

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับตำแหน่งดิสซาร์จบางส่วน

เครื่องตรวจจับตำแหน่งดิสซาร์จบางส่วนที่ออกแบบสร้างนี้เป็นเครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้างซึ่งมีคุณลักษณะสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ

- 1) มีแบนด์วิดท์ระหว่าง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 5 เมกกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการหาตำแหน่ง PD ในสายเคเบิล
- 2) มีแบนด์วิดท์ระหว่าง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 400 กิโลเฮิร์ตซ์ สำหรับใช้ในการหาขนาด PD ในสายเคเบิล
- 3) มีความไวในการตรวจจับสัญญาณ PD น้อยกว่า 5 พิโคคูลอมปี
- 4) มีอิมพีแดนซ์วัดขนาด 75 โอห์ม โดยพิจารณาจากคาเรคเตอร์สติกอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล ซึ่งมีขนาดระหว่าง 10 ถึง 60 โอห์ม
- 5) วงจรรับสัญญาณ PD สามารถทนกระแสได้ประมาณ 1 แอมแปร์

3.2 ส่วนประกอบของเครื่องตรวจจับตำแหน่งดิสซาร์จบางส่วน

เนื่องจากสัญญาณของ PD มีขนาดเล็กมากอยู่ในหน่วยของไมโครโวลต์ถึงมิลลิโวลต์เท่านั้น จึงถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นได้โดยง่าย การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงการลดผลของสัญญาณรบกวนเป็นหลัก สำหรับงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากเครื่องตรวจจับดิสซาร์จบางส่วนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นในส่วนวงจรปลิกย่อยต่างๆ จึงมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยจะได้แสดงไว้ในภาคผนวก วงจรหลักที่สำคัญในการวิจัยนี้คือ

- 1) วงจรรับสัญญาณ PD ใช้สำหรับรับสัญญาณจากสายเคเบิลที่ความถี่ตัดด้านต่ำ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นวงจรกรองผ่านสูงแบบพาสซีฟ (Passive High Pass Filter)
- 2) วงจรขยายสัญญาณ PD ใช้สำหรับขยายสัญญาณ โดยเป็นวงจรกรองผ่านต่ำความถี่ตัดด้านสูง 5 เมกกะเฮิร์ตซ์ เป็นวงจรชนิดแอคทีฟ (Active Low Pass Filter)

วงจรประกอบอื่น ๆ ที่มีการวิจัย และพัฒนาไว้แล้ว ได้แก่

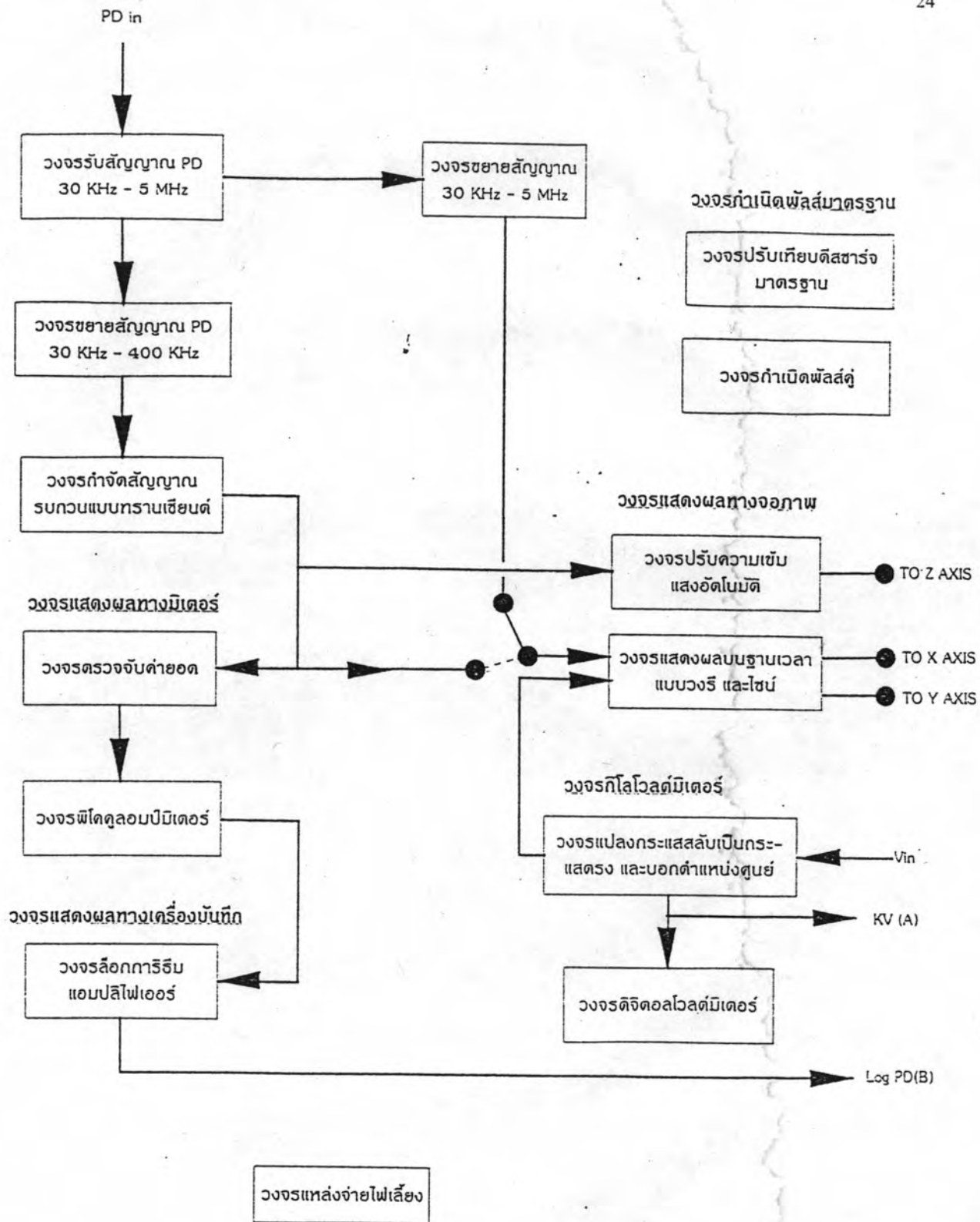
- 3) วงจรขยายสัญญาณ PD โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำความถี่ตัดด้านสูง 400 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นวงจรชนิดแอกติฟ
- 4) วงจรกำจัดสัญญาณรบกวนแบบทรานเซียนด์ ที่ซึ่งโครโมโซมกับความถี่ของแหล่งจ่าย เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของไรริสเตอร์ โดยอาศัยวงจรหน้าต่างเวลา (Time Window)
- 5) วงจรแสดงผลทางเครื่องวัด ใช้สำหรับอ่านค่าของ PD
- 6) วงจรแสดงผลทางเครื่องบันทึก โดยแสดงผลเป็นกราฟระหว่างแรงดันของแหล่งจ่าย และค่าล็อกการรีมของสัญญาณ PD
- 7) วงจรแสดงผลทางจอภาพใช้แสดงรูปสัญญาณ PD บนจอออสซิลโลสโคป
- 8) วงจรกิโลโวลต์มิเตอร์ ใช้สำหรับบอกขนาดแรงดันทดสอบเป็นหน่วยอาร์เอ็มเอส โดยต่อจากภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์ และใช้เป็นวงจรถอดค่าแห่งศูนย์กลางของแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรถดสอบ
- 9) วงจรกำเนิดพัลส์มาตรฐานใช้สำหรับการปรับเทียบ และตรวจสอบคุณสมบัติของการเกิดซูเปอร์โพสิชันของเครื่องตรวจจับ PD

การต่อวงจรแต่ละส่วนเข้าด้วยกันแสดงไว้เป็นไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1

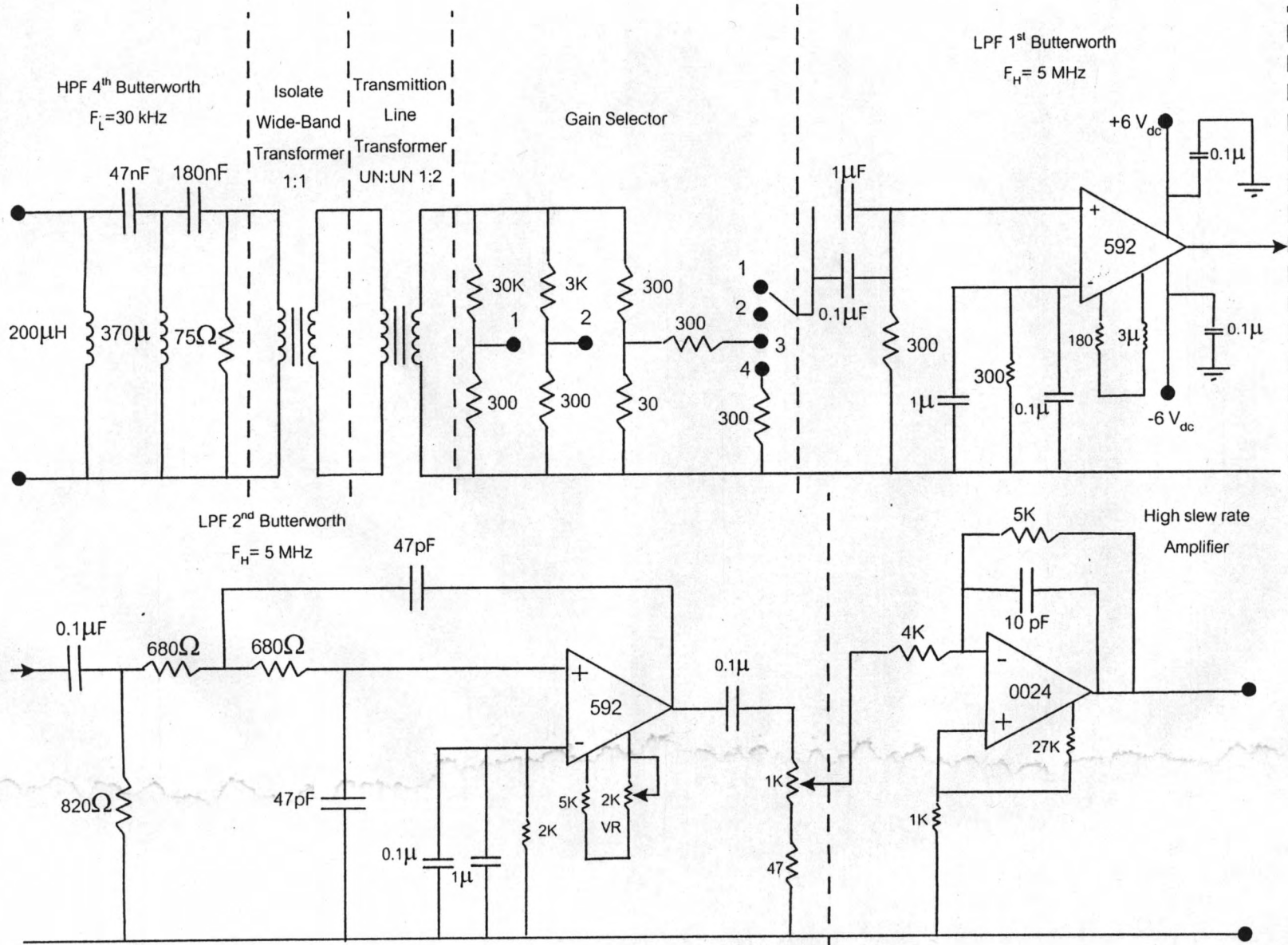
3.3 การออกแบบวงจรเครื่องตรวจจับหาค่าแห่งคิซาร์จบางส่วน

การออกแบบวงจรรับสัญญาณคิซาร์จบางส่วนสำหรับหาค่าแห่งคิซาร์จในสายเคเบิลยาวนั้น เนื่องจากเราต้องการตัดความถี่ต่ำโดยเฉพาะ 50 เฮิร์ตซ์ - 60 เฮิร์ตซ์ออก จึงเลือกใช้วงจรกรองอันดับ 4 แบบบัตเตอร์เวิร์ด (Butterworth 4th Filter) เป็นวงจรกรองผ่านสูง โดยมีความชัน 80 dB/decade เพราะเป็นวงจรกรองที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวงจร RC หรือ RLC ทั่วไป

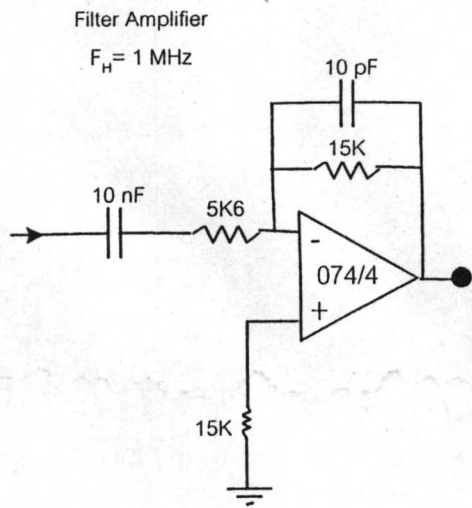
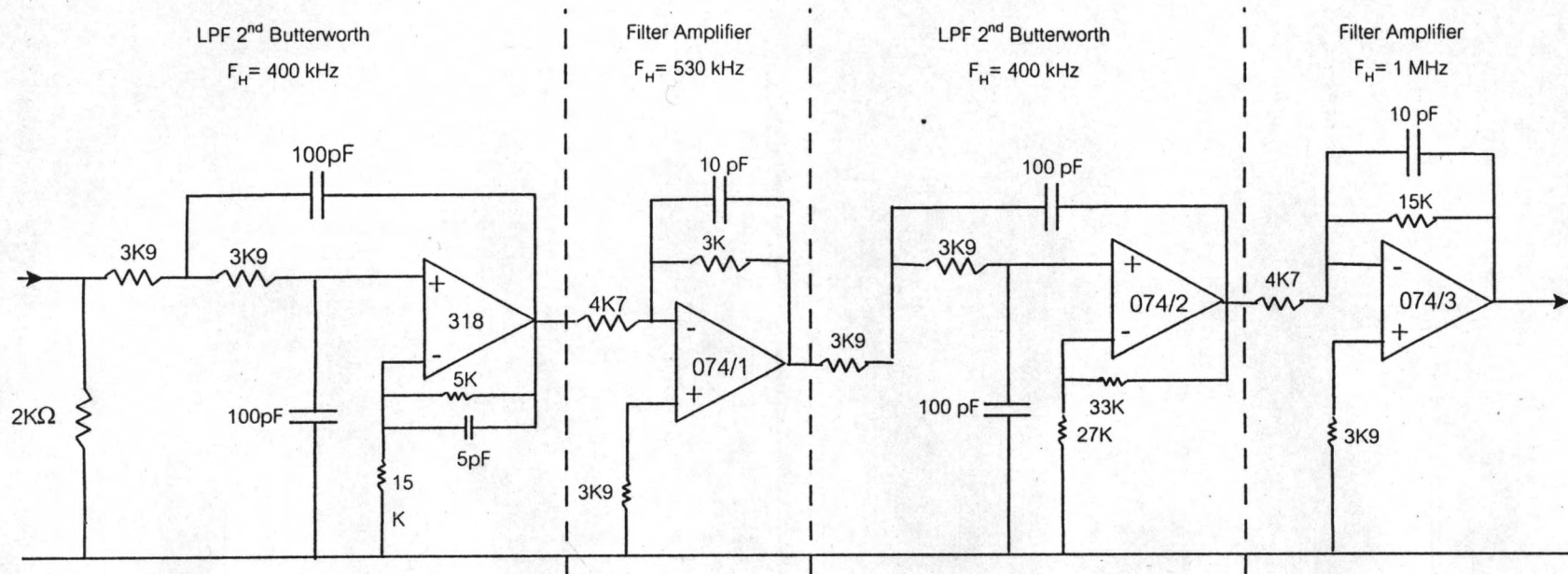
เนื่องจากคาแรมเตอร์สติคิมพีแดนซ์ของสายอยู่ระหว่าง 10 - 60 โอห์ม จึงเลือกอิมพีแดนซ์ วัต (Z_m) ขนาด 75 โอห์ม เพื่อให้เกิดการสะท้อนกลับทำให้สามารถหาค่าแห่งคิซาร์จการเกิด PD ได้ เลือกแบนด์วิดท์ที่ค่า 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 5 เมกกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าที่มาตรฐานยอมรับในการตรวจหาค่าแห่งคิซาร์จของ PD โดยมีตัวกรองผ่านต่ำเป็นบัตเตอร์เวิร์ด ลำดับ 3 เพื่อให้มีความถี่ตัดสูง 5 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่ 60 dB/decade วงจรความถี่ผ่านสูงเลือกใช้เป็นพาสซีฟ ประกอบด้วย R, L, C ส่วนวงจรความถี่ผ่านต่ำเลือกใช้เป็นแอกติฟ เพื่อให้สามารถขยายสัญญาณได้ รูปแบบวงจรสำหรับใช้งานมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.2 สำหรับวงจรที่ใช้หาขนาดของสัญญาณ PD มีรายละเอียดดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 การต่อวงจรต่างๆ เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.2 วงจรหาตำแหน่งที่เกิด PD



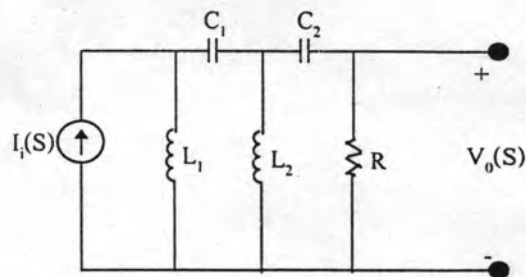
รูปที่ 3.3 วงจรหาขนาด PD

สัญญาณขาออกที่ออกจากตัวกรองความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 5 เมกกะเฮิร์ตซ์ เป็นพัลส์ซึ่งสามารถแสดงผลบนจอภาพ เพื่อใช้หาตำแหน่งของ PD ได้ เมื่อต้องการหาขนาดของ PD จะใช้วิธีลดแบนด์วิดท์ลงเหลือ 400 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อป้องกันความถี่วิทยุช่วง 560 กิโลเฮิร์ตซ์ (AM) เลือกใช้แบตเตอรี่เวอร์คัลลำดับที่ 4 เพื่อให้ตัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้ดี วงจรที่ใช้จึงเป็นการนำสัญญาณขาออกของการตรวจหาตำแหน่งของ PD มาผ่านตัวกรองที่ลดแบนด์วิดท์ลงดังรูป 3.3

วงจรประกอบสำหรับเครื่องตรวจจับหาตำแหน่ง และภาคแสดงผล [6] ของสัญญาณ PD สามารถแสดงได้ดังรูป 3.1 วงจรภาคแสดงผล และรายการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

3.4 การออกแบบและการคำนวณ INPUT UNIT

INPUT UNIT สำหรับการวิจัยครั้งนี้ เลือกออกแบบเป็นตัวกรองผ่านสูง (High-pass Filter) แบบบัตเตอร์เวิร์คอันดับที่ 4 (Butterworth order 4th) [10] โดยมีวงจรสมมูลดังนี้



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูล

$$\text{ฟังก์ชันการถ่ายโอน} = \frac{V_o(S)}{I_i(S)} = \frac{1}{S^4 + 2.6135S^3 + 3.1414S^2 + 2.6135S + 1} \quad (3.1)$$

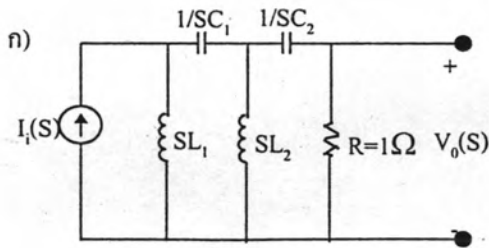
เมื่อ $S = j\omega$

ทำการแปลงฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer Function, TF) ตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-pass Filter, LPF) ไปเป็นตัวกรองความถี่สูง (High-pass Filter, HPF) โดยการแทนค่า S ด้วย $1/S$ จะได้ TF สำหรับ HPF ดังนี้ คือ

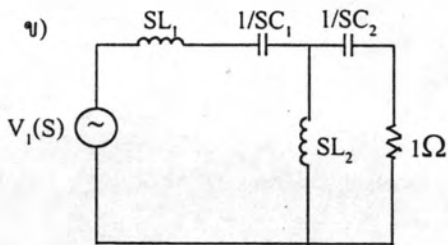
$$\frac{V_o(S)}{I_i(S)} = \frac{S^4}{S^4 + 2.6135S^3 + 3.1414S^2 + 2.6135S + 1}$$

การพิสูจน์ทำได้โดยการยุบวงจรของเทวินินท์

เปลี่ยนค่ากระแสเป็นแรงดัน



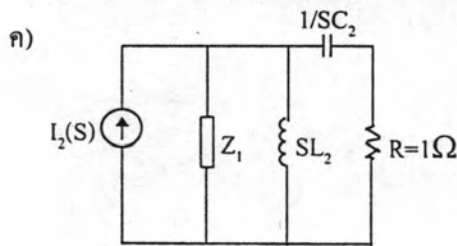
$$I_1(S) = \frac{V_1(S)}{SL_1}$$



ดังนั้น $V_1(S) = I_1(S) SL_1$ (3.2)

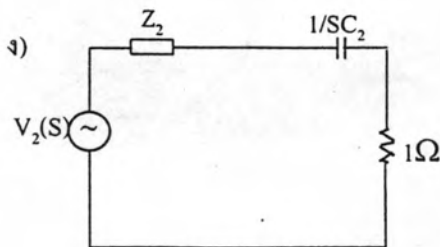
ให้ $Z_1 = SL_1 + \frac{1}{SC_1} = \frac{S^2 L_1 C_1 + 1}{SC_1}$ (3.3)

$$I_2(S) = \frac{V_1(S)}{Z_1}$$
 (3.4)



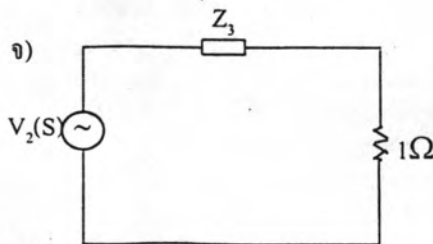
ให้ $Z_2 = Z_1 // SL_2 = \frac{Z_1 SL_2}{Z_1 + SL_2}$ (3.5)

$$V_2(S) = I(S) Z_2$$
 (3.6)



$$Z_3 = Z_2 + \frac{1}{SC_2} = \frac{Z_2 SC_2 + 1}{SC_2}$$
 (3.7)

$$V_0(S) = \frac{V_2(S)}{Z_3 + 1}$$
 (3.8)



แทนค่าทั้งหมดกลับไปยังสมการเริ่มต้น จะพบว่า

รูปที่ 3.5 รูปวงจร INPUT UNIT

$$\frac{V_o(S)}{I_i(S)} = \frac{s^4}{(s^4 + s^3(L_1 + L_2)/L_1L_2 + s^2(L_1C_1 + L_2C_2 + L_2C_1)/L_1L_2C_1C_2 + s/(C_1L_1L_2) + 1/L_1L_2C_1C_2)} \quad (3.9)$$

เทียบค่าสมการที่ 3.9 กับสมการที่ 3.1 จะได้ว่า

$$(L_1 + L_2)/L_1L_2 = 2.6131$$

$$(L_1C_1 + L_2C_2 + L_2C_1)/L_1L_2C_1C_2 = 3.4142$$

$$1/(C_1L_1L_2) = 2.6131$$

$$1/L_1L_2C_1C_2 = 1$$

จะได้ว่าที่ความถี่ 1 rad/sec ค่าที่ได้เป็นดังนี้

$$C_1 = 0.6341$$

$$C_2 = 2.6131$$

$$L_1 = 0.6533$$

$$L_2 = 0.9239$$

คิดความถี่ที่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ อิมพีแดนซ์วัด (Z_m) ที่ 75 โอห์ม โดยการทำสเกลความถี่ (Frequency Scaling) และสเกลอิมพีแดนซ์ (Impedance Scaling) [2]

จะได้ค่าใหม่ดังนี้

$$C'_1 = 0.6341/(75 \cdot 2\pi \cdot 30 \cdot 10^3) = 44.85 \text{ nF}$$

$$C'_2 = 2.6131/(75 \cdot 2\pi \cdot 30 \cdot 10^3) = 184.84 \text{ nF}$$

$$L'_1 = 0.6533 \cdot 75/(2\pi \cdot 30 \cdot 10^3) = 259.94 \text{ } \mu\text{H}$$

$$L'_2 = 0.9239 \cdot 75/(2\pi \cdot 30 \cdot 10^3) = 367.61 \text{ } \mu\text{H}$$

3.5 การคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ (Inductance, L)

การเลือกแกน Ferrite ชนิดวงแหวน (Toroid)

- 1) ต้องเลือกแกน Ferrite ที่ทำงานได้ตลอดช่วงความถี่ 30 กิโลเฮิร์ตซ์ - 5 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยค่าสูญเสียในแกน (Core Loss) ต่ำ โดยดูได้จากคำแนะนำผู้ผลิต
- 2) แกนที่เลือกใช้ต้องไม่อิ่มตัว เมื่อกระแสไหลผ่าน

ออกแบบ $L_1 = 260 \mu\text{H}$ ด้วยแกน T225-26

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ID) = 35.6 มิลลิเมตร (mm)

ค่า $A_L = 98 \text{ nH/N}^2$ $A = 1.42 \text{ cm}^2$

$V = 20.7 \text{ cm}^3$

จำนวนแกน 1 แกน

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร } I &= \omega C_K V & (3.10) \\ &= 2\pi(50)10 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

โดยกำหนดความถี่ที่ 50 Hz

ตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_K) 10 นาโนฟารัด (nF)

แรงดันทดสอบ 200 กิโลโวลต์ (KV)

จะได้

$$\text{กระแส (I)} = 0.6283 \text{ A}_{\text{rms}}$$

$$\begin{aligned} \text{จำนวนรอบที่ใช้พัน (N)} &= \sqrt{\frac{L_1}{A_L}} & (3.11) \\ &= \sqrt{\frac{260 \cdot 10^{-6}}{98 \cdot 10^{-9}}} \\ &= 51.5 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

เลือกพันที่ 52 รอบ

เลือกลวดเบอร์ 16 SWG ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (OD) เท่ากับ 1.622 mm เพื่อค่าคลาดเคลื่อน 10% (ตัวคูณ 1.1) เพราะฉะนั้นจำนวนรอบที่พันได้บนแกน Toroid คือ

$$\pi ID/OD = 35.6\pi/(1.622*1.1) = 62 \text{ รอบ}$$

พบว่าเพียงพอต่อการพัน (52 รอบ)

พิจารณาค่าความอิมิตัวของแกน Toroid

$$\text{จากสูตร } E_{\text{rms}} = 4.44 NfB_{\text{max}}A_{\text{eff}} \quad (3.12)$$

เมื่อ N = จำนวนรอบของขดลวด

f = ความถี่

B_{max} = ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

A_{eff} = พื้นที่หน้าตัดที่ใช้งาน

$$\text{เพราะว่า } E_{\text{rms}} = IZ_L = I2\pi fL \quad (3.13)$$

$$= 0.6283 * 2\pi * 50 * 260 * 10^{-6}$$

$$= 0.0513 \text{ V}_{\text{rms}}$$

$$0.0513 = 4.44(52)(50)B_{\text{max}} * 1.42 * 10^{-4}$$

$$B_{\text{max}} = 0.03129$$

$$= 312.9 \text{ Gauss}$$

ค่า B_{max} จากผู้ผลิตคือ 3500 Gauss

ค่า $313 \ll 3500$ จึงสามารถใช้แกนดังกล่าวได้

$$\text{ค่ากระแสสูงสุด } (I_{\text{max}}) = 0.6283 * 3500 / 220 = 9.9957 \text{ A}_{\text{rms}}$$

Core Loss ที่ $I = 0.6283$

จากข้อมูลผู้ผลิต

$$\text{Core Loss} = 6.94 * 10^{-10} f^{1.36} B^{2.03} V \text{ mW/cm}^2 \quad (3.14)$$

เมื่อ f = ความถี่ (Hz)

$$B = 220 \text{ Gauss}$$

$$V = \text{ปริมาตร (cm}^3\text{)}$$

$$\text{Core Loss} = 6.94 * 10^{-10} (5 * 10^6)^{1.36} (313)^{2.03} (20.7)$$

$$= 2.1582 * 10^6 \text{ mW/cm}^2$$

$$= 2.1582 \text{ kW/cm}^2$$

$$E_{rms} = 4.44(52)(5 \cdot 10^6)(0.0313)(1.42 \cdot 10^{-4})$$

$$= 5,130.85 \text{ โวลต์}$$

$$\begin{aligned} \text{ความต้านทานสมมูล (R}_{\text{eq}}) &= (E_{rms})^2 / \text{Core Loss} & (3.15) \\ &= (5,130.85)^2 / (2.1582 \cdot 10^3) \\ &= 12.198 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

$R_{\text{eq}} \gg 75 \Omega$ ดังนั้นจึงสามารถใช้งานได้

การคำนวณและออกแบบ L_2

L_2 มีค่า 370 μH เลือกแกน T225-26 จำนวน 1 แกน

จากการคำนวณ L_2 จะได้ว่า

$$\text{จำนวนรอบ (N}_2) = \sqrt{\frac{370 \cdot 10^{-6}}{98 \cdot 10^{-7}}} = 61.445 \text{ รอบ}$$

เลือกพื้นที่ 62 รอบ

L_2 จะไม่เกิดการอิ่มตัวเนื่องจากกระแสที่ 50 Hz เช่น L_1 อีก

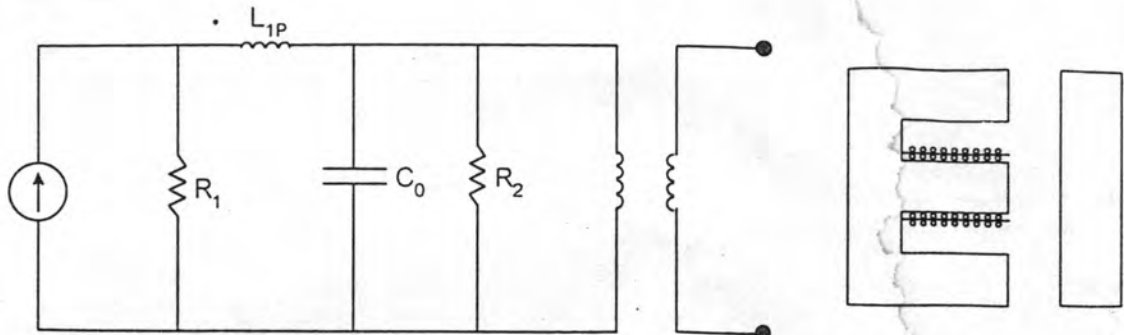
เลือกลวดเบอร์ 22 SWG ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (OD) เท่ากับ 0.7112 mm เพื่อค่าคลาดเคลื่อน 10% (ตัวคูณ 1.1) จะได้ว่า

$$\text{จำนวนรอบสูงสุด} = 35.6\pi / (0.7112 \cdot 1.1) = 143 \text{ รอบ}$$

เพราะฉะนั้น จึงเพียงพอต่อการพันลวดตัวนำ

3.6 การออกแบบหม้อแปลงแบบแถบกว้าง

การออกแบบหม้อแปลงแบบแถบกว้างต้องคำนึงถึงแบนด์วิดท์ และโหลด ขณะที่ใช้งาน การคำนวณสำหรับงานวิจัยนี้ จะจำลองหม้อแปลงแบบแถบกว้างด้วยตัวกรองความถี่กลางอันดับที่ 2 ชนิดบัตเตอร์เวิร์ค ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รูปแสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงความถี่กว้าง และการพัน

การคำนวณทำได้ดังนี้

$$L_{1p} = (F_L(\mu_0(N_p)^2)\lambda / \omega_L)(d + (d_{cu})/3) \quad (3.16)$$

เมื่อ $F = \text{Correction Factor (0.9)}$ [1]

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$\lambda =$ เส้นรอบรูปเฉลี่ยระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ

$\omega_L =$ ความถี่รวมของขดลวดต่อชั้น

$d =$ ระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิกับขดลวดทุติยภูมิ

$d_{cu} =$ ความหนารวมขดลวดของปฐมภูมิกับทุติยภูมิ

เลือกแกน EI 60/44K, 45H ซึ่งมี $A_L = 5,300 \text{ N}^2/\text{nH}$

คำนวณค่า L_p ที่ความถี่ $4 \cdot 5 \text{ MHz} = 20 \text{ MHz}$ เมื่อให้ $\tau = \omega_L/R$ โดยกำหนดให้ $\tau = 1$

$$R = 2\pi f L_p; L_p = 75 / (2\pi \cdot 20 \cdot 10^6) = 596.8 \text{ nH}$$

$$L_s \text{ ที่ค่า } 4 \cdot 75 = 300 \Omega \text{ (4R)} \text{ จะได้ } L_s = 300 / (2\pi \cdot 30 \cdot 10^3) = 1,591.38 \mu\text{H}$$

เมื่อพิจารณาแบนด์วิดท์ในช่วง 30 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 5 เมกะเฮิร์ตซ์

$$\text{จำนวนรอบ } N = \sqrt{\frac{1.591 \cdot 10^{-3}}{5300 \cdot 10^{-9}}} = 17.32 \text{ รอบ} \quad \text{เลือก 20 รอบ}$$

$$L_{1p} = 0.9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4(16.3 \cdot 10^{-3})(0.1 \cdot 10^{-3} + (0.27/3) \cdot 10^{-3}) \cdot 20^2$$

เมื่อกำหนดให้ใช้ลวด AWG 32# ซึ่งมี OD = 0.27 mm กระจายจนวนหนา 0.1 mm

$$\lambda = 4 \cdot (16.3 \cdot 10^{-3}) \text{ จากข้อมูลผู้ผลิต}$$

$$L_{ip} = 5.60 \text{ nH} \ll 1591.38 \text{ } \mu\text{H}$$

ที่ความถี่ 4*5 MHz ค่า $C_0 = 1/(2\pi fR) = 1/(2\pi 20 \cdot 10^6 \cdot 75)$

$$C_0 = 2.12 \text{ nF}$$

3.7 หม้อแปลงสายส่งชนิด Unbalance to Unbalance

UN:UN 2:1 (300:75 Ω)

$$\text{จาก } X_\mu = 3Rg/2 \quad (3.17)$$

$$= 3/2 \cdot 75 = 112.5 \text{ } \Omega$$

$$\text{เลือก } X_\mu \approx 2 \cdot 75$$

$$\therefore 2\pi f_{\min} L_\mu = 150$$

$$2\pi(435 \text{ KHz})L_\mu = 150 \quad (3.18)$$

$$\therefore L_\mu (75 \text{ Side}) = 597 \text{ } \mu\text{H}$$

เลือกแกน Toroid

รุ่น H24A FR 25 ϕ C15 ϕ /12 ซึ่งมี

$$A_L = 6,000 \text{ nH/N}^2 \pm 25\%$$

$$N = \sqrt{597 \text{ } \mu\text{H} \cdot 1.25 / 6 \text{ } \mu\text{H}} \approx 11 \text{ รอบ}$$

Z_{op} ใช้สาย TIEV เป็น PE $\epsilon_r = 2.2$

จนวนหนา 0.2 mm ดึงทองแดงเคมออก ใ้ลวดเบอร์ 32

SWG ϕ 0.2743 mm

$$D = 0.2 + 0.2 + 0.2743 = 0.6743 \text{ mm}$$

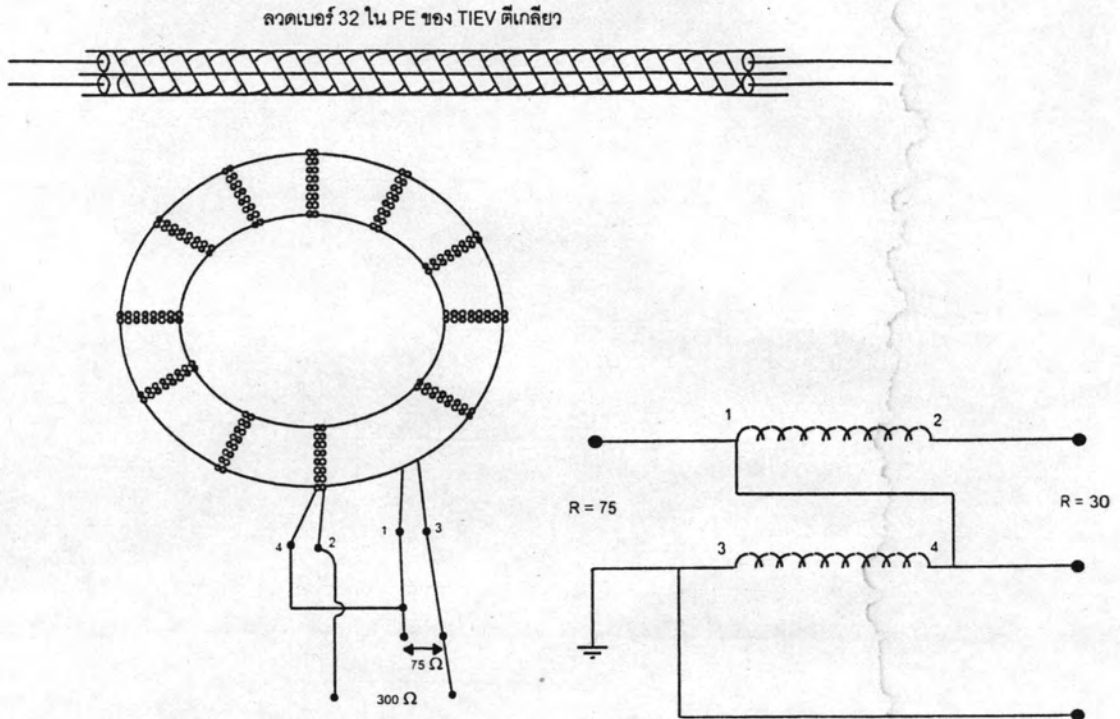
$$d = 0.2743 \text{ mm}$$

$$\therefore Z_0 = (120 / \sqrt{\epsilon_r}) \text{Cosh}^{-1}(0.674/0.274) \quad (3.19)$$

$$\epsilon_r = (1 + \sqrt{2.2})/2 = 1.24$$

$$\therefore Z_0 = 150 \Omega$$

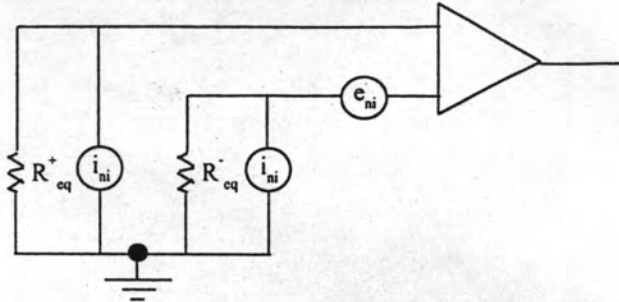
จากนั้นต่อวงจรตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการต่อวงจรหม้อแปลงสายส่ง

3.8 การคำนวณสัญญาณรบกวน

การคำนวณสัญญาณรบกวนรวมทั้งอินพุตของวงจรขยาย (พรีแอมป์ลิไฟเออร์) โดยใช้ออปแอมป์ แสดงดังรูปที่ 3.8 [15]



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลการเกิดสัญญาณรบกวน

ซึ่งการคำนวณสามารถทำได้ดังนี้

$$e_{ni(\text{total})} = (e_{ni}^2 + (i_{ni}R_{eq}^+)^2 + (i_{ni}R_{eq}^-)^2 + (e_{ni}^+)^2 + (e_{ni}^-)^2)^{1/2} \quad (3.20)$$

$$(e_{ni}^\pm)^2 = 4KTR_{eq}^\pm \quad (3.21)$$

$$V_{n(\text{rms})} = e_{ni(\text{total})}B^{1/2} \quad (3.22)$$

- เมื่อ e_{ni} คือ แรงดันรบกวนที่อินพุตของออปแอมป์
 i_{ni} คือ กระแสรบกวนที่อินพุตของออปแอมป์
 R_{eq}^+ คือ ความต้านทานสมมูลที่อินพุตของออปแอมป์ด้านไม่กลับขั้ว
 R_{eq}^- คือ ความต้านทานสมมูลที่อินพุตของออปแอมป์ด้านกลับขั้ว
 B คือ แบนด์วิดท์สมมูลที่พิจารณา หรือ Power bandwidth
 K คือ ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ = 1.38×10^{-23} Joules/ $^\circ\text{K}$
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($^\circ\text{K}$) ปกติจะคิดที่ $T = 300^\circ\text{K}$

การคำนวณสัญญาณรบกวนจากรูป เมื่อใช้ IC เบอร์ LM592 จากข้อมูลผู้ผลิต LM592 มี

$$e_{ni} = 12 \text{ nV}/(\text{Hz})^{1/2} \text{ สำหรับตัวกรองลำดับที่ 1}$$

$$\text{effective band width} \approx \pi/2(f_2 - f_1) = 7.8 \text{ MHz}$$

$$e_{ni} \approx 33.5 \text{ } \mu\text{V}$$

กระแส $i_n \approx 0.4 \text{ pA}/(\text{Hz})^{1/2}$ และ $R_{cq1} = R_{cq2} = 300 \text{ } \Omega$

$$\begin{aligned} e_{nt}^2 &= 4KTR_{cq} \\ &= 4 * 1.38 * 10^{-23} * 300 * 300 \\ &= 4.968 * 10^{-18} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_n R_{cq} &= 0.4 * 10^{-12} * 300 * (7.8 * 10^6)^{1/2} \\ &= 335 * 10^{-9} \text{ V} \end{aligned}$$

จากสมการ 3.20, 3.21, 3.22 จะได้

$$\begin{aligned} V_{n(\text{rms})} &= [(33.5 * 10^{-6})^2 + (335 * 10^{-9})^2 + (335 * 10^{-9})^2 + 4.968 * 10^{-18}]^{1/2} \\ &= 33.5 \text{ } \mu\text{V} \end{aligned}$$

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบอิมพัลส์ของตัวกรองที่ออกแบบนี้ด้วยโปรแกรม LEK โดยการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ (ช่วงเวลาน้อยกว่า 100 ns) ที่มีขนาดประจุ $q = 1$ พิโคคูลอมบี้ ที่อินพุต จะให้เอาต์พุตเท่ากับ 1.9 มิลลิโวลต์ ดังรูปที่ 3.9 เนื่องจากอัตราขยายของตัวกรองเท่ากับ 2.51 เท่า ดังนั้นจะได้ $\xi_p = 1.9 * 10^{-3} / 2.51 = 756.97$ ไมโครโวลต์ต่อพิโคคูลอมบี้ การเพิ่มประสิทธิภาพโดยลด S/N จะใช้หม้อแปลงแบบแถบกว้างต่อเข้ากับหม้อแปลงสายส่ง ซึ่งมีอัตราส่วน 1:2 ซึ่งมีผลทำให้ $\xi_s = 756.97 * 2 = 1.51$ มิลลิโวลต์ต่อพิโคคูลอมบี้ จากการคำนวณ จะได้ $V_{n(\text{rms})} = 33.5$ ไมโครโวลต์

พิจารณา $C_k = C_t = 1$ นาโนฟารัด

$$q_{\text{min}} = 5(C_k + C_t)V_{n(\text{rms})} / \xi_s e^{xy}$$

เมื่อป้อนสัญญาณพัลส์เข้าด้านรับของเครื่องรับโดยตรง

ทำให้ $X = 0$

ดังนั้น $e^{xy} = 1$ แทนค่า ในสมการ 2.35

$$q_{\text{min}} = 5(1+1)*33.5/(1.51*1) = 0.222 \text{ พิโคคูลอมบี้}$$

ในกรณีที่คิดพัลส์ลูกแรก การคำนวณความไวสำหรับสายเคเบิล ทำได้โดยการใช้ความต้านทานที่มีค่าเท่ากับคาแควเตอร์รีสติคของสายเคเบิลต่ออนุกรมกับ C_k คร่อมที่อินพุตของตัวกรองความถี่กลาง ที่ออกแบบดังรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 โดยใช้ความต้านทานขนาด 10 โอห์ม $C_k = 4$ และ 10 นาโนฟารัด ตามลำดับ แล้วจึงทำการป้อนกระแสพัลส์ที่มี $q = 1$ พิโคคูลอมป์ คร่อมตัวต้านทาน 10 โอห์ม

เนื่องจาก
$$f(C_k, Z_0) \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} = \frac{V_{3(\text{มิลิ})}}{V_{3(\text{เดซิ})}}$$

ดังนั้นที่ $R = 10$ โอห์ม $C_k = 4$ นาโนฟารัด จะได้

$$f(C_k, Z_0) \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} = 2 \cdot 10^{-4} / (1.9 \cdot 10^{-3}) = 0.105$$

ที่ $C_k = 10$ นาโนฟารัด จะได้

$$f(C_k, Z_0) \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} = 2.15 \cdot 10^{-4} / (1.9 \cdot 10^{-3}) = 0.113$$

จากสมการ 2.24 เมื่อ $C_k = 4$ นาโนฟารัด และระยะ $X = 0$

$$q_{\min} = 5(33.5)/(3028)(0.113) = 0.48953 \text{ พิโคคูลอมป์}$$

ที่ $C_k = 10 \text{ nF}$

$$q_{\min} = 5(33.5)/(3028)(0.105) = 0.5268 \text{ พิโคคูลอมป์}$$

เป็น q_{\min} สำหรับพัลส์ลูกแรกที่วิ่งมาถึงเครื่องตรวจวัด PD

ที่ $C_k = 10 \text{ nF}$ กรณีไม่คิดค่าสูญเสียภายในสาย

เนื่องจาก

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น} \quad \frac{2Z_m}{Z_m + Z_0} &= 2 \cdot 75 / (75 + 10) \\ &= 1.765 \end{aligned}$$

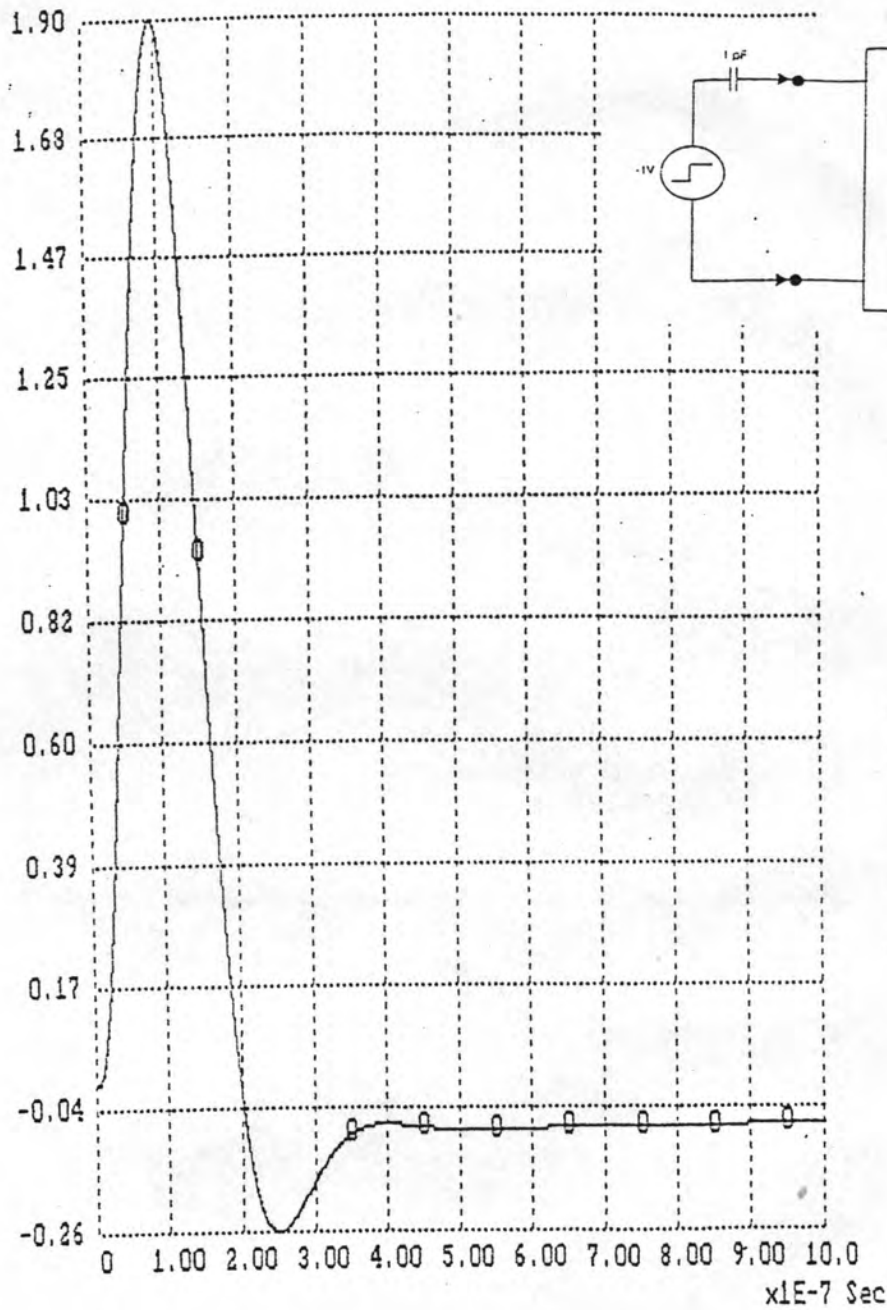
$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น} \quad \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} = (75 - 10) / (75 + 10) = 0.765$$

เมื่อคิด q_{\min} เป็นขนาดของคลื่นรูปที่ 3 ที่เครื่องวัดตรวจจับได้ คือ

$$\begin{aligned}
 0.5268 \text{ pC} &= q_{\min 3} * \frac{2Z_m}{Z_m + Z_0} * \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \\
 &= q_{\min 3} * 1.765 * 0.765 e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \\
 q_{\min 3} &= (0.5268 e^{-\gamma(\omega)(3L-x)}) / 1.35 = 0.39 e^{-\gamma(\omega)(3L-x)}
 \end{aligned}$$

U9

x1E-3

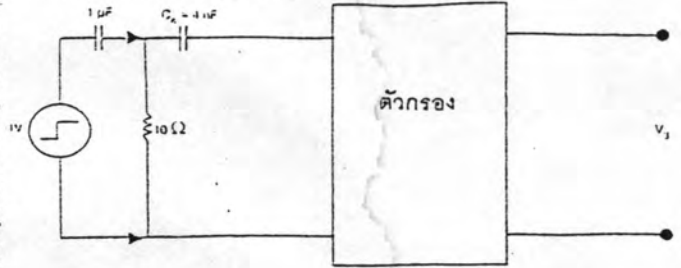
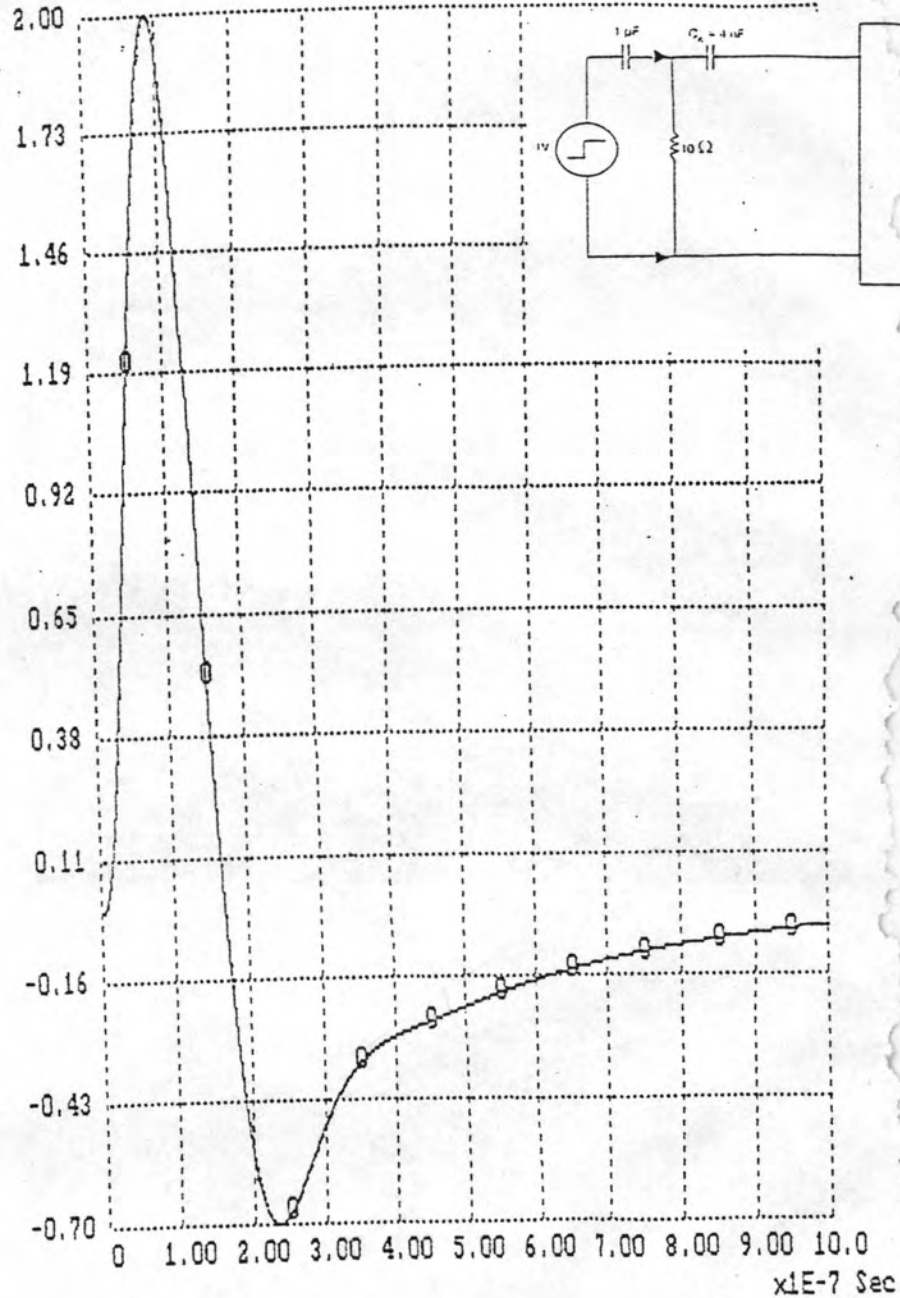


รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองแรงดันพัลส์ขนาด 1 μ C

ความต้านทาน R = 10 โอห์ม

U9

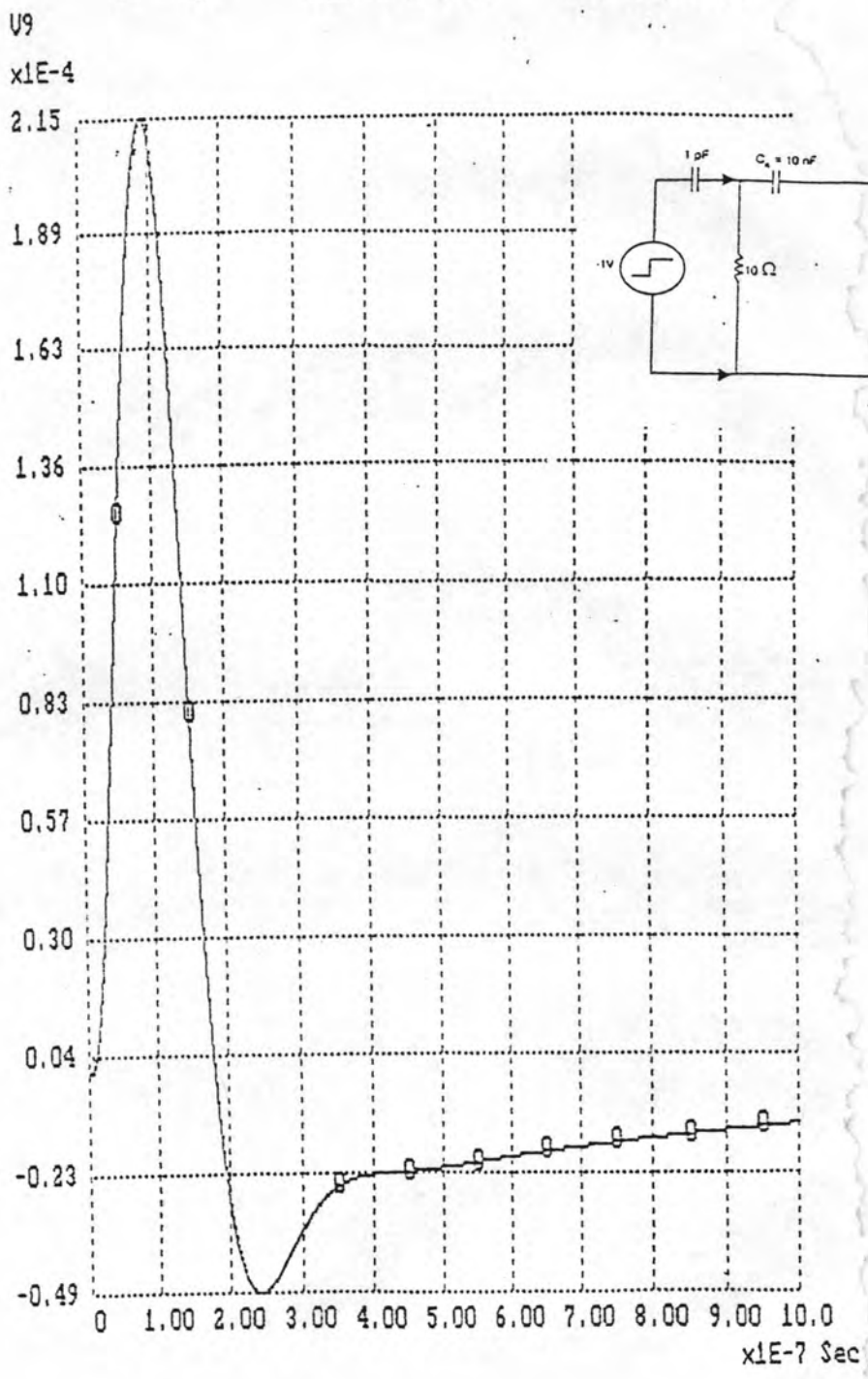
x1E-4



รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองแรงดันพัลส์ขนาด 1 μ C

ความต้านทาน R = 10 โอห์ม Ck = 4 nF

0 — U9 Min=-0.0000491 Max= 0.0002155



รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองแรงดันพัลส์ขนาด 1 pC

ความต้านทาน R = 10 โอห์ม Ck = 10 nF