

KESKİN KESİMLİ

ÇENTİK VE BANT GEÇİREN SÜZGEÇLERİN ETKİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

SÜLEYMAN PENBECİ
AHMET UZUNOĞLU

UDK: 621.372.54
621.372.57

ÖZET

Bu yazıda keskin kesimli çentik (no t eh) ve bant geçiren süzgeçlerin gerçekleştirme yöntemleri önerilmiştir. Keskin kesimli çentik ve bant-geçiren süzgeç işlevlerini elde etmek için Butterworth ve Çebişef alçak-geçiren süzgeç işlevlerinin değiştirilmesi ile bulunan yeni işlevler kullanılmış ve bu süzgeçlerin gerçekleştirilmeleri etkin devre birleşim (sentez) yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Kararlılık ve duyarlılık gerekleri gözönünde bulundurularak keskin kesimli süzgeç işlevleri bir ve/veya ikinci dereceden çarpanlara ayrılmaktadır.

önerilen yöntemleri göstermek üzere bir çentik ve biri frekans dönüşümü yöntemi, diğeri yüksek-geçiren ve alçak-geçiren keskin kesimli süzgeçlerin ardarda eklenmeleri ile elde edilen iki bant-geçiren süzgecin R,C öğeleri ve işlem yükselteçleri kullanılarak gerçekleştirilmeleri verilmiştir. Gerçekleştirilen bu süzgeç, devreleri ile elde edilen deneysel sonuçların kuramsal sonuçlara yakın olduğu ayrıca saptanmıştır.

SUMMARY

In this paper, the active realization of sharp cut-off notch and band-pass filters are given. Sharp cut-off filter functions are obtained from modified Butterworth and modified Chebyshev low-pass filter functions. For the realization of these filters, active realization techniques are employed. Because of stability and sensitivity considerations the sharp cut-off filter functions are divided into first and/or second order factor.

To illustrate the above procedures, active filter realization of a notch filter and two band-pass filters, one obtained by using frequency transformation, and the other by means of connecting low-pass and high-pass sharp cut-off filters in cascade using R, C elements and operational amplifiers are given. Theoretical and experimental results for these filters are found to be in good agreement.

Süleyman Penbeci, Y.Prof.Dr., ODTÜ

1. GİRİŞ

Son zamanlarda Budak ve Aronhime [1], Butterworth süzgeç işlevinde, bir çift sanal sıfır eklemekle, uyardıranabandında meydana gelen bir dalgays karşılık, keskin kesim elde edilebildiğini Önermişlerdi. Datta Roy da [2] bu sıfırların sayısını artırmakla kesim eğiminin daha da artırılabilirdiğini ortaya koymuştu. Daha sonra Agarval ve Sedra [3], Çebişef süzgeç işlevinde bir veya daha fazla sanal sıfır ekleme çalışmasını yapmışlar ve sanal sıfırlı Butterworth süzgeçlerinden daha keskin kesim elde etmişlerdi. Çebişef süzgeçlerinde, geçirme bandında meydana gelen dalganın, ters Çebişef (inverse Chebyshev) süzgeçlerinde yapılan uygulama sayesinde, yalnız durdurma bandında oluşan dalgalanma ile en-düz (maximally-flat) keskin kesimli Çebişef süzgeci elde edilişi Harris [A] tarafından incelenmiştir.

Bu işlevlerde, sanal sıfırın normalize edilmiş açısal kesim frekansı $\omega = 1$ rad/san'a doğru yaklaştırılmasında, durdurma bandındaki dalganın zayıflatılmasının azalmakta, kesim eğrilerinin daha da artmakta ve bu şekilde Butterworth ve Çebişef süzgeç işlevlerinden keskin-kesimli çentik süzgeçleri elde edilebilir duruma gelmektedir. Bant geçiren süzgeç gerçekleştirilmesi için ise frekans dönüşümü ve alçak-geçiren, yüksek-geçiren süzgeçlerin ardarda bağlanmaları gibi iki yöntem kullanılabilir.

Bu süzgeçlerin gerçekleştirilmeleri R, L, C öğeleri kullanılarak kolaylıkla yapılabilir. Fakat tümleşik devrelerin gelişmekte olan modern teknolojisinde [5], yalnız R, C ve etkin öğelerin kullanılması yaygınlaşmaktadır. Burada etkin öğe işlem yükselteçleri kullanarak elde edilen çentik süzgeç ve bant geçiren süzgeç işlevlerinin gerçekleştirme sonuçları da verilmektedir.

2. KESKİN KESİMLİ BUTTERWORTH SÜZGEÇLERİ

En-düz alçak geçiren genlik tepkisi verebilen basit işlev, Butterworth işlevidir.

$$|B(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} \quad (1)$$

Bunun normalize edilmiş açısal kesim frekansı ($\omega = 1$ 'deki eğimi ise

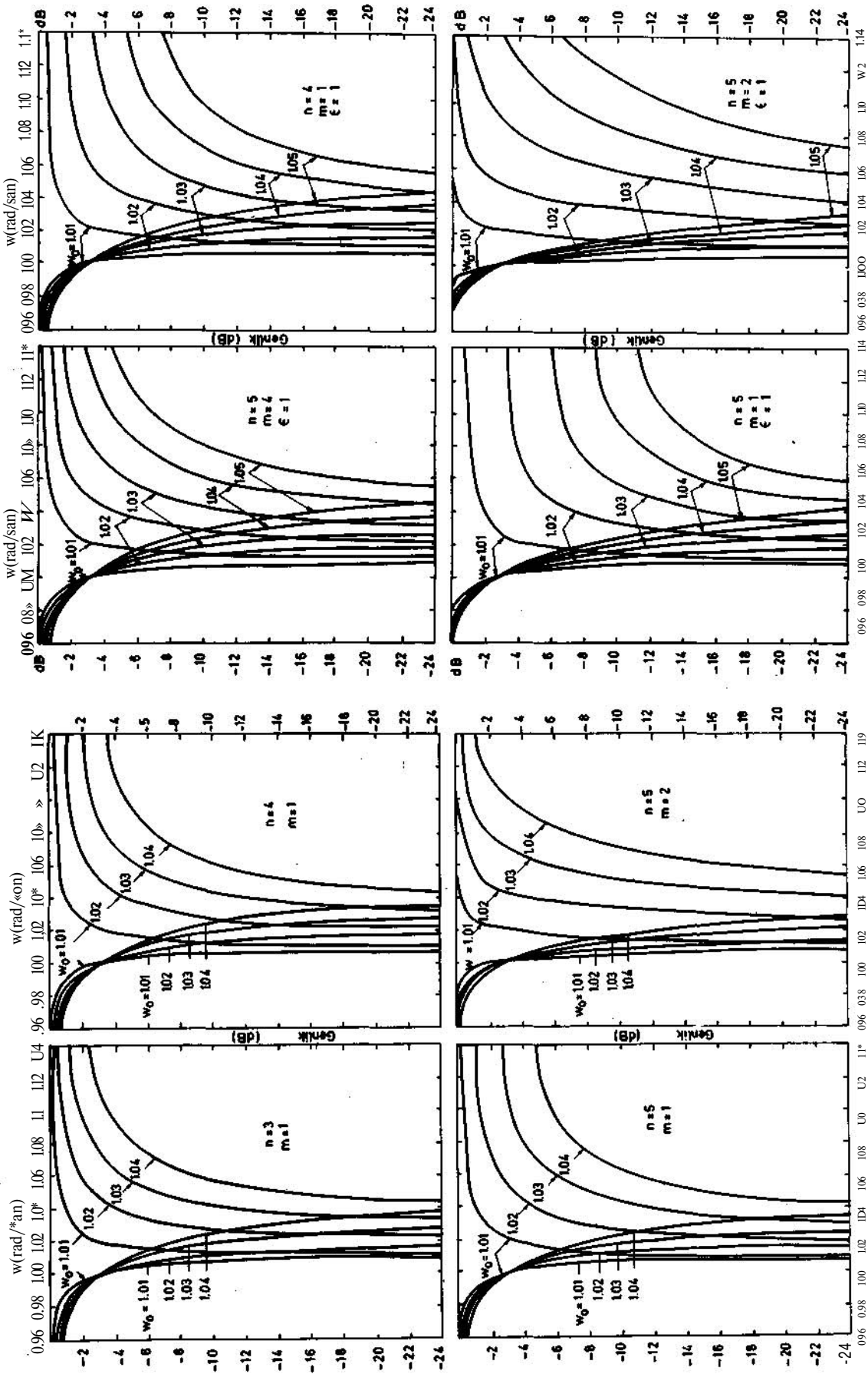
$$S_{bn} = \frac{d}{d\omega} |B(j\omega)|_{\omega=1} = -\frac{n}{2T} \quad (2)$$

(1) bağıntısı üzerinde yapılan bir düzeltme ile en-düz özelliği korunarak kesim-eğimi, durdurma bandı zayıflatılmasında oluşan azalmaya karşılık artırılabilir. Bu düzeltme bir veya daha fazla jüj eksenli (sanal) sıfırları eklemektir, n süzgecin derecesini, m eklenen sanal sıfır sayısını, ω_0 da bu sıfırın yerini gösterirse, elde edilen genlik-karesi işlevi şöyle olmaktadır:

$$|F(j\omega)|^2 = \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^{2m}}{(\omega^2 - \omega_0^2)^{2m} + (\omega^2 - 1)^{2m} \omega^{2n}} \quad (3)$$

Bunun kesim eğimi, $g(u) = (\omega^2 - \omega_0^2)^{2m}$ ve $X = (\omega^2 - 1)^{2m}$ eşitliklerini kullanarak ve türev alarak bulunur.

$$\frac{d}{d\omega} |F(j\omega)| = \frac{\lambda \omega^{2n-1} [g'(\omega) - 2n\omega(u)]}{2|F(j\omega)| [g(\omega) + \lambda \omega^{2n}]^2} \quad (4)$$



Şekil 1. Butterworth çentik süzgeçlerinin değişik sanal sifirlar için genlik tepkeleri.

Şekil 2. Çebişev çentik süzgeçlerinin değişik sanal sifirlar için genlik tepkeleri.

$$(0=1 \text{ de, } g(1) = X, g(1)' = \frac{4m}{j=1} \text{ ve}$$

$$|F(j1)| = -\frac{1}{T}$$

olduğu bilinerek, (4) bağıntısının şu şekilde olduğu görülür.

$$s_{bm} = \left(\frac{n}{2\sqrt{2}} + \frac{m}{\sqrt{2}(\omega_0^2-1)} \right)$$

$$s_{bn} = \frac{n}{\sqrt{2}(\omega_0^2-1)} \quad (5)$$

Keskin kesimli Butterworth ve Butterworth süzgeçlerinin kesim eğimlerinin oranı ise:

$$r_{brm} = \frac{s_{bm}}{s_{bn}} = 1 + \frac{2m}{n(\omega_0^2-1)} \quad (6)$$

Bu bağıntıda görüldüğü gibi eğim oranı u_0 1 için daima 1'den büyüktür ve n arttıkça, u_0 'da 1'e yaklaştıkça zaman artmaktadır. Burada alçakgeçirenlik durumunu bozmamak için $n > 2m$ koşulunun sağlanması gerekir.

Sanal sıfırları eklenmiş bir Butterworth süzgecinin zayıflatma eğrisi de şekil 1'de verilen örnekteki gibi olmaktadır. Burada durdurma bandında ortaya çıkan tepenin (ω_p teppe frekansı) (4) bağıntısının sıfıra eşitlenmesiyle bulunan frekanstır.

$$\omega_p^2 = -\frac{n}{n-2m} \omega_0^2 \quad (7)$$

$$F_p = |F(j\omega_p)| = \frac{1}{1 + n^2 \omega_0^{2n} f(m)}$$

$$\left(1 - \frac{1}{\omega_0^2}\right)^{2m} \quad (8)$$

$$f(m) = \frac{1}{(2m)^{2m} (n-2m)^{n-2m}}$$

F_p 'nin, n ve ω_0 belirli olduğu zaman en düşük olması için, f(m) in n ye göre değişiminin incelenmesi gerekir. f(m) nin türevini sıfıra eşitlemekle bulunan ve f(m) i en büyük yapan m değeri de aşağıdadır:

$$m = m_0 = \frac{n(\omega_0^2-1)}{2(2(4-1))} \quad (9)$$

n ve m belirli olduğu zaman, F_p , ω_0 ile ters orantılı olmakta ve u_0 'nin artmasıyla, F_p azalmakta, dolayısı ile u_0 'deki zayıflatma artmaktadır. Ayrıca ω_0 nin F_p 'e çok yaklaşması durumunda, durdurma bandı zayıflaması da geçirme bandı zayıflamasına yaklaşmakta ve çentik süzgeç elde edilebilmektedir.

Sanal sıfırlı Butterworth ile Butterworth süzgecini karşılaştırmak için, kesim eğimi derecesi n olan sanal sıfırlı Butterworth süzgecine göre, fazla olan Butterworth süzgecinin derecesi n_b olarak gösterilirse, $S_{1,n} \wedge S_{b,n}$ koşulundan nfi nin aşağıdaki koşulu sağlanması gerektiği bulunur.

$$n > n_b + \frac{2m}{u_e^2 u_1^2} \quad (10)$$

Buna bir örnek gerekirse, üçüncü dereceden tek sıfırlı, $u_0=1,2$ seçilen bir keskin kesimli

Butterworth süzgeci ile aynı kesim eğimli normal Butterworth süzgeci en az sekizinci olabilir.

3. SANAL SIFIRLI ÇEBİŞEF SÜZGEÇLERİ

Bir çift veya daha fazla sanal sıfır eklenerek elde edilen Çebişef süzgeçlerinin, Çebişef ve sanal sıfırlı Butterworth süzgeçlerine göre daha keskin kesimli oldukları ve durdurma bandı zayıflamasında arttığı görülmüştür. Ayrıca Çebişef süzgeçlerindeki geçirme bandı dalgalanma genliğinde, sanal sıfırlı Çebişef süzgecinde azalmaktadır.

Çebişef süzgeci genlik-karesi işlevi

$$|C(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 V_n^2(\omega)} \quad (11)$$

olup burada ϵ değişmezi dalgalanma çarpanını ve $V_n(u_1)$ da n yinci dereceden Çebişef çokterimlisini göstermektedir. ω_0 da m çift eşit sanal sıfırı olan Çebişef işlevi ise

$$|T(j\omega)|^2 = \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^{2m}}{(\omega^2 - \omega_0^2)^{2m} + \epsilon^2 u_0^{2m} V_n^2(\omega)} \quad (12a)$$

veya

$$|T(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 \left[\frac{\omega_0^2 - 1}{\omega^2 - \omega_0^2} \right]^{2m} V_n^2(\omega)} \quad (12b)$$

olur $\omega = 1$ rad/san de

$$|T(j\omega)|^2 = |C(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2} \quad (13)$$

ve ($D < 1$ için

$$1 + \epsilon^2 \left[\frac{\omega_0^2 - 1}{\omega^2 - \omega_0^2} \right]^{2m} V_n^2(\omega) < 1 + \epsilon^2 V_n^2(\omega) \quad (14)$$

bulunur. Bu nedenle durdurma bandında $|T(j\omega)|$, $|C(j\omega)|$ ya göre daha fazla olur ve geçirme bandındaki hata azalır. Ayrıca ω_0 , bire yaklaştırlılırsa $\left[\frac{\omega_0^2 - 1}{\omega^2 - \omega_0^2} \right]^{2m}$ sıfıra yaklaşır ve tepke düzleşir.

Sanal sıfırlı Çebişef süzgecinin kesim eğimi de

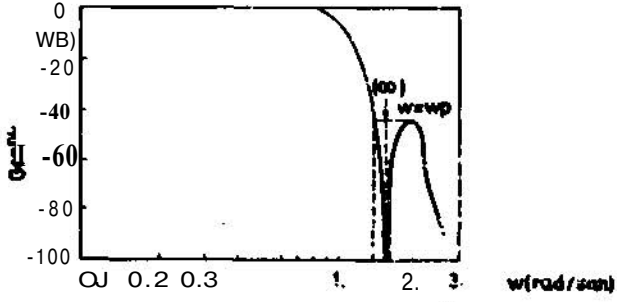
$$S_{cm} = \frac{-f}{di} |T(j\omega)|$$

$$= \frac{-eV}{(1 + \epsilon^2)^{3/2}} \left[1 + \frac{2m}{n^2(\omega_0^2-1)} \right] \quad (15)$$

$m=0$ için, (15) bağıntısı Çebişef süzgeci kesim eğimini verir. Her iki süzgeç kesim eğimleri oranı da aşağıdaki gibi olur.

$$S_{cmm} = \frac{S_{cm}}{S_{en}} = 1 + \frac{2m}{n^2(\omega_0^2-1)} \quad (16)$$

Sanal sıfırlı Çebişef ile sanal sıfırlı Butterworth süzgeç işlevlerini karşılaştırmak için, $\omega=1$ deki zayıflamaların aynı olmasını sağlamak üzere $\epsilon=1$ kabul ederek, kesim eğimlerinin oranı bulunacak olursa,



Şekil 3. $n=8$, $m=2$ ve $w_0=1,5$ için bir alçak-geçiren keskin kesimli Buttrsvortfi süzgeç genlik tepkesi.

$$\frac{S_{cm}}{S_{bm}} = \frac{n + \frac{2m}{n(\omega_0^2 - 1)}}{1 + \frac{2m}{n(\omega_0^2 - 1)}} \quad (17)$$

elde edilir. Bu da gösterir ki $n > 1$ için sanal sıfırlı Çebişef süzgeçleri, sanal sıfırlı But-
tervorth süzgeçlerinden daha keskin eğim vere-
bilmektedir.

Durdurma bandı zayıflaması incelenecek olursa, $1 < (2\zeta)^{-1}$ aralığında sanal sıfırlı Çebişef
süzgecinin zayıflamasının, Çebişef süzgecine
göre fazla olduğu görülür. Çünkü bu aralıkta,

$$1 + V_n^2(a) \left[\frac{\omega_0^2 - 1}{\omega^2 - \omega_0^2} \right]^{2m} > 1 + \varepsilon^2 V_n^2(w) \quad (18)$$

olmaktadır, $w > (2\zeta\omega_0 - 1)^{-1}$ aralığında ise yukarı-
daki ilişki ters olmakta bu sebeple zayıflama,
Çebişef süzgecinden daha az olmaktadır.

Sanal sıfırlı Çebişefi ile sanal sıfırlı Butter-
worth süzgeç işlevleri durdurma bandında karşı-
laştırılacak olursa durumun Çebişef ve Butter-
worth süzgeçleri karşılaştırması ile aynı oldu-
ğu görülür.

Eğer n_c Çebişef süzgeci derecesi, n_s sanal SL-
tırlı Eut'envoitb süzgeci derecesi olursa, bun-
ların n dereceden sanal sıfırlı Çebişef süzgecin-
den daha keskin keeijili olabilmeleri için bulu-
nan ilişkiler .ie şöyledir:

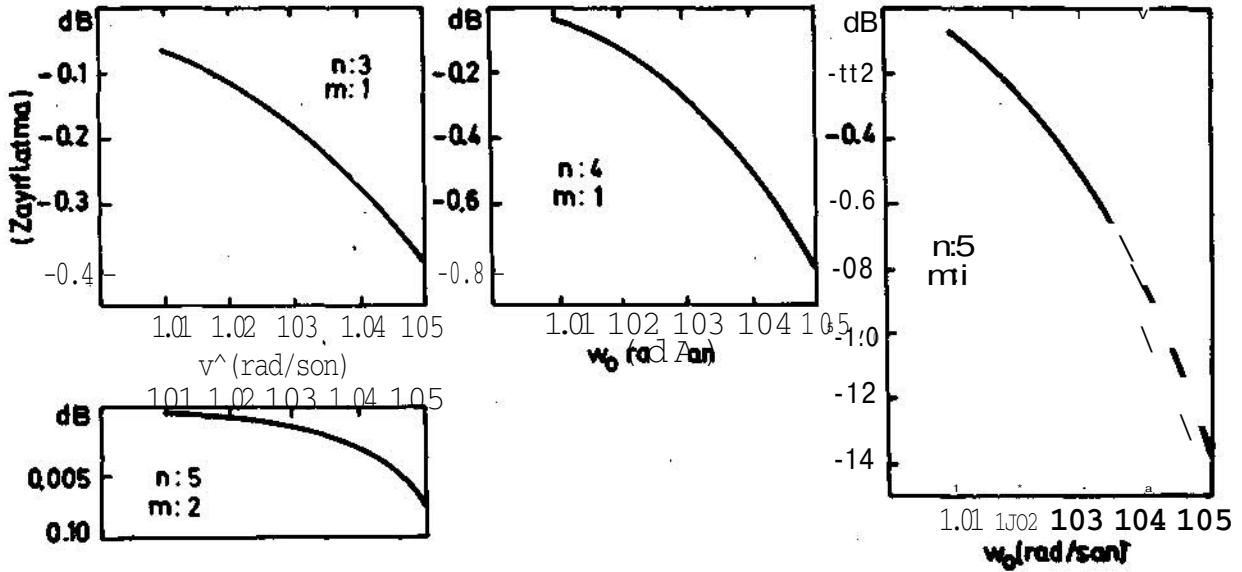
$$n_c^2 \geq n_s^2 + \frac{2m}{\omega_0^2 - 1} \quad (19)$$

$$n_s \geq n_c - \frac{n_c^2}{\omega_0^2} + \frac{2irH}{\omega_0^2} \quad (20)$$

$n=3$, $w_0=1,2$ sfiçiminde, DIT çift sanal sıfırlı).
Çebişef süzgeci kadar keskin kesimli Çebişef ve-
ya sanal sıfırlı Butterworth süzgeci elde etmek
için derecelerinin $n_c > 3,68 = 4$, $n_s \approx 4,6y = 5$ ol-
ması gerekir. Bu da sanal sıfırlı Çebişef süzge-
cinin keskin kesim aide etmede üstünlüğünü orca-
ya koymaktadır.

4. KESKİN KESİMLİ ALÇAK GEÇİREN SÜZGEÇ İŞLEVLERİNDEN ELDE EDİLEN ÇENTİK SÜZGEÇLER

Şekil 3'de görüldüğü üzere keskin kesimli alçak
geçiren süzgeç tepkesinde, durdurma bandında bir
tepe oluşmakta ve sanal sıfırın yeri bire yak-
laştıkça bu tepe yükselmekte ve durdurma ba-
dını zayıflaması azalmaktadır. Kuramsal olarak ge-
çirme ve durdurma bandı genlik seviyeleri farklı
olmaktadır. Fakat (0. bire çok yaklaştırıldığında
bu seviys farkı da azalmakta ve pratikte önemi
kalmamaktadır. Bu durumu incelemek için
 $\zeta_0 = 1,01-1,05$ aralığında sanal sıfır değerleri



Şekil 4. Butterworth çentik süzgeçleri için durdurma bandı zayıflamasının U_0 ya göre değişimleri.

(rad/san)	n=3, m=1	n=4, m=1	n=5, m=1	n=5, m=2
ω_0	ω_p	$F_p(\text{dB})$	ω_p	$F_p(\text{dB})$
1,01	1,743	-0,31	1,422	-0,06
1,02	1,765	-0,05	1,443	-0,12
1,03	1,781	-0,11	1,456	-0,27
1,04	1,791	-0,20	1,470	-0,50
1,05	1,818	-0,33	1,485	-1,46

Çizelge 1. Sanal sıfırlı Butterworth süzgeçlerinin ω_0 deki zayıflamaları.

ω_0	**p (rt/d/car)	V < , $\hat{t} - 1$	V < 16, $r = C, E39$	TpldBlt = -0.349
1,01	1,387	-0,03	-0,023	-0,011
1,02	1,40e	-0,37	-0,09a	-0,047
1,03	1,429	-0,83	-0,23	-0,110
1,04	1,453	-1,44	-0,42	-0,20
1,05	1,47b	-2,16	-0,67	-0,33

ω_0	ω_p	$F_p(\text{dB})$	ω_p	$F_p(\text{dB})$
1,01	1,178	-0,347	-0,90	-0,04
1,02	1,193	-1,19	0,0	-0,195
1,03	1,223	-2,83	0,93	-0,47
1,04	1,277	-4,60	-1,72	-0,50
1,05	1,302	-6,29	-2,66	-1,45

ω_0	ω_p	$F_p(\text{dB})$	ω_p	$F_p(\text{dB})$
1,01	1,116	-0,92	-0,26	-0,12
1,02	1,134	-3,32	-1,13	-0,57
1,03	1,152	-6,09	-2,54	-1,38
1,04	1,169	-9,69	-4,24	-2,50
1,05	1,186	-11,01	-6,03	-3,83

ω_0	ω_p	$F_p(\text{dB})$	ω_p	$F_p(\text{dB})$
1,01	1,700	-0,001	-0,0004	-0,0002
1,02	1,737	-0,02	-0,0055	-0,003
1,03	1,764	-0,072	-0,019	-0,009
1,04	1,795	-0,293	-0,078	-0,04
1,05	1,826	-0,790	-0,22	-0,104

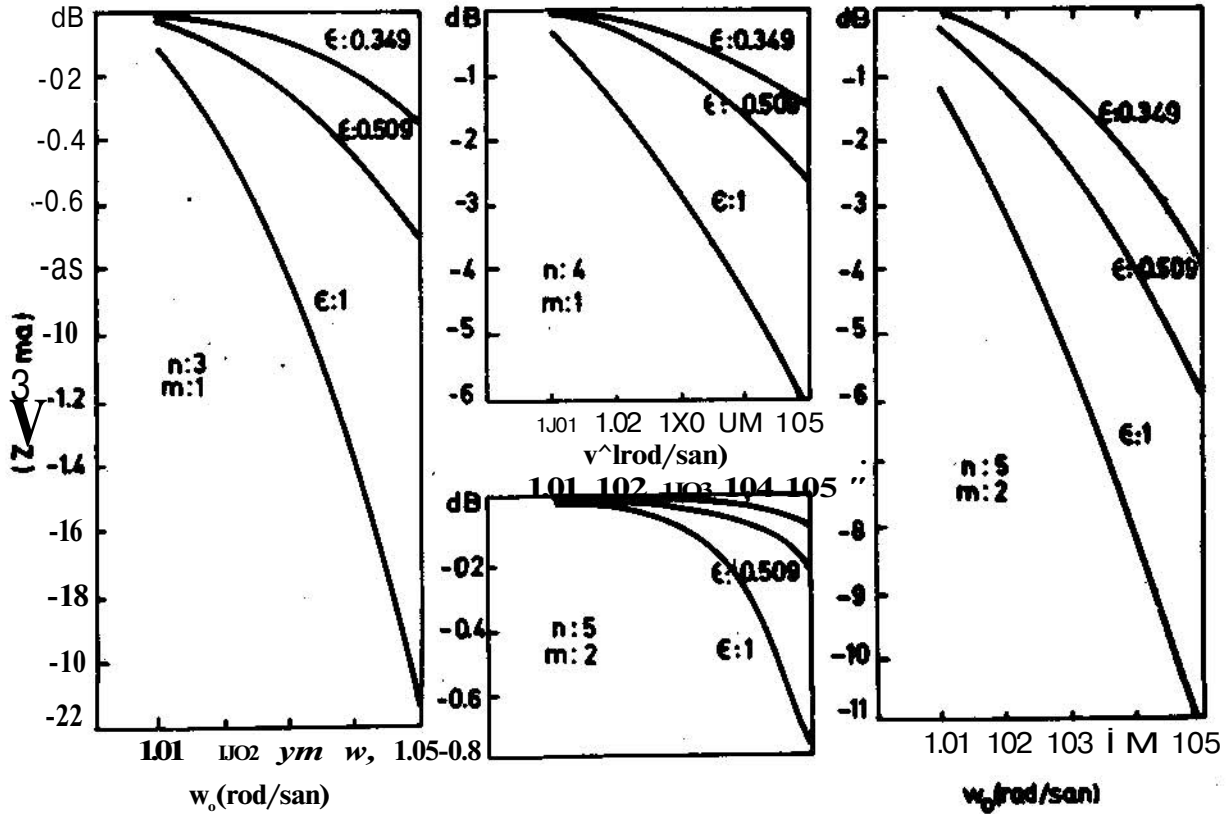
Çizelge 2. -Sanal sıfırlı Çebişef süzgeçlerinin ω_0 deki zayıflamaları.

için, sanal sıfırlı Butterworth ve sanal sıfırlı Çebişef süzgeçleri genlik tepkeleri bilgisayar yolu ile çizdirilmiş ve durumları incelenmiştir!-. Şekil 1 v« 2'de bu çizimler görülmektedir.

Çentik süzgeçlerin tasarımı sırasında, zayıflatılan frekansdaki bant aralığı, bu aralığın her iki tarafındaki seviye farkı ve kesim eğimlerinin bilinmesi, süzgeç işlevinin derecesini, sanal sıfırın yerini seçmeye yardımcı olacaktır. Bu nedenle, sanal sıfırlı Butterworth ve sanal sıfırlı Çebişef süzgeç işlevleri üzerinde, çentik süzgeç tasarımı sırasında kullanılmak üzere bir inceleme yapılmıştır.

Sanal sıfırlı Butterworth süzgeçleri, n = 3;4;5 ve $\omega_0 = 1,01-1,05$ aralığı için tepe frekansı ω_p deki zayıflatma değerleri Çizelge 1'de verilmiş, ve Şekil 4'de değişimleri çizilmiştir.

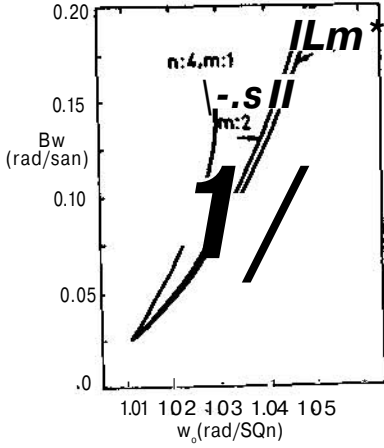
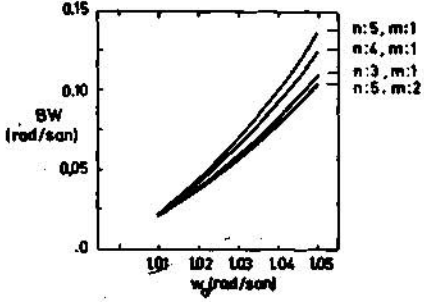
Sanal sıfırlı Çebişef süzgeç işlevlerinde n=3;4;5 dereceleri ve $\omega_0 = 1,01-1,05$ aralığı için, ω_p deki zayıflatma değerleri de Çizelge 2'de verilmiş ve çizimleri Şekil 5'de gösterilmiştir. Örnekleme olarak, eğer her iki geçirme bandı zayıflatma farkı 0,3 dB olması yeterli görülüyorsa, ilk geçirme bandı zayıflatmasınının dB olduğu gözönüne alınarak, Butterworth işlevi için n = 3, m = 1 ($\omega_0 = 1,048$ rad/san veya n = 4, m = 1 $\omega_0 = 1,032$ rad/san seçebiliriz. Çebişef işlevi içinse n = 3, m = 1 $\omega_0 = 1,0485$ rad/san seçimi de isteğe uyabilir. Fakat son karar için, bant aralığı kesim eğimleri ve diğer pratik kısıtlamalar da gözönüne alınmalıdır. Kuramsal olarak da bilmekteyiz ki, sa-



Şekil 5. Çebişef çentik süzgeçleri için durdurma bandı zayıflamasının ω_0 ya göre değişimleri.

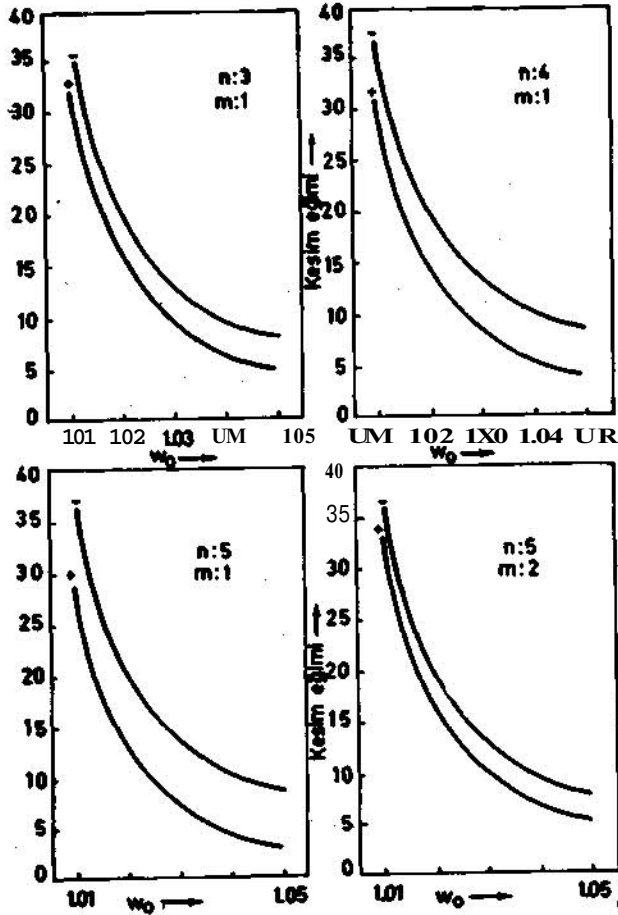
Şekil 6.

Butterworth çentik süzgeçleri bant aralığı değişimleri.



Şekil 7.

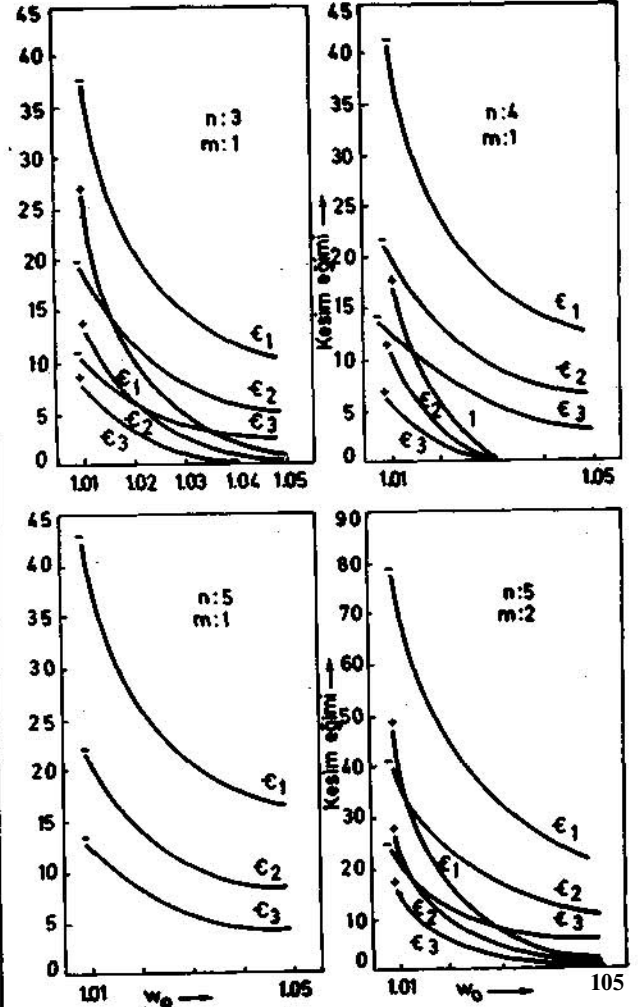
Çebişef çentik süzgeçleri bant aralığı değişimleri.



Şekil 8. Butterworth çentik süzgeçleri kesim eğimlerinin α_0 ya göre değişimleri.

nal sıfırlı Çebişef süzgeçleri, tepe frekansında, daha fazla zayıflama yapmaktadır. Bu durum $w_0 = 1,01-1,05$ aralığı için de geçerlidir ve Çizelge 1 ve 2 karşılaştırmasında görüldüğü gibi, sanal sıfırlı Butterworth süzgeçleri aynı değerler için, sanal sıfırlı Çebişef süzgeçlerinden daha az zayıflamaya sahiptir.

Sanal sıfırlı süzgeç işlevlerinden elde edilen çentik süzgeçlerin bant aralığını bulmak için kesim frekansı ω_c rad/san seviyesindeki diğer kesim frekansının (ω_1) bulunması gerekir. Bu durumda (ω_1-1) rad/san, çentik süzgeçleri için durdurma frekansı bant aralığı olarak düşünülmelidir. Butterworth çentik süzgeçleri için (ω_1-1) aynı zamanda 3 dB bant aralığı olmaktadır. Sanal sıfırlı Butterworth süzgeçleri için, genlik işlevi $1/2$ ye eşitlenerek, 1'den büyük olan ω_1 değerleri hesaplanarak, bant aralıkları bulunabilir. Çebişef çentik süzgeçleri için ise bant aralıkları, genlik işlevi $1/1+P$ ye eşitlenerek bulunur. Bu hesaplamaların sonucu Çizelge 3 ve 4'de verilmiş ve Şekil 6 ve 7'de değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 9. Çebişef çentik süzgeçleri kesim eğiminin t_1-1 , $t_2=0,549$ ve $t_3=0,349$ dalga çarpanları için değişimleri.

ω ₀	n=3 m=1	n=4 m=1	n=5 m=1	n=5 m=2
	Bw(rad/san)	Bw(rad/san)	Bw(rad/san)	Bw(rad/san)
1,01	0,0219	0,0239	0,0274	0,0230
1,02	0,0486	0,0617	-	0,0512
1,03	0,0827	0,1693	-	0,0881
1,04	0,1292	-	-	0,1369
1,05	0,2021	-	-	0,2057

çizelge 3. Çebişef çentik süzgeçleri bant aralıkları (Bw)

ω ₀	n=3 m=1	n=4 m=1	n=5 m=1	n=5 m=2
	Bw(rad/san)	bw(rad/san)	Bw(rad/san)	Bw(rad/san)
1,01	0,0206	0,0209	0,0210	0,0204
1,02	0,0427	0,0432	0,0443	0,0417
1,03	0,0651	0,0677	0,0708	0,0640
1,04	0,0997	0,0949	0,1019	0,0873
1,05	0,1157	0,1256	0,1402	0,1118

Çizelge 4. Buttentorth çentik süzgeçleri bant aralıkları (Bw)

Çebişef çentik süzgeçleri için bazı sanal sıfır değerlerinde, tepe frekansındaki zayıflama, birinci kesim eğimindeki zayıflama değerinden fazla olması nedeniyle bant aralığı hesaplanmamıştır.

Çentik süzgeçlerin simetrisi, seçiciliği hakkında bilgi edinmek ve bunu tasarımlarda kullanmak üzere, her iki kesim frekansındaki kesim eğimleri hesaplanmıştır. Buttentorth çentik süzgeci için $w=1$ deki kesim eğimi (5) bağıntısından, ($0 = \omega_0$ deki kesim eğimi ise (4) bağıntısında $a = \omega_0$) değerleri kullanılarak bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 5, çizimleri de Şekil 8'de verilmiştir.

Çebişef çentik süzgeçleri için ise $u > 1$ deki eğimler (15) bağıntısından bulunur $u = w_0$ deki eğimler ise genlik işlevinin türevini bu frekansda hesaplayarak elde edilir. 1 ; 0,509 ve 0,349 dalga faktörleri için $w=1,01-1,05$ aralığındaki her iki eğim değerleri ve çizimleri Çizelge 6 ile Şekil 9'da verilmiştir. Bu eğim değerlerini logaritmik olarak bulabilmek için ise bu değerleri $\frac{20}{\omega_c}$ ile çarpmak gerekir.

$$IF(\llcorner C)J$$

Burada u_0 kesim frekansı olarak alınmalıdır.

Bu verileri kullanarak, her iki geçirme bandı pratik olarak aynı seviyede olan ve kesim eğimleri çok az farklı çentik süzgeçleri, sanal sıfırlı Buttentorth veya sanal sıfırlı Çebişef süzgeç işlevlerinden birini kullanarak tasarımı yapabiliriz. Süzgecin derecesi n ve sanal sıfırın sayısı m artırıldığında, sanal sıfırın yeri

ω ₀	<ω ₀ - 1 (rad/san) deki eğimler				<D = UI (rad/san) deki eğimler			
	n=3 m=1	n=4 m=1	n=5 m=1	n=5 m=2	n=3 m=1	n=4 m=1	n=5 m=1	n=5 m=2
1,01	-36,41	-36,77	-37,12	-72,48	+32,15	+31,37	+30,62	+68,27
1,02	-18,74	-19,09	-19,45	-37,12	+14,59	+13,93	+12,89	+32,21
1,03	-12,65	-13,01	-13,36	-24,96	+9,27	+8,23	+7,20	+19,84
1,04	-9,68	-10,04	-10,40	-19,02	+6,33	+5,35	+4,30	+13,81
1,05	-7,92	-8,27	-8,63	-15,50	+4,61	+3,59	+2,55	+10,36

Çizelge 5. Buttentorth çentik süzgeçleri için $\omega_0 = I$ ve $\omega_0 = UI$ deki kesim eğimleri

u_0 in bire çok yaklaşması halinde, çentik süzgeçler için en iyi koşullar elde edilebilir. Bu koşullar daha iyi seçicilik daha dar bant aralığı ve daha fazla kesim eğimleridir. Genel olarak, elimizdeki iki çeşit süzgeç işlevlerinden, sanal sıfırlı Buttentorth süzgeç işlevleri için tepe frekanslarında daha az zayıflama, daha dar bant aralığı ve her iki kesim eğimleri daha az farklı olmakta, buna karşılık sanal sıfırlı Çebişef süzgeçlerinde dalga faktörü 1 için kesim eğimleri fazla olmaktadır. Bir örnek verilirse: $n=5, m=2, \omega_0=1,01$ için sanal sıfırlı Buttentorth süzgeci tepe frekansında zayıflama 0,0001 dB, kesim eğimleri -72,48 ve +68,27 ve bant aralığı 0,020 rad/san olmaktadır. Aynı durumda Çebişef çentik süzgeci için zayıflama 0,0004 dB, bant aralığı da 0,023 rad/san olmaktadır. Kesim eğimleri ise $e=1$ için, -79,56 ve +49,95, $e=0,349$ için ise -23,07 ve +14,5 olmaktadır.

ω ₀	n=3, m=1			n=4, m=1		
	E=1	e=0,509	e=0,349	E=1	e=0,509	e=0,349
1,01	-38,53	-19,99	-11,17	-41,02	-21,27	-11,89
1,02	-20,87	-10,83	-6,05	-23,37	-12,12	-6,77
1,03	-14,77	-7,66	-4,28	-17,26	-8,95	-5,0
1,04	-11,81	-6,12	-3,42	-14,26	-7,39	-4,13
1,05	-9,93	-5,15	-2,88	-12,50	-6,48	-3,62
ω ₀	n=5, m=1			n=5, m=2		
	f=1	e=0,509	e=0,349	f=1	e=0,509	e=0,349
1,01	-44,20	-22,93	-12,82	-79,66	-41,27	-23,07
1,02	-26,52	-13,76	-7,69	-44,20	-22,93	-12,83
1,03	-20,42	-10,59	-5,92	-32,20	-16,60	-9,28
1,04	-17,50	-9,08	-5,08	-26,08	-13,53	-7,56
1,05	-15,74	-8,16	-4,56	-22,54	-11,69	-6,54
ω ₀	n=3, m=1			n=4, m=1		
	F=1	e=0,509	e=0,349	E=1	e=0,509	e=0,349
1,01	27,08	14,05	7,85	21,05	60,92	6,12
1,02	10,09	5,23	2,93	5,15	2,67	1,49
1,03	4,74	2,46	1,38	0,4	0,21	0,12
1,04	2,29	1,19	0,66	-	-	-
1,05	0,96	0,5	0,28	-	-	-
ω ₀	n=5, m=1			n=5, m=2		
	F=1	e=0,509	e=0,349	E=1	e=0,509	e=0,349
1,01	14,32	7,43	4,15	49,95	25,91	14,50
1,02	-	-	-	17,95	9,31	5,20
1,03	-	-	-	8,49	4,4	2,46
1,04	-	-	-	4,42	2,29	1,28
1,05	-	-	-	2,21	1,15	0,64

çizelge 6. Çebişef çentik süzgeçleri için ÜIFI ve w₀ deki kesim eğimleri.

Tasarımlama uygulamasında, süzgecin seçilen n, m ve w_0 değerlerine göre genlik-karesi işlevinden, sıfır ve kutupların yerini bularak, bunların sol düzlemdekilerini kullanmak suretiyle, gerçekleştirilmesi yapılacak geçiş (transfer) işlevi elde edilir. Elde edilen geçiş işlevinde bilinen bir tasarım yöntemiyle gerçekleştirilerek, pratik devre elde edilebilir. Buna bir örnek verilirse: $n=3, m=1, \omega_0=1,02$, ve $e=1$ için sanal sıfırlı Çebişef süzgecinin gerçekleştirilmesi üzere, transfer işlevinin bulunması için genlik-karesi işlevi alınarak $ü$ yerine $(-js)$ konur.

$$T(s)^2 = \frac{(-s^2 - 1,02^2)^2}{(-s^2 - 1,02^2)^2 + 1(1,02^2 - 1) (-16s^6 - 24s^4 - 9s^2)^2}$$

Bilgisayar veya programlanabilen hesaplayıcılar kullanarak bu işlevin sol düzlemdeki kutupları bulunur. Sıfır ve kutupların sol düzlemdekileri kullanılmak suretiyle bulunan transfer işlevi de şöyle olmaktadır:

$$T(s) = \frac{s^2 + 1,0404}{-0,02611 (s+6,234011(s^2+0,04502s+1,12453))}$$

5. ETKİN ÇENTİK SÜZGEÇİ TASARIMINDA KULLANILAN BİREŞİM YÖNTEMİ

Keskin kesimli süzgeçlerin gerçekleştirilmesi edilgen RLC öğeleri kullanılarak kolayca yapılabilir. Fakat tümleşik devrenin önemli bir yer tutmaya başladığı modern elektronik teknolojisinde R, C ve etkin öğelerin kullanılması [5], [6], [7] yaygınlaşmaktadır. Burada etkin öğesi işlem yükseltici elan etkin devreler kullanılmıştır. Genel olarak tümleşik devre işlem yükselteçlerinin yüksek giriş empedansı, düşük çıkış empedansı, çok yüksek açık-döngü (open-loop) kazancı ve fakat sınırlı bant genişliği vardır. Bu devrelerin avantajı, çıkışın işlem yükselticiden olması, bu sayede yüksek dereceli işlevlerin gerçekleştirilmesinin: bunların birinci ve ikinci dereceden çarpanlarının birbirine yükleme etkisi olmadan ve araya ayırma-yükseltici koymadan ardarda bağlanarak yapılabilmesidir. Bireşimin birinci ve ikinci dereceden çarpanlarla yapılması, aynı zamanda duyarlık üzerinde de, önemli bir azalma sağlamaktadır.

Etkin devre bireşim yöntemlerinde duyarlık, bir süzgecin beklenen tepkesinden çok farklı bir sonuç alınmasına yol açacak kadar önemli bir etken olmaktadır. Etkin sistemler için çeşitli duyarlık tanımları için de, kutup duyarlığı,

S_j ve Q-duyarlığı, S_j , yeterli bilgiyi sağlamaktadır. Bunlar

$$S_{X^j}^P = \frac{X}{\sigma_j} \cdot \frac{3a_j}{iX} + j \frac{X}{\omega_j} \frac{\partial Q_j}{\partial X} \quad (21)$$

ve

$$S_{X^j}^Q = \frac{X}{Q} \frac{\partial Q}{\partial X} \quad (22)$$

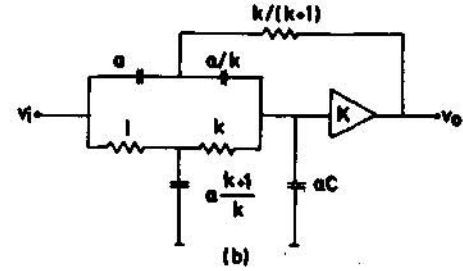
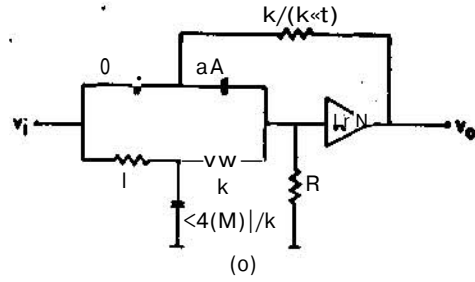
olarak tanımlanır. Burada $P_j = a_j + j\omega_j$ duyarlığı aranan kutup, X'de duyarlığa etki eden etkin veya edilgen öğe değeri karşılığıdır. U_j 'nin X'e bağlı olmadığı sistemler için bu iki tanım birbirleriyle şu şekilde ilişkili olmaktadır.

$$\frac{Q}{X} = \frac{\partial Q}{\partial X} \quad f_{Qj} = \frac{\partial Q_j}{\partial X}$$

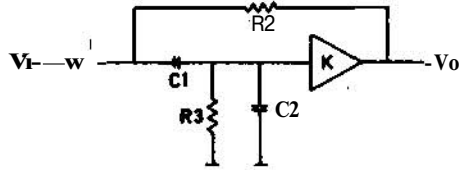
Kutup duyarlık hesaplamalarında, S^j nin gerçel kısmının eksi olmasına karşın, sanal kısmının çok küçük olması halinde, kutubun değişmesi, gerçel eksene paralel olmakta ve X in değerinde artış olması karşısında, kutup sanal eksene doğru yaklaşmakta, bu nedenle salınım olasılığı çoğalmaktadır.

Bir çift sanal sıfırı olan, (2) deki gibi bir geçiş işlevinin etkin gerçekleştirilmesini Şekil 10'daki devreleri kullanarak yapabiliriz. Görüldüğü gibi bu devreler tek işlem yükselticiden faydalanmaktadır.

$$T(s) = \frac{H(s^2 + \sigma t)}{s^2 + \sigma s + Y} \quad (24)$$



Şekil 10. İki kutup ve iki sanal sıfırlı işlevler için etkin devreler
a) Yüksek-geçiren b) Alçak-geçiren



Şekil 11, İki kutup ve tek sıfırlı işlevler için etkin devre.

Eğer $Y > a$ ise Şekil (10.a) yi kullanmak mümkün olur. Bu devrenin transfer işlevi:

$$T(s) = \frac{K(s^2 + \frac{1}{a^2})}{\frac{2k+1}{a} \left[\frac{1}{R} + \frac{2-K}{k} \right] s + \left[1 + \frac{k+1}{R} \right] \frac{1}{a^2}} \quad (25)$$

Devre parametreleri de (24) ve (25) bağıntılarıyla karşılaştırılmasından bulunur.

$$a = \frac{1}{\sqrt{a}} \quad (26)$$

$$R = \frac{k+1}{\frac{2k+1}{a} - 1}$$

$$R = \frac{1}{\frac{2k+1}{a} - 1} \left[\frac{Y}{L^a} - 1 - \frac{\beta}{\sqrt{a}} \right]$$

$$H = K$$

Bu devrenin K kazancına göre kutup ve Q duyarlılıkları da şöyledir-

$$\xi_j^p = -\frac{KR}{k+2R-RK} + j \frac{K(k-H)^2(k+2R-RK)}{(k+1)^2(k+2R-RK)^2+4Rk^2(R+1+k)} \quad (27)$$

$$\xi = \frac{\Delta}{k+2R-RK} \quad (28)$$

cx>y durumunda ise Şekil (10.b) deki devre kullanılabilir. Bunun transfer işlevi ise:

$$T(s) = \frac{\frac{K}{(k+1)c+1} \left[s^2 + \frac{1}{a^2} \right]}{(k+1) \left(c + \frac{2-K}{k} \right) s^2 + \frac{1}{aRk+Dc+I} s + \frac{1}{a^2[(k+1)c+1]}} \quad (29)$$

Devre parametreleri de :

$$\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$$

$$C = \frac{\frac{\alpha}{Y} - 1}{k+1} \quad (30)$$

$$K = 2 + \frac{k}{k+1} \left[\frac{\alpha}{Y} - 1 - \frac{\beta\sqrt{\alpha}}{Y} \right]$$

$$H = -\frac{*}{a} - K$$

Kutup duyarlılığı ile Q duyarlılıkları da şöyledir :

$$\frac{p}{V} = \frac{K}{kC+2-K} + j \frac{K(k+1)^2 (k+2-K)}{\left\{ -(k+1)^2 \left[c + \frac{2-K}{k} \right]^2 + A[(k+1)c+1] \right\}} \quad (31)$$

$$S^o = \frac{K}{kC+2-K} \quad (32)$$

Bu devrelerde k istenildiği gibi seçilmektedir. Bu seçme belirli bir kazanç (k) değeri veya düşük bir kazanç (K) değeri elde etmek için olabilir, k'nin 1'e çok yakın seçilmesi, öge değerlerinin dağılımını da azaltacaktır.

Y = a durumunda ise her iki devre de kullanılabilir. 0 takdirde R direncini veya (aC) sığacını devreden çıkarmak yeterli olmaktadır.

01=0 için, yani geçiş işlevi $\frac{Hs}{s^2+\beta s + \gamma}$ olan bant geçiren süzgeç işlevi için Şekil 11'de verilen devre kullanılabilir. Bu devrenin, devre elemanları cinsinden geçiş işlevi:

$$K = \frac{s}{R_1 C_2}$$

$$T(s) = \frac{1}{s^2+s} \left[\frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-K}{R_1 C_2} \right] + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{C_1 C^2} \quad (33)$$

Devre öğelerinin g ve Y cinsinden tasarlan, için aşağıdaki denklemler kullanılır. Bu denklemler iyi öge değer dağılımı ve düşük Q değerleri için (10 veya daha az) düşük duyarlılık verebilmektedir. Tasarımda önce $C_x = C_2$ için uygun bir C değeri seçilir. Sonra kazanç K ve direnç VL_1, R_2, R_3 değerleri bulunur.

$$K = 5 - \frac{\sqrt{2}}{Q} = 5 - \sqrt{\frac{2}{Y}} \beta \quad (34)$$

$$\frac{\sqrt{2}}{WC} = \frac{1}{C} = \frac{\sqrt{2}}{Y}$$

K kazancına göre kutup ve Q duyarlıkları ise şöyledir:

$$\frac{P_j}{S_K} = -\frac{K}{R_2 C_2} \frac{1}{\beta} + j \frac{\frac{K}{R_2 C_2}}{(4\gamma - \beta^2)} \quad (36)$$

$$S_K^o = \frac{K}{R_2 C_2} \frac{1}{\beta} \quad (37)$$

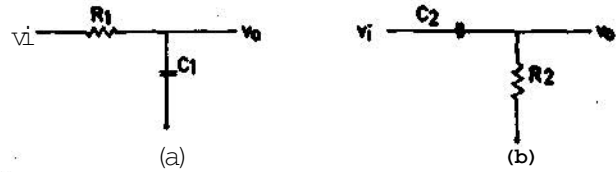
Gerçel kutupların gerçekleştirilmesi ise Şekil 12'deki devrelerle yapılır. Bunların transfer işlevleri ise:

$$T_1(s) = \frac{H_1}{s+a_1} = \frac{1/R_1 C_1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} \quad (38)$$

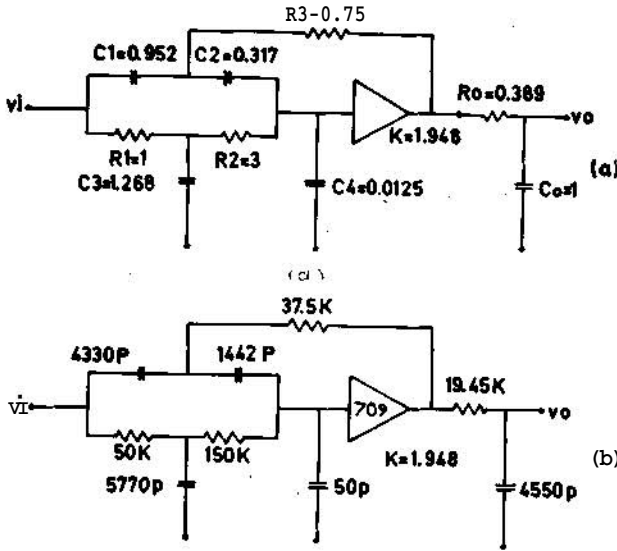
$$T_2(s) = \frac{H_2 s}{s+a_2} = \frac{s}{8 + \frac{1}{R_2 C_2}} \quad (39)$$

Bu devreler işlem yükselteçli devrelere ardarda bağlanabilirler. Devre öğeleri; $di = \frac{1}{R_1} C_1$, $a_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$ eşitliklerini kullanarak ve bir öge değerini serbest seçerek bulunurlar.

Süzgeçlerin pratik gerçekleştirilmesinde, önce süzgeç transfer işlevinin birinci ve ikinci dereceden normalize edilmiş çarpanlarının birleşimi



Şekil 12. Gerçel kutuplu işlev devreleri
a) Yüksekgeçiren b) Alçakgeçiren



Şekil 13. Çebişef çentik süzgeç etkin devreleri
a) Normal ize edilmiş,
b) 50 kOhm ve 700 Hz'e ayarlanmış.

yapılır. Uygun empedans ve frekans çarpanları seçilerek, istenilen frekansdaki, asıl öge değerleri elde edilir. Şekil 10'daki devreler, işlem yükselteç kazancı K'ya göre yüksek duyarlık göstermeleri nedeni ile, düşük Q ve düşük kazançlı yüzgeçlere uygulanabilirler. Bu nedenle kullanılan ikinci dereceden işlevlerin Q değerinin 10 veya daha az olması gerekmektedir. Daha yüksek değerlerde Q lan olan devreler için ise ($Q = 10^3$ 'e kadar), çok fazla sayıda işlem yükselteçlerine gerek gösteren, bu sebeple pahalı olan tasarım yöntemleri bulunmaktadır [8].

6. ETKİN ÇENTİK SÜZGEÇ GERÇEKLEŞTİRMESİ

Şekil 10'daki devreleri kullanarak bir etkin çentik süzgeç gerçekleştirilmesi yapmak istersek ikinci dereceden çarpanlarının Q değeri 10'dan düşük olan bir işlev kullanmamız gerekir. Bu nedenle yapılan incelemede, üçüncü dereceden sanal sıfırlı Butterworth ve Çebişef süzgeç işlevlerinin Q değerleri $U_0 \ll 1,02-1,05$ aralığında değişik dalga çarpanlarını da kullanarak hesaplanmış ve Çizelge 7'de gösterilmiştir.

Bu devrelerde kutup duyarlığının yüksek Q değerinde etkisini görebilmek için üçüncü dereceden iki sanal sıfırlı Çebişef süzgeç işlevi ele alın-

ω_0	Sanal sıfırlı		Sanal sıfırlı Çebişef süzgeçleri	
	Butterworth süzgeçleri	$e = 1$	$e = 0,509$	$e = 0,349$
1,05	9,46	8,69	15,09	21,23
1,04	11,84	10,81	19,43	27,60
1,02	16,06	15,62	23,68	38,48
1,02	21,07	24,97	31,47	54,41

Çizelge 7. Üçüncü dereceden süzgeçlerin Q değerleri.

mış ve denenmiştir. Bunlardan biri için $u_0=1,02$, $e=1$ ve $Q=24,97$, diğeri için ise $u_0=1,05$ $E=1$ $Q=8,69$ dur. TL1709 işlem yükselteçleri kullanılarak yapılan gerçekleştirilmede, Q değeri yüksek olan devre, teorik tepkeden çok farklı bir tepke göstermiştir. Bunların kutup duyarlılıkları da hesaplanınca, aradaki farklılık anlaşılabilir olur. Birincisi için $s_{1j} = -265,3 + j0,014$, ikincisi için ise $s_{2j} = -22,2 + j0,075$ dir. İkinci seçim için gerçekleştirme şöyle yapılmıştır. Genlik işlevinden bulunan, geçiş işlevi $T(s)$ aşağıdaki gibidir:

$$T(s) = \frac{(s^2 + 1,1055)}{-0,1681(s + 2,55699)(s^2 + 0,118s + 1,05165)}$$

tkinci dereceden çarpan tasarım parametrelerinde

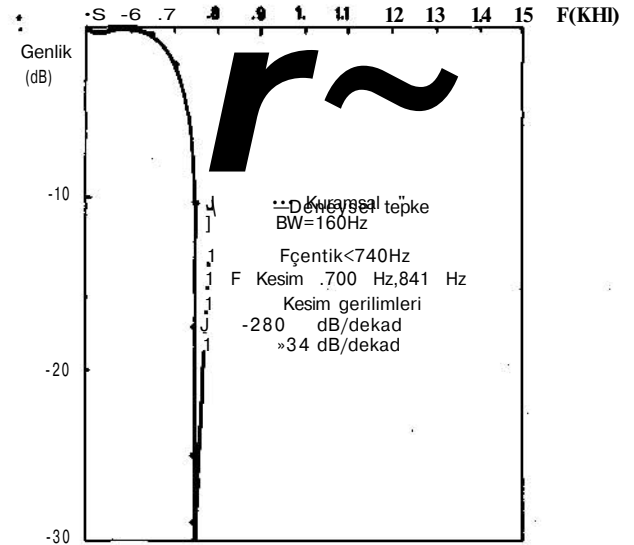
$$\begin{aligned} a &= 0,9524 \\ k &= 3 \\ C &= 0,012 \\ K &= 1,948 \end{aligned}$$

olarak hesaplanmıştır. Normalize edilmiş öge değerleri bulunduğundan sonra 50 Kempedans ve 700 Hz frekans çarpanları ile, 1 olan kesim frekansı 700 Hz'e kaydırılmıştır. Bu frekans 'kaydırma işleminde dirençler 50×10^3 ile sığalar ise

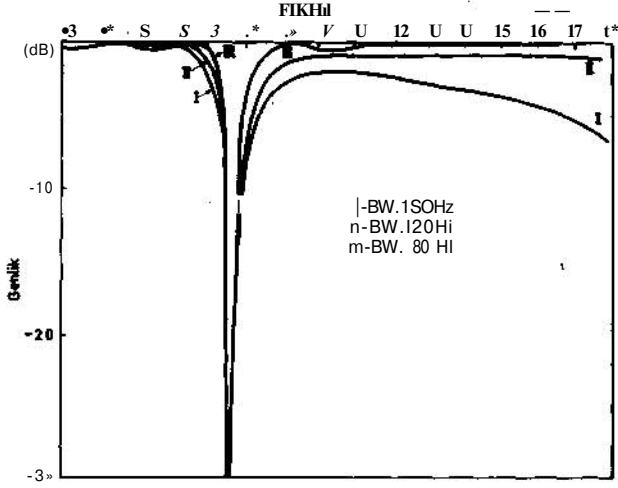
$$\frac{1}{(50 \times 10^3) \times (700 \times 2)} = \frac{10^{-7}}{21,991}$$

ile çarpılarak asıl devre değerleri bulunmuştur. Çentik süzgecin, zayıflatılan frekansı ise $1,05 \times 700 = 735$ Hz olmakta ve bu frekansa zayıflama 30 dB ye ulaşmaktadır. Kesim frekanslarında hesaplanan eğimler ise -280 dB/dekad ve +34 dB/dekad olmaktadır. Normalize edilmiş öge değerleri ile asıl öge değerlerini gösteren devre Şekil 13'de verilmiştir. Kuramsal ve deneysel sonuçların, genlik tepkeleri ise Şekil 14'de görülmektedir.

Bu devrede bazı değişiklikler yapılarak genlik tepkesinin çentik frekansına göre daha bakışılmlı



Şekil 14. Çebişef çentik süzgeci, $u_0=1,05$ ve $t=1$) genlik tepkesi.



Şekil 15. CQ VB C# sığaçların değiştirilmesiyle düzeltilmiş Çebişef çentik süzgeç tepkeleri. (I) Şekil 14'ün aynı, (II) $C_0 = 500$ pf, (III) $C_0 = 500$ pf ve $C4 = 0$.

olması sağlanabilir. Bu amaçla C_0 sığaçının 500 pf'a ve daha sonra bu değişikliğe ek olarak C_4 sığaçının değerinin sıfıra indirilmesiyle elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 15'de gösterilmiştir.

7. KESKİN KESİMLİ BANT-GEÇİREN SÜZGEÇLER

Keskin kesimli bant-geçiren süzgeçler keskin kesimli alçak-geçiren süzgeçlerden, frekans dönüşümü veya alçak ve yüksek geçiren süzgeçlerin ardarda eklenmeleri ile elde edilir. Alçak-geçiren bant-geçirene frekans dönüşümü, alçak-geçiren süzgecin karmaşık (complex) frekansı $s = 0 + j\omega$ yerine $\frac{S^2 + \omega_c^2}{S}$ koyarak yapılır. Bant geniş-

ligi kontrolünü de sağlayan bu dönüşüm ögesinde, $S_b = +j\omega$ bant geçiren süzgecin karmaşık frekansı, f_c 3-dB frekanslarının (f_1 ve f_2) geometrik ortalaması ($f_c = \sqrt{f_1 f_2}$) ve $f_{B1} = \sqrt{f_1^2 - 1}$ ve $f_{B2} = \sqrt{f_2^2 - 1}$ geçiren süzgecin bant genişliğidir. 0 zaman bant geçiren süzgecin herhangi bir gerçel frekansı f_1, ω cinsinden şu işlevi kullanarak bulunabilir:

$$\Omega^2 - \omega(\Omega_2 - \Omega_1) \Omega - \Omega_c = 0 \quad (40)$$

Bant-geçiren Butterworth ve bant-geçiren keskin kesimli Butterworth süzgeçlerinin kesim eğimleri frekans dönüşümü sonunda şöyle olmaktadır:

$$S_{B1} \Big|_{\Omega = \Omega_1} = \frac{n}{2/2} \left[\frac{\Omega_1^2 + \Omega_c^2}{\Omega_B \Omega_1^2} \right] \quad (41)$$

$$S_{B2} \Big|_{\Omega = \Omega_2} = \frac{n}{2/2} \left[\frac{\Omega_2^2 + \Omega_c^2}{\Omega_B \Omega_2^2} \right] \quad (42)$$

$$S_{MB1} \Big|_{\Omega = \Omega_1} = \frac{\Omega_1^2 + \Omega_c^2}{\Omega_B \Omega_1^2} \left[S_{B1} + \frac{m}{\sqrt{2}(\omega f - 1)} \right] \quad (43)$$

$$S_{MB2} \Big|_{\Omega = \Omega_2} = \left(\frac{\Omega_2^2 + \Omega_c^2}{\Omega_B \Omega_2^2} \right) \left[S_{B2} + \frac{m}{\sqrt{2}(\omega_0^2 - 1)} \right] \quad (44)$$

Bant geçiren keskin kesimli Butterworth süzgeci için en düşük zayıflamanın olduğu frekans ise (40) ta $\omega = \omega_0$ kullanarak veya şu eşitlikten faydalanılarak bulunabilir.

$$\omega_p = \frac{1}{2} \left[\omega_0 \left(\frac{n}{n-2m} \right)^{\frac{1}{2}} \pm \omega_0^2 \sqrt{\frac{n}{n-2m} + 4} \right] \quad (45)$$

0 takdirde üç, deki en düşük zayıflama da bantın her iki yanında alçak geçiren süzgecin en düşük zayıflamasıyla aynı olmaktadır.

Bant-geçiren Çebişef ve bant-geçiren keskin kesimli Çebişef süzgeçleri için kesim eğimleri de:

$$S_{c1} \Big|_{\Omega = \Omega_1} = \frac{\epsilon^2 n^2}{(1+\epsilon^2)^{3/2}} \left[\frac{\Omega_1^2 + \Omega_c^2}{\Omega_B \Omega_1^2} \right] \quad (46)$$

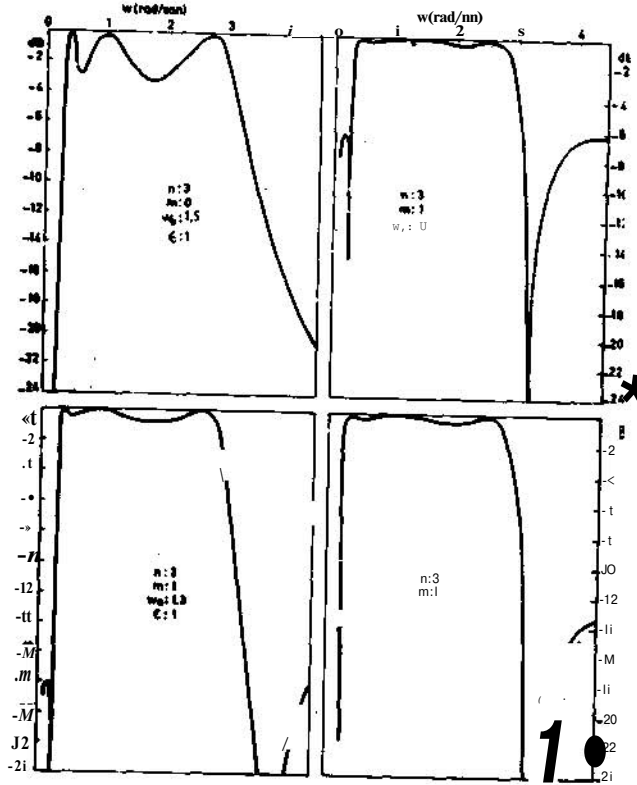
$$S_{c2} \Big|_{\Omega = \Omega_2} = \frac{-\epsilon^2 n^2}{(1+\epsilon^2)^{3/2}} \left[\frac{\Omega_2^2 + \Omega_c^2}{\Omega_B \Omega_2^2} \right] \quad (47)$$

$$S_{cM1} \Big|_{\Omega = \Omega_1} = S_{e1} \left[1 + \frac{2m}{K-1} \right] \quad (48)$$

$$S_{cM2} \Big|_{\Omega = \Omega_2} = S_{e2} \left[1 + \frac{2m}{n^2(\omega_0^2 - 1)} \right] \quad (49)$$

Durdurma bandı en düşük zayıflamasının da yine değişmediği ayrıca gösterilebilir.

Bant geçiren süzgeçlerin etkin gerçekleştirilmesi, edilgin süzgeçlerde uygulanan yöntemle yapılamaz, yani etkin RC alçak geçiren devreyi etkin RC bant geçiren devreye dönüştüren bir yöntem yoktur. En düşük sayısal çalışmayla alçak-geçirenden, bant-geçiren süzgeç geçiş işlevi elde etmeyi sağlayan yöntem Saraga [9] tarafından önerilmiştir. Bu yöntem birinci ve ikinci dereceden çarpanlara ayrılmış alçak geçiren süzgeç işlevinin, ikinci ve dördüncü dereceden bant geçiren süzgeç işlevi çarpanlarına dönüştürülmesidir. Dördüncü dereceden çarpanlar, sonra ikinci dereceden çarpanlara ayrılmakta ve etkin gerçekleştirme yapılmaktadır. Bir örnekle bu dönüşüm daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 16. Çebişef işlevlerinden frekans dönüşümü ile elde edilen bant-geçiren süzgeç tepkeleri.

ÖRNEK :

Sıgnal sıfırını $\pm j1,2$ ve dalga çarpanı $e = 1$ olan üçüncü dereceden keskin kesimli alçak geçiren Çebişef süzgeci geçiş işlevi kesim frekansları $\omega_1 = 5$ ve $\omega_2 = 8$ rad/san olan bant geçiren süzgeç geçiş işlevine dönüştürülecektir, önce alçak geçiren süzgeç geçiş işlevinin birinci ve ikinci dereceden çarpanları bulunur.

$$T(s) = \frac{1}{(s+0,83811)} \frac{(s^2+1,44)}{(s^2+0,2699s+0,9762)} \quad (50)$$

Bu çarpanlarda s yerine $-\frac{s^2+40}{j8}$ ($f_c = 5 \times 8 = 40$ ve $f_{ig} = 8 - 5 = 3$) koyarak bant geçiren süzgecin çarpanları elde edilir.

$$T_1(s) = \frac{1}{s+0,83811} \rightarrow H_1(s) = \frac{3s}{s^2+2,5143s+40}$$

$$T_2(s) = \frac{s^2+1,44}{s^2+0,2699s+0,9762}$$

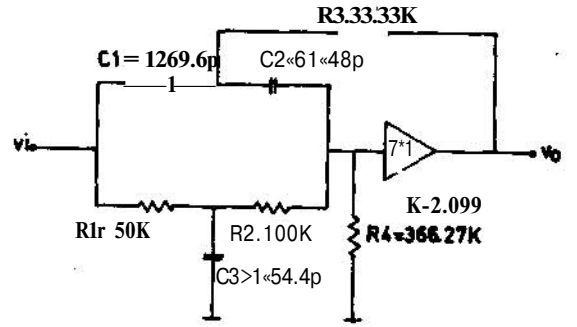
$$-H(s) = \frac{8^2 \cdot 96 \cdot s^2 + 1600}{s^4 + 0,810s^3 + 88,786s^2 + 32,388s + 1600}$$

Sonra $H_2(s)$ ikinci dereceden çarpanlara ayrılır-

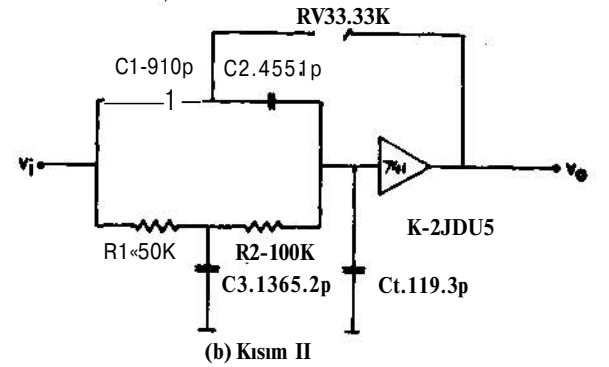
sa, bant geçiren süzgecin, etkin gerçekleştirme-ye hazır geçiş işlevi elde edilmiş olur.

$$H(s) = \frac{3s}{s^2+2,5143s+40} \frac{s^2+70,1i)3}{s^2+0,313s+2,5,2ii} \frac{s^2+22,805}{r^2+1,497s+63,339}$$

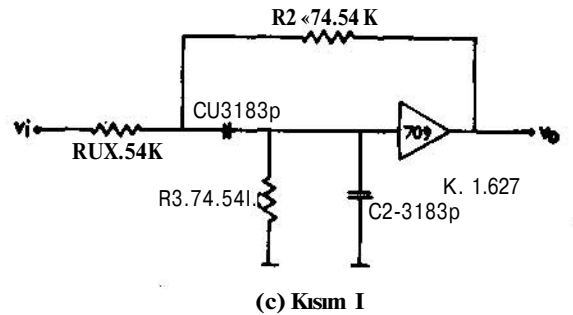
Bilgisayar kullar.xlararak frekans dönüşümü ile $n = 3;4;5$, $m = 1,2$ ve ω_0 ir, 1,1 den 1,5 e kadar değişen değerleri için elde edilen bant geçiren süzgeçlerin genlik tepkeleri elde edilmiştir [IOJ. örnek olarak Şekil 16'da bant genişliği 2,7 rad/san ve kesim frekansları $\omega_1 = 0,3$ rad/szi. ve $\omega_2 = 3$ rad/san olan keskin kesimli bant geçiren Çebişef süzgeçlerinin genlik tepkeleri n , m ve ω_0 in değişik değerleri için gösterilmiştir.



(a) Kısım I



(b) Kısım II



(c) Kısım I

Şekil 17. Keskin kesimli bant-geçiren süzgeç için frekans dönüşümü ile gerçekleştirilen etkin devreler.

Yukarda verilen örneğin deneysel yapımında kesim frekanslarisaaha kullanışlı değerler olan 300 Hz ve 3000 Hz'c kaydırılmış ve her üç çarpanın ayrı ayrı etkin tasarımı yapılmıştır.

Öge değerlerini gösteren devreler Şekil 17'de, deneysel ve kuramsal genlik tepkelerini birarada gösteren çizimler de Şekil 18'de verilmiştir.

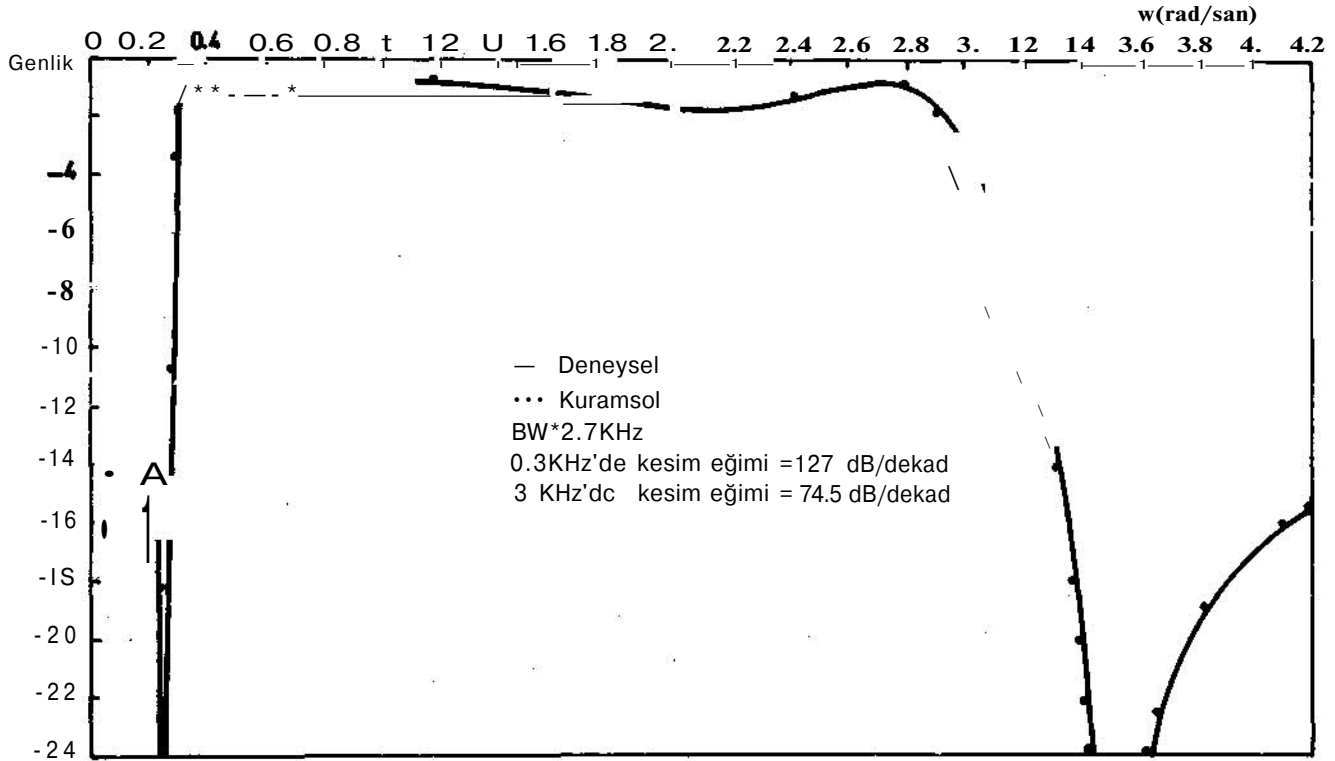
Yüksek ve alçak geçiren süzgeçlerin ardarda bağlanmaları ile bant-geçiren devre elde edebilmek için önce 3. dereceden (50)de verilen alçak geçiren Çebişef süzgeç işlevini kullanarak, alçak geçiren süzgeç tasarımı

yapılmıştır. Bu devrenin asıl öge değerleri 50 kQ empedans ve bantın üst kesimi cılan 3000 Hz'e kaydırma çarpanları kullanarak bulunmuştur.

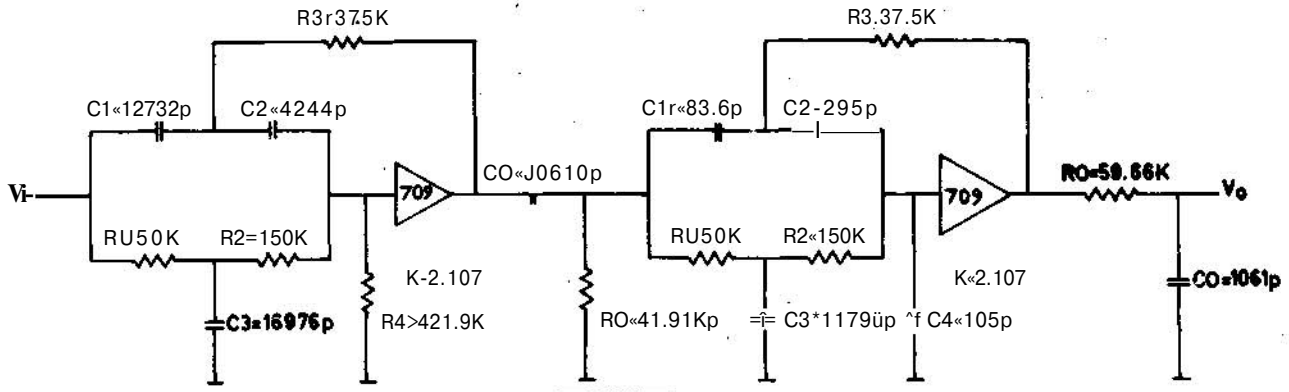
Alçak-geçiren süzgeç işlevi üzerinde yapılan $s \rightarrow 1/s$ dönüşümü sonucu kesim frekansı 1 olan yüksek-geçiren süzgeç işlevi

$$H_2(s) = \frac{s}{s+1,1932} \frac{s^2+0,6944}{s^2+0,2766s+1,0234} \quad (51)$$

elde edilmiştir. Bu işlevin tasarımı da yine bölüm 5'deki devrelerle yapılmış ve 50 kft empedans



Şekil 18. Frekans dönüşümü ile elde edilmiş üçüncü derece keskin kesimli bant-geçiren Çebişef süzgecin kuramsal ve deneysel genlik tepkeleri.



Şekil 19. Yüksek -ve alçak- geçiren keskin kesimli Çebişef süzgeçlerinin ardarda bağlanması ile elde edilen bant-geçiren süzgeç devresi.