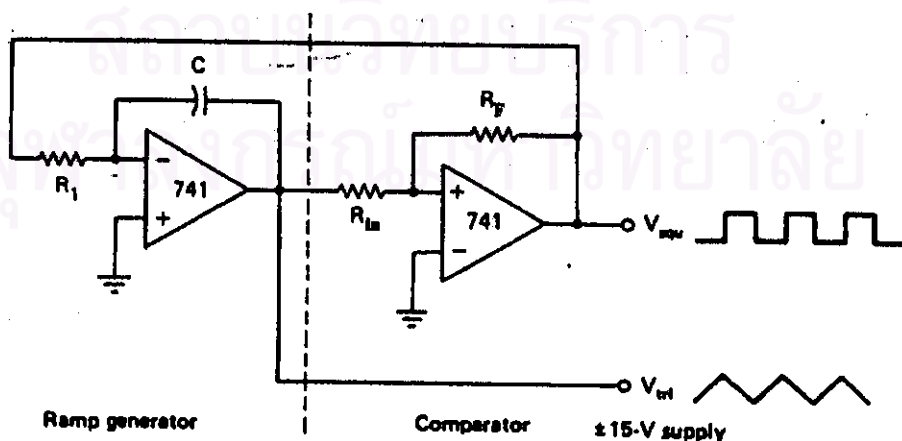
$$I_{in} = I_F = \frac{V_{out}}{R_{in} + R_F} \quad (3.8)$$

เป็นผลให้  $V_d = R_{in} I_{in}$  เมื่อ  $V_{in}$  เท่ากับศูนย์โวลต์ และเมื่อค่อยๆ ปรับ  $V_{in}$  ให้มีค่าต่ำลง  $V_d$  จะมีค่าลดลง จนเมื่อถึงแรงดัน  $V_{T-}$  ซึ่งทำให้  $V_d$  เป็นศูนย์โวลต์  $V_{out}$  มีค่าเป็น  $V_{sat-}$  และ  $V_d$  จะมีขนาดเท่ากับ  $-R_{in} I_{in}$  ดังนั้นจึงต้องเพิ่มค่า  $V_{in}$  ขึ้นเพื่อทำให้  $V_d$  กลับเป็นศูนย์ดังเดิมซึ่งเมื่อนั้น  $V_{in} = V_{T+}$  และเราสามารถคำนวณหา  $V_{T+}$  และ  $V_{T-}$  จากสมการ

$$V_{T+} = \frac{V_{sat+}}{R_F/R_{in}} \quad (3.9)$$

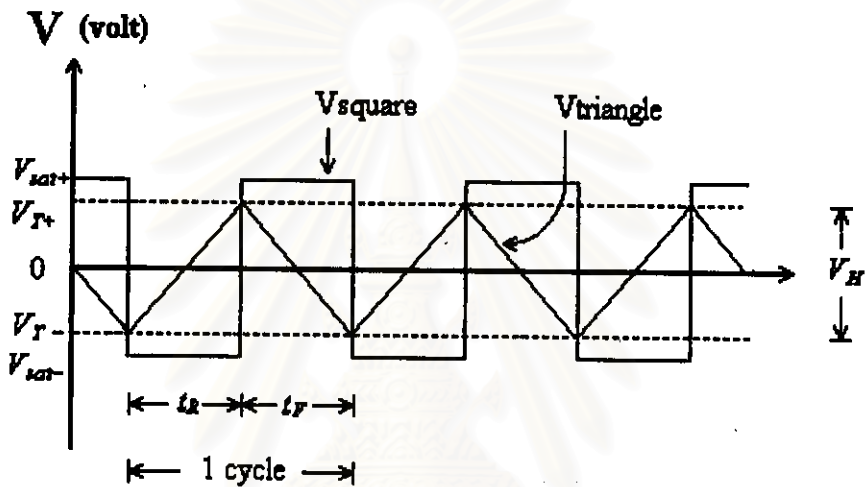
$$V_{T-} = \frac{V_{sat-}}{R_F/R_{in}} \quad (3.10)$$

เราสามารถนำคอมพารเตอ์รมาใช้นี้มาใช้ร่วมกับวงจรกำเนิดคลื่นแรมป์หรือวงจรอินทิเกรเตอ์เพื่อสร้างวงจรกำเนิดคลื่นรูปสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 3.15 โดยการนำเอาท์พุทจากอินทิเกรเตอ์มาต่อเป็น



รูปที่ 3.15 แสดงการรวมวงจรอินทิเกรเตอ์กับวงจรคอมพารเตอ์เพื่อสร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม

อินพุทของคอมพาราเตอร์ แล้วป้อนเอาต์พุทจากคอมพาราเตอร์กลับไปยังอินพุทของอินทิเกรเตอร์  
 อีกที จะเห็นว่า เมื่อโคที่คลื่นสามเหลี่ยมมีขนาดเท่ากับ  $V_{T+}$  หรือ  $V_{T-}$  สัญญาณเอาต์พุทของ  
 คอมพาราเตอร์จะเปลี่ยนสถานะทันที ทำให้เกิดการ ออสซิลเลทตลอดเวลา ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงรูปคลื่นการทำงานของวงจรกำเนิดคลื่นในรูปที่ 3.13

สำหรับความถี่ของสัญญาณเอาต์พุทหาได้จาก  $t_R$  ซึ่งเป็นเวลาในการขึ้น และ  $t_F$  ซึ่งเป็นเวลาในการตก ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม มีค่าดังนี้

$$t_R = \frac{V_H}{V_{sat-}} (R_1 C) \quad (3.11)$$

$$t_F = \frac{V_H}{V_{sat+}} (R_1 C) \quad (3.12)$$

โดยที่  $V_H$  คือแรงดันฮิสเทอรีซิส และมีค่าเท่ากับ

$$V_H = V_{T+} - V_{T-} = (V_T) - (-V_T) = 2V_T \quad (3.13)$$

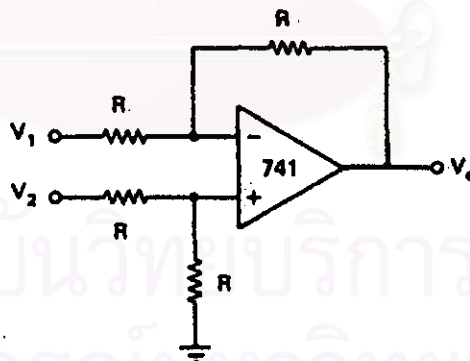
ดังนั้น คาบ  $T$  ของสัญญาณเท่ากับ

$$T = t_R + t_F \quad (3.14)$$

และความถี่เอ๊าท์พุท  $f$  มีค่า

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.15)$$

วงจรก่าเน็คกลืนรูปตามเหลี่ยมมีทั้งศักย์ในด้านบวกและด้านลบ เนื่องจากทรานซิสเตอร์ที่ใช้จึง  
กระแจะทำงานเฉพาะด้านบวก ดังนั้นจึงต้องทำให้สัญญาณรูปตามเหลี่ยมมีศักย์อยู่ในด้านบวกดัง  
รูปที่ 3.13 โดยเพิ่มวงจรถบแรงดัน ดังรูปที่ 3.17

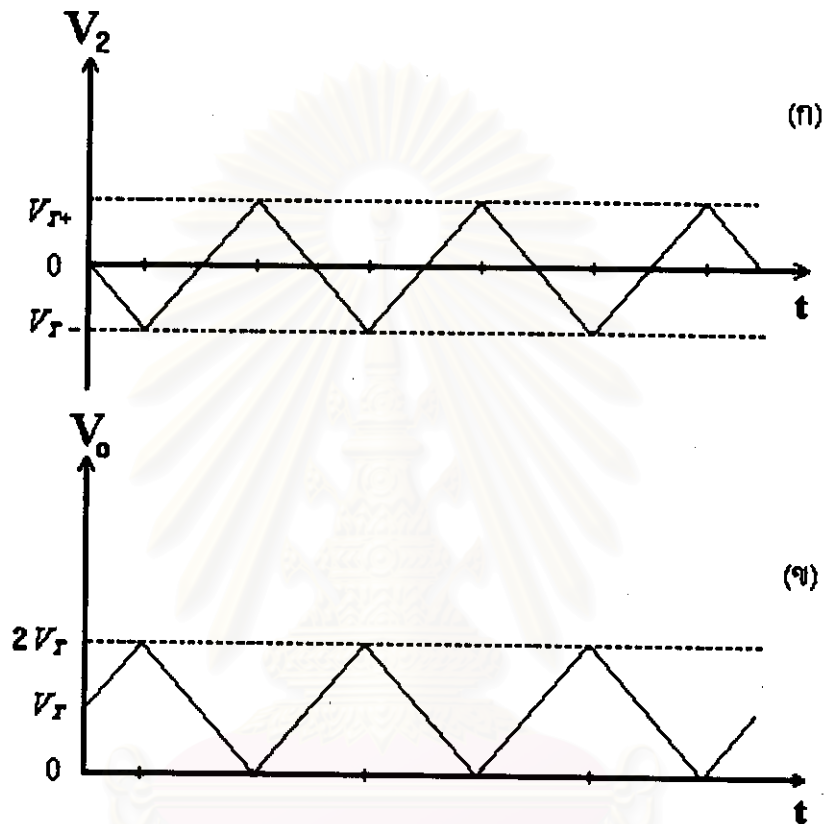


รูปที่ 3.17 วงจรถบแรงดัน

จากรูปที่ 3.17 ความต่างศักย์เอ๊าท์พุท  $V_o$  มีค่าเป็น

$$V_o = V_1 - V_2 \quad (3.16)$$

จากสมการที่ 3.18 ถ้าให้  $V_1 = V_T$  และ  $V_2$  เป็นสัญญาณเอาร์ทพุทจากวงจรกำเนิดคลื่นรูปสามเหลี่ยม รูปคลื่นที่เอาร์ทพุทจากวงจรแรงดันจะเป็นดังรูปที่ 3.16 (ข)



รูปที่ 3.18 (ก) แสดงคลื่นรูปสามเหลี่ยมจากวงจรกำเนิดคลื่นรูปสามเหลี่ยม  
(ข) แสดงคลื่นรูปสามเหลี่ยมเมื่อผ่านวงจรแรงดัน

รูปที่ 3.18 (ข) เป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่จะนำไปใช้ในการไบแอสทรานซิสเตอร์ตามแบบที่ต้องการอย่างสมบูรณ์ สำหรับแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณหาได้จากสมการที่ 3.9 ถึง 3.15 ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ต้องการกระแสไหลผ่านขดลวดคอมมูเลทสูงสุดประมาณ 2 แอมแปร์ และความถี่ในการกวาดขึ้นลงของสนามคอมมูเลท 50 Hz ซึ่งสามารถออกแบบได้ดังนี้ ให้  $f_R$  เท่ากับ  $f_F$  ดังนั้นจากสมการที่ 3.11 3.12 3.13 และ 3.14

$$T = \frac{4V_T}{V_{sat}}(R_1 C) \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.15 จะได้ว่า

$$f = \frac{V_{sat}}{4V_T R_1 C} \quad (3.18)$$

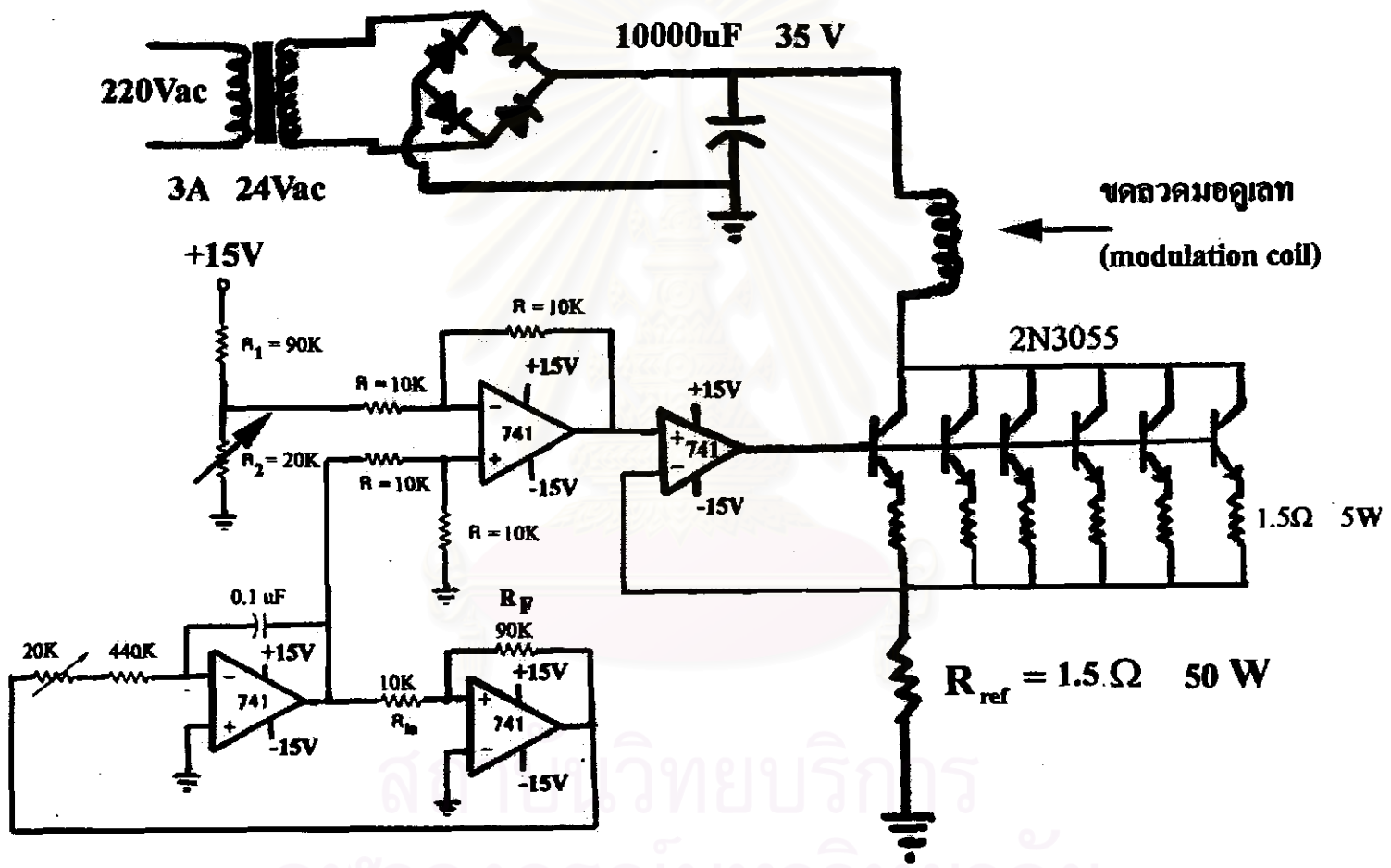
เนื่องจากเราต้องการกระแสไหลผ่านขดลวดคอมมูเตทสูงที่สุดประมาณ 2 แอมแปร์ จากสมการที่ 3.7 เราสามารถคำนวณความต่างศักย์สูงสุดที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์หรือ  $V_H$  เพื่อที่จะบังคับให้กระแสไหลได้ตามที่ต้องการ จะได้ว่า

$$V_H = 2V_T = IR = 2R \quad (3.19)$$

จากรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นว่า  $R$  มีค่าเท่ากับ  $1.5 \Omega$  ดังนั้น  $V_H = 3$  โวลต์ จากสมการที่ 3.9 3.10 และ 3.18 สามารถออกแบบวงจรให้เป็นตามที่ต้องการได้ถ้าทราบ  $V_{sat}$  ของออปแอมป์ที่ไฟเลี้ยงค่านั้นๆ ถ้าใช้ไฟเลี้ยง  $\pm 15$  โวลต์  $\pm V_{sat}$  จะมีค่าประมาณ  $\pm 13.5$  โวลต์ กำหนดใช้  $C = 0.1 \mu F$  และความถี่  $f = 50 \text{ Hz}$  หา  $R_1$  ได้จากสมการที่ 3.18 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $450 \text{ K}\Omega$  และหาค่า  $R_F$  และ  $R_{in}$  ได้จากสมการที่ 3.9 และ 3.10 ดังนี้

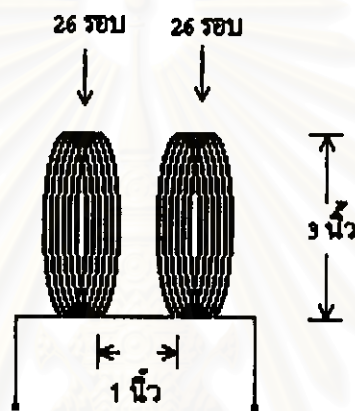
$$R_F = \frac{V_{sat}}{V_T} R_{in} \quad (3.20)$$

จะได้ว่า  $R_F = 9R_{in}$  ถ้ากำหนดให้  $R_{in} = 10 \text{ K}\Omega$  จะได้ค่า  $R_F = 90 \text{ K}\Omega$  สำหรับวงจรที่ออกแบบไว้แล้วนั้นแสดงดังรูปที่ 3.19



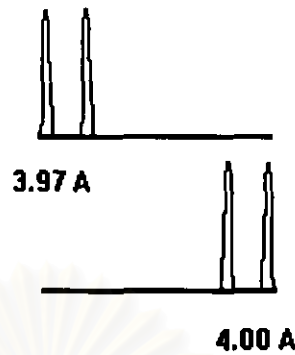
รูปที่ 3.19 วงจรมอดูเลทสมรรถนะดีอย่างสมบูรณ์

สำหรับการพันขดลวดมอดูเลท สามารถทำได้โดยการนำลวดอบน้ำยาเบอร์ 20 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 34/1000 นิ้ว พันแบบไซลินดริคจำนวน 52 รอบ โดยแบ่งข้างละ 26 รอบ ดังรูปที่ 3.18 โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 นิ้ว



รูปที่ 3.20a แสดงการพันขดลวดมอดูเลท

วงจรมอดูเลทสนามแม่เหล็กนี้ได้ทำการทดลองและวัดสนามมอดูเลทโดยใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก และใช้การทดลองโดยเอ็นเอ็มอาร์ทดลองและคำนวณหาค่าสนามมอดูเลทปรากฏว่าการใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กวัดโดยตรงเครื่องวัดสนามซีที่ตำแหน่ง  $8 \times 10^{-4}$  tesla สำหรับวิธีทางเอ็นเอ็มอาร์นั้นจะทำการปรับพิคสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ในจอออสซิลอสโคปให้อยู่ด้านซ้ายสุดและขวาสุดดังรูปที่ 3.20b ซึ่งจะให้ความแตกต่างของกระแสที่จ่ายเลี้ยงแม่เหล็ก  $\Delta I$  โดยถ้า  $\Delta I$  ไปถูกกับค่า  $M$  ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของแม่เหล็กที่ได้ทำการทดลองหาไว้แล้วนั้นก็จะได้ค่าสนามมอดูเลทสูงสุคนั้นเอง



รูปที่ 3.20b แสดงการปรับเทียบทิศสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ไปทางซ้ายสุดและขวาสุด

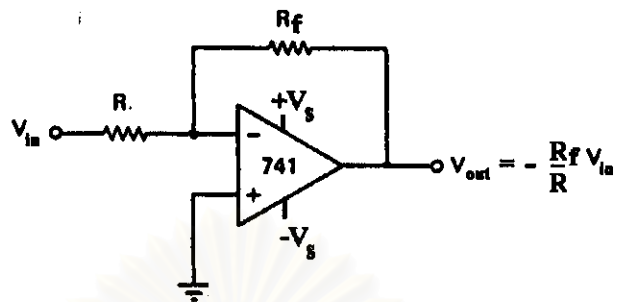
จากรูปที่ 3.20b  $\Delta I = 0.03$  แอมแปร์ จากค่า  $M = 722 \times 10^{-4}$  tesla/ampere ดังนั้นค่าสนามมอดูเลตสูงสุดมีค่าประมาณ  $22 \times 10^{-4}$  tesla ซึ่งก็คือสนามมอดูเลตจะกวาดขึ้นลงในช่วง 0 ถึง  $22 \times 10^{-4}$  tesla โดยมีความถี่ 50 Hz

สำหรับความน่าเชื่อถือของค่าสนามแม่เหล็กมอดูเลตที่ได้ทั้งสองค่า นั้นค่าที่ได้จากการทดลองเอ็นเอ็มอาร์น่าเชื่อถือและถูกต้องมากกว่าการใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กวัด เนื่องจากสนามมอดูเลตมีความถี่ 50 Hz ดังนั้นค่าที่ได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กจึงเป็นเพียงค่าเฉลี่ย แต่จากการทดลองเอ็นเอ็มอาร์นั้น เราสามารถกำหนดให้ทิศสัญญาณเกิดที่ตำแหน่งที่สนามมอดูเลตใกล้ค่าต่ำสุดและกำหนดให้ทิศสัญญาณเกิดที่ตำแหน่งใกล้ค่าสูงสุดได้ ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าที่มีความถูกต้องมากกว่า

### 3.6 วงจรขยายสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์

สัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ที่มาจากโรบินสันคิเทคเตอร์นั้นจะมีขนาดเล็กมากอยู่ในหน่วยมิลลิโวลต์ เนื่องจากวงจรที่ทำการแปลงสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์เป็นปริมาณน้ำมันข้าวโพคจะต้องมีการเรคตีไฟสัญญาณ ดังนั้นจำเป็นต้องขยายสัญญาณให้อยู่ในระดับโวลต์จึงจะสามารถทำได้ โดยออกแบบวงจรขยายโดยใช้ออปแอมป์ดังรูปที่ 3.21





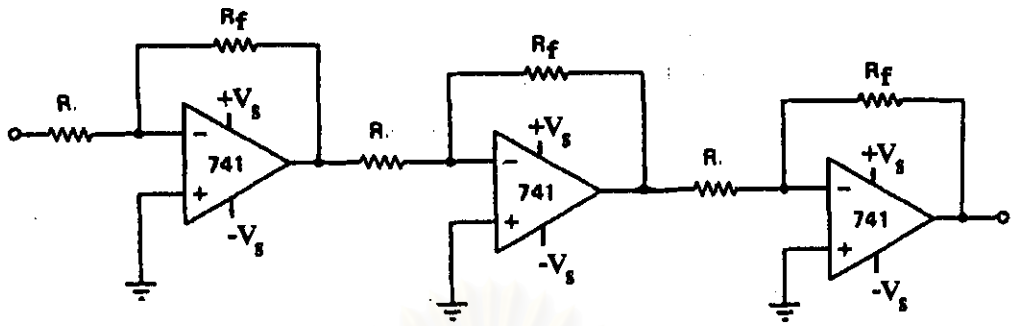
รูปที่ 3.21 วงจรขยายแบบกลับเฟสโดยใช้ออปแอมป์

จากรูปที่ 3.21 อัตราขยายของวงจรมีค่าเท่ากับ  $\frac{R_f}{R}$  โดยสัญญาณเอาต์พุตจะมีเฟสต่างจากสัญญาณอินพุต 180 องศา สำหรับพิกสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ที่ได้จากโรบินสันดีเทคเตอร์จะมีพิกอยู่ในด้านลบ ดังรูป 3.22



รูปที่ 3.22 แสดงสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ที่ออกจากโรบินสันดีเทคเตอร์

โดยความสูงของพิกจะอยู่ในระดับมิลลิโวลต์จึงต้องขยายอีก 1000 เท่าเพื่อให้อยู่ในระดับโวลต์ และสัญญาณจะต้องอยู่ในด้านบวก ดังนั้นถ้านำวงจรขยายดังรูปที่ 3.21 โดยออกแบบให้ขยาย 10 เท่า ต่อรวมกันสามวงจรดังรูปที่ 3.23 โดยอัตราขยายโวลต์จะมีค่าเท่ากับผลคูณของอัตราขยายแต่ละภาค ซึ่งจะได้อัตราขยาย 1000 เท่า และสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์อยู่ในด้านบวก

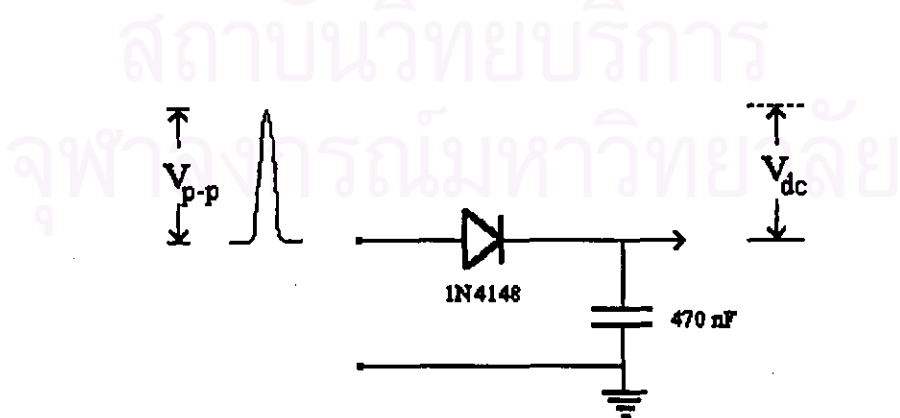


รูปที่ 3.23 วงจรขยายสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ 1000 เท่าโดยใช้ออปแอมป์

สำหรับออปแอมป์นั้นอาจใช้เบอร์ 741 ขรรมค่าก็พอใช้ได้ หรืออาจใช้เบอร์ OPA121 ก็จะถูกกว่ามาก แต่ราคาแพง สำหรับตัวต้านทานในการออกแบบวงจรคำนวณได้โดย  $R_f = 10R$  ถ้า  $R = 10\text{ K}\Omega$  จะได้  $R_f = 100\text{ K}\Omega$

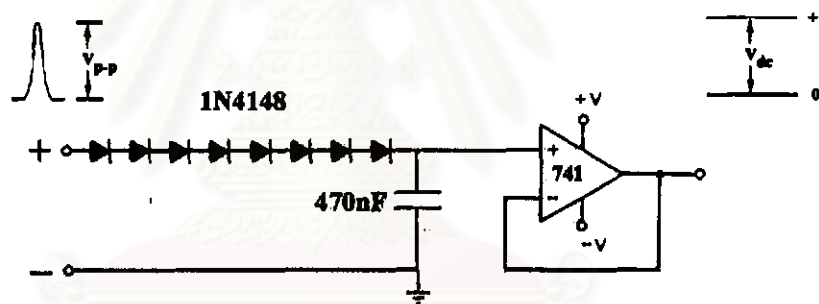
### 3.7 วงจรแปลงสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์เป็นปริมาณน้ำมันข้าวโพด

จากหลักการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 คือเราต้องตรวจจับความสูงของพิกสัญญาณเอ็นเอ็มอาร์ในด้านบวกเป็นโวลต์ โดยวงจรที่ออกแบบนำมาใช้นี้เป็นวงจรตรวจจับความสูงของพิก (peak voltage detector) โดยใช้ไดโอดและตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงวงจรตรวจจับความสูงของพิกสัญญาณ (peak voltage detector)

วงจรในรูปที่ 3.24 เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาไดโอดจะเรกติไฟสัญญาณให้อยู่ในด้านบวกจากนั้นสัญญาณจะถูกกรองโดยตัวเก็บประจุ เอาท์พุทของวงจรคือค่าไฟลิตซ์ค่าหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับความสูงของพีคสัญญาณอินพุตซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งจะนำไปเข้าวงจรตามแรงดัน (voltage follower) เพื่อจะไม่ให้ตัวเก็บประจุคายประจุมากเพราะออปแอมป์มีความต้านทานขาเข้าสูงมาก ทำให้ได้ค่า  $V_{dc}$  ที่เรียบและจากนั้นนำค่า  $V_{dc}$  นี้ไปทำการเปรียบเทียบตามสมการที่ 2.13 ในบทที่ 2 โดยวงจรตรวจจับความสูงของพีคสัญญาณอินพุตที่สมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.25

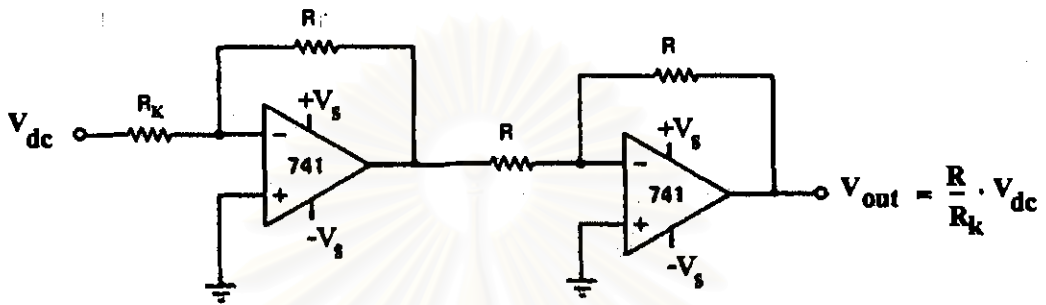


รูปที่ 3.25 วงจรตรวจจับความสูงของพีคสัญญาณอินพุตอย่างสมบูรณ์

จากรูปมีไดโอดต่ออนุกรมกันหลายตัวทั้งนี้เนื่องจากจากการทดลอง ไดโอดหนึ่งตัวที่ต่ออนุกรมเพิ่มขึ้นจะทำให้สัญญาณรบกวนลดลงเนื่องจากไดโอดที่ใช้เป็นไดโอดชนิดความถี่ต่ำ สัญญาณรบกวนที่เป็นความถี่สูงจึงผ่านไดโอดชนิดนี้ไม่ได้ สำหรับไดโอดทั้ง 8 ตัวในวงจรมันจะมีผลทำให้สัญญาณอินพุตตกลงประมาณ 3 เดซิเบล

เนื่องจากความสูงของพีคสัญญาณที่ได้มีขนาดแปรผันตามกับปริมาณน้ำมันข้าวโพด ซึ่งได้จากการทดลองดังรูปที่ 3.27 เราสามารถหาปริมาณน้ำมันข้าวโพดได้โดยการหารความสูงของสัญญาณด้วยค่า  $k$  ซึ่งเป็นค่าคงที่อัตราส่วนความสูงของพีคสัญญาณต่อปริมาณน้ำมันข้าวโพด

หาได้โดยการนำเอาน้ำมันข้าวโพดที่ทราบค่าแน่นอนมาสอบเทียบเพื่อหาค่า  $k$  ซึ่งเท่ากับ  $V_{dc}$  หาค่าด้วยมวลของน้ำมันนั่นเอง เมื่อได้ค่า  $k$  แล้วจึงสร้างวงจรหารด้วย  $k$  ดังรูปที่ 3.26



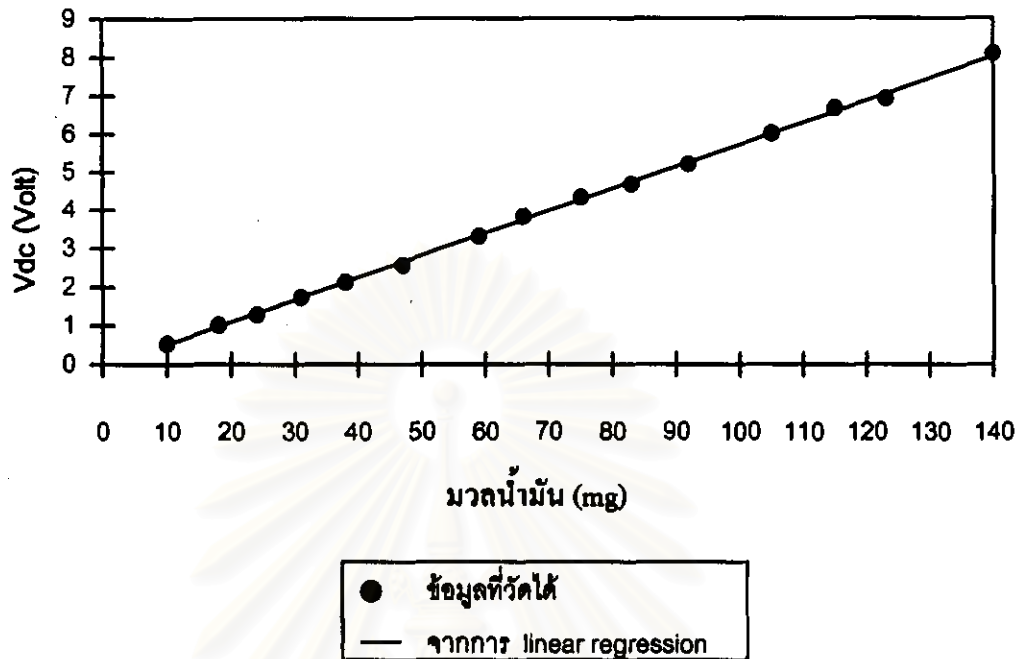
$$A_v = \left(-\frac{R}{R_k}\right) \left(-\frac{R}{R}\right) = \frac{R}{R_k} = \frac{1}{k} \quad \text{โดย } R_k > R$$

$$k = \frac{R_k}{R}$$

รูปที่ 3.26 วงจรหารด้วย  $k$

เมื่อนำโวลต์มิเตอร์วัด  $V_{out}$  ก็จะแสดงปริมาณน้ำมันข้าวโพดออกมาในรูปของ  $1V = 1g$  หรือ  $1mV = 1mg$  นั่นเอง

ในการทดลองหาค่า  $k$  ได้ดังรูปที่ 3.27 โดยสมบัติของน้ำมันข้าวโพดที่ใช้ในการทดลองหาค่า  $k$  นี้ได้ในภาคผนวก.

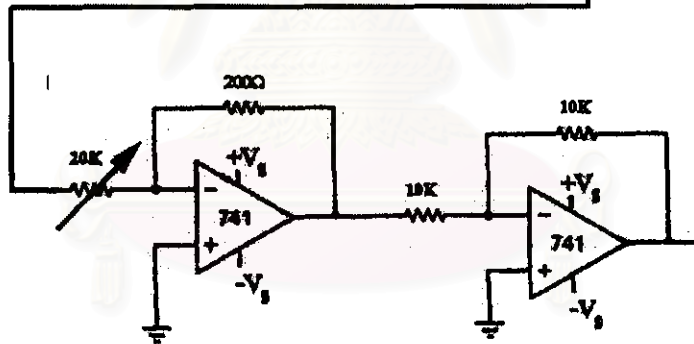
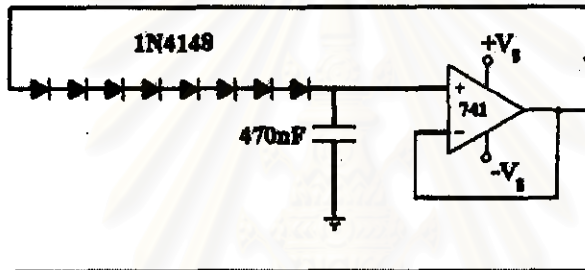
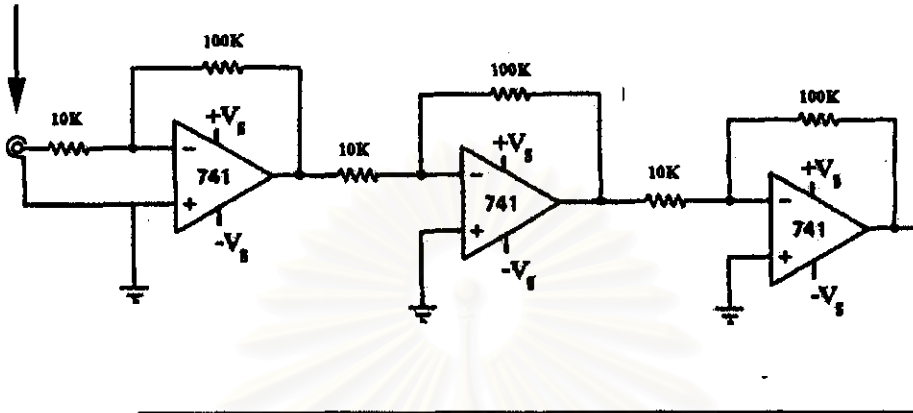


รูปที่ 3.27 กราฟเพื่อหาค่า  $k$  จากการทดลอง

ค่า  $k$  จากรูปที่ 3.27 มีค่าเท่ากับความชันของกราฟ ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 57.81 โวลต์ต่อกรัม ดังนั้นจึงทำการออกแบบวงจรหารซึ่งสามารถหารได้ตั้งแต่ 1 ถึง 99 โดยกำหนดให้  $R = 200\Omega$  และให้  $R_x$  เป็นความต้านทานปรับค่าได้รอบละเอียด มีค่าเท่ากับ  $20\text{ K}\Omega$  สูงสุด สำหรับวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นปริมาณน้ำมันข้าวโพดอย่างสมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.28

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

input (สัญญาณ NMR จากดีเทกเตอร์)



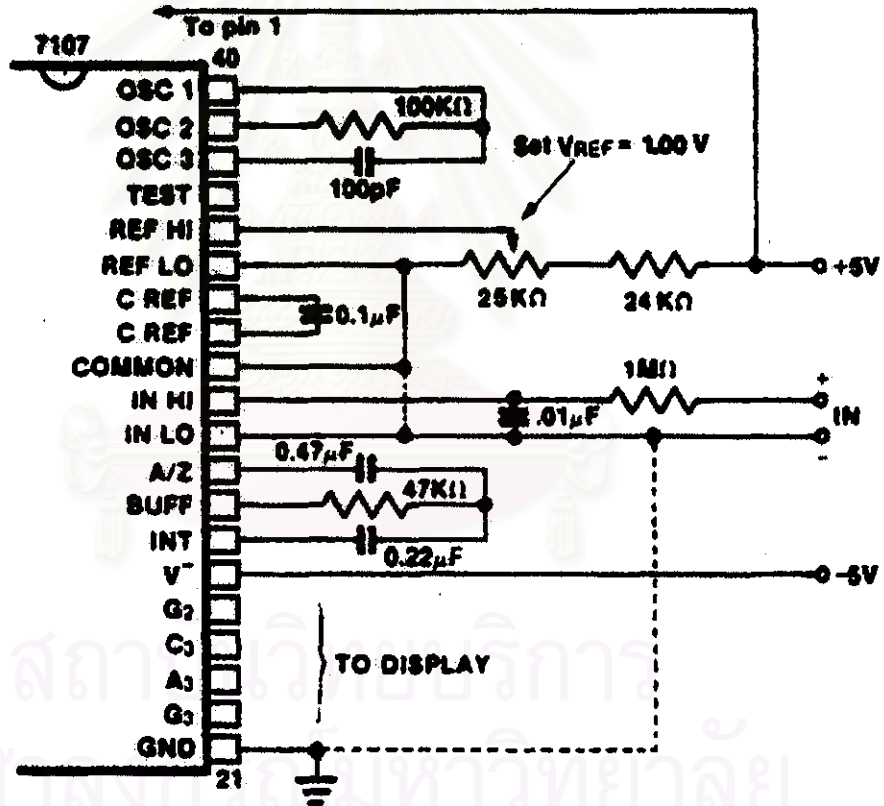
$V_s = \pm 15$  Volt

(Volt Meter)

รูปที่ 3.28 วงจรแปลงสัญญาณ NMR เป็นปริมาณน้ำมันข้าวโพดอย่างสมบูรณ์

### 3.8 วงจรโวลต์มิเตอร์

สำหรับวงจรโวลต์มิเตอร์นั้นใช้ไอซีเดี่ยวเบอร์ 7107 ซึ่งเป็นไอซีแบบ ADC โดยแสดงผลออกทางจอ LED 7 segment ได้ 3 หลัก ครั้ง ซึ่งทำการออกแบบให้วัดค่าได้สูงสุด 2 โวลต์ มีความละเอียด 1 มิลลิโวลต์ ก็มิตค่าแสดงผลในช่วง -1.999 โวลต์ ถึง 1.999 โวลต์ วงจรแสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 วงจรโวลต์มิเตอร์

จากวงจรที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้เมื่อนำมาประกอบกันจะได้เครื่องมือเพื่อวัดปริมาณน้ำมันข้าวโพคได้ ส่วนรายละเอียดวิธีการใช้เครื่องมือนี้จะกล่าวในบทต่อไป