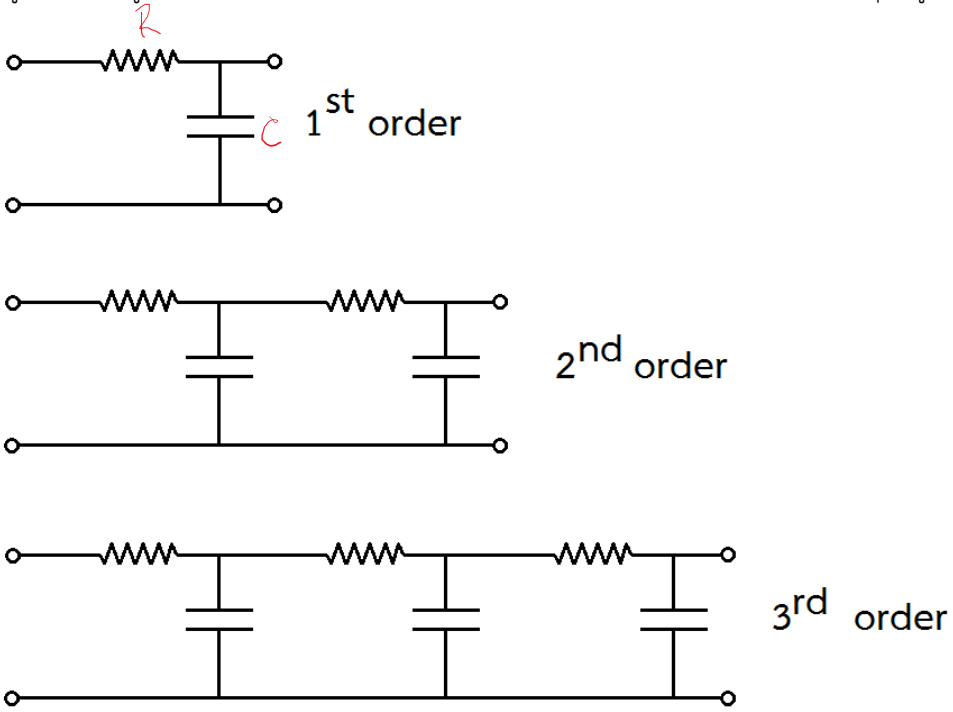
สัปดาห์ที่ 13

บทที่ 6 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit)

วงจรกรองความถี่เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าผ่านได้บางช่วงเท่านั้น โดยที่ความถี่อื่นๆ จะถูกลดทอนหรือ ตัดออกไปเพื่อให้ได้ความถี่ที่ต้องการเท่านั้น โดยวงจรกรองความถี่นั้น แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit, LPF), วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter Circuit, HPF), วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter Circuit, BPF) และ วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit, BRF)

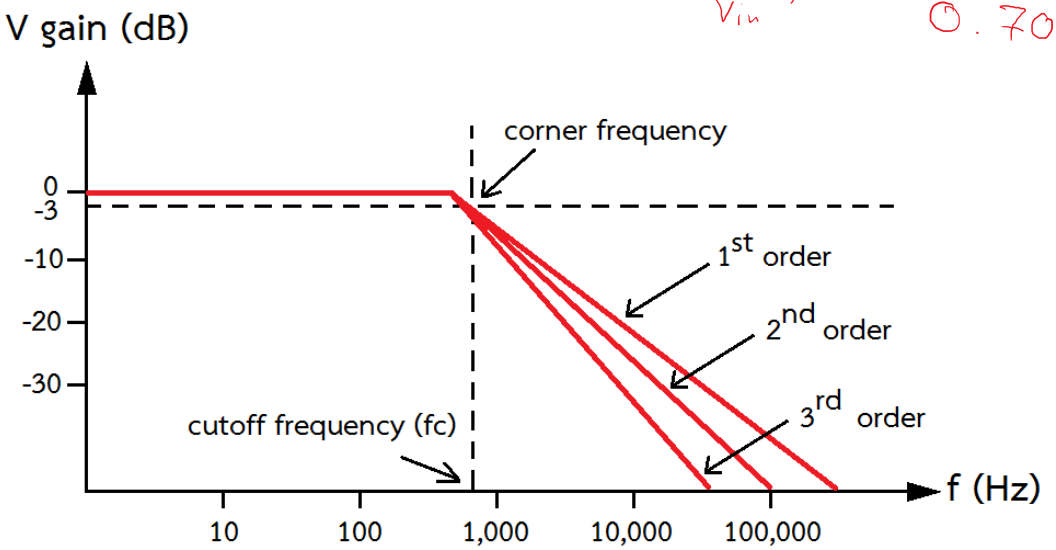
6.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit, LPF)

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความที่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่สูงกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 6.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปที่ 6.1 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter, LPF) สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 6.1

$$\omega_C = \frac{1}{RC} = 2\pi f_C \qquad (6.1)$$

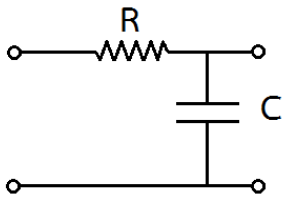
โดย ω_C คือ ความถี่ตัดเชิงมุม มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที (rad/s)

f_C คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)

C คือ ความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

ตัวอย่างที่ 6.1 จากรูป ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน กำหนดให้ R = 10 kΩ และ C = 0.001 μF จงหาค่าความถี่ตัด

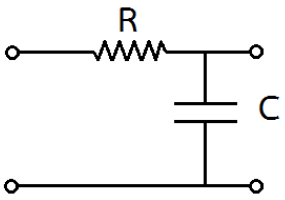


วิธีทำ จาก $\omega_C = \frac{1}{RC} = \frac{1}{(10\times10^3)(0.001\times10^{-6})} = 100\ krad/s$

หรือ $\omega_C = 2\pi f_C$

$$f_C = \frac{\omega_C}{2\pi} = \frac{100\times10^3}{2\times3.14} = 15.9\ kHz$$

ตัวอย่างที่ 6.2 จากรูป ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ถ้าต้องการความถี่ตัด 2 kHz โดยกำหนดให้ C = 0.005 μF จงหาว่าจะต้องใช้ค่าความต้านทานในวงจรเท่าไร

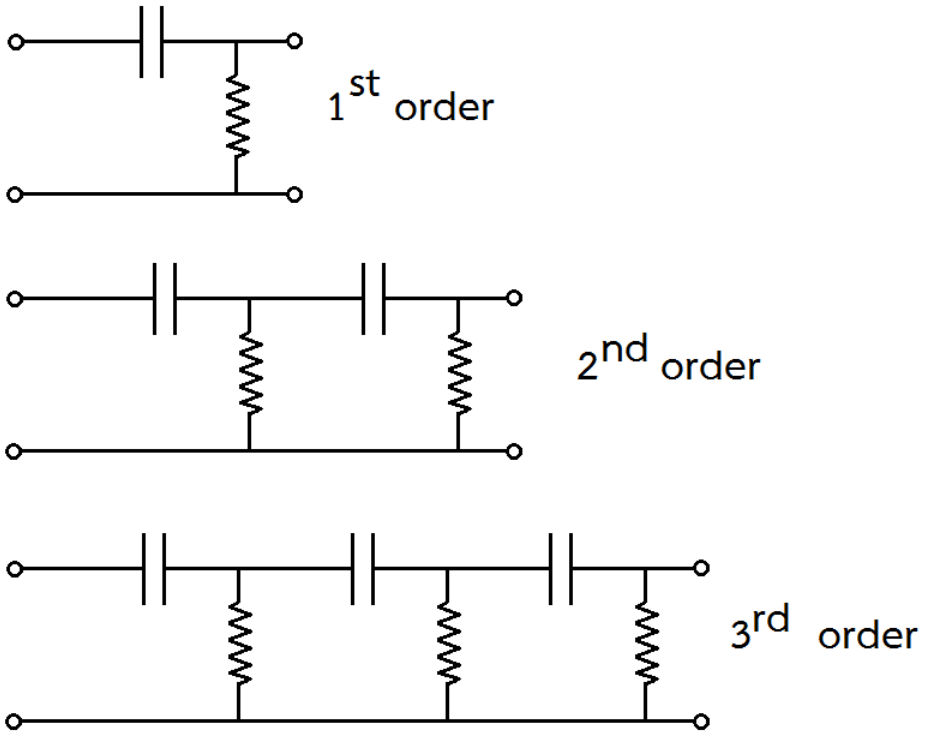


วิธีทำ จาก $\frac{1}{RC} = 2\pi f_C$

จะได้ $R = \frac{1}{2\pi f_C C} = \frac{1}{2\times 3.14\times 2\times 10^{3}\times 0.005\times 10^{-6}} = 15.9\ k\Omega$

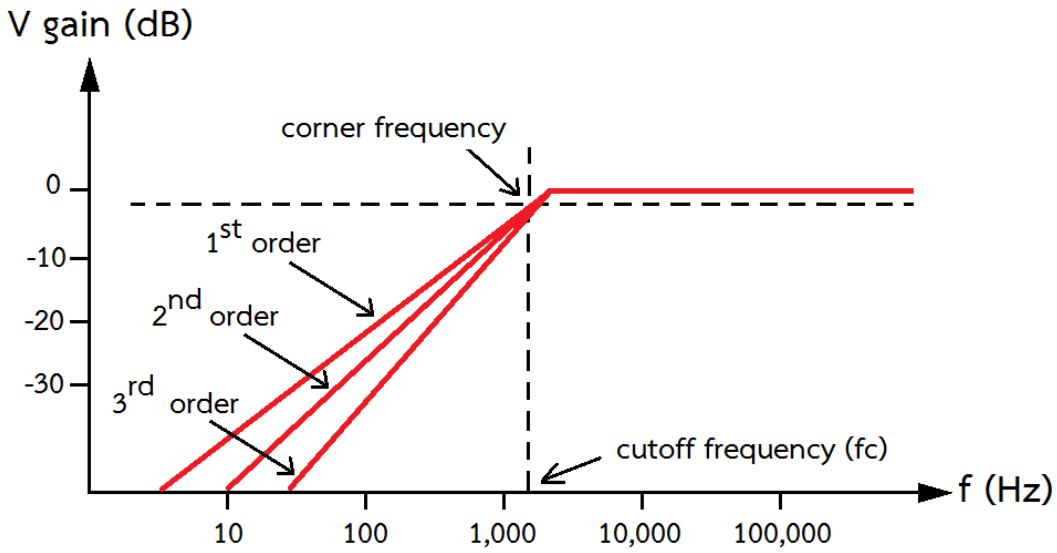
6.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter Circuit, HPF)

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน เป็นวงจรที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยที่ความถี่ที่ต่ำกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 6.3 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

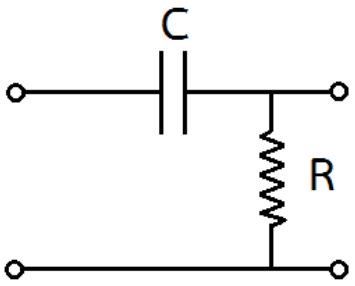
จากรูปที่ 6.3 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกำดับการลดทอนความถี่ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (cutoff frequency) ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (high pass filter, HPF) สามารถทำได้โดยใช้หลักการเดียวกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน นั่นคือคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 6.1

ตัวอย่างที่ 6.3 จากรูปวงจรกรองความถี่สูงผ่าน จงคำนวณหาค่าความต้านทาน เมื่อกำหนดให้ตัวเก็บประจุมีค่าความจุ 0.002 μF และต้องการความถี่ตัด 10 kHz



$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

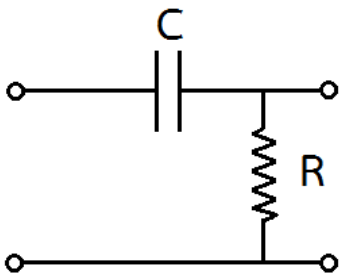
วิธีทำ จาก $\frac{1}{RC} = 2\pi f_C$

จะได้ $R = \frac{1}{2\pi f_C C}$

$$R = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10 \times 10^3 \times 0.002 \times 10^{-6}}$$

$$R = 7.961\ k\Omega$$

ตัวอย่างที่ 6.4 จากรูป ในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน กำหนดให้ R = 22 kΩ และ C = 0.01 μF จงหาค่าความถี่ตัด



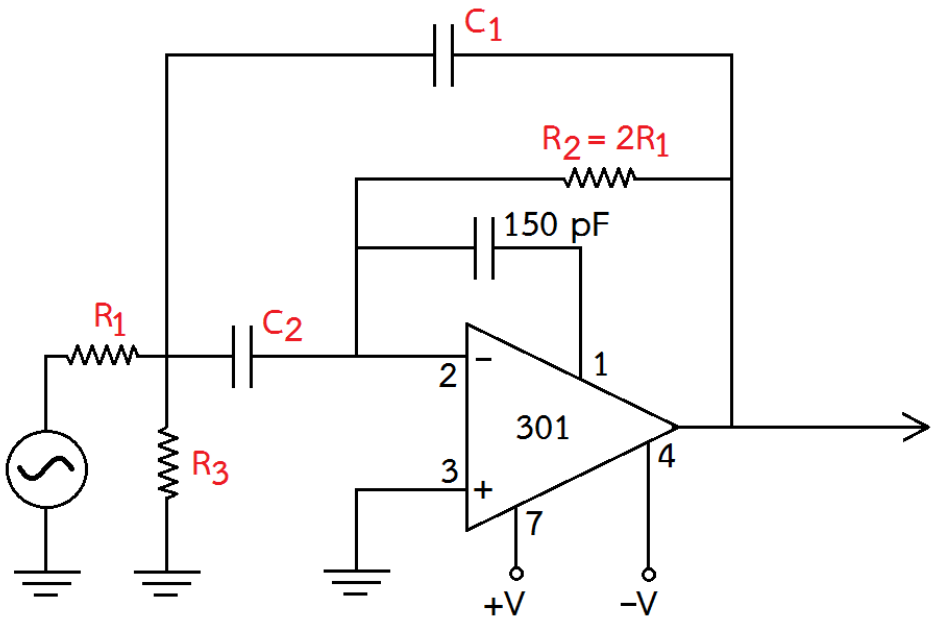
วิธีทำ จาก $\omega_C = \frac{1}{RC} = \frac{1}{(22\times10^3)(0.01\times10^{-6})} = 4.45\ krad/s$

หรือ $\omega_C = 2\pi f_C$

$f_C = \frac{\omega_C}{2\pi} = \frac{4.45\times10^3}{2\times3.14} = 724\ kHz$

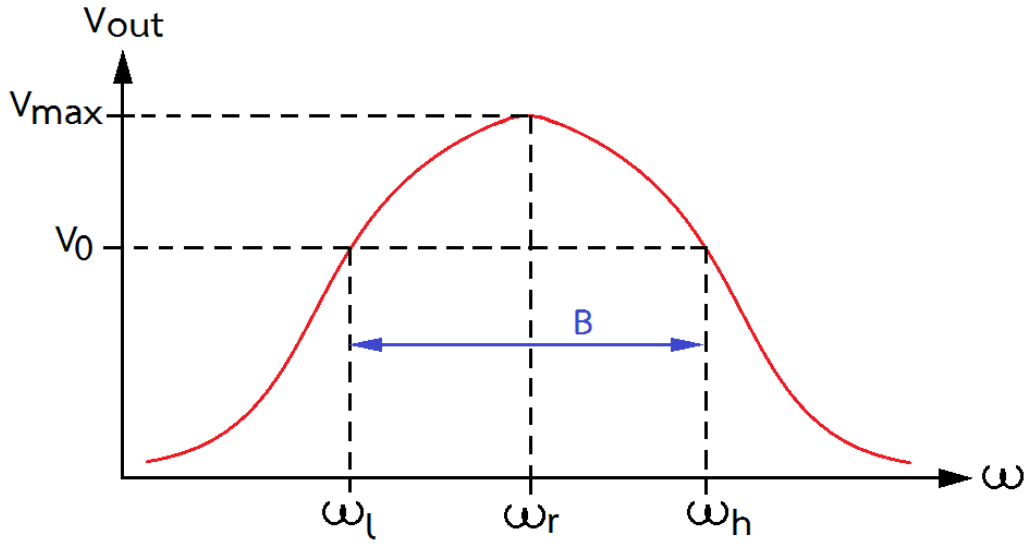
6.3 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter Circuit, BPF)

วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ เป็นวงจรที่ยอมให้ช่วงสัญญาณความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ โดยความถี่ที่ไม่ได้อยู่ในช่วงที่กำหนดจะถูกลดทอนจนหมดไป ซึ่งเสมือนกับการนำวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจรกรองความถี่สูงผ่านมาต่อร่วมกันนั่นเอง



รูปที่ 6.5 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่

จากรูปที่ 6.5 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่

จากรูปที่ 6.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงความถี่เท่านั้น เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency, ω_r) ส่วนตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าลดลง (V_0) มี 2 ความถี่ คือ ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เรียกว่า higher cutoff frequency ใช้สัญลักษณ์ ω_h และความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ เรียกว่า lower cutoff frequency ใช้สัญลักษณ์ ω_l ซึ่งช่วงผลต่างระหว่าง ω_h และ ω_l เรียกว่า แบนวิธ (banwidth, B) โดย $B = \omega_h - \omega_l$

นอกจากนั้นอัตราส่วนระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับแบนวิธ เรียกว่า ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor, Q) บางครั้งนิยมเรียกสั้นๆ ว่า Q factor ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกความถี่ ค่าตัวประกอบคุณภาพนี้ไม่มีหน่วย โดยยิ่งค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูง วงจรจะสามารถเลือกความถี่ได้ดีมายิ่งขึ้น ดังนี้

ความถี่ช่วงแคบ (narrow band) จะมีค่า $B < 0.01$ และ $Q > 10$

ความถี่ช่วงกว้าง (wide band) จะมีค่า $B > 0.01$ และ $Q < 10$

ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่สามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) ของวงจรได้ จากค่าแบนวิธของวงจรนั้นๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$\boxed{Q = \frac{\omega_r}{B}} \qquad (6.2)$$

6.3.1 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band pass filter circuit)

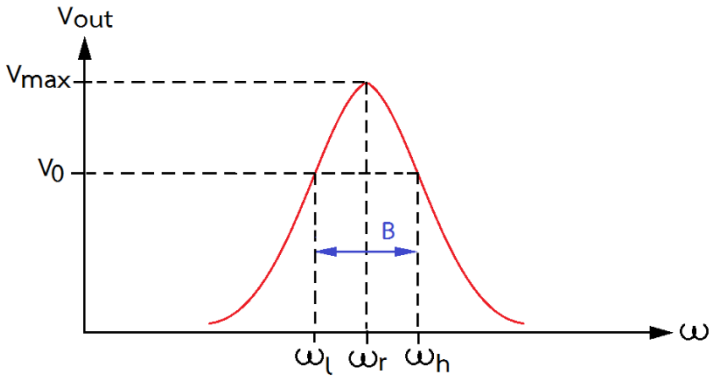
การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrow band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 6.5 แต่จะต้องกำหนดค่าแบนวิธ (B) ที่ต้องการ รวมถึงค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) จากสมการที่ 6.2 จากนั้นคำนวณหาค่าอุปกรณ์อื่นๆ โดยเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ ให้มีค่าที่เหมาะสม และคำนวณหาค่าความต้านทานต่างๆ ในวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_2 = \frac{2}{BC} \tag{6.3}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} \tag{6.4}$$

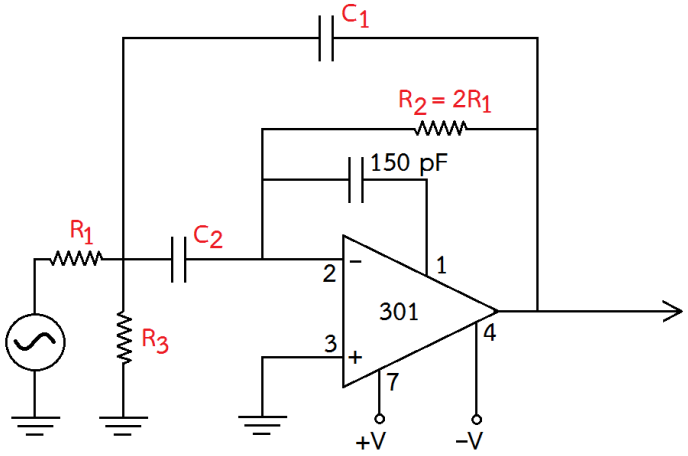
$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} \tag{6.5}$$

สัญญาณที่ออกมาจากวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบนี้ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังนี้



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงแคบ

ตัวอย่างที่ 6.5 จงหาค่า R_1, R_2, R_3 จากวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ดังรูป โดยกำหนดให้ f_r = 1,590 kHz หรือ ω_r = 10 krad/s, Q = 10 และ $C_1 = C_2 = C$ = 0.01 μF



วิธีทำ หาค่าแบนวิธจาก $Q = \frac{\omega_r}{B}$ หรือ $B = \frac{\omega_r}{Q} = \frac{10\times10^3}{10} = 1\,\frac{krad}{s} = 159.23\ Hz$

หาค่า R แต่ละตัวในวงจร

$$R_2 = \frac{2}{BC} = \frac{2}{1\times10^3\times0.01\times10^{-6}} = 200\ k\Omega$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} = \frac{200\times10^3}{2} = 100\ k\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} = \frac{200\times10^3}{4\times10^2} = 0.5\ k\Omega$$

ตัวอย่างที่ 6.6 จากตัวอย่างที่ 6.5 ถ้าต้องการให้แบนวิธมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 krad/s จงหาค่า Q, R_1, R_2 และ R_3

วิธีทำ หาตัวประกอบคุณภาพจาก $Q = \frac{\omega_r}{B} = \frac{10\times10^3}{2\times10^3} = 5$

หาค่า R แต่ละตัวในวงจร

$$R_2 = \frac{2}{BC} = \frac{2}{2\times10^3\times0.01\times10^{-6}} = 100\ k\Omega$$

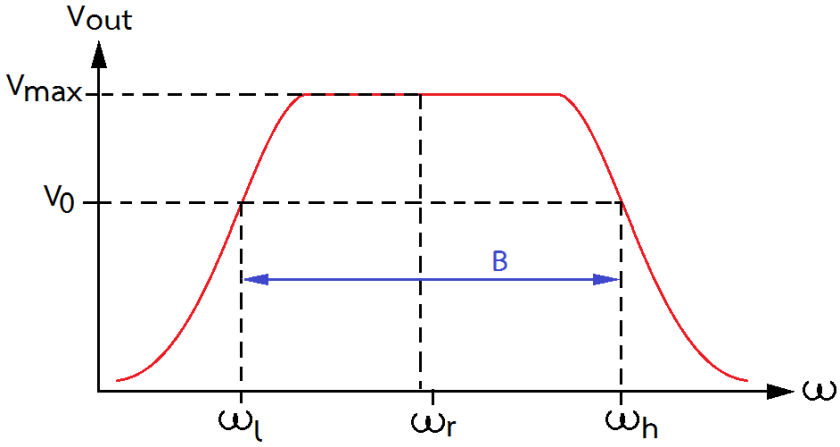
$$R_1 = \frac{R_2}{2} = \frac{100\times10^3}{2} = 50\ k\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} = \frac{100\times10^3}{4\times5^2} = 1\ k\Omega$$

6.3.2 วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (wide band pass filter circuit)

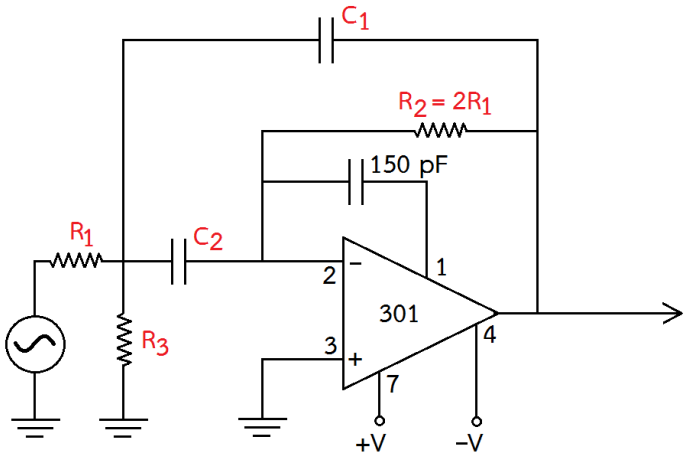
การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (wide band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 6.5 เช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบ แต่จะเลือกให้ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) มีค่าน้อยกว่า 10 โดยการออกแบบนอกจากนั้น จะเหมือนกับวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบทุกประการ

สัญญาณที่ออกมาจากวงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้างนี้ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังนี้



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงความถี่ช่วงกว้าง

ตัวอย่างที่ 6.7 จงหาค่า R_1, R_2, R_3 จากวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงกว้างดังรูป โดยกำหนดให้ fr = 3,183 Hz หรือ ω_r = 20 krad/s, Q = 5 และ $C_1 = C_2 = C = 0.01$ μF



วิธีทำ หาค่าแบนวิธจาก $Q = \frac{\omega_r}{B}$ หรือ $B = \frac{\omega_r}{Q} = \frac{20\times10^3}{5} = 4\,\frac{krad}{s} = 636\ Hz$

หาค่า R แต่ละตัวในวงจร

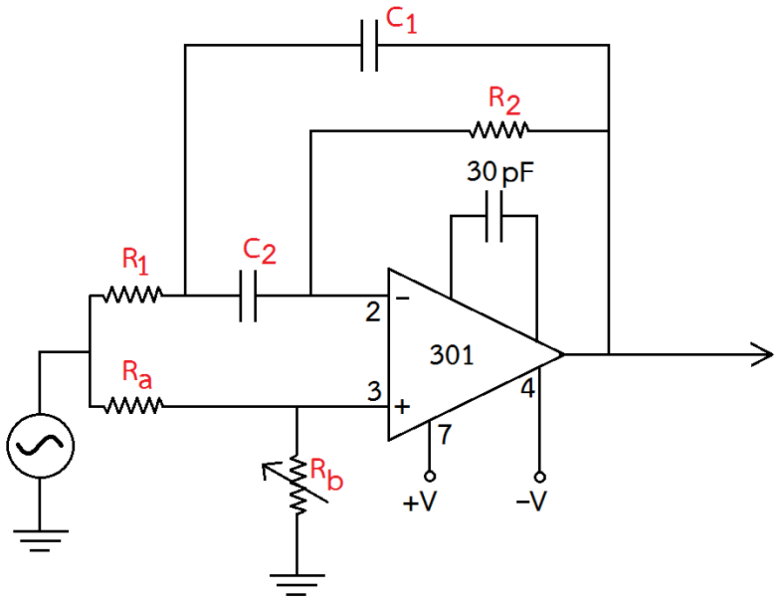
$$R_2 = \frac{2}{BC} = \frac{2}{4\times10^3\times0.01\times10^{-6}} = 50\ k\Omega$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} = \frac{50\times10^3}{2} = 25\ k\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} = \frac{50\times10^3}{4\times5^2} = 500\ \Omega$$

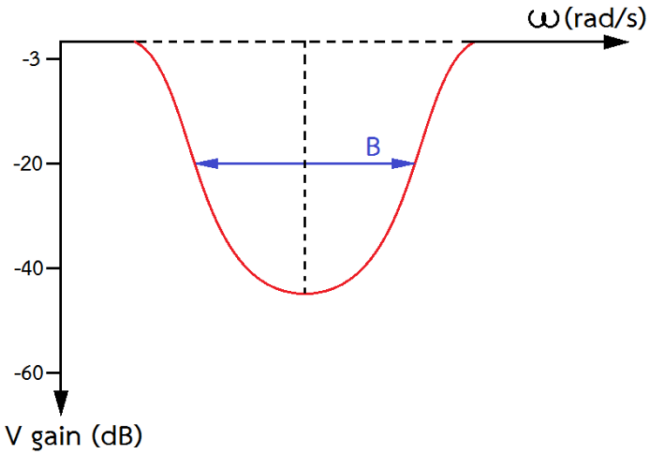
6.4 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit, BRF)

วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ เป็นวงจรที่กำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการบางช่วงออกไป สามารถทำได้โดยการต่อวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 6.9 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่

จากรูปที่ 6.9 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่

ในขั้นตอนการออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่นั้น ทำคล้ายกับวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยเพื่อความสะดวกจะกำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ อยู่ช่วงระหว่าง 100 pF -0.1 μF โดยสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่างๆ ได้ดังนี้

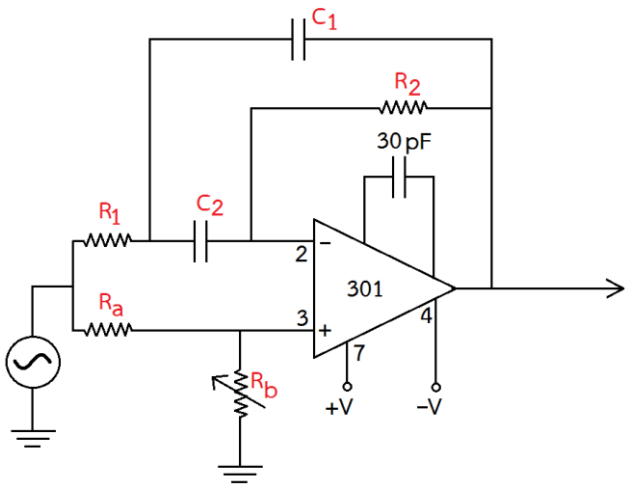
$$R_2 = \frac{2}{BC} \tag{6.6}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{4Q^2} \tag{6.7}$$

$$R_a \approx 1\ k\Omega \tag{6.8}$$

$$R_b = 2Q^2 R_a \tag{6.9}$$

ตัวอย่างที่ 6.8 จากรูป จงออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ที่มี f_r = 400 Hz, Q = 5 และ $C_1 = C_2 = C$ = 0.01 μF



วิธีทำ จาก $\omega_r = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 400 = 2.51\ krad/s$

หาแบนวิธจะได้

$$B = \frac{\omega_r}{Q} = \frac{2.5\times10^3}{5} = 500\ rad/s$$

$$R_2 = \frac{2}{BC} = \frac{2}{500\times0.01\times10^{-6}} = 400k\Omega$$

$$R_1 = \frac{R_2}{4Q^2} = \frac{400\times10^3}{4\times5^2} = 4k\Omega$$

เนื่องจาก R_a = 4 kΩ จะได้ R_b มีค่า

$$R_b = 2Q^2 R_a = 2 \times 5^2 \times 1 \times 10^3 = 50\ k\Omega$$