บทที่ 3
การออกแบบสร้างวงจร และผลการวัด

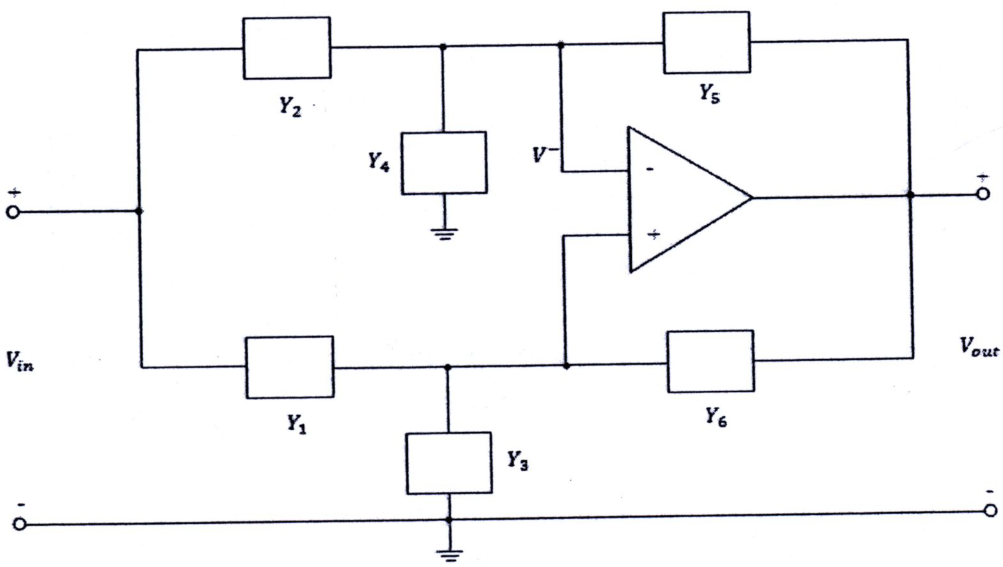
3.1 บทนำ

ในการสังเคราะห์วงจรเน็ทเวิร์กแบบแอคทีฟ อาร์ ซี จากทรานสเฟอร์ฟังก์ชันนั้นอาจทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธีคาสเคด (Cascade) โดยการแยกองค์ประกอบของเน็ทเวิร์กฟังก์ชันให้อยู่ในรูปผลคูณของเทอมลำดับที่หนึ่ง (First order) หรือเทอมลำดับที่สอง (Second order) ในกรณีที่มีโพลจริงคูณอยู่ด้วย แต่ละเทอมสามารถนำมาสร้างวงจรแบบแอคทีฟ อาร์ ซี (Active R C circuit) ที่มีรูปแบบเดียวกันแล้วนำมาอนุกรมกัน จะได้วงจรรวมแทนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันทั้งหมด

2. วิธีโดยตรง (Direct)คือการสร้างวงจรแบบแอคทีฟ อาร์ ซี วงจรเดียวแทนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันทั้งหมด รูปแบบวงจรจึงซับซ้อนแตกต่างกันไปตามลำดับสูงสุดของเน็ทเวิร์กฟังก์ชัน

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้โครงสร้างของวงจร แบบ ใช้ ออปแอมป์ หนึ่งตัว (Single-Amplifier Realization) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 มาคาสเคดกัน



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัว

จากรูปที่ 3.1 ที่ปลายของระยะทั้ง 2 ของออปแอมป์เป็นสมการได้ว่า

$$Y_2\left(V-V_{in}\right)+Y_4\left(V\right)+Y_6\left(V-V_0\right)=0 \tag{3.1}$$

$$Y_1\left(V-V_{in}\right)+Y_3\left(V\right)+Y_5\left(V-V_0\right)=0 \tag{3.2}$$

จาก (3.1) และ (3.2) เราตัดเทอม V ออกจะได้ Transfer voltage ratio ฟังชั่นคือ

$$H(s)=\frac{V_0(s)}{V_{in}(s)}$$

$$=\frac{Y_1(Y_2+Y_4+Y_6)-Y_2(Y_1+Y_3+Y_5)}{Y_6(Y_1+Y_3+Y_2)-Y_5(Y_2+Y_4+Y_2)} \tag{3.3}$$

จาก (3.3) ทำให้สมการง่ายต่อการคำนวณ (Simplify) โดยให้

$$Y_1+Y_3+Y_5=Y_2+Y_4+Y_6 \tag{3.4}$$

ตามเงื่อนไขในสมการ (3.4) สมการ (3.3) จะลดรูปลงเหลือ

$$H(s)=\frac{V_0(s)}{V_{in}(s)}=\frac{Y_1-Y_2}{Y_6-Y_5}=\frac{Y_2-Y_1}{Y_5-Y_6} \tag{3.5}$$

สมการ (3.5) เขียนเป็นรูปแบบของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันได้ทั่วไปว่า

$$H(s)=\frac{P(s)}{Q(s)} \tag{3.6}$$

เพื่อให้สมการ (3.6) สามารถออกแบบให้เป็นวงจร RC ได้ โดยใช้ทฤษฎีของ RC One-port network ซึ่งคุณสมบัติของ RC ในรูป One-port admittance เขียนได้ว่า

$$Y(s)=\frac{Hs(S+\alpha_3)(S+\alpha_5)(S+\alpha_5)...}{(S+\alpha_2)(S+\alpha_4)...} \tag{3.7}$$

โดยที่ $0<\alpha_2<\alpha_3<\alpha_4<\alpha_5...$

$$\frac{Y(s)}{S}=H+\frac{k_0}{S}+\frac{k_2}{S+\alpha_2}+\frac{k_3}{S+\alpha_4}+... \tag{3.8}$$

จาก (3.6) ให้

$$H(s)=\frac{\frac{P(s)}{D(s)}}{\frac{Q(s)}{D(s)}} \tag{3.9}$$

โดยที่ $D(s)$ มีรากที่ไม่จำกัด (Unrestricted) แต่มีเงื่อนไขว่ารากจะต้องเป็นรากง่ายๆ (Simple) ค่าจริง (Real) และอยู่บน Negative axis เท่านั้น

จาก (3.9) เทียบเป็นสัมประสิทธิ์กับ (3.5) จะได้

$$\frac{P(s)}{D(s)}=Y_1-Y_2 \text{ หรือ } Y_2-Y_1 \tag{3.10a}$$

$$\frac{Q(s)}{D(s)}=Y_6-Y_5 \text{ หรือ } Y_5-Y_6 \tag{3.10b}$$

หรือ

$$\frac{P(s)}{D(s)}=K_\infty s+\frac{\sum_i k_i s}{s+\sigma_i}-\frac{\sum_j k_j s}{s+\beta_i} \tag{3.11a}$$

$$\frac{Q(s)}{D(s)}=K_\infty s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u}-\frac{\sum_v k_v s}{s+\beta_v} \tag{3.11b}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ k_∞, k_i, k_j, k_u และ k_v เป็นบวกและเป็นค่าจริง ถ้า k_∞ และ $k_{\infty'}$ เป็นบวก จะได้ว่า

$$Y_1(s)=K_\infty s+\frac{\sum_v Ik_i s}{s+\sigma_i} \quad \text{และ} \quad Y_2(s)=\frac{\sum_j k_j s}{s+\beta_i} \tag{3.12a}$$

$$Y_5(s)=\frac{\sum_v k_v s}{s+\beta_v} \quad \text{และ} \quad Y_2(s)=K_{\infty'} s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u} \tag{3.12b}$$

$$Y_1(s)=\frac{\sum_v k_v s}{s+\beta_v} \quad \text{และ} \quad Y_6(s)=K_{\infty'} s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u} \tag{3.13a}$$

$$Y_5(s)=K_\infty s+\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_u} \quad \text{และ} \quad Y_6(s)=\frac{\sum_u k_u s}{s+\sigma_i} \tag{3.13b}$$

ซึ่งจากสมการ (3.12a) และ (3.12b) สามารถออกแบบสร้างเป็นวงจร RC สุดท้ายในการคำนวณหาค่า Y_3 และ Y_4 จากสมการ (3.4) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$Y_3 - Y_4 = (Y_6 - Y_5) - (Y_1 - Y_2)$$

$$= Q(s) - \frac{P(s)}{D(s)} \tag{3.14a}$$

หรือ

$$Y_4 - Y_3 = (Y_5 - Y_6) - (Y_2 - Y_1)$$

$$= Q(s) - \frac{P(s)}{D(s)} \tag{3.14b}$$

3.2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัว

สร้างวงจรจาก Transfer voltage ratio ฟังชั่น สมการที่ (2.20) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s) \cdot H_4(s) \tag{3.15}$$

3.2.1 ตัวอย่างการออกแบบวงจร $H_1(s)$

$$H_1 = \frac{[s^2 + 5.5254s + 36.4608]}{[s^2 + 5.3714s + 36.597]} = \frac{P(s)}{Q(s)} \tag{3.16}$$

ให้ $D(s)$ = (s+5) (s+7) เมื่อ

$$\frac{P(s)}{D(s)} = Y_1 - Y_2 \quad , \frac{Q(s)}{D(s)} = Y_6 - Y_5 \quad , \frac{Q(s) - P(s)}{D(s)} = Y_3 - Y_4$$

หา Y_1, Y_2 จาก

$$\frac{P(s)}{SD(s)} = \frac{[s^2 + 5.5254s + 36.4608]}{s(s+5)(s+7)} \tag{3.17}$$

$$= \frac{A}{s} + \frac{B}{s+5} + \frac{C}{s+7} \tag{3.18}$$

หาค่า A ,B ,C

$$A=\frac{SP(s)}{SD(s)}\Big|_{s=0} \quad =\frac{s\left(s^2+5.5254s+36.4608\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=0} \quad =1.0417$$

$$B=\frac{(s+5)P(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-5} \quad =\frac{(s+5)\left(s^2+5.5254s+36.4608\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-5} \quad =-3.3834$$

$$C=\frac{(s+7)P(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-7} \quad =\frac{(s+7)\left(s^2+5.5254s+36.4608\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-7} \quad =3.3416$$

นำค่า A ,B ,C ที่ได้ไปแทนลงในสมการ (4.18) จะได้

$$\frac{P(s)}{D(s)}=\frac{1.0417s}{s}-\frac{3.3834s}{s+5}+\frac{3.3416s}{s+7}=Y_1-Y_2 \tag{3.19}$$

$$\therefore \quad Y_1=\frac{1.0417s}{s}+\frac{3.3416s}{s+7} \tag{3.20}$$

$$Y_1=\frac{1}{0.96}+\frac{1}{0.2993+\frac{1}{0.4774s}} \tag{3.21}$$

$$\therefore \quad Y_2=\frac{3.3834s}{s+5} \tag{3.22}$$

$$Y_2=\frac{1}{0.2956+\frac{1}{0.6767s}} \tag{3.23}$$

หา Y_5,Y_6 จาก

$$\frac{Q(s)}{SD(s)}=\frac{[s^2+5.3714s+36.597]}{s(s+5)(s+7)} \tag{3.24}$$

$$=\frac{D}{s}+\frac{E}{s+5}+\frac{F}{s+7} \tag{3.25}$$

หาค่า D ,E ,F

$$D = \frac{SP(s)}{SD(s)}\Big|_{s=0} \quad = \frac{S\left(s^2+5.3714s+36.597\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=0} \quad = 1.0456$$

$$E = \frac{(s+5)Q(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-5} \quad = \frac{(s+5)\left(s^2+5.3714s+36.597\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-5} \quad = -3.4740$$

$$F = \frac{(s+7)Q(s)}{SD(s)}\Big|_{s=-7} \quad = \frac{(s+7)\left(s^2+5.3714s+36.597\right)}{s(s+5)(s+7)}\Big|_{s=-7} \quad = 3.4284$$

นำค่า D ,E ,F ที่ได้ไปแทนลงในสมการ (3.25) จะได้

$$\frac{Q(s)}{D(s)} = \frac{1.0456s}{s} - \frac{3.474s}{s+5} + \frac{3.4284s}{s+7} = Y_6 - Y_5 \tag{3.26}$$

$$\therefore \; Y_6 = \frac{1.0456s}{s} + \frac{3.4284s}{s+7} \tag{3.27}$$

$$Y_6 = \frac{1}{0.9564} + \frac{1}{0.2917 + \frac{1}{0.4898s}} \tag{3.28}$$

$$\therefore \; Y_5 = \frac{3.474s}{s+5} \tag{3.29}$$

$$Y_5 = \frac{1}{0.2879 + \frac{1}{0.6948s}} \tag{3.30}$$

หา Y_3, Y_4 จาก

$$\frac{Q(s)-P(s)}{D(s)} = (Y_6 - Y_5) - (Y_1 - Y_2) \tag{3.31}$$

นำค่าจากสมการ (3.26) และ (3.19) มาแทนในสมการ (3.31) จะได้

$$\frac{Q(s)-P(s)}{D(s)} = \left[\frac{1.0456s}{s} - \frac{3.474s}{s+5} + \frac{3.4284s}{s+7}\right] - \left[\frac{1.0417}{s} - \frac{3.3834s}{s+5} + \frac{3.3416s}{s+7}\right] \tag{3.32}$$

$$\frac{Q(s)-P(s)}{D(s)} = \left[\frac{0.0039s}{s} - \frac{0.0906s}{s+5} + \frac{0.0868s}{s+7}\right] = Y_3 - Y_4 \tag{3.33}$$

$$\therefore \quad Y_3 = \frac{0.0039s}{s} + \frac{0.0868s}{s+7} \tag{3.34}$$

$$Y_3 = \frac{1}{256.4103} + \frac{1}{11.5207 + \frac{1}{0.0124s}} \tag{3.35}$$

$$\therefore \quad Y_4 = \frac{0.0906s}{s+5} \tag{3.36}$$

$$Y_4 = \frac{1}{11.037 + \frac{1}{0.0181s}} \tag{3.37}$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับ สมการ

$$H_2 = \frac{[s^2 + 6.9012s + 24.5674]}{[s^2 + 9.5166s + 25.6666]} = \frac{P(s)}{Q(s)}$$

$$H_3 = \frac{[s^2 + 33.8696s + 619.9923]}{[s^2 + 8.1402s + 28.9364]} = \frac{P(s)}{Q(s)}$$

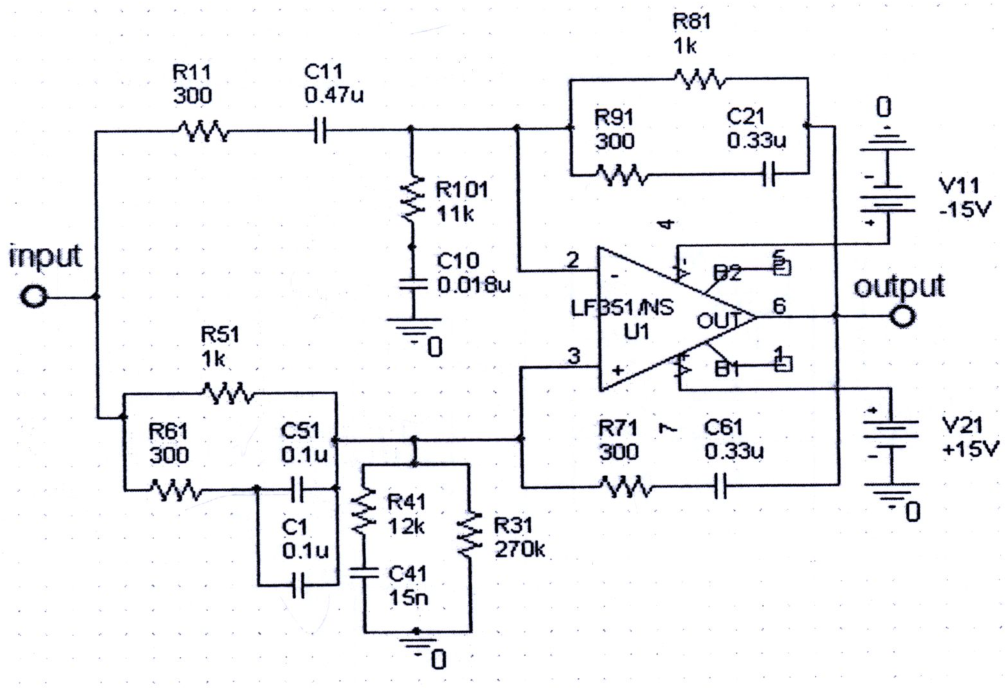
$$H_4 = \frac{s + 5.4058}{s + 4.9718} = \frac{P(s)}{Q(s)}$$

สามารถออกแบบได้ด้วยวิธการเดียวกัน

3.3 จำลองการทำงานของวงจรแบบออปแอมป์หนึ่งตัวโดยใช้โปรแกรม PSpice

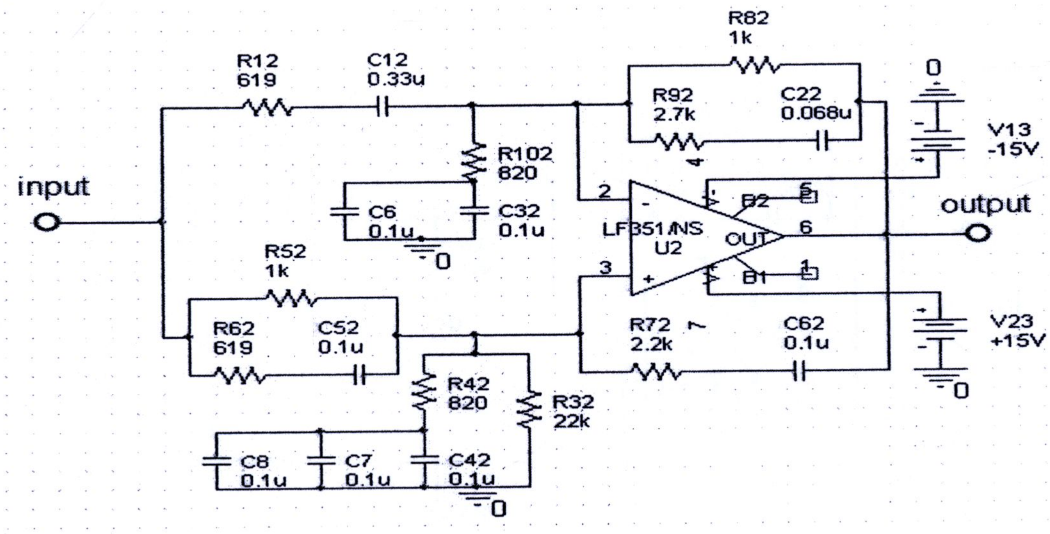
PSpice เป็นโปรแกรมที่มีความสามารถในการจำลองการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ หรือการออกแบบการทำงาน พร้อมยังสามารถจำลองดูผลลัพธ์ของการตอบสนองทางขนาด และทางเฟส ก่อนที่จะนำวงจรดังกล่าวไปทำการสร้างเพื่อนำไปใช้งานจริง

นำค่า Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_1 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจรรูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.2



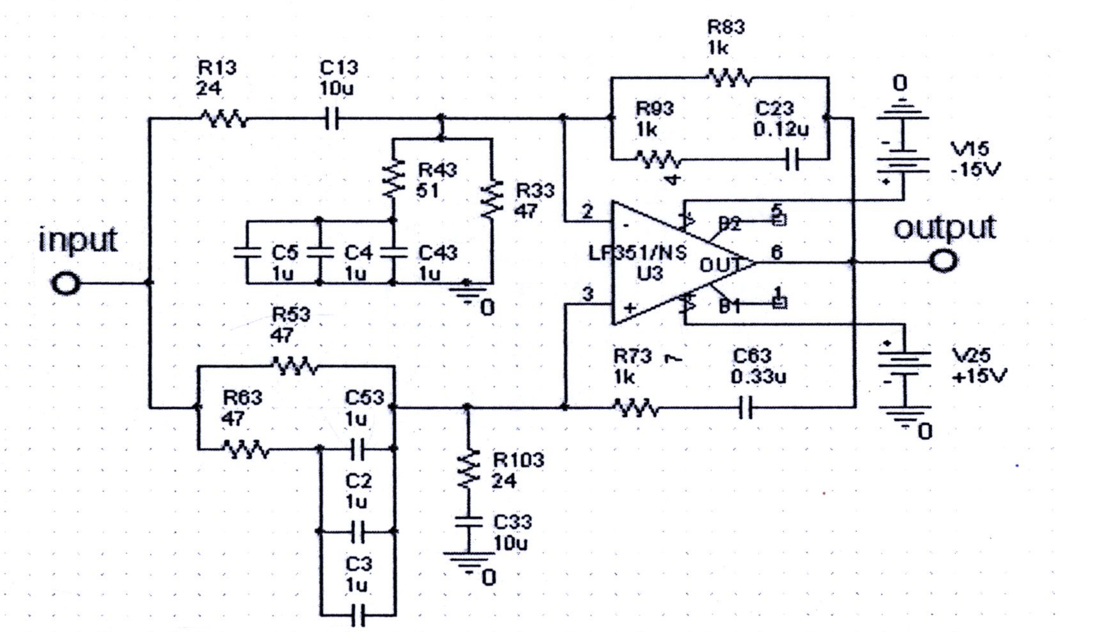
รูปที่ 3.2 วงจรสมการ $H_1(s)$

นำค่า Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_2 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจร รูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.3



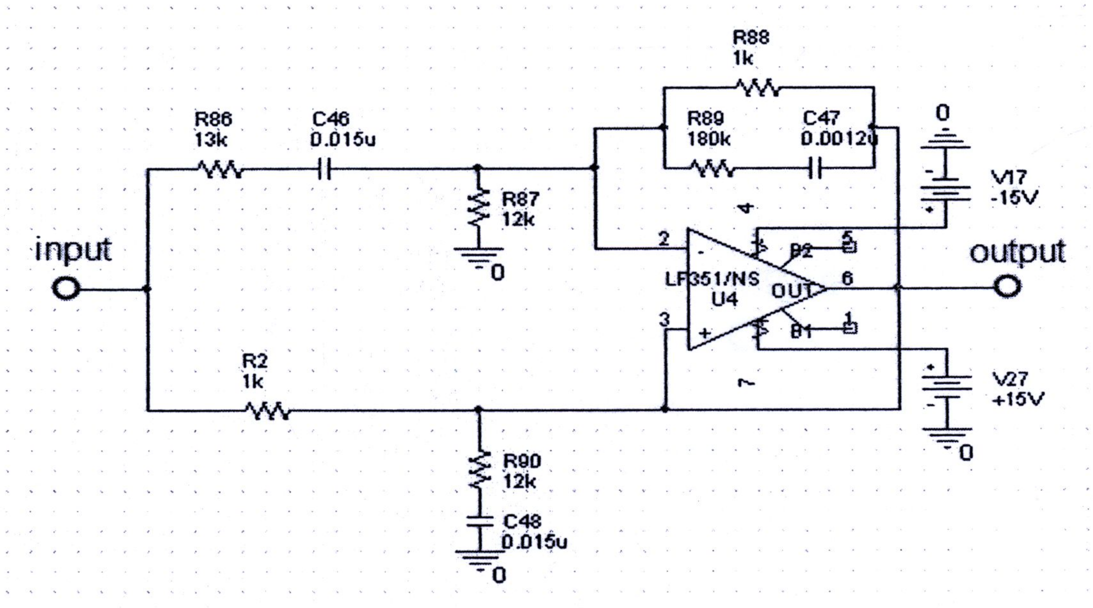
รูปที่ 3.3 วงจรสมการ $H_2(s)$

นำค่า Y_1,Y_2,Y_3,Y_4,Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_3 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจร รูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.4



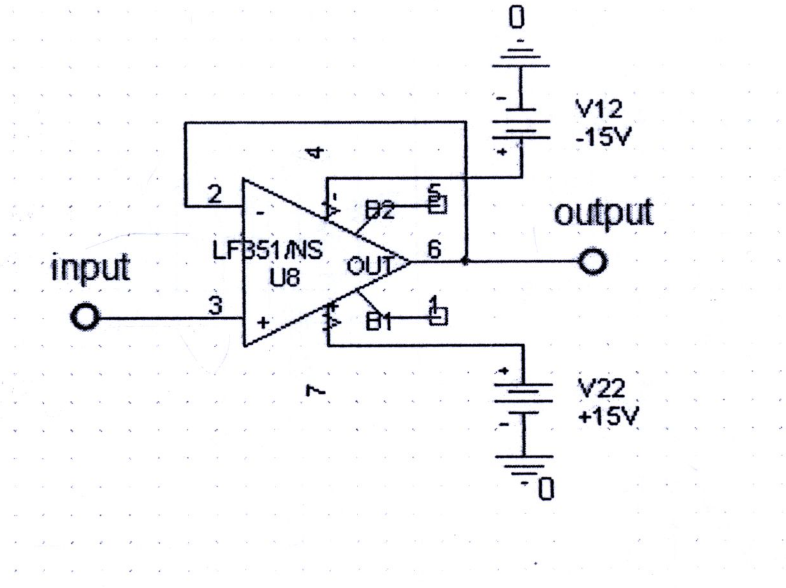
รูปที่ 3.4 วงจรสมการ $H_3(s)$

นำค่า Y_1,Y_2,Y_3,Y_4,Y_5 และ Y_6 ที่หาได้จากสมการ H_4 มาแทนค่าตามโครงสร้างของวงจร รูปที่ 3.1 โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 จะได้วงจร ดังรูปที่ 3.5



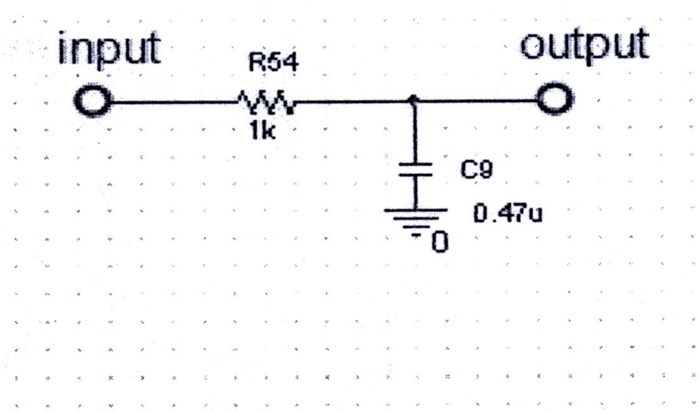
รูปที่ 3.5 วงจรสมการ $H_4(s)$

จากนั้นนำวงจรในรูปที่ 3.2, 3.3, 3.4 และ 3.5 คาสเคดกัน โดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LF351 เป็นบัพเฟอร์ตัวเชื่อมแต่ละวงจรจะได้วงจร ดังรูปที่ 3.6

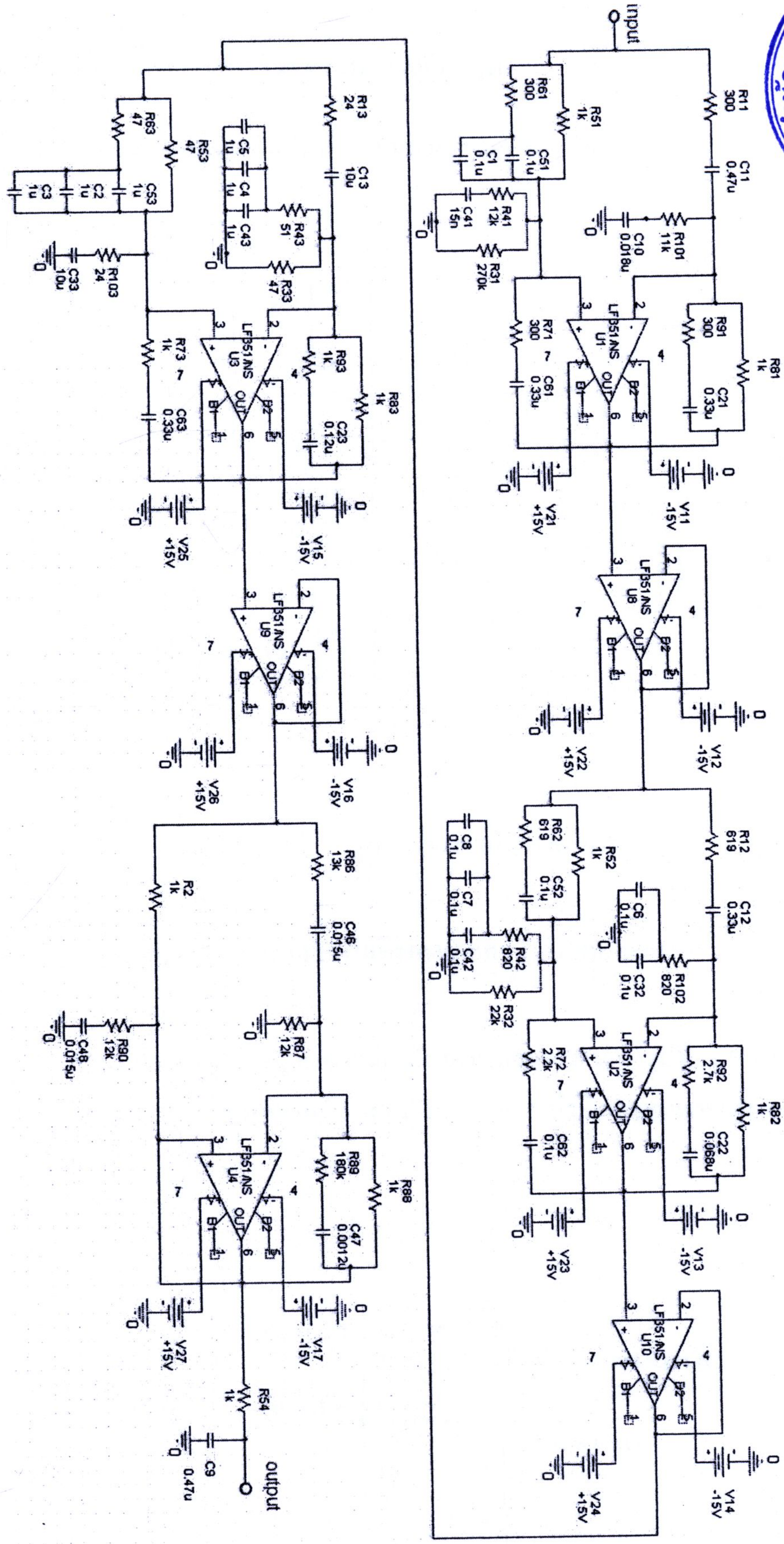


รูปที่ 3.6 วงจรบัพเฟอร์

เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุตที่ได้ยังมีสัญญาณความถี่สูงอยู่ ฉะนั้นจึงนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมาใช้ในการกรองความถี่สูงออกให้เลือกเฉพาะความถี่ต่ำที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.7



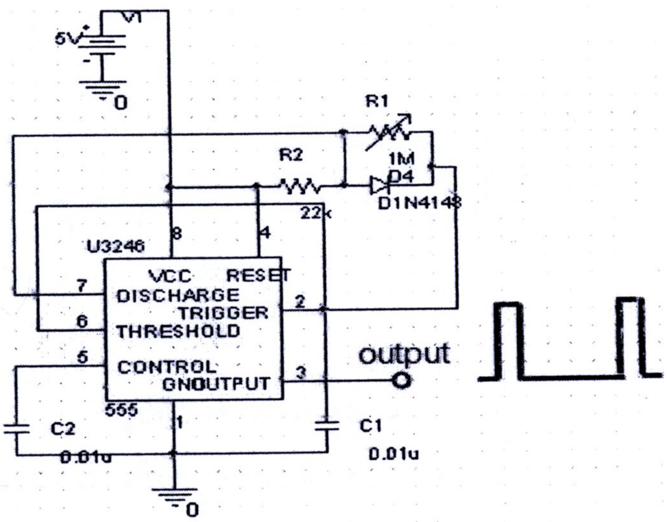
รูปที่ 3.7 วงจรกรองความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.8 วงจรรวมออปแอมป์หนึ่งตัวนำมาคาสเคดกัน

3.4 จำลองการทำงานของวงจรสัญญาณอินพุต

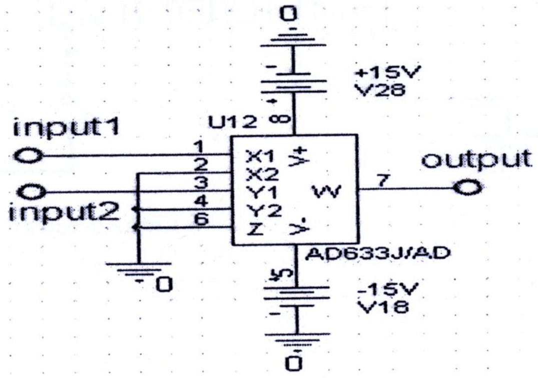
ทำการสร้างอินพุตซึ่งเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมแคบๆ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9วงจรสัญญาณอินพุต

3.5 จำลองการทำงานของวงจรมัลติพลายเออร์ (Multiplier)

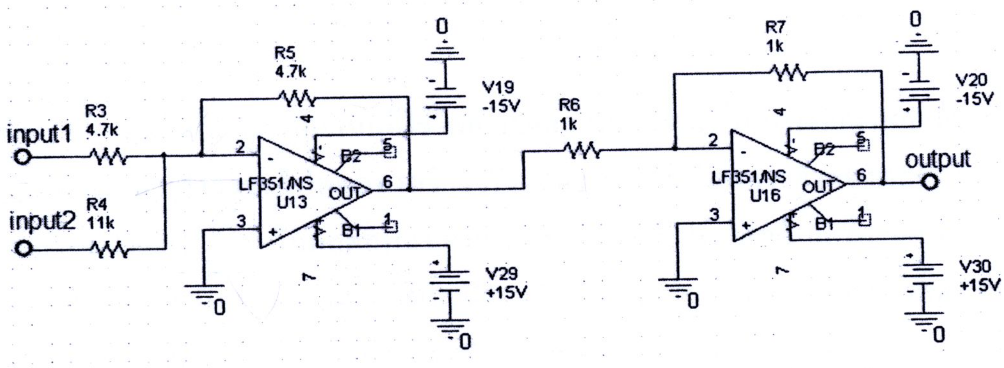
ส่วนนี้คือการนำสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์จากวงจรดังรูปที่ 3.6 มาต่อเข้ากับวงจรมัลติพลายเออร์ที่อินพุตขาหนึ่ง ส่วนอินพุตอีกขาหนึ่งคือสัญญาณพาหะ (carrier)



รูปที่ 3.10 วงจรมัลติพลายเออร์

3.6 จำลองการทำงานของวงจร Adder

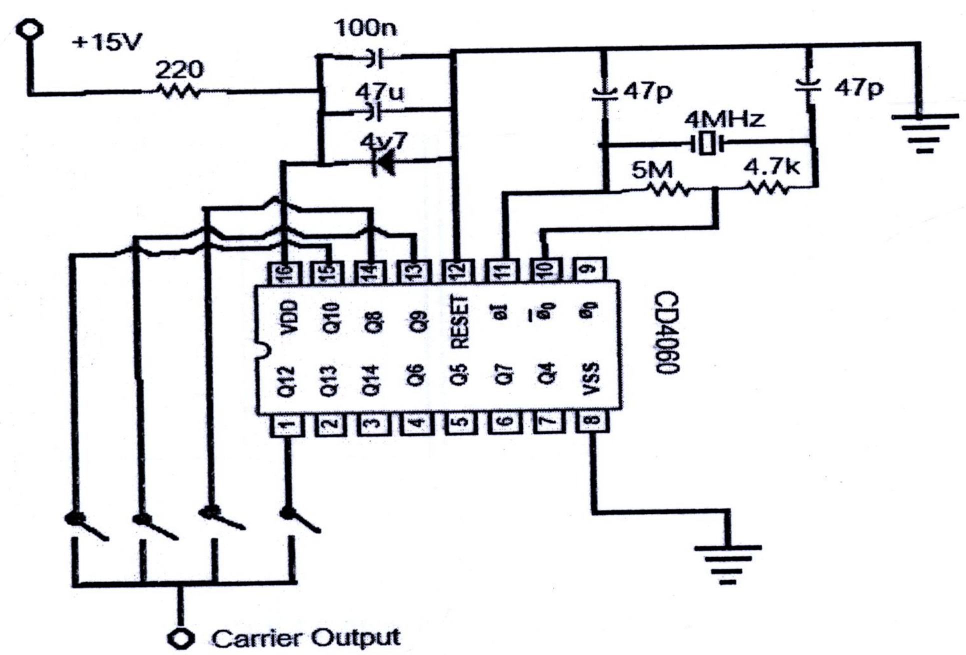
ส่วนนี้คือ การนำสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากวงจรดังรูปที่ 3.8 รวมกับสัญญาณซายน์กำลังสองพัลซ์จากวงจรดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.11 วงจรบวก(Adder)

3.7 จำลองการทำงานของวงจรสัญญาณพาหะ (Carrier)

ทำการสร้างสัญญาณพาหะ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสัญญาณพาหะ (Carrier)