

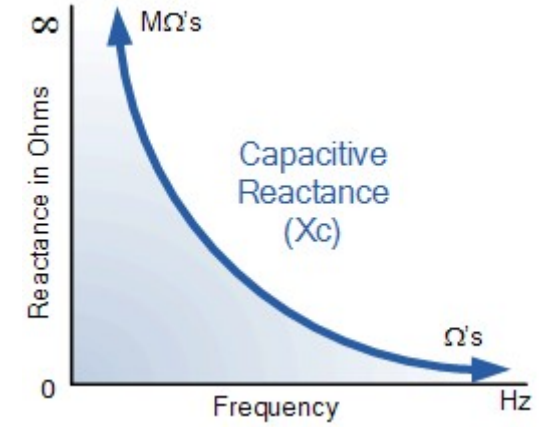
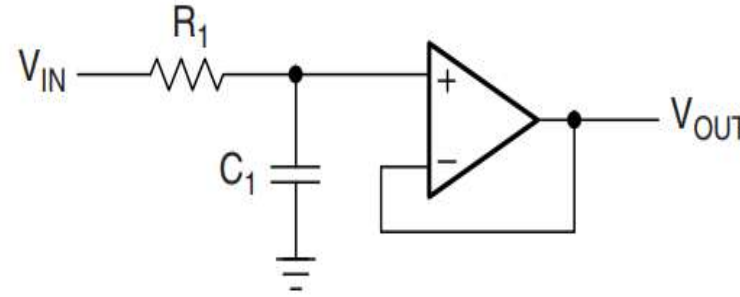


Analog Elektronik – 2

- **Aktif Filtrelere Giriş**
- **Multi-Feedback Filters**
- **Low Pass Multi-Feedback Filters**
- **Low Pass Filter Design**
- **High Pass Multi-Feedback Filters**
- **High Pass Filter Design**
- **Opamp Selection : Slewrate & GBW & BW**

Aktif Filtrelere Giriş

Active First Order Low-Pass Filter:



$X_{C1} = R_1$ iken \Rightarrow cut-off frequency $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

Opamp voltaj kazancı $A_v=1$

f (frequency): Bir saniyedeki tekrar eden sinyal sayısı.

ω (angular frequency): açısal frekans, frekansın radyan cinsinden ifadesidir.

$\omega=2\pi f$ (tam bir sinyal 2π ile açıklanabilir, aynı dairenin çevresi gibi)

Neden gerek duyulmuş?

Sinyaller, sinüs ve cosinüs gibi periyodik sinyallerdir ve bu sinyaller trigonometrik ifadeler içerirler. Bu nedenle açısal frekans kullanılır.

Low / High / Band Pass Filters

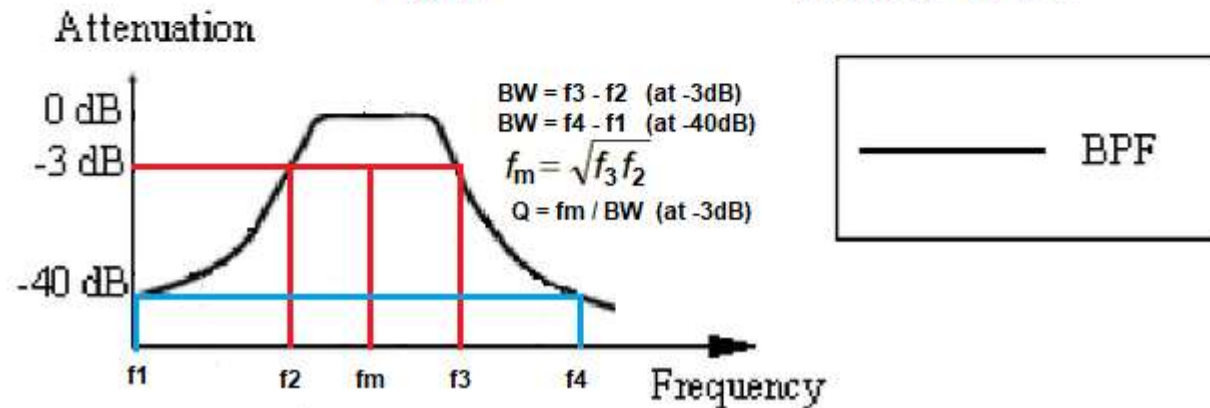
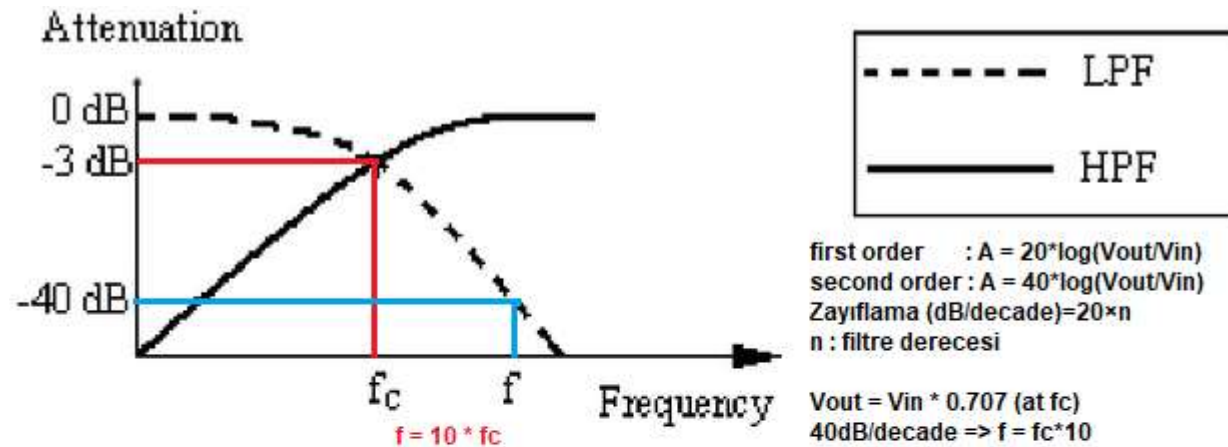
Alçak,yüksek ve band geçiren filtrenin köşe frekansları, bandwidth(band genişliği) ve filtre kalite faktörü(Q) aşağıdaki gibidir.

Band : Sinyalin max. -3dB'ye kadar zayıfladığı bölge (XdB ile (X-3)dB arası)

LP(LowPass) BW = f_c

BP(BandPass) BW = $f_3 - f_2$ (merkez frekans geometrik ortalamadır)

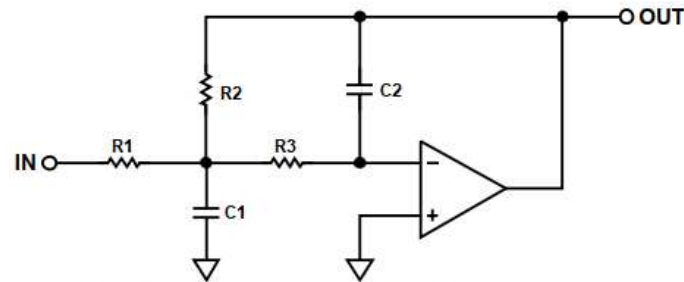
HP(HighPass) BW = ????? (SORU?)



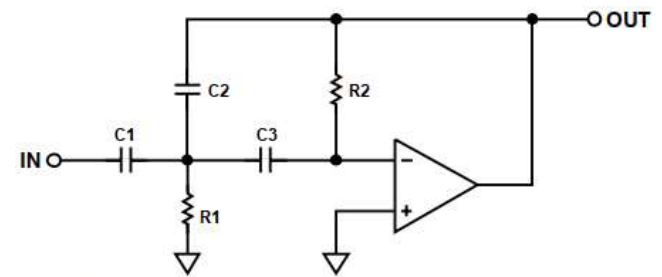
Multi-Feedback Filters

Tek opamplı filtre yapılarından en çok Sallen-Key ve Multi-Feedback filtre yapıları kullanılır. Sallen-Key düşük Q değerlerinde tercih edilir ama yüksek Q değerlerinde devre elemanlarının değerleri(%1-%0.1), sıcaklıkla değişme vs çok kritik olur.

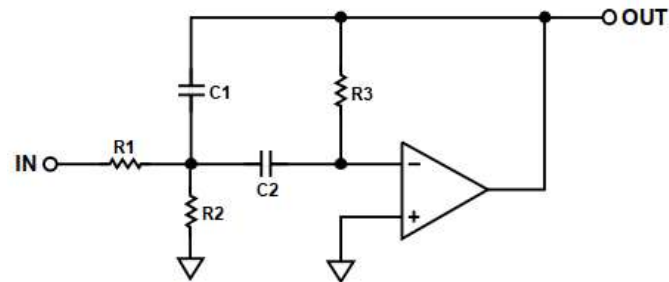
Yüksek Q için daha stabil olan Multi-feedback filtre yapısı tercih edilir. ($Q \leq 10$)
Aşağıda LP/HP/BP MFB(Multi-FeedBack) filtre yapıları var.



Multiple Feedback Low-Pass Filter



Multiple Feedback High-Pass Filter



Multiple Feedback Band-Pass Filter

MFB Low Pass Filter Design

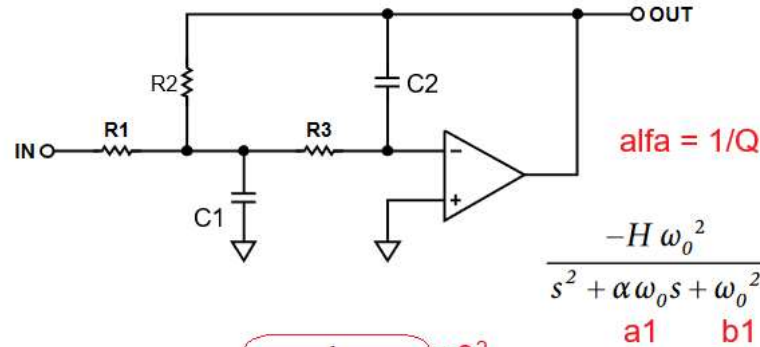
Aşağıda iki adet transfer fonksiyonu gösterimi var. Biri devre komponentleri üzerinden diğeri gain(H), filter quality factor($Q=1/\alpha$), frekans(f) ve açısal frekans(ω) açıdan transfer fonksiyonu.

ω_0 =filtrenin köşe frekansındaki açısal frekansdır($2\pi f_0$). (f_0 =köşe frekansı))

H:filtrenin kazancı

$H \cdot \omega_0^2 / \omega^2 = H$ olmalı (eksilik tersleyen girişten geliyor)

$H = R_2/R_1$ bulunur ($R_1=R_2$ seçilirse $H=1$, gain 1 olacaktır)



$$\frac{V_O}{V_{IN}} = \frac{-H \left(\frac{1}{R_1 R_3 C_1 C_2} \right) \omega_0^2}{s^2 + s \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

a1 = ω_0/Q b1 = ω_0^2

Örnek üzerinden değerleri bulalım.

$H=1$ (gain), $f_c=f_0=10\text{Khz}$, $Q=0.7$ (butterworth gibi) olsun

Çözüm:LP Filter Design Example

$H=1$, $f_0=10\text{Khz}$, $Q=0.7$ olduğunu biliyoruz.

$H=R_2/R_1$ idi burada $H=1$ olduğu için $R_1=R_2=R_3=10\text{K}$ seçebiliriz

$\omega_0=2\pi f_0 \Rightarrow \omega_0=62832 \text{ rad/sn}$ bulunur

$\omega_0^2 = \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}$ den $R_2=R_3$ biliniyor ve C_1 ile C_2 'de eşit seçilebilir ama seçmeyelim

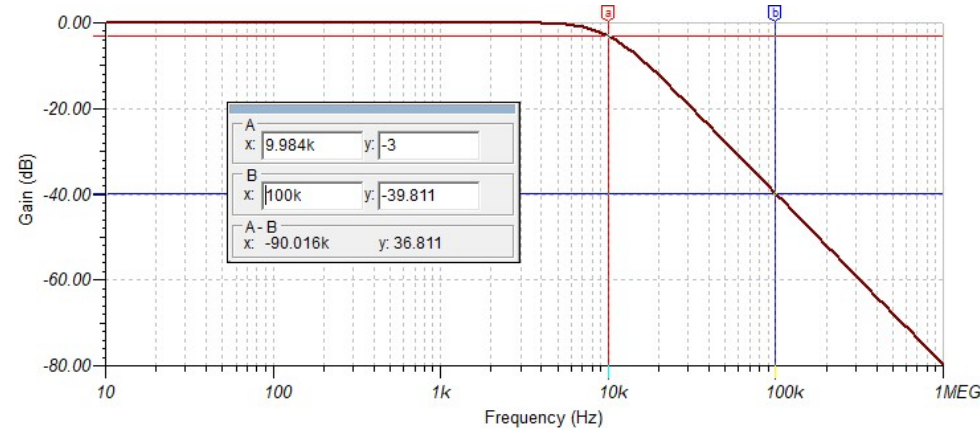
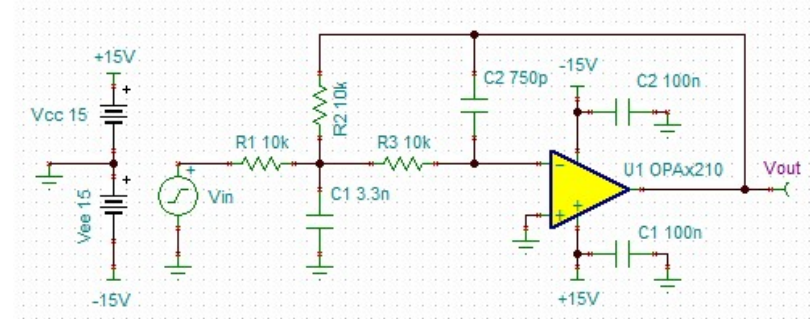
$C_1 C_2 = 1 / (\omega_0^2 R_2 R_3) = 2.533 \cdot 10^{-18}$ bulundu.

$C_1 = 3.3\text{nF} = 3.3 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ seçersek

$C_2 = 7.67 \cdot 10^{-10} \text{ F} \Rightarrow C_2 = 767\text{pf}$ bulunur. Pratikte böyle bir değer yok yerine $C_2 = 750\text{pf}$ seçelim.

Simulasyonunu yapalım bulduğumuz değerler gerçekten çalışıyor mu?

-3dB'de 10Khz ve frekansın 10 katında -40dB ve Q'da mükemmel.

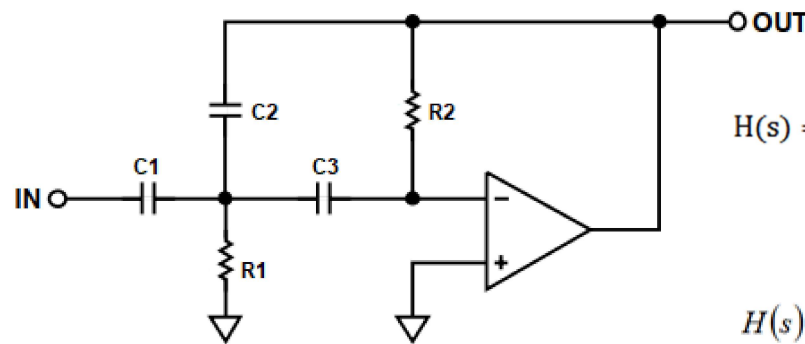




RFT_ch4_pg3_FSK.webp

High Pass Multi-Feedback Filters

LP'deki gibi iki adet transfer fonksiyonu gösterimi var. Biri devre komponentleri üzerinden diğeri gain, Q, frekans üzerinden.



Multiple Feedback High-Pass Filter

$$H(s) = \frac{-s^2 \frac{C_1}{C_2}}{s^2 + s \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 \times C_2 \times C_3} + \frac{1}{R_1 \times R_2 \times C_2 \times C_3}}$$

a1 b1

$$H(s) = \frac{H s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2}$$

H = gain = C1/C2 olur.

Geri kalanını örnek üzerinden bulalım.

Örnek : 2. dereceden Butterworth MFB High-Pass tasarlayalım

a1 ve b1 filtre katsayılarıdır. (Butterworth, Bessel, Chebyscheff coefficients)

Filtre katsayı tablolarından seçilir. a1=1.4142 b1=1.0 Q1=0.71

H = 1 olsun (bu arada filtrelerde gain genelde 1 veya daha düşük seçilir, daha stabil olması için, Q kontrollü olursa birden büyük seçilebilir)

fc = f0 = 1Khz

Çözüm : H = gain = C1/C2 = 1 => C1=C2 olur ve C3'de eşit olsun.

MFB HP Filter Example

Butterworth katsayıları aşağıdadır. 2. dereceden için a1,b1 ve Q verilmiş.

Butterworth coefficients

n	i	ai	bi	Ki=ci/fc	Qi
1	1	1.0000	0.0000	1.000	—
2	1	1.4142	1.0000	1.000	0.71
3	1	1.0000	0.0000	1.000	—
	2	1.0000	1.0000	1.272	1.00

$$a1 = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 \times C_2 \times C_3} \quad b1 = \frac{1}{R_1 \times R_2 \times C_2 \times C_3}$$

katsayılar normalize frekansa göredir, $w_n = 1$ kabul edilir, C ve R değerleri normalize değerler üzerinden bulunup sonra scale edilir.

$C1n=C2n=C3n=Cn=1F$ olur. (n=normalize frekansta)

Gerçekte $C1=C2=C3=Cg=100nF$ seçersek (Cg =gerçek değer)

Scale şöyle bulunur, $w_n=1$ rad/sn iken $Cn=1F$ ise w_0 iken Cg nedir?

$$w_n=1 \quad Cn=1F \quad (\text{frekans ile C ters orantılıdır, } XC = 1 / wC)$$
$$m=> \quad w_0 \quad Cg$$

scale = m = $Cn / (w_0 * Cg)$ bulunur.

$$a1 = (3 * Cn) / (R2n * Cn^2) = 3 / (R2n) = 1.4142 \text{ olacaktır } (Cn=1F)$$

$$R2n = 3 / 1.4142 = 2.12134 \Rightarrow R2n = 2.12134 \text{ ohm}$$

$$b1 = 1 = 1 / R1n * R2n \Rightarrow R1n = 1 / R2n \text{ olur. } R1n = 1 / 2.12134 = 0.4714 \text{ ohm}$$

MFB HP Filter Example

$$R2n = 2.12134 \text{ ohm}$$

$$R1n = 0.4714 \text{ ohm}$$

$$\text{scale} = m = Cn / (w0 * Cg)$$

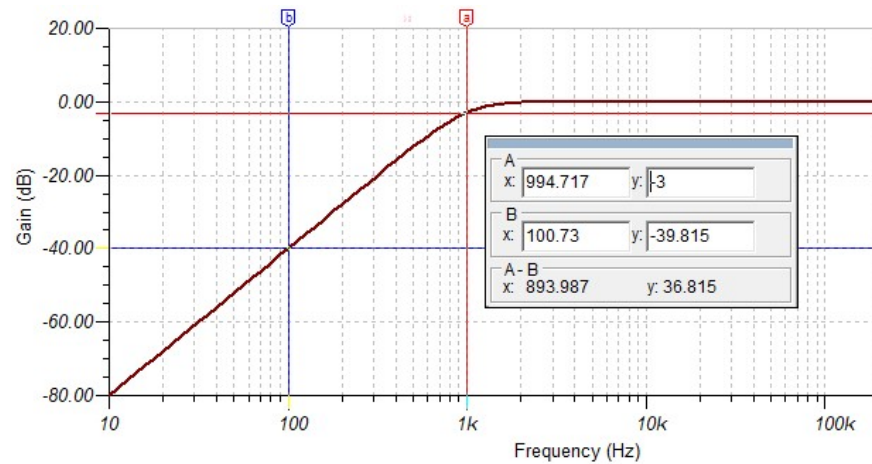
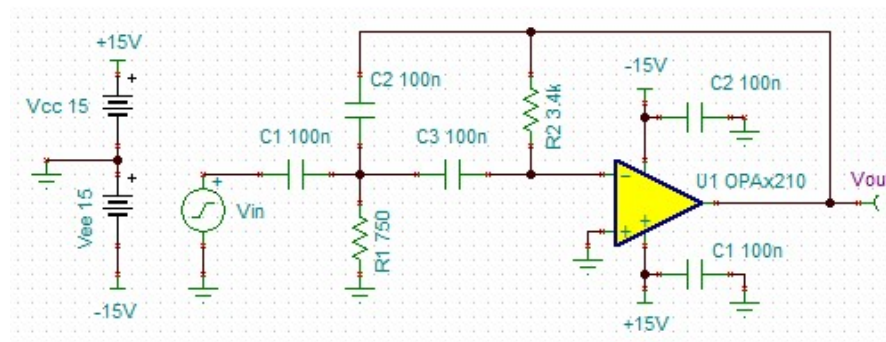
$$w0 = 2 * \pi * f0 = 6283.186 \text{ rad/sn}$$

$$m = 1F / (6283.186 * 100nF) = 1592 \text{ bulunur}$$

$$R2 = R2n * m = 2.12134 * 1592 = 3377R = 3.4K\%1$$

$$R1 = R1n * m = 0.4714 * 1592 = 750R \%1$$

Şimdi test edelim. $f0 = f_c = 994\text{Hz}$ (1KHz) (-3dB), (100Hz'de $f_c/10$ 'da -40dB).



Opamp Selection

Filtre devrelerini simule ederken TI'nın OPA2210 kullandım. Opamplar amaca uygun seçilir. OPA2210 genel uygulamalar için iyi bir opamp ama spesifik uygulamalarda başka bir opamplar seçilir.

OPA2210'un datasheetinden GBW(gain bandwitdh product) ve SR(slewrate) bilgilerini aşağıya kopyladım.

$GBW = Gain * f_{max}$ f_{max} =sinyaldeki maksimum komponent, Gain=Voltaj Kazancı

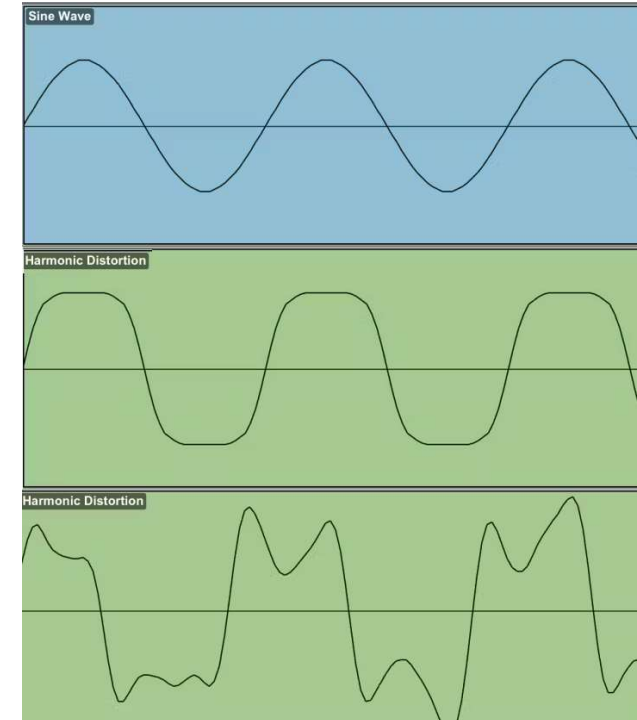
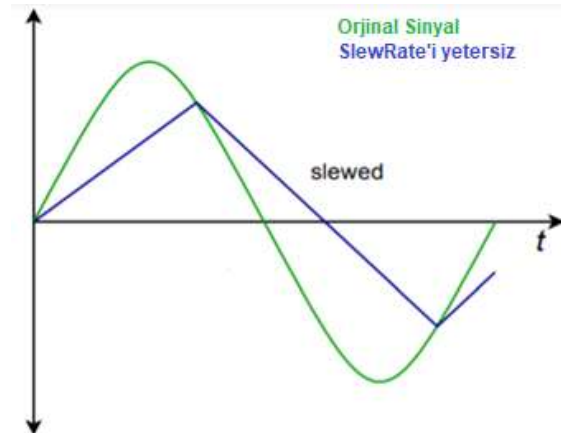
Burada dikkat edilecek nokta GBW, -3dB'de ki verilir yani GBW frekans noktasında $V_{in} * 0.707$ olur.

Asıl sinyalin %30'u kayıp, bu nedenle güvende kalmak için işlem yapılır. (örnekte bahsedeceğim)

GBW ve SR neden önemli, sinyalimiz frekans, kazanç altında bozulabilir mi bilmek istiyoruz. Bu arada sinyal bozulmasına distorsiyon denir. Özellikle ses sistemlerinde çok duyarsınız. Hi-Fi sistemlerde.

$SR = 2 * \pi * f_{max} * V_{outMax}$

FREQUENCY RESPONSE			
GBW	Gain bandwidth product	18	MHz
SR	Slew rate	6.4	V/ μ s





Example

Doğrudan örnek üzerinden GBW ve SR 'yi hesaplayalım.

Örnek : $f_{\text{signal}} = 250\text{Khz}$ $V_{\text{in}}=1000\text{mV}$ $\text{Gain}=1(0\text{dB})$ olsun.

OPA2210'yi kullanacağız ve beslemesi $\pm 15\text{V}$.

$f_{\text{max}}=250\text{Khz}$, $V_{\text{outMax}}=V_{\text{in}}*\text{Gain}=1000\text{mV}*1=1\text{V}$ (besleme sınırı içinde)

Çözüm :

*Sinyalin bozulmaması bode plot'taki(gain-frekans eğirisi) gibi frekansın 10 katında

GBW sınırları içinde kalması istenir. Frekansın 10 katı $\Rightarrow 40\text{dB} \Rightarrow 100$ katı istenir

$\text{GBW} = 100 * \text{Gain} * f_{\text{Max}} = 100*1*250\ 000=25\text{Mhz} > 18\text{Mhz}$ (sinyalde bozulma olabilir)

$\text{SR} = 2*\pi*f_{\text{max}}*V_{\text{outMax}} \Rightarrow f_{\text{max}} = 1/T_{\text{max}}$ ($T_{\text{max}}=\mu\text{S}$ cinsinden olmalı)

$f_{\text{max}} = 250\text{Khz} \Rightarrow T_{\text{max}} = 1/250\text{Khz} = 4\mu\text{S}$

Bu şartlarda $f_{\text{max}}=180\text{Khz}$ 'i geçemez.

Veya $\text{gain} < 1$ olmalı

Slewrate'e bakalım:

$\text{SR} = (6.28*1\text{V}) / (4\mu\text{S}) = 1.57\ \text{V}/\mu\text{S} < 6.4\ \text{V}/\mu\text{S}$ (şartı sağlıyor)

GBW simulasyon örneđi

GBW Simulasyon örneği : Gain=100 olsun, OPA2210'nın yeni GBW'sini bulalım.

Gain : 100 ($R3/R2$), görüldüğü gibi gain=100(40dB), köşe frekansında(37dB) 180Khz.

GBW=18Mhz'di, Gain=100 olduğu için yeni GBW=18Mhz/100=180Khz olur.

