T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKIM MODLU KESİRLİ DERECELİ EVRENSEL SÜZGEÇ TASARIMI

Serkan KAHRAMAN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AKIM MODLU KESİRLİ DERECELİ EVRENSEL SÜZGEÇ TASARIMI

Serkan KAHRAMAN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4
3. MATERYAL ve YÖNTEM 6
3.1. Materyal 6
3.1.1. Süzgecin tanımı 6
3.1.2. Süzgeç çeşitleri 7
3.1.3. İkinci derece süzgeç çeşitleri ve özellikleri 8
3.1.4. CCII ile akım modlu devre tasarımı 10
3.1.5. AD844A entegresinin akım taşıyıcı (current conveyor) olarak kullanılması 16
3.1.6. Kesirli dereceli süzgeçler 19
3.2. Yöntem 22
3.2.1. Kesirli dereceli süzgeç oluşturma yöntemleri 22
3.2.2. Kesirli derece kapasite modelinin oluşturulması 24
3.2.3. Devreye kesirli derecenin uygulanması 27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 31
4.1. Kesirli Derece Uygulanan Devrenin Benzetim Sonuçları 31
4.2. Kesirli Derece Modelinin Logaritmik Ortam Süzgecine Uygulanması 38
4.2.1. Logaritmik ortam süzgeçlerin tanımı 38
4.2.2. Lineerlik 39
4.2.3. Akım / gerilim modlu devreler 39
4.2.4. Translineer prensibi 41
4.2.5. Adams'ın devresi 43
4.2.6. Logaritmik ortamda süzgeç tasarım örneği 45
4.2.7. Logaritmik ortam süzgecine kesirli derecenin uygulanması 50
4.2.8. Kesirli derece logaritmik ortam süzgeç benzetimleri 51
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 54
5.1. Sonuçlar 54
5.2. Öneriler 55
KAYNAKLAR 56
ÖZGEÇMİŞ 58
EKLER 59
EK 1 59

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKIM MODLU KESİRLİ DERECELİ EVRENSEL SÜZGEÇ TASARIMI

Serkan KAHRAMAN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali KIRÇAY
Yıl: 2022, Sayfa: 59

Bu çalışmada akım modlu ikinci dereceden iki evrensel süzgece kesirli derece uygulanmıştır. Birinci süzgeç üç akım taşıyıcı (CCII, AD844A), iki kondansatör, üç direnç kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan süzgece Foster devresi uygulanmıştır. Foster devresinde kullanılan kondansatör ve direnç değerleri 100 kHz frekans ve 1 nf kapasite değeri için MATLAB programı ile hesaplanmıştır. Foster devresinde geleneksel kondansatörlerde bulunan $X_C = 1/SC$ empedans değeri, modelde $X_C = 1/S^{\alpha}C$ değerine eşit olmaktadır. Modelin uygulanmasıyla α'nın 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 değerleri için α+1 değerine bağlı olarak 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 derecesine sahip süzgeçler elde edilmiş ve bu süzgeçlerin genlik ve faz cevapları PSPİCE programı yardımıyla birbirleriyle ve ikinci derece süzgeç ile karşılaştırılmıştır. İkinci süzgeç devresi ise daha önce integratörler kullanılarak logaritmik ortamda tasarlanmış transistörlerden ve kondansatörlerden oluşan düşük güçlü bir devredir. Kesirli derecenin her devreye uygulanabildiğini göstermek amacıyla farklı bir ortamda tasarlanan bu süzgece α'nın 0.8 ve 0.9 değerleri için kesirli derece uygulanarak genlik ve faz cevapları PSPİCE programı yardımıyla birbirleriyle ve ikinci derece süzgeç devresi ile karşılaştırılmıştır. İki devrenin de sonuçları; kesirli dereceli süzgeçlerin bir ihtiyaç olduğunu, çok iyi sonuçlar verdiğini ve model kullanılmasıyla devrelere rahatça uygulanabildiğini göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: kesirli derece, Foster devresi, genlik-faz cevabı, kapasite modeli

ABSTRACT

MSc Thesis

CURRENT MODE FRICTIONAL ORDER UNIVERSAL FILTER DESIGN

Serkan KAHRAMAN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali KIRÇAY
Year: 2022, Page: 59

In this study, fractional order was applied to two current-mode second-order universal filters. The first filter is designed using three current conveyors (CCII, AD844A), two capacitors, and three resistors. Foster circuit is applied to the designed filter. Capacitor and resistor values used in Foster circuit were calculated with MATLAB program for 100 kHz frequency and 1 nf capacitance value. In the Foster circuit, the impedance value of $X_C = 1/SC$ in conventional capacitors is equal to the value of $X_C = 1/S^{\alpha}C$ in the model. By applying the model, filters with a degree of 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 depending on the value of α+1 for the values of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 The amplitude and phase responses of these filters were compared with each other and with the second order filter with the help of the PSPICE program. The second filter circuit, on the other hand, is a low-power circuit consisting of transistors and capacitors previously designed in a logarithmic environment using integrators. In order to show that fractional order can be applied to every circuit, this filter designed in a different environment is applied to this filter for 0.8 and 0.9 values of α, and the amplitude and phase responses are compared with each other and with the second order filter circuit with the help of PSPICE program. The results of both circuits; It shows that fractional order filters are a necessity, they give very good results and can be easily applied to circuits by using models.

KEYWORDS: fractional order, Foster network, amplitude-phase response, capacitance model

TEŞEKKÜR

Tez konusunun seçiminde, hazırlanmasında ve uygulanmasında yardımını esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Ali KIRÇAY'a, bilgisi ve deneyimleriyle bana yol gösteren Arş. Gör. Fatma Zuhal ADALAR'a ve bu konudaki bilgisini benimle paylaşan doktora öğrencisi Fadile ŞEN'e teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Alçak geçiren ideal süzgeç genlik ve faz cevapları…..…….……..…….... 6
Şekil 3.2. Genel süzgeç devresi…….……..... 7
Şekil 3.3. İdeal süzgeçlerin genlik cevapları……..…...10
Şekil 3.4. CCII (Current Conveyor) sembolü……..... 11
Şekil 3.5.a. Yüksek geçiren süzgeç genlik cevabı……..… 13
Şekil 3.5.b. Yüksek geçiren süzgeç faz cevabı……..… 13
Şekil 3.6. Şekil 3.6. Bant geçiren süzgeç genlik cevabı……..….. 14
Şekil 3.7. Alçak geçiren süzgeç genlik cevabı……..…… 14
Şekil 3.8. Bant durduran süzgeç genlik cevabı……. 15
Şekil 3.9. Tüm geçiren süzgeç genlik cevabı…….……..15
Şekil 3.10. CCII (current conveyor) sembolü……..... 17
Şekil 3.11. AD844A (current conveyor) iç yapısı……..…17
Şekil 3.12.a. İdeal CCII ile AD844A entegresinin yüksek geçiren süzgeç için genlik cevapları…...18
Şekil 3.12.b. İdeal CCII ile AD844A entegresinin yüksek geçiren süzgeç için faz cevapları…….. 18
Şekil 3.13. AD844 entegresinin CCII olarak kullanılması……..... 19
Şekil 3.14. Butterworth süzgecin farklı dereceler için genlik cevapları……..….. 20
Şekil 3.15.a. 1. derece ve 2. derece süzgeçlerin yaklaşık kazanç grafiği ……...…….……. 21
Şekil 3.15.b. 1. derece ve 2. derece süzgeçlerin yaklaşık faz grafiği ……..……..…… 21
Şekil 3.16.a. Kesirli derece kapasite modeli (1)……..…….…… 22
Şekil 3.16.b. Kesirli derece kapasite modeli (2) ……..… 22
Şekil 3.16.c. Kesirli derece kapasite modeli (3) ……..……..……..... 23
Şekil 3.17. Kapasite eş değer modeli…….……..... 25
Şekil 3.18. n=5 değeri için eş değer kapasite modeli…… 26
Şekil 3.19. n değeri için Foster-I eş değer kapasite modeli……..….. 27
Şekil 3.20. Kesirli derece modelinin devreye uygulanması…….…..... 28
Şekil 3.21. Kondansatör sembolü……..…….…….. 28
Şekil 4.1.a. Kesirli dereceli yüksek geçiren süzgecin genlik cevabı……..……..... 31
Şekil 4.1.b. Kesirli dereceli yüksek geçiren süzgecin faz cevabı ……..…… 32
Şekil 4.1.c. Kesirli dereceli yüksek geçiren süzgecin zaman cevabı ……..……..... 32
Şekil 4.1.d. R1, R2, R3, Ra, Rb, Rc, Rd, Re, Rf değerlerinin Monte-Carlo kazanç cevabı……..…33
Şekil 4.1.e. R1, R2, R3, Ra, Rb, Rc, Rd, Re, Rf değerlerinin Monte-Carlo faz cevabı ……...…… 34
Şekil 4.1.f. C2, Cb, Cc, Cd, Ce, Cf değerlerinin Monte-Carlo kazanç cevabı ……...……. 35
Şekil 4.1.g. C2, Cb, Cc, Cd, Ce, Cf değerlerinin Monte-Carlo faz cevabı ……..….. 35
Şekil 4.2. Kesirli dereceli bant geçiren süzgecin genlik cevabı …….……...……..... 36
Şekil 4.3. Kesirli dereceli alçak geçiren süzgecin genlik cevabı …….……..……... 37
Şekil 4.4. Kesirli dereceli bant durduran süzgecin genlik cevabı ……...……..... 37
Şekil 4.5. Translineer devre örneği……...……..…..... 42
Şekil 4.6. Adams'ın devresi……...……...……...……... 43
Şekil 4.7. Logaritmik süzgeçlerin çalışma prensibi……..……..……..…… 43
Şekil 4.8. Op-amp sembolü…… 44
Şekil 4.9. Diyot sembolü…....……..……..……... 44
Şekil 4.10. Logaritmik ortam, evrensel süzgeç blok şeması……...…….……...…..... 46
Şekil 4.11. İntegratör devresi……...……..... 48
Şekil 4.12. Logaritmik ortam evrensel süzgeç……...……..... 50
Şekil 4.13. Logaritmik ortam süzgecine kesirli derecenin uygulanışı…….……..…… 50
Şekil 4.14.a. Logaritmik ortam kesirli dereceli alçak geçiren süzgeç genlik cevabı…….…… 51
Şekil 4.14.b. Logaritmik ortam kesirli dereceli alçak geçiren süzgeç faz cevabı …….……...…… 52
Şekil 4.15. Logaritmik ortam kesirli dereceli bant geçiren süzgeç genlik cevabı……....…… 52
Şekil 4.16. Logaritmik ortam kesirli dereceli yüksek geçiren süzgeç genlik cevabı……..53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Kesirli derece modeli direnç, kondansatör değerleri…… 26

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
α	Kesirli Dereceli Devreler İçin Kesir Değeri
BJT	Bipolar Junction Transistor
C	Kondansatör
CCII+	Pozitif İkinci Nesil Akım Taşıyıcı
CCII-	Negatif İkinci Nesil Akım Taşıyıcı
H(s)	Transfer Fonksiyonu
I_c	Transistör Kollektör Akımı
I_d	Diyot Akımı
I_s	Diyot Sızıntı Akımı
k	Boltzmann Sabiti (1.3806568 x 10E-23 JK-1)
PSPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
q	Bir Elektronun Yükü (1.602 x 10E-19C)
R	Direnç
T	Sıcaklık (Kelvin)
V	Volt
V_{BE}	Transistör Base Emitter Gerilimi
V_T	Sıcaklığa Bağlı Gerilim (Thermal Voltage)

1. GİRİŞ

Elektrik ve elektronikte sinyallerin işlenmesi büyük öneme sahiptir. Sinyallerin karmaşık yapıda olması, gürültü içermesi, istenilen sinyalin özelliği gibi durumlar sinyallerde bir ayrıştırmaya gidilmesini zorunlu kılmıştır. Sinyallerin istenilen frekans aralığındaki kısımlarını geçirip istenmeyen kısımlarını söndüren devrelere süzgeç denir (Şen, 2019).

Süzgeçler sinyallerin istenen kısımlarını bir kazanç değeri ile çarparak yükseltir, istenmeyen kısımlarını ise çok düşük değerlerle çarparak söndürür. Süzgeçler; sinyali kazanç değeriyle çarparak yükselten geçirme bandı, sinyali düşük değerlerle çarparak söndüren durdurma bandı ve bu iki bant arasında bulunan geçiş bandından oluşur (Dindar, 2013).

İyi bir süzgeç işleminin yapılması geçiş bandının dar olması istenmektedir. Aksi halde geçirme ve durdurma bantları arasında geniş frekans aralıkları farklı değerlerle çarpılarak sinyalin net bir şekilde ayrışmasına engel olacaktır. Bu amaçla, geçiş bandını dar tutmak için, üst derece süzgeç üretme ihtiyacı doğmuştur. Bu da süzgeç cevaplarında istenmeyen dalgaların oluşması gibi yeni problemlere sebep olmuştur.

Süzgeçlerin teorik karşılıkları laplace ortamında transfer fonksiyonudur. Transfer fonksiyonları süzgeçlerin çeşidi, kesim frekansı, kazancı, kalite faktörü gibi bilgiler verebilen fonksiyonlardır (Dindar, 2013). Denklem 1.1'de süzgeçlere ait genel bir transfer fonksiyonu yer almaktadır (Dindar, 2013).

$$H(s) = \frac{n_k s^k + n_{k-1} s^{k-1} + n_{k-2} s^{k-2} + \cdots + n_0}{s^m + d_{m-1} s^{m-1} + d_{m-2} s^{m-2} + \cdots + d_0} \quad , (k \leq m) \tag{1.1}$$

Denklem 1.1'de yer alan transfer fonksiyonunda pay ve paydadaki kat sayılar süzgeç çeşidini ve özelliklerini belirlemektedir. s'nin kuvvetleri ise tam sayı değerleri almaktadır. Bu kuvvetlerin tam sayı olmasının nedeni ise kapasite empedanslarının 1/SC değerine sahip olmasıdır. Burada s'nin kuvveti 1'dir. Dolayısıyla bu kondansatörler kullanılarak oluşturulan süzgeçler; 1, 2, 3, 4, … , n. dereceden gibi değerler almakta bu nedenle de yeteri kadar esnek olamamaktadır. Bu yüzden daha dar

geçiş bandı için üst dereceye çıkılmakta, yüksek derecelerdeki dalgalanmaları azaltmak için ise geçiş bandını genişletmek pahasına bir alt dereceye inilmek zorunda kalınmaktadır.

Son yıllarda yapılan çalışmalarla kapasite eş değer modelleri geliştirilmiş; kesirli dereceli süzgeç tasarımları mümkün hale gelmiştir. Bu modellerde empedans değeri 1/SC olan kondansatörler yerine $1/S^{\alpha}C$ ($0 \leq \alpha \leq 1$) olan eşdeğer modeller kullanılmıştır. Böylece transfer fonksiyonu Denklem 1.2'deki şekli almıştır (Şen, 2019).

$$H(s) = \frac{n_k s^{k+\alpha} + n_{k-1} s^{k+\alpha-1} + n_{k-2} s^{k+\alpha-2} + \cdots + n_0}{s^{m+\alpha} + d_{m-1} s^{m+\alpha-1} + d_{m-2} s^{m+\alpha-2} + \cdots + d_0}, \ (k \leq m) \qquad (1.2)$$

Denklem 1.2'de α ifadesinin 0-1 arasında değerler alması ($0 \leq \alpha \leq 1$) süzgeç derecesinin kesirli değerler alabilmesini sağlamış; iki tam sayı arasındaki süzgeç özellikleri de elde edilmiştir. Böylece süzgeçlerin daha hassas bir şekilde ayarlanması sağlanmış, buna bağlı olarak sinyalleri doğru bir şekilde ayırmadaki gücü de artmıştır. Ayrıca yüksek derecelere çıkmak yerine düşük dereceli kesirli derece süzgeçlerle istenilen cevaplar elde edilebilmektedir.

Kesirli dereceli süzgeçlerle beraber, düşük dereceli süzgeçlerin geçiş bandı genişliği ve yüksek dereceli süzgeçlerdeki dalgalanmalardan en az şekilde etkilenecek süzgeçlerin tasarlanması mümkün hale gelmiştir. Ayrıca kesirli derecenin uygulanması devreyi tamamen değiştirmediğinden, sadece bir kapasitenin eş değer modelle değiştirilmesinin yeterli olması uygulama konusunda da büyük avantajlar sağlamıştır (Şen, 2019).

Bu çalışmada iki farklı devreye kesirli derece modeli uygulanmıştır. Birinci devrede; CCII (current conveyor) ile ikinci dereceden, akım modlu evrensel bir süzgeç tasarlanarak süzgece Foster ağı ile tasarlanan kesirli derece modeli uygulanmıştır. Model parametreleri, α'nın 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 değerleri için MATLAB programı yardımı ile hesaplanarak devreye uygulanmıştır. Devrenin 196 KHz kesim frekansı ve kalite faktörünün 19 değeri için benzetim sonuçları PSPİCE programı ile çizdirilmiştir. Oldukça başarılı sonuçlar veren süzgeç, bu frekans değeri ile düşük frekanslı devre uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilmektedir.

İkinci çalışma ise daha önce logaritmik ortamda tasarlanan (Kırçay ve Çam) bir devreye α'nın 0.8, 0.9 değerleri için modelin uygulandığı akım modlu, evrensel bir süzgeçtir. İntegratörler kullanılarak logaritmik ortamda tasarlanan bu devrenin PSPİCE benzetim sonuçlarında, kesirli derece modelinin süzgece oldukça başarılı bir şekilde uygulandığı görülmektedir.

Kesirli dereceli süzgeçlerin avantajları ve sağladığı kolaylıklar sebebiyle bilimde olduğu gibi teknolojide de hızlı bir şekilde yaygınlaşması daha hassas ve en az hata ile süzgeçleme işleminin yapılması amacıyla bu çalışmanın bilim ve teknolojiye katkı sağlaması ümit edilmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Vinagre ve ark. (2000) tarafından, kesirli derece kullanılarak kontrol sistemlerinde bazı yaklaşımlar uygulanmaya çalışılmıştır. Enterpolasyon ve eğri uydurma gibi teknikler kullanılarak yaklaşımlar ayrık ve sürekli zamanda incelenmiş, sonuçları karşılaştırılmıştır.

Radvan ve ark. (2007) tarafından, birinci derece süzgeçlere kesirli derece uygulanmıştır. Alçak geçiren süzgeç, yüksek geçiren süzgeç ve tüm geçiren süzgeçlere; seri R-C bileşenlerinin paralel bağlandığı ve R-C elemanlarının karar ağacı şeklinde bağlandığı modeller uygulanarak sonuçlar pspice programı yardımıyla çizdirilmiştir. Çalışmada kesirli derece tam sayılı dereceyle karşılaştırılmıştır.

Ali ve ark. (2013) tarafından, kesirli dereceli Butterworth süzgeci pasif ve aktif elemanlarla gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında seri R-C bileşenlerinin paralel bağlanması şeklide oluşturulan model, Khn ve Sallen-Key devrelerine de uygulanarak sonuçlar pspice programıyla analiz edilmiştir. Süzgeç cevapları çizdirilerek kesirli derecenin tam sayılı derecelerle karşılaştırılması sağlanmıştır.

Freeborn ve ark. (2014) tarafından, kesirli dereceli model, alçak geçiren Chebyshev süzgece uygulanmış, sonuçlar matlab ve pspice yardımıyla analiz edilmiştir. Model olarak paralel R-C bileşenlerinin seri bağlandığı Foster-I ağı kullanılmıştır. Modelin $\alpha=0.2$, $\alpha=0.5$ ve $\alpha=0.8$ değerleri için direnç ve kapasite değerleri bulunmuş; benzetimler yardımıyla bu değerlere göre süzgeçlerin verdikleri cevaplar karşılaştırılmıştır.

Freeborn (2015) tarafından, kesirli dereceli model, alçak geçiren Butterworth süzgece uygulanmıştır. Model olarak paralel R-C bileşenlerinin seri bağlandığı Foster-I ağı kullanılmıştır. $\alpha=0.5$ ve $\alpha=0.75$ değerleri için modelin direnç ve kondansatör değerleri bulunmuş; bu değerlere göre süzgeç cevapları spice ile çizdirilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre, α değerlerinin verdiği sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Kubanek ve Freeborn (2017) tarafından, $\alpha=0.25$, $\alpha=0.5$, $\alpha=0.75$ değerleri için oluşturulan model, alçak geçiren bir süzgece uygulanarak sonuçları pspice ile

çizdirilmiştir. Aktif eleman olarak DVCC ve entegre olarak AD844 kullanılan çalışmada birinci ve ikinci derece arasında kesirli derecenin etkileri incelenmiştir.

Dvorak ve ark. (2019) tarafından, elektronik olarak ayarlanabilen bir süzgeç tasarlanarak bu süzgece paralel R-C elemanlarının seri bağlandığı Foster ağı modeli uygulanmıştır. Çalışmada alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran süzgeçler OTA ve ACA (Ayarlanabilir Akım Amplifikatörü) ile tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devrede $\alpha=0.2$, $\alpha=0.5$, $\alpha=0.8$ olacak şekilde eşdeğer modelin parametreleri hesaplanmış ve 1.2, 1.5, 1.8 dereceleri için süzgeçlerin genlik ve faz cevapları bulunarak karşılaştırılmıştır.

Bertsias ve ark. (2019) tarafından, az sayıda MOS transistor kullanılarak akım ve gerilim modlu devreler tasarlanmış, bu devrelere kesirli derece modeli uygulanmıştır. Kesirli derece modeli, seri R-C bileşenlerinin paralel bağlanması şeklinde oluşturulmuştur. $\alpha=0.3$, $\alpha=0.5$, $\alpha=0.7$ değerleri için direnç ve kapasite değerleri hesaplanan model; alçak geçiren, bant geçiren ve yüksek geçiren süzgeçlere uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

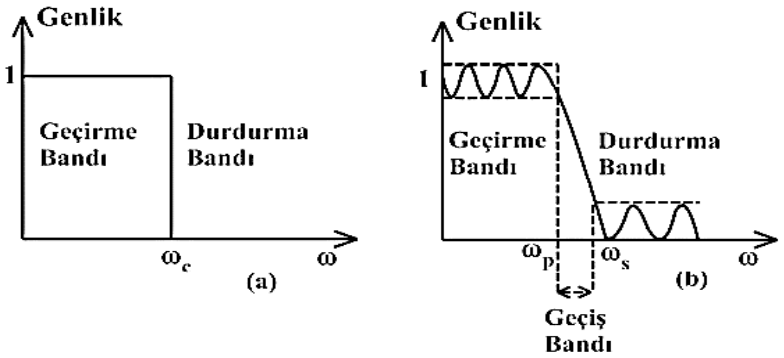
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Süzgecin tanımı

Sinyallerin karmaşık yapıda olması, gürültü içermesi, istenilen sinyalin özelliği gibi durumlar sinyallerde bir ayrıştırmaya gidilmesini zorunlu kılmıştır. Sinyallerin istenilen frekans aralığındaki kısımlarını geçirip istenmeyen kısımlarını söndüren devrelere süzgeç denir.

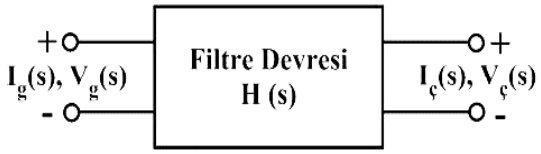
Süzgeçler; sinyalleri güçlendiren geçirme bandı, sinyalleri zayıflatan durdurma bandı ve bu iki bant arasında kalan geçiş bandından oluşur (Dindar, 2013). Süzgeçlerin iyi bir sinyal ayrıştırması yapabilmesi için geçiş bandının dar tutulması istenmektedir.



Şekil 3.1.a. Alçak geçiren ideal süzgeç genlik cevabı, b. Alçak geçiren yaklaşık süzgeç genlik cevabı (Dindar, 2013)

Şekil 3.1.a.'da ideal bir alçak geçiren süzgecin genlik cevabı verilmiştir (Dindar, 2013). Genlik cevabında geçirme bandıyla durdurma bandı bitişiktir. Ancak gerçekte süzgeçlerin böyle bir cevap vermesi mümkün değildir. Şekil 3.1.b.'de ise yaklaşık bir süzgecin genlik cevabı verilmiştir (Dindar, 2013). Bu süzgeç cevabında üç bant da açıkça görülmektedir. Burada geçirme bandı ile geçiş bandını ayıran ω_p kesim frekansı (passband frequency) ve geçiş bandıyla durdurma bandını ayıran ω_s kesim frekansı (stopband frequency) sınırları karşımıza çıkar (Dindar, 2013).

Süzgeçler frekans bölgesinde transfer fonksiyonlarına karşılık gelir. İşledikleri işarete göre çıkış geriliminin giriş gerilimine bölümü veya çıkış akımının giriş akımına bölümü frekans bölgesinde bir transfer fonksiyonuna karşılık gelir.



Şekil 3.2. Genel süzgeç devresi (Dindar, 2013)

Şekil 3.2.'deki devre akım veya gerilim modlu genel bir süzgeçtir (Dindar, 2013). Bu süzgeçte çıkış geriliminin giriş gerilimine veya çıkış akımının giriş akımına bölümünden Denklem 3.1'deki genel transfer fonksiyonu elde edilir (Şen, 2019).

$$H(s) = \frac{I_ç(s)}{I_g(s)} = \frac{V_ç(s)}{V_g(s)} = \frac{n_k s^k + n_{k-1} s^{k-1} + n_{k-2} s^{k-2} + \cdots + n_0}{s^m + d_{m-1} s^{m-1} + d_{m-2} s^{m-2} + \cdots + d_0}, \; k \leq m \qquad (3.1)$$

Denklem 3.1'de m dereceden bir süzgecin transfer fonksiyonu verilmiştir. Burada n, d katsayıları süzgecin çeşidini ve özelliklerini belirlemektedir. m, k katsayıları tam sayı değerleri almaktadır (kesirli derece uygulanmamışsa). m değerine göre süzgeçler, 1, 2, 3, …, m. dereceden süzgeç olarak tanımlanır.

3.1.2. Süzgeç çeşitleri

Denklem 3.1' de m'nin alacağı değere göre süzgeç derecesi belirlenmektedir. Bu m değeri devrede kullanılan kapasite sayısı ile doğru orantılıdır. Çalışmada 2. dereceden süzgeç tasarımı yapıldığından dolayı 2. derece süzgeçlerin özellikleri anlatılacaktır. İkinci derece bir süzgecin genel formu Denklem 3.2'de gösterilmektedir (Kırçay, Çam).

$$H(s) = \frac{n_0 S^2 + n_1 S + n_2}{d_0 S^2 + d_1 S + d_2} = \frac{n_0 S^2 + n_1 S + n_2}{S^2 + \frac{\omega_0}{Q} S + {\omega_0}^2} \qquad (3.2)$$

Denklem 3.2'de:

$n_0 \neq 0,\ n_1 \neq 0,\ n_2 \neq 0$ değerleri için tüm geçiren süzgeç (all-pass filter),

$n_0 \neq 0,\ n_1 = 0,\ n_2 \neq 0$ değerleri için bant durduran süzgeç (notch-pass filter),

$n_0 = 0,\ n_1 \neq 0,\ n_2 = 0$ değerleri için bant geçiren süzgeç (band-pass filter)

$n_0 \neq 0,\ n_1 = 0,\ n_2 = 0$ değerleri için yüksek geçiren süzgeç (high-pass filter)

$n_0 = 0,\ n_1 = 0,\ n_2 \neq 0$ değerleri için alçak geçiren süzgeç (low-pass filter)

elde edilir. Burada ω_0 değeri kesim frekansı, Q değeri kalite faktörüdür.

3.1.3. İkinci derece süzgeç çeşitleri ve özellikleri

$$H(s) = \frac{n_k s^k + n_{k-1} s^{k-1} + n_{k-2} s^{k-2} + \cdots + n_0}{s^m + d_{m-1} s^{m-1} + d_{m-2} s^{m-2} + \cdots + d_0}, \quad k \leq m \tag{3.3}$$

Denklem 3.3'te süzgeçlerin genel transfer fonksiyonu verilmiştir (Şen, 2019). Denklemlerde m değerleri süzgecin derecesini, n katsayıları süzgeç çeşidini ve özelliklerini belirlemektedir. Denklem 3.4'te ise ikinci derece süzgeçlere ait genel bir transfer fonksiyonu verilmiştir (Kırçay, Çam).

$$H(s) = \frac{n_0 S^2 + n_1 S + n_2}{d_0 S^2 + d_1 S + d_2} = \frac{n_0 S^2 + n_1 S + n_2}{S^2 + \frac{\omega_0}{Q} S + {\omega_0}^2} \tag{3.4}$$

Denklem 3.4'te $n_0 \neq 0, n_0 \neq 0, n_0 \neq 0$ değerleri için tüm geçiren (all-pass) süzgeç elde edilir. Tüm geçiren süzgece ait transfer fonksiyonunun genel formu Denklem 3.5'te verilmiştir (Kırçay, Çam).

$$H(s) = k\ \frac{S^2 - \frac{\omega_0}{Q} S + {\omega_0}^2}{S^2 + \frac{\omega_0}{Q} S + {\omega_0}^2} \tag{3.5}$$

Denklem 3.4'te $n_0 \neq 0, n_0 = 0, n_0 \neq 0$ değerleri için bant durduran (notch-pass) süzgeç elde edilir. Bant durduran süzgece ait transfer fonksiyonunun genel formu Denklem 3.6'da verilmiştir (Kırçay, Çam).

$$H(s) = k\,\frac{S^2+{\omega_n}^2}{S^2+\frac{\omega_0}{Q}S+{\omega_0}^2} \tag{3.6}$$

Denklem 3.6'da $\omega_n = \omega_0$ ise çentik süzgeç, $\omega_n > \omega_0$ alçak geçiren çentik süzgeç, $\omega_n < \omega_0$ ise yüksek geçiren çentik süzgeç elde edilir (Kırçay, Çam).

Denklem 3.4'te $n_0 \neq 0, n_0 = 0, n_0 = 0$ değerleri için yüksek geçiren (high-pass) süzgeç elde edilir. Yüksek geçiren süzgece ait transfer fonksiyonunun genel formu Denklem 3.7'de verilmiştir (Kırçay, Çam).

$$H(s) = k\,\frac{S^2}{S^2+\frac{\omega_0}{Q}S+{\omega_0}^2} \tag{3.7}$$

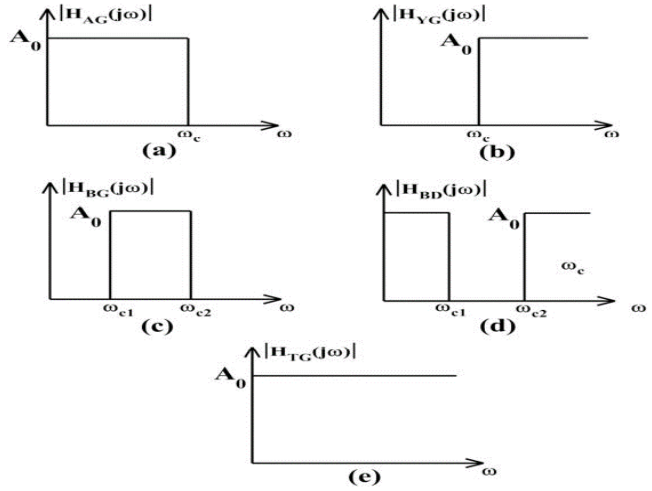
Denklem 3.4'da $n_0 = 0, n_0 \neq 0, n_0 = 0$ değerleri için bant geçiren (band-pass) süzgeç elde edilir. Bant geçiren süzgece ait transfer fonksiyonunun genel formu Denklem 3.8'de verilmiştir (Kırçay, Çam).

$$H(s) = k\,\frac{\frac{\omega_0}{Q}S}{S^2+\frac{\omega_0}{Q}S+{\omega_0}^2} \tag{3.8}$$

Denklem 3.4'te $n_0 = 0, n_0 = 0, n_0 \neq 0$ değerleri için alçak geçiren (low-pass) süzgeç elde edilir. Alçak geçiren süzgece ait transfer fonksiyonunun genel formu Denklem 3.9'da verilmiştir (Kırçay, Çam).

$$H(s) = k\,\frac{{\omega_0}^2}{S^2+\frac{\omega_0}{Q}S+{\omega_0}^2} \tag{3.9}$$

2. derece süzgeçlerin genlik cevapları Şekil 3.3.'te verilmiştir (Şen, 2019).



Şekil 3.3. İdeal süzgeçlerin genlik cevapları (Şen, 2019)

Şekil 3.3.a.'da alçak geçiren süzgecin, Şekil 3.3.b.'de yüksek geçiren süzgecin, Şekil 3.3.c.'de bant geçiren süzgecin, Şekil 3.3.d.'de bant durduran süzgecin ve Şekil 3.3.e.' de tüm geçiren süzgecin genlik cevapları verilmiştir. Tüm geçiren süzgeç sinyalin tümünü aynı kat sayıyla geçirme özelliğinden dolayı diğer süzgeçlerden ayrılmaktadır. Tüm geçiren süzgeçteki amaç faz kaydırmaktır.

3.1.4. CCII ile akım modlu devre tasarımı

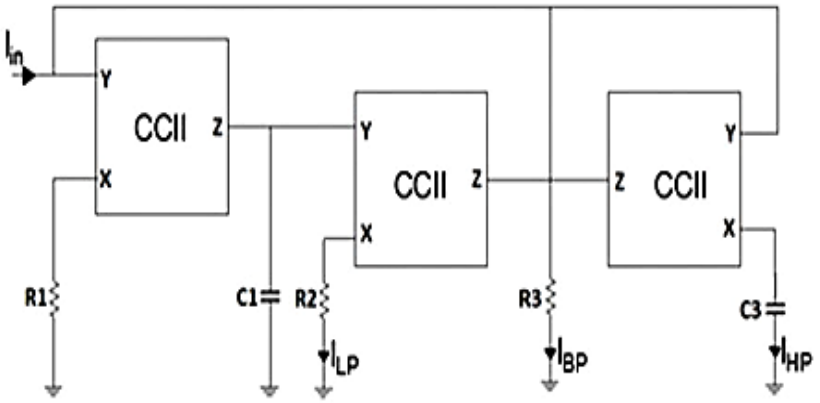
Akım modlu devreler;

- Düşük gerilimle çalışır.
- Düşük güç tüketimine sahiptir.
- Düşük parazitik etkiye sahiptir.
- İşlevsel esneklikleri yüksektir.
- Geniş çalışma frekans bandına sahiptir.
- Yüksek kazanç değerine sahiptir.

gibi avantajlara sahip olması (Aslanalp, 2003) akım modlu devrelere yönelimi arttırmıştır. Akım modlu devre tasarımı beraberinde akım moda uyumlu olan devre elemanlarının kullanımını da getirmiştir. Bu devre elemanlardan biri de akım taşıyıcılardır (current conveyor). Bu bağlamda akım modlu devreler tasarlamak amacıyla akım moda uyumlu devre elemanları ile çalışmak süzgeç performansı açısından önem arz etmektedir.

Elektronik devrelerde gürültü, devre performansını düşüren önemli bir etkendir. Gürültünün başlıca nedenlerinden biri ise devrede kullanılan kapasitelerin direkt toprağa bağlı olmamasıdır. Toprağa bağlı olmayan bu kapasiteler süzgeç tepkilerinde belirsiz dalgalanmalar ortaya çıkarabilmektedir. Bu denenle devrelerde kullanılan kapasitelerin bir ucunun toprağa bağlı olması da son derece önemlidir.

Devrelerde aranan diğer bir özellikler ise güç kayıplarının ve ısınmanın az olması amacıyla direnç değerlerinin küçük olmasıdır. Tüm bu özellikler dikkate alınarak Şekil 3.4.'teki devre tasarlanmıştır.



Şekil 3.4. CCII ile akım modlu, ikinci derece, evrensel süzgeç devresi

Şekil 3.4.'te üç adet CCII (current conveyor), üç adet direnç ve iki adet kondansatör ile akım modlu evrensel bir süzgeç tasarlanmıştır. CCII, AD844 entegresinin uygun bağlantıları (Şekil 3.12.) sonucu elde edilmiştir. Devrede üç adet çıkış bulunmaktadır. Bu çıkışlar alçak geçiren süzgeç çıkışı (low pass filter), bant geçiren süzgeç çıkışı (band pass filter) ve yüksek geçiren süzgeç (high pass filter) çıkışlarıdır. Ayrıca yüksek geçiren ve alçak geçiren süzgeçlerin toplamından bant durduran süzgeç (notch pass), bant durduran ve bant geçiren süzgeçlerin farkından tüm geçiren süzgeç (all pass) elde edilebilmektedir. Devrede, çıkış akımlarının giriş akımlarına oranı olarak elde edilen transfer fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

$$H_{LP}(s) = \frac{I_{LP}}{I_{IN}} = \frac{\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{S^2+S\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \tag{3.10}$$

$$H_{BP}(s) = \frac{I_{BP}}{I_{IN}} = \frac{S\frac{1}{R_3C_2}}{S^2+S\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.11)$$

$$H_{HP}(s) = \frac{I_{HP}}{I_{IN}} = \frac{S^2}{S^2+S\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.12)$$

$$H_{NP}(s) = \frac{I_{NP}}{I_{IN}} = \frac{S^2+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{S^2+S\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.13)$$

$$H_{AP}(s) = \frac{I_{AP}}{I_{IN}} = \frac{S^2-S\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{S^2+S\frac{1}{R_3C_2}+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.14)$$

Denklem 3.10'da alçak geçiren süzgece, Denklem 3.11'de bant geçiren süzgece, Denklem 3.12'de yüksek geçiren süzgece, Denklem 3.13'te bant durduran süzgece, Denklem 3.14'te tüm geçiren süzgece ait transfer fonksiyonları verilmiştir. Denklem 3.13; Denklem 3.10 ve Denklem 3.12'nin toplamından elde edilirken, Denklem 3.14; Denklem 3.13 ve Denklem 3.11'in farkından elde edilmiştir.

$$K = 1 \quad (3.15)$$

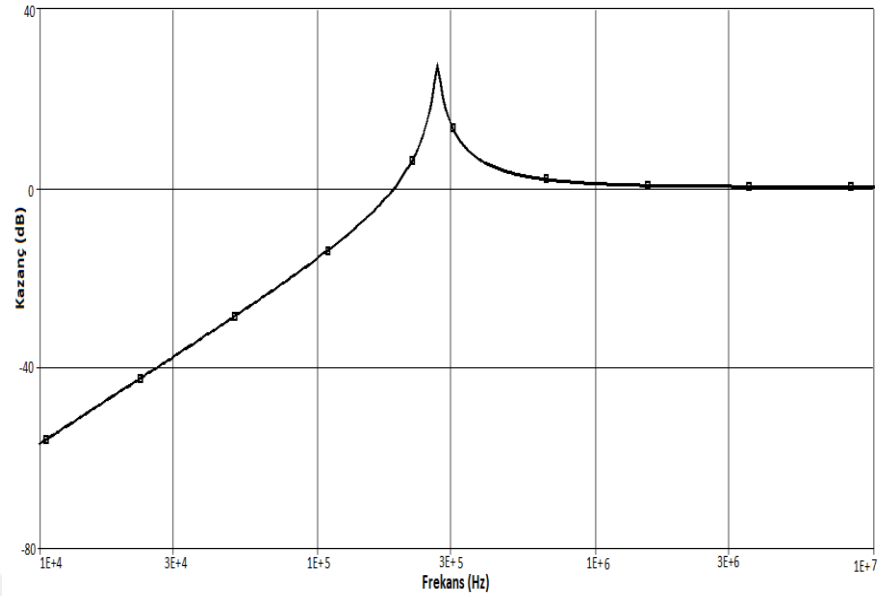
$$\omega_0 = \sqrt{1/R_1R_2C_1C_2} \quad (3.16)$$

$$Q = R_3C_2\sqrt{1/R_1R_2C_1C_2} \quad (3.17)$$

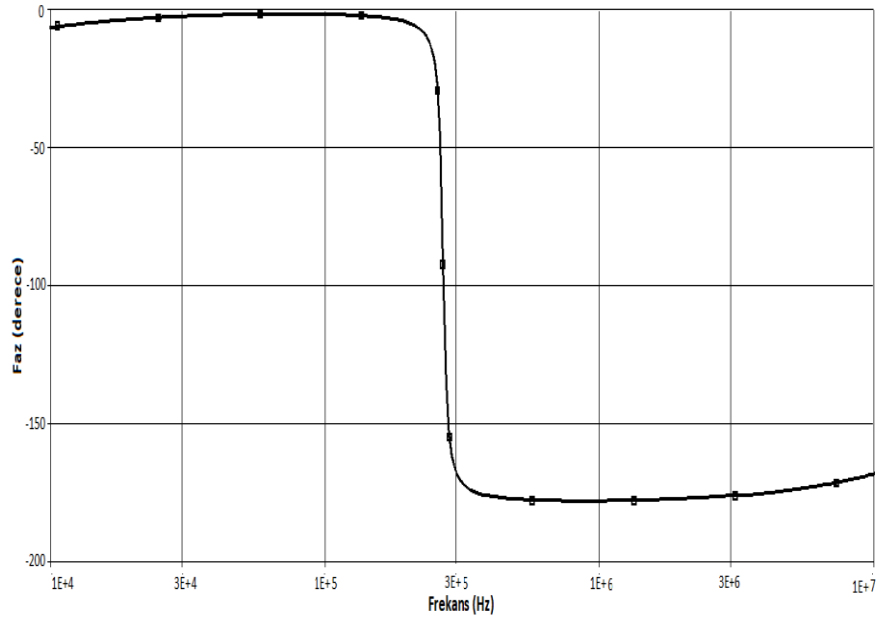
$$\omega_0/Q = 1/R_3C_2 \quad (3.18)$$

Süzgeçlere ait; kazanç değeri Denklem 3.15'te, kesim frekansı Denklem 3.16'da, kalite faktörü Denklem 3.17'de, bant genişliği Denklem 3.18'de verilmiştir.

R1=200 Ω, R2= 1.3 kΩ, R3=10 kΩ ve C1=C2=10 nF değerleri için süzgeç tepkileri pspice programı ile çizdirildiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilir. Burada kesim frekansı 196 KHz, kalite faktörü 19 olarak seçilmiştir. Bu frekans değeri ile süzgeç, düşük güçlü frekans uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilmektedir.

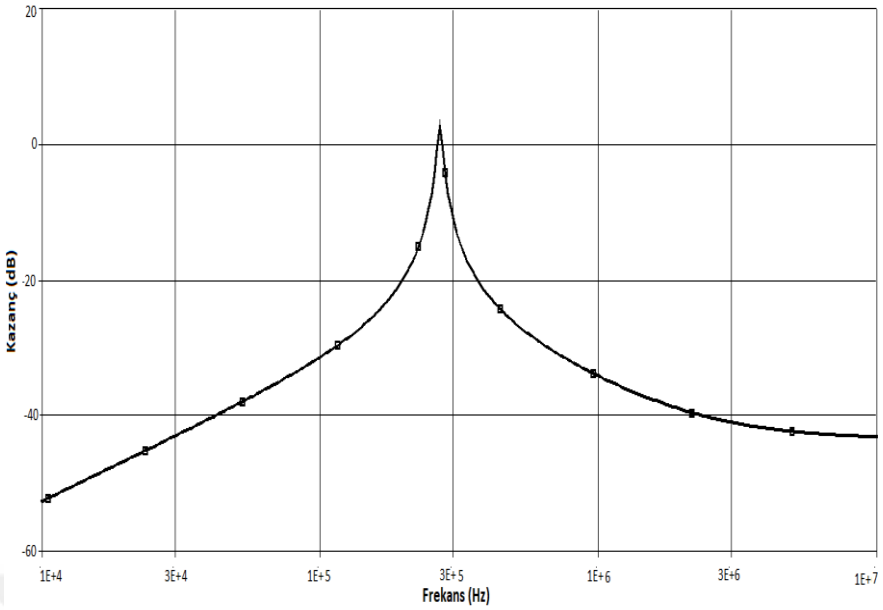


Şekil 3.5.a. Yüksek geçiren süzgeç genlik cevabı



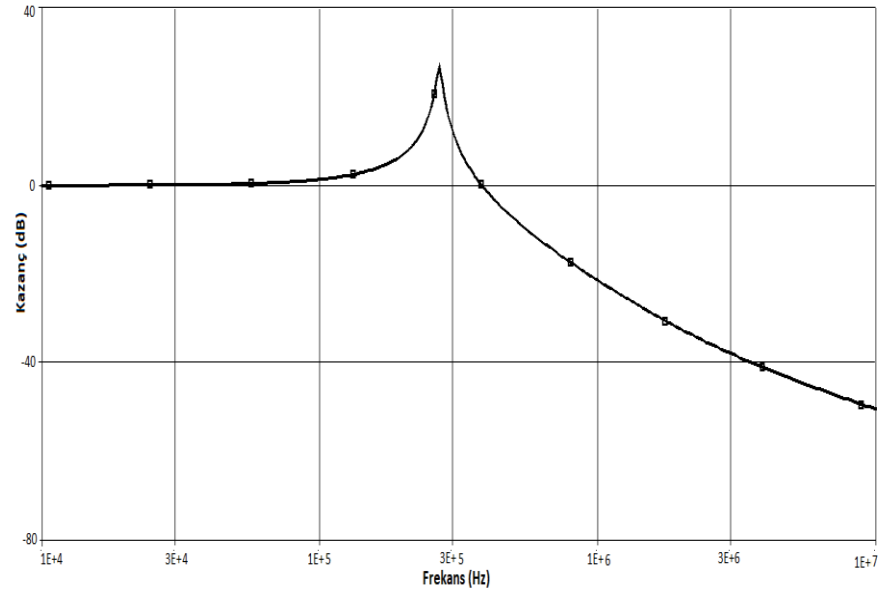
Şekil 3.5.b. Yüksek geçiren süzgeç faz cevabı

Şekil 3.5.a.'da yüksek geçiren süzgece ait genlik (kazanç) cevabı, Şekil 3.5.b.'de yüksek geçiren süzgece ait faz cevabı verilmiştir.



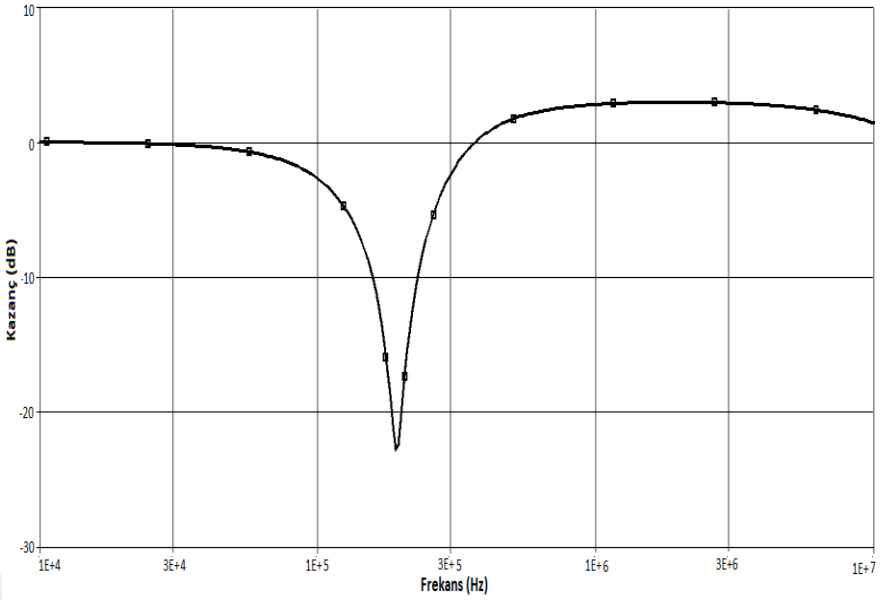
Şekil 3.6. Bant geçiren süzgeç genlik cevabı

Şekil 3.6.'da bant geçiren süzgece ait genlik (kazanç) cevabı verilmiştir.



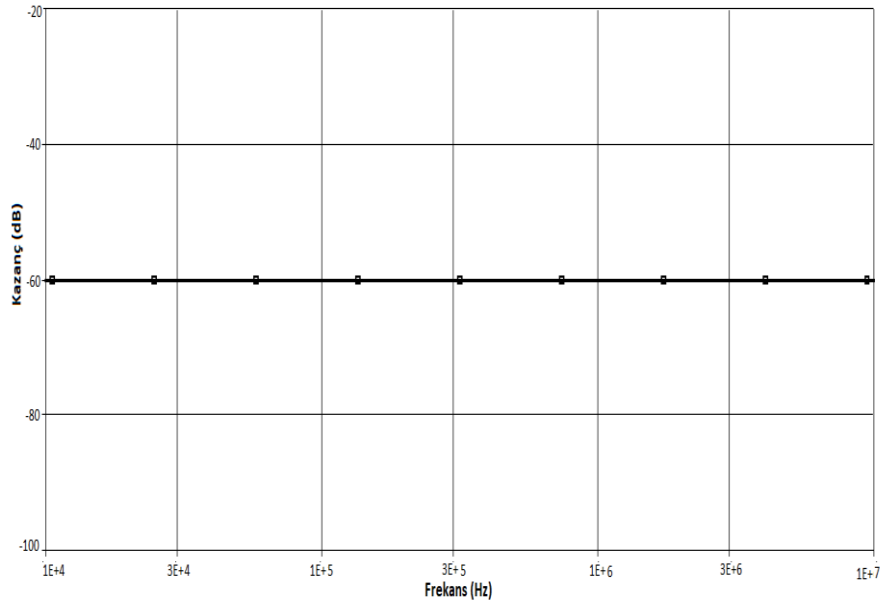
Şekil 3.7. Alçak geçiren süzgeç genlik cevabı

Şekil 3.7'de alçak geçiren süzgece ait genlik (kazanç) cevabı verilmiştir.



Şekil 3.8. Bant durduran süzgeç genlik cevabı

Şekil 3.8.'de bant durduran süzgece ait genlik (kazanç) cevabı verilmiştir.



Şekil 3.9. Tüm geçiren süzgeç genlik cevabı

Şekil 3.9.'da tüm geçiren süzgece ait genlik (kazanç) cevabı verilmiştir.

Şekil 3.5.a. ve Şekil 3.7.'de genlik cevaplarında süzgeçlerin bant geçişine geçmeden önce bir dalgalanmaya uğradığı görülmektedir. Bu dalgalanma sinyalin o aralıkta diğer kısımlara göre farklı ve düzensiz bir sayı ile çarpılmasına neden

olmaktadır. Bu da sinyalin hatalı bir şekilde işlenmesine yol açmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için süzgecin derecesi bir alt tam sayıya düşürülebilir; ancak bu da süzgecin bant geçiş hızında bir düşüşe neden olmaktadır. Bu düşüş geçiş bandının genişliğini arttırmaktadır. Genişleyen geçiş bandı iki kesim frekansı arasında sinyalin farklı değerlerle çarpılmasına, doğru bir şekilde ayrılamamasına neden olmaktadır. Ayrıca süzgeç derecelerinin tam sayılar şeklinde olması bir üst dereceye çıkarken veya bir alt dereceye inerken farklı süzgeç tasarımlarının yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu problemler daha esnek bir süzgeç tasarımına ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

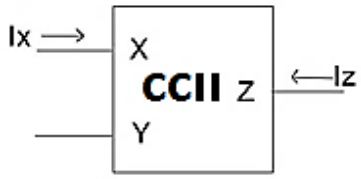
3.1.5. AD844A entegresinin akım taşıyıcı (current conveyor) olarak kullanılması

Gelişen teknoloji ve ortaya çıkan yeni ihtiyaçlar süzgeçlerde değişmelere neden olmuştur. Önceleri pasif elemanlarla süzgeçler tasarlanmaktaydı; ancak düşük frekanslarda kullanılan yüksek değerli devre elemanları hem yüksek güç kaybına hem de gürültüye neden olmaktaydı. Bu durum süzgeçlerde aktif elemanların kullanımını zorunlu hale getirmiştir.

Aktif elemanlarla birlikte bazı problemler çözülse de düşük güçlü teknolojiye olan yönelim süzgeçlerde de değişimlere neden olmuştur. Süzgeçlerde gerilimi işlemek yerine güç tasarrufu için akım işlenmeye başlanmıştır. Bu da akım modlu devre elemanlarının kullanımını arttırmıştır. Akım modlu devrelerin gerilim modlu devrelere göre avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Aslanalp, 2003).

- Düşük gerilimle çalışır.
- Düşük güç tüketimine sahiptir.
- Düşük parazitik etkiye sahiptir.
- İşlevsel esneklikleri yüksektir.
- Geniş çalışma frekans bandına sahiptir.
- Yüksek kazanç değerine sahiptir.

Akımın oluşması potansiyel farka bağlı olduğundan dolayı bu devrelerde de gerilimden bahsetmek mümkündür. Ancak işlenen işaret akımdır. Akım modlu devre tasarımının yaygınlaşmasıyla beraber akım modlu elemanların kullanımında da artış yaşanmıştır. Bu elemanlardan biri ticarileşmiş olan akım taşıyıcılardır (current conveyor). Şekil 3.10.'da CCII'nın sembolü gösterilmiştir (Şen, 2019).



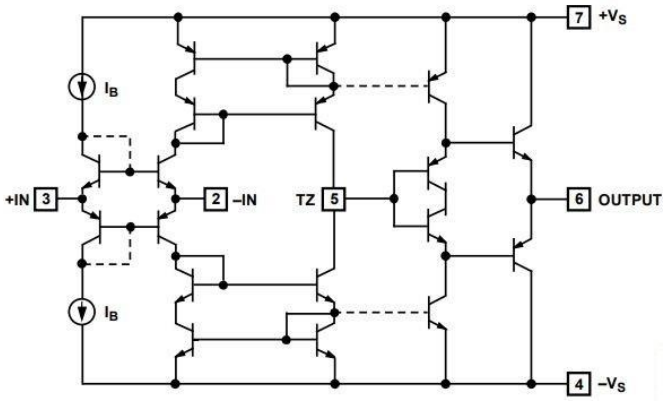
Şekil 3.10. CCII (current conveyor) sembolü

Şekil 3.10'da sombolü verilen CCII'de akım ve gerilim ilişkileri Denklem 3.19'daki gibidir:

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Denklem 3.19'da V_x, V_y, I_x, I_y sırayla giriş gerilim ve akımları; V_z, I_z çıkış gerilim ve akımıdır (Şen, 2019). Görüldüğü gibi CCII akım modlu bir devre elemanı olup akım modlu devre yapılarında kullanılmaya müsaittir. CCII'nin bant genişliğinin yüksek olması (70 MHz), gürültüye karşı duyarlılığının düşük olması gibi özellikleri diğer avantajları arasındadır.

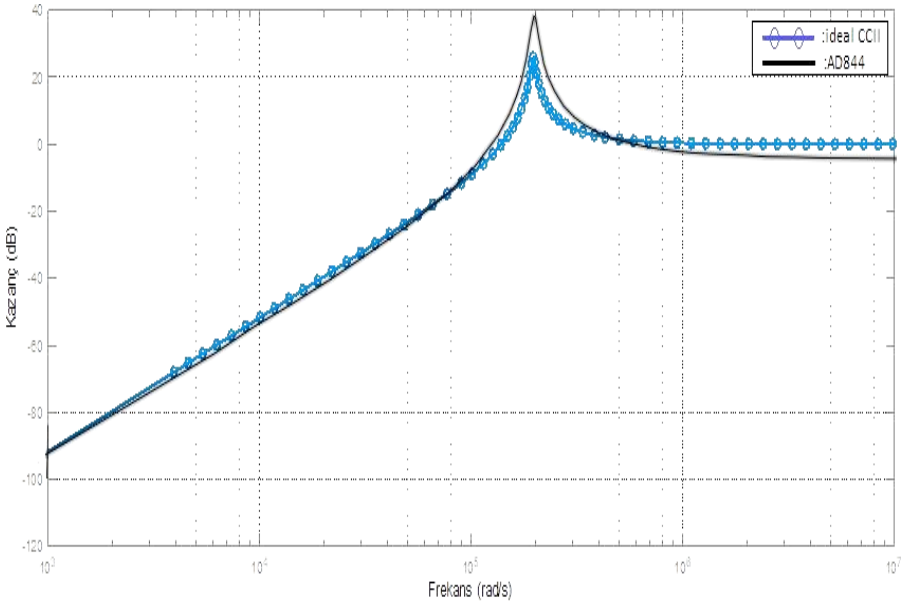
Şekil 3.11.'de AD844A'nın iç yapısı verilmiştir (AD844A data sheet).



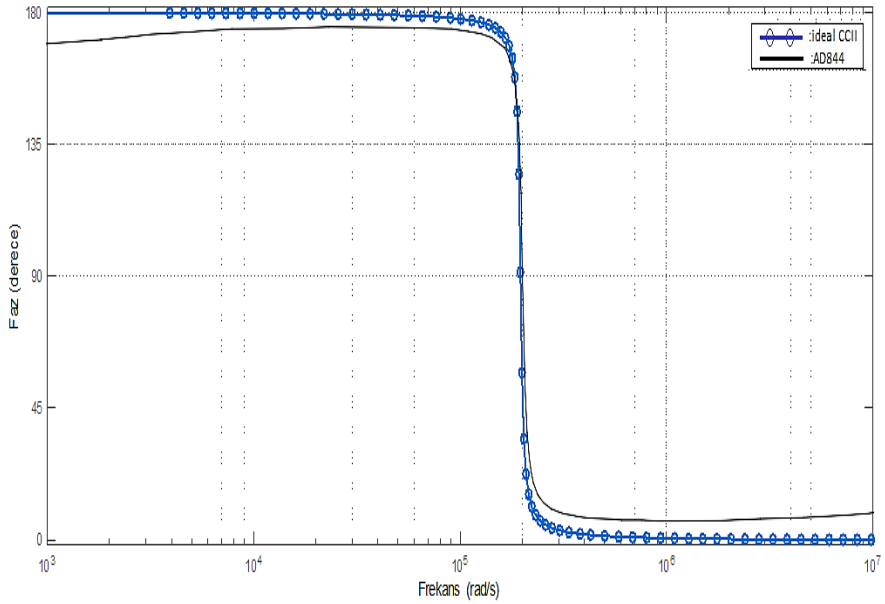
Şekil 3.11. AD844A (current conveyor) iç yapısı

CCII bazı makalelerde transistörler veya mosfetlerle tasarlanmıştır. Ancak BJT'lerle tasarlanan AD844A entegresi (Şekil 3.11.) de yine CCII olarak çalışabilmektedir. CCII'nin AD844 entegresinde ideale çok yakın sonuçlar vermesi

(David ve Freeborn, 2017), ticarileşmiş olması ve entegre olma özelliğinin sağladığı avantajlar nedeniyle bu çalışmada CCII olarak AD844A entegresi kullanılmıştır. Tasarlanan Şekil 4.'teki devrenin yüksek geçiren süzgeç çıkışı için Şekil 3.12.a.'da AD844A ve ideal CCII'ın genlik cevapları, Şekil 3.12.b.'de faz cevapları karşılaştırılmıştır.

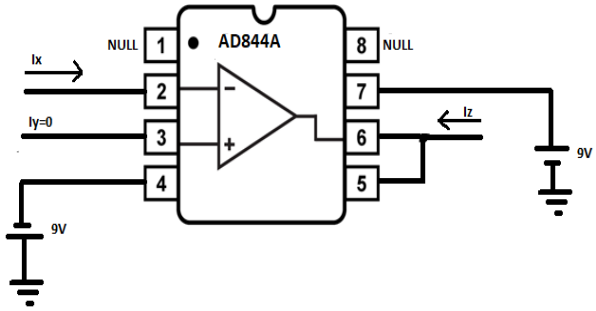


Şekil 3.12.a. İdeal CCII ile AD844A entegresinin yüksek geçiren süzgeç için genlik cevapları



Şekil 3.12.b. İdeal CCII ile AD844A entegresinin yüksek geçiren süzgeç için faz cevapları

Şekil 3.12.a. ve Şekil 3.12.b.'de AD844A entegresinin, CCII olarak kullanımında ideale yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Şekil 3.13.'te AD844A entegresinin CCII olarak kullanılması için gerekli bağlantı şekli gösterilmiştir (AD844A data sheet).



Şekil 3.13. AD844 entegresinin CCII olarak kullanılması

Piyasada kolayca temin edilebilen AD844A entegresinin bağlantı şeklinin kolay olması, transistör ve CMOS modellerine göre devrelerin sade olması, eleman sayısının az olması, devre kurulumu ve devredeki problemlerin kolay bir şekilde tespit edilmesi kullanım avantajları arasındadır.

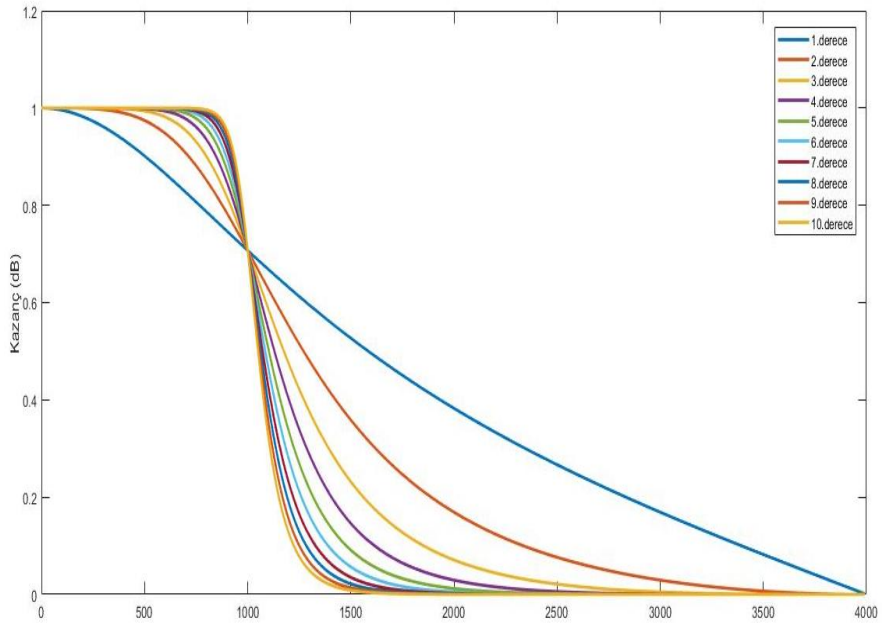
3.1.6. Kesirli dereceli süzgeçler

Süzgeçlerin çıkış akımının giriş akımına veya çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı frekans bölgesinde transfer fonksiyonuna karşılık gelir. Denklem 3.20'de süzgeçlerin genel transfer fonksiyonu verilmiştir (Şen, 2019).

$$H(s) = \frac{n_k s^k + n_{k-1} s^{k-1} + n_{k-2} s^{k-2} + \cdots + n_0}{s^m + d_{m-1} s^{m-1} + d_{m-2} s^{m-2} + \cdots + d_0}, \quad k \leq m \tag{3.20}$$

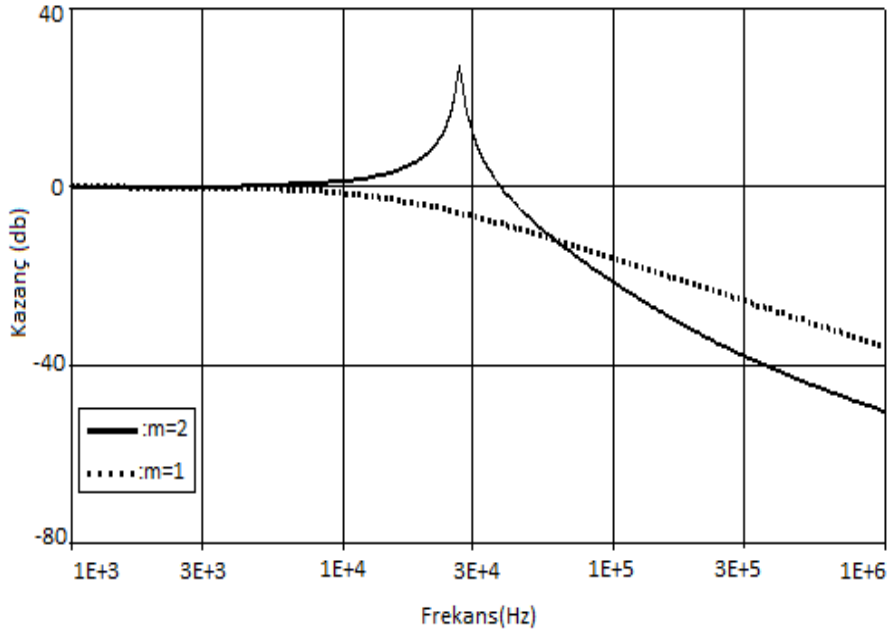
Denklem 3.20' de verilen süzgeçlere ait genel transfer fonksiyonunda (Şen, 2019); n ve d değerleri süzgeç çeşidi ve özelliklerini, m değeri ise süzgeç derecesini belirler. Kesirli derece uygulanmayan devrelerde m ve k değerleri tam sayıdır. Pasif eleman olarak direnç ve kondansatörlerin kullanıldığı bir süzgeçte m ve k değerleri kondansatör sayısıyla orantılıdır. Kondansatörlerin $Z_c = 1/SC$ empedans değerine bağlı olarak denklemdeki s değerlerinin derecesi 1,2,…,m gibi tam sayı değerlerini alır. Bu da aradaki süzgeç cevaplarını elde edememe gibi problemlere neden

olmaktadır. Şekil 3.13.'te bir Butterworth süzgecin farklı dereceler için kazanç grafiği gösterilmiştir.

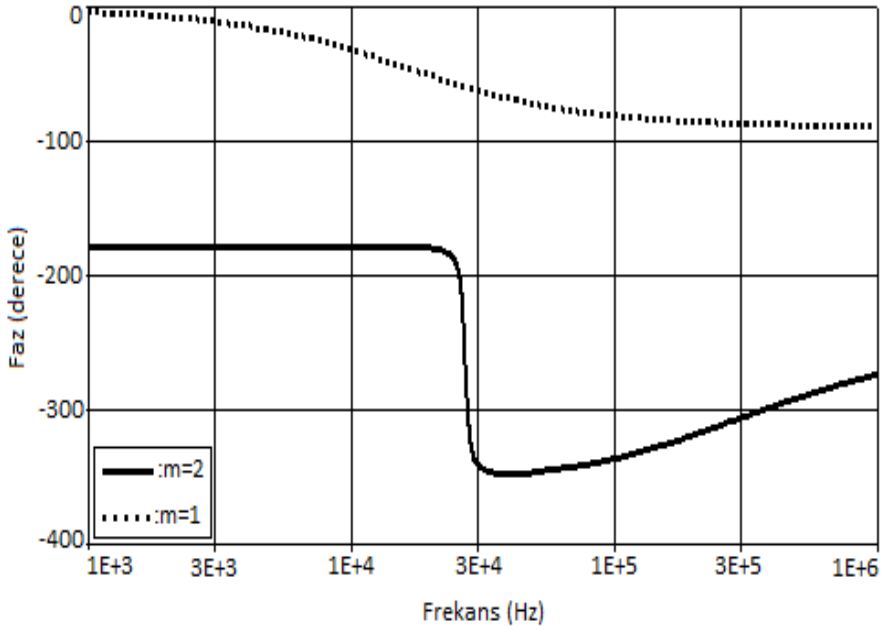


Şekil 3.14. Butterworth süzgecin farklı dereceler için genlik cevapları

Şekil 3.14.'te görüldüğü gibi süzgecin derecesi arttıkça geçiş bandı daralmaktadır. Bu da süzgecin sinyali güçlendireceği ve söndüreceği bölgelerin net bir şekilde ayrılmasını ve iyi bir süzme işlemi yapmasını sağlamaktadır. Şekil 3.15.'te, direnç ve kondansatörün paralel bağlanmasıyla oluşturulan 1. derece alçak geçiren süzgecin genlik cevabı, tasarlanan (Şekil 4.) 2. derece süzgecin genlik cevabı ile karşılaştırılmıştır (İkinci derece süzgecin kalite faktörü 19 seçilmiştir.).



Şekil 3.15.a. 1. derece ve 2. derece süzgeçlerin yaklaşık kazanç grafiği



Şekil 3.15.b. 1. derece ve 2. derece süzgeçlerin yaklaşık faz grafiği

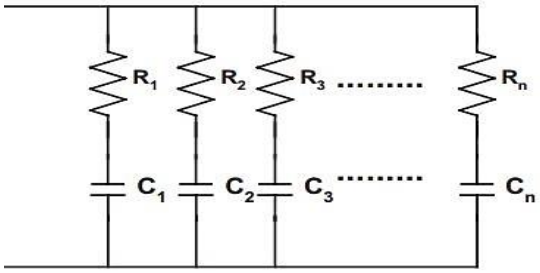
Şekil 3.15.a.'da görüldüğü gibi ardışık tam sayılı iki süzgeç arasında bile bant geçişlerinde ciddi farklar bulunmaktadır. Birinci derece süzgecin geçiş bandının geniş olduğu, ikinci derce süzgeçte ise geçiş bandında bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu dalgalanma sinyalin o frekans aralığındaki değerlerini farklı sayılarla çarpılmasına neden olmaktadır. Şekil 3.15.b.'de de ikinci derece süzgecin, birinci derece süzgece

oranla, geçiş bandının dar olduğu görülmektedir. Yukarıdaki grafiklerden süzgeçlerin cevapları ve bunun neden olduğu problemler göz önüne alındığında süzgeçlere kesirli derece uygulamanın ne derece gerekli olduğu görülmektedir.

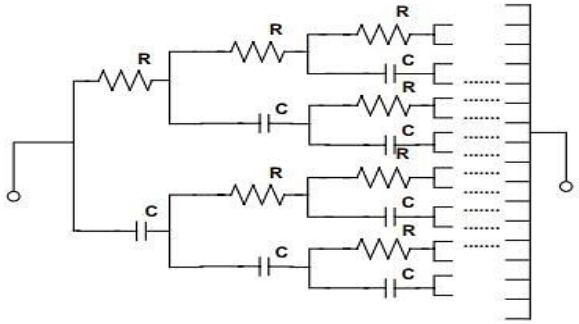
Süzgeçlere kesirli derece özelliği kazandırmak amacıyla farklı modeller oluşturulmuştur. R-C (direnç ve kondansatör) bileşenlerinin birbirine paralel bağlandığı model (Radwan ve ark., 2007), R ve C elemanlarının karar ağacı şeklinde bağlandığı model (Radwan ve ark., 2007) ve paralel R ve C elemanlarının birbirine ve bir dirence seri bağlandığı Foster modeli (Freeborn ve ark., 2014) kullanılan modellerin en önemlileridir.

3.2. Yöntem

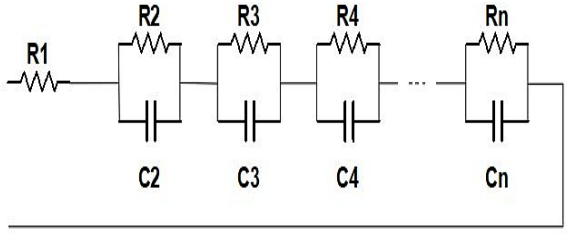
3.2.1. Kesirli dereceli süzgeç oluşturma yöntemleri



Şekil 3.16.a. Kesirli derece kapasite modeli (1) (Radwan ve ark., 2007)



Şekil 3.16.b. Kesirli derece kapasite modeli (2) (Radwan ve ark., 2007)



Şekil 3.16.c. Kesirli derece kapasite modeli (3) (Freeborn ve ark., 2014)

Şekil 3.16.'da görülen modeller kondansatörler yerine kullanılarak süzgeçlere kesirli derece uygulanmaktadır. Bu modellerde, R-C bileşenlerinin sayısı arttıkça α değeri daha hassas ve doğru şekilde hesaplanmaktadır. Denklem 3.21'de geleneksel kondansatöre ait empedans değeri, Denklem 3.22'de eş değer modelin empedans değeri verilmiştir (Şen, 2019).

$$Zc = \frac{1}{s^1 C} \tag{3.21}$$

$$Zc = \frac{1}{s^\alpha C}, \ 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{3.22}$$

Denklem 3.21'de s ifadesinin üssü 1'dir. Birinci derece bir süzgeçte bir tane kondansatör kullanılır, kondansatörden gelen s^1 ifadesi birinci derece süzgeç transfer fonksiyonuna karşılık gelir. İkinci derece süzgeç için iki kondansatörden gelen s^1 değerleri çarpılarak s^2 ifadesi; n adet kondansatör için ise s^n ifadesi elde edilmektedir. Dolayısıyla geleneksel kondansatörlerle kesirli derece sağlanamamakta, kesirli derecelere ulaşılamamaktadır.

Denklem 3.22'de α değeri kesirli değerler alabilmektedir. Bu durumda n. dereceden bir süzgeçte uygun bir kondansatör yerine kapasite eş değer modelinin kullanılmasıyla α değerinin hassasiyetine göre n-1 ile n aralığındaki süzgeç değerleri elde edilebilmektedir. Denklem 3.23'te n dereceli bir süzgecin kondansatörlerinden birinin yerine eş değer modelin kullanılması sonucu elde edilen transfer fonksiyonu derecesi verilmiştir.

$$s^{n-1}.s^\alpha = s^{n+\alpha-1}, \ 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{3.23}$$

Denklem 3.23'te, α alabileceği değerler aralığında değiştiğinde transfer fonksiyonunun derecesinin de bir alt tam sayı ve bir üst tam sayı arasında değerler aldığı görülmektedir.

Geleneksel kapasitelerle üretilen süzgeçlerde, geçiş bandını daraltmak veya kazanç grafiğindeki bir dalgalanmayı gidermek için devrenin yeniden oluşturulması gerekirken kesirli derece modelinde iki tam sayı arasındaki değerleri uygulamak için modeldeki kondansatör ve dirençlerin değerlerini değiştirmek yeterli olmaktadır. Benzer şekilde bir modelin var olması, istenilen her devreye bu modelin kolayca uygulanabilmesi anlamına gelmektedir. Bu avantajları da göz önüne alındığında kesirli derecenin önemi açık bir şekilde görülmektedir.

3.2.2. Kesirli derece kapasite modelinin oluşturulması

Son yıllarda hem geçiş bandını daraltmak hem de dalgalanmaları ve bunun sonucundaki problemleri önlemek amacıyla kesirli derece uygulamalarına gidilmiştir. Böylece dalgalanmanın problem çıkarmayacağı en yüksek hıza ulaşmak hedeflenmiş, bu alanda çalışmalar ortaya konmuştur. Ayrıca yüksek dereceli süzgeçler tasarlamak yerine düşük, kesirli dereceli süzgeçlerle istenilen cevaplar elde edilebilmektedir. Kesirli dereceli süzgeçlerin kullanıldığı, kullanılmaya elverişli olduğu alanlara; kesirli dereceli osilatörler (Radvan ve ark., 2008), kontrol teorisi (Podlubny ve ark., 2002), PV modelleme (Abdelaty ve ark., 2018), chaotic sistemler (Radvan ve ark., 2011) örnek verilebilir. Kesirli derece modelinin avantajları görüldükçe bu devrelerin kullanılacağı alanlarda da artış görülmesi beklenmektedir. Denklem 3.24'te Caputo tanımı yer almaktadır (Şen ve Kırçay, 2021).

$$ {}_{a}^{C}D_{t}^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha - n)} \int \frac{f^{(n)}(\tau)d\tau}{(t-\tau)^{\alpha+1-n}} \tag{3.24} $$

Denklem 3.24'te $n-1 < \alpha < n$, a başlangıç zamanı, t gerekli zaman hesaplaması ve α kesirli derece değeridir. Başlangıç değerleri göz önüne alınıp Laplace transform uygulanırsa Denklem 3.25 elde edilir (Şen ve Kırçay, 2021).

$$ L\{ {}_{a}^{C}D_{t}^{\alpha} f(t) \} = s^{\alpha} F(s) \tag{3.25} $$

Denklem 3.25'teki α değeri devrede esneklik sağlamakta ve kesirli derece tasarımının yolunu açmaktadır. Empedans değeri ise:

$$Z(s) = k\, s^{\alpha} \tag{3.26}$$

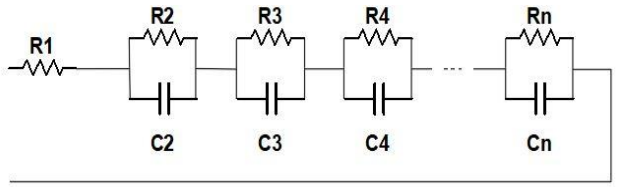
$$s = j\omega \tag{3.27}$$

(3.26)'daki eşitlikte (3.27) değeri yerine yazılırsa empedans değeri:

$$|Z| = k\, \omega^{\alpha},\ \angle \alpha\, \pi/2 \tag{3.28}$$

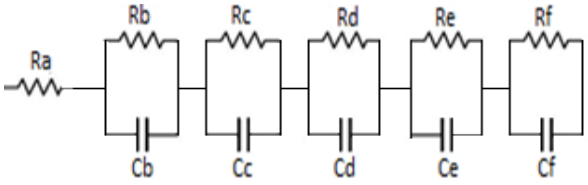
(3.28)'deki eşitlikte, saf dirençler (kapasite veya indüktör etkisi yoksa) için $\alpha = 0$, faz açısı da 0; indüktörler için $\alpha = 1$, faz açısı $\pi/2$; kapasiteler için $\alpha = -1$, faz açısı $-\pi/2$ değerine eşit olur (Şen ve Kırçay, 2021).

Denklem 3.28'deki kapasite empedansını elde etmek amacıyla farklı kapasite eş değer modelleri oluşturulmuş. Bu çalışmada Foster-I ağı ile elde edilen model kullanılmıştır.



Şekil 3.17. Kapasite eş değer modeli (Şen ve Kırçay, 2021)

Şekil 3.17.'de Foster-I ağı ile oluşturulan model bir dirence seri bağlı, paralel R-C bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenlerin sayısının artması modelin hesaplanmasına daha fazla değişkenin eklenmesi anlamına gelip daha hassas bir α değerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada beş bileşen (n=5) için Şekil 3.18.'deki gibi model oluşturulmuştur.



Şekil 3.18. n=5 değeri için eş değer kapasite modeli (Şen ve Kırçay, 2021)

Şekil 3.18.'de Foster-I ağı ile n=5 (n paralel bağlı direnç ve kondansatör sayısı) değeri için kesirli dereceyi sağlayacak model oluşturulmuştur. Modelde empedans değeri Denklem 3.29'daki gibidir.

$$Z_c = \frac{1}{S^{\alpha} C}, (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (3.29)$$

n=5 değeri için Foster-I ağı kullanılarak gerçekleştirilen eş değer model parametreleri 100 KHz frekans değeri ve C=1 nF olacak şekilde α=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 değerleri için MATLAB programı yardımıyla Çizelge 3.1.'deki gibi hesaplanmıştır (Şen ve Kırçay, 2021).

Çizelge 3.1. Kesirli derece modeli direnç-kapasite değerleri

Eşdeğer model bileşenleri	**Kesirli derece değerleri (α)**								
	0.1	**0.2**	**0.3**	**0.4**	**0.5**	**0.6**	**0.7**	**0.8**	**0.9**
Ra (Ω)	1007	634.4	395.5	242.4	114.67	82.95	44.53	21.18	7.52
Rb (Ω)	294.3	408.9	422.1	381	314.32	239.28	166	100.1	44.38
Rc (Ω)	185.2	313.5	389.6	419.2	408.89	365.46	295.9	207.3	106.4
Rd (Ω)	179.2	347.4	493.4	606.2	674.78	688.39	636.6	509.8	299.7
Re (Ω)	244.2	546.2	898.9	1.29 k	1.68 k	2.02 k	2.22 k	2.14 k	1.53 k
Rf (Ω)	604.6	1742	3810	7.52 k	14.29 k	27.14 k	53.52 k	116.6 k	334.7 k
Cb (nF)	30.24	24.50	26.50	32.62	43.66	63.02	99.41	1.80	4.41
Cc (nF)	2.76	1.74	1.49	1.47	1.61	1.91	2.51	3.80	7.85
Cd (nF)	9.40	5.13	3.83	3.30	3.14	3.27	3.75	4.97	8.98
Ce (nF)	0.233	0.112	7.29	5.49	4.55	4.1	4.06	4.60	7.07
Cf (nF)	0.614	0.248	0.134	8.22	5.39	3.69	2.60	1.87	1.36

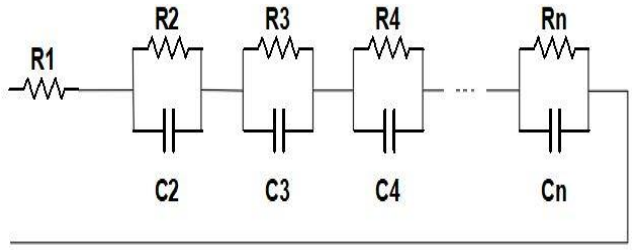
Çizelge 3.1.'de α=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 değerleri için eş değer kapasite modelinin parametre değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin sırayla Şekil 3.18.'deki devreye uygulanmasıyla istenilen α değerleri elde edilebilmektedir.

3.2.3. Devreye kesirli derecenin uygulanması

Kesirli derece uygulaması ile birlikte iki tam sayı arasında kalan süzgeç özellikleri elde edilebilmektedir. İki tam sayı arasındaki dereceler elde edilirken ayrıca bir süzgeç tasarımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Tasarlanan kondansatör modelinin parametreleri farklı α değerleri için bir kere hesaplandıktan sonra aynı model tüm süzgeçler için kullanılabilmektedir. Modeli uygularken; uygun kondansatör eş değer modelle değiştirildikten sonra istenilen α değerleri için modeldeki direnç ve kondansatörlere hesaplanan değerler verilmektedir.

Kesirli dereceyi sağlamak amacıyla farklı kondansatör modelleri kullanılmıştır. Bunlar seri direnç ve kondansatörlerin paralel bağlanması (Radvan ve ark., 2007), direnç ve kondansatörlerin karar ağacı şeklinde bağlanması (Radvan ve ark., 2007) ve Foster-I ağı modelidir (Freeborn ve ark., 2014).

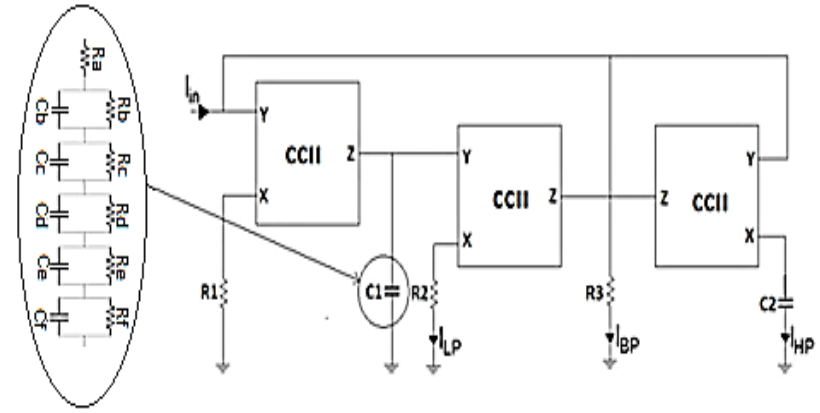
Foster-I ağı paralel direnç ve kondansatör bileşenlerinin birbirine seri bağlanması şeklinde oluşmaktadır. Model bu devreye seri bağlı bir dirençten meydana gelmektedir. n değeri için model Şekil 3.19.'da gösterilmiştir (Şen ve Kırçay, 2021).



Şekil 3.19. n değeri için Foster-I eş değer kapasite modeli (Şen ve Kırçay, 2021)

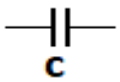
Şekil 3.19.'da n değeri için Foster-I eş değer kapasite modeli oluşturulmuştur. Bu modelde n sayısı arttıkça modelde kullanılan eleman sayısı artmakta; dolayısıyla daha hassas α değerleri hesaplamanın yolu açılmaktadır. Ancak devreye ek elemanların eklenmesi hem güç kaybına hem maliyete hem de kapasitelerden kaynaklanan gürültünün artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle istenilen hassasiyeti sağlayacak az sayıda eleman kullanılarak modelin oluşturulması, devre performansı açısından da faydalı olmaktadır. Bu nedenle Şekil 3.18.'de n=5 değeri için model oluşturulmuştur. n=5 değeri için model oluşturulduktan sonra modelde kullanılan Ra, Rb, Rc, Rd, Re, Rf, Cb, Cc, Cd, Ce, Cf değerleri MATLAB programı kullanılarak Çizelge 3.1.' deki

gibi hesaplanmıştır. Şekil 3.18.'de n=5 değeri için oluşturulan model devreye Şekil 3.20.'deki gibi uygulanmıştır.



Şekil 3.20. Kesirli derece modelinin devreye uygulanması

Şekil 3.20' de, C1 kondansatörünün yerine Şekil 3.18.'deki modelin konmasıyla devre kesirli derece özelliği kazanmaktadır. Ra, Rb, Rc, Rd, Re, Rf, Cb, Cc, Cd, Ce, Cf elemanlarına Çizelge 3.1'deki değerler, istenilen α değerleri için verilerek 1-2 arasındaki kesirli dereceler elde edilebilmektedir. Bu model sayesinde 2. derece bir süzgece yapılan küçük bir değişiklik ile süzgecin, α değerinin hassasiyetine göre iki tam sayı arasındaki tüm kesirli dereceleri yeni bir süzgeç tasarımına gerek kalmadan alması sağlanabilmektedir. Çizelge 3.1.'deki değerler sırayla Şekil 3.18.'deki devre elemanlarına verilerek α' nın 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 değerlerini alması sağlanmıştır. Böylece süzgeçte 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 derecelerine ulaşılmıştır. Kondansatörün sembolü Şekil 3.21.'de gösterilmiştir (Şen, 2019).



Şekil 3.21. Kondansatör sembolü (Şen, 2019)

Şekil 3.21'de sembolü gösterilen kondansatörün empedansı Denklem 3.30'da verilmiştir (Şen ve Kırçay, 2021).

$$Z_c = \frac{1}{SC} \tag{3.30}$$

Denklem 3.30'da verilen empedans değerinde s'nin derecesi 1'dir. Kondansatördeki bu 1 değeri nedeniyle süzgeç dereceleri tam sayılar şeklide yükselmektedir.

Şekil 3.4.'te devredeki kondansatör yerine eş değer model (Şekil 3.18.) getirildikten sonra Denklem 3.31'deki genel süzgeç transfer fonksiyonu Denklem 3.32' deki şekli almıştır (Şen ve Kırçay, 2021).

$$H(s) = \frac{n_k s^k + n_{k-1} s^{k-1} + n_{k-2} s^{k-2} + \cdots + n_0}{s^m + d_{m-1} s^{m-1} + d_{m-2} s^{m-2} + \cdots + d_0} \ , \ (k \leq m) \tag{3.31}$$

$$H(s) = \frac{n_k s^{k+\alpha} + n_{k-1} s^{k+\alpha-1} + n_{k-2} s^{k+\alpha-2} + \cdots + n_0}{s^{m+\alpha} + d_{m-1} s^{m+\alpha-1} + d_{m-2} s^{m+\alpha-2} + \cdots + d_0} \ , \ (k \leq m) \tag{3.32}$$

Denklem 3.32'de transfer fonksiyonunun derecesi, kondansatörün devreden çıkarılışından dolayı 1 eksilirken, eş değer modelin devreye eklenmesiyle α değeri kadar artmıştır. Genel transfer fonksiyonundaki etkiler tasarlanan devrenin transfer fonksiyonuna da benzer şekilde yansımakta ve transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde değişmektedir.

$$H_{LP}^{FO}(s) = \frac{I_{LP}}{I_{IN}} = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{S^{1+\alpha} + S^{\alpha} \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \ , 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{3.33}$$

Denklem 3.33'te alçak geçiren süzgeç transfer fonksiyonunun, kesirli derece uygulandıktan sonraki hali verilmiştir.

$$H_{BP}^{FO}(s) = \frac{I_{BP}}{I_{IN}} = \frac{S^{\alpha} \frac{1}{R_3 C_2}}{S^{1+\alpha} + S^{\alpha} \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \ , \ 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{3.34}$$

Denklem 3.34'te bant geçiren süzgeç transfer fonksiyonunun, kesirli derece uygulandıktan sonraki hali verilmiştir. 7

$$H_{HP}^{FO}(s) = \frac{I_{HP}}{I_{IN}} = \frac{S^{1+\alpha}}{S^{1+\alpha} + S^{\alpha} \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \ , \ 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{3.35}$$

Denklem 3.35'te yüksek geçiren süzgeç transfer fonksiyonunun, kesirli derece uygulandıktan sonraki hali verilmiştir.

$$H_{NP}^{FO}(s) = \frac{I_{NP}}{I_{IN}} = \frac{S^{1+\alpha} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{S^{1+\alpha} + S^{\alpha}\frac{1}{R_3C_2} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}},\ 0 \le \alpha \le 1 \quad (3.36)$$

Denklem 3.36'da bant durduran süzgeç transfer fonksiyonunun, kesirli derece uygulandıktan sonraki hali verilmiştir.

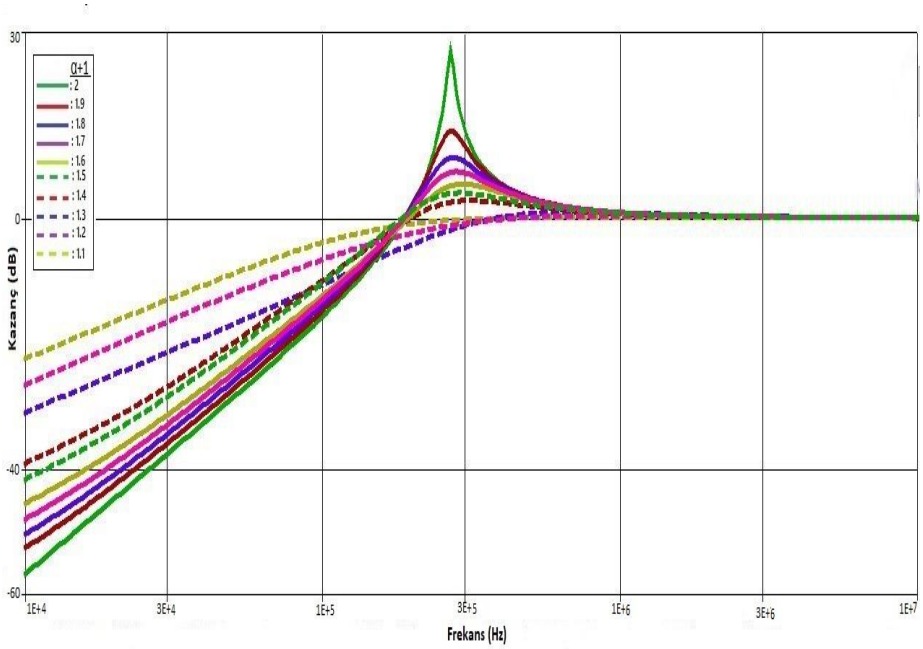
$$H_{AP}^{FO}(s) = \frac{I_{AP}}{I_{IN}} = \frac{S^{1+\alpha} - S^{\alpha}\frac{1}{R_3C_2} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{S^{1+\alpha} + S^{\alpha}\frac{1}{R_3C_2} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}},\ 0 \le \alpha \le 1 \quad (3.37)$$

Denklem 3.37'de tüm geçiren süzgeç transfer fonksiyonunun, kesirli derece uygulandıktan sonraki hali verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

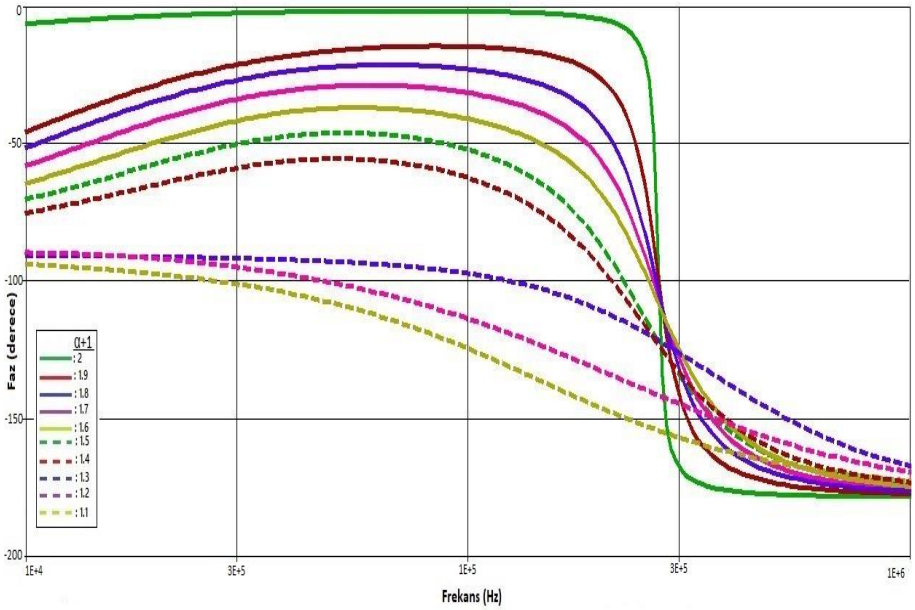
4.1. Kesirli Derece Uygulanan Devrenin Benzetim Sonuçları

Şekil 3.20.'deki devrede direnç ve kondansatörlere Çizelge 3.1.'deki değerler verildiğinde süzgecin derecesi sırayla 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 olur. R1=1.5 kΩ, R2 = 1kΩ, R3=10 kΩ, C2=10 nF ve ikinci derece süzgeç için C1=10 nF değerleri verilmiştir. Devrede CCII olarak AD844A entegresinin Şekil 3.13.'teki bağlantısı kullanılmıştır. α+1 derecesinin; 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 ve 2 değerleri için devrenin, ORCAD PSPİCE programıyla benzetimi yapılarak, kesim frekansı 196 KHz, kalite faktörü 19 olacak şekilde yüksek geçiren süzgeç, bant geçiren süzgeç, alçak geçiren süzgeç ve bant durduran süzgeçlerin cevapları çizdirilmiştir.



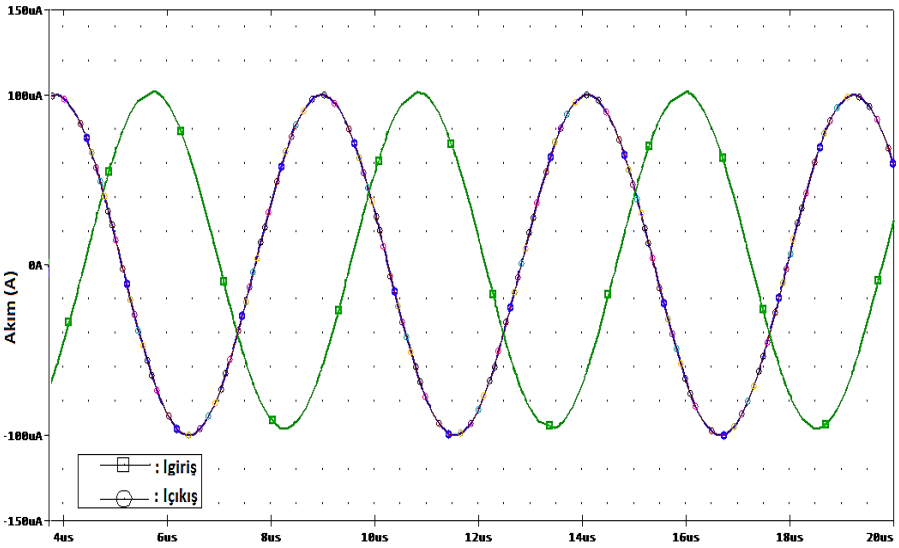
Şekil 4.1.a. Kesirli dereceli yüksek geçiren süzgecin genlik cevabı

Şekil 4.1.a.'da CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin yüksek geçiren süzgeç için kazanç cevabı verilmiştir. Cevapta α+1=1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9 kesirli derece değerleri 2. derece (tam sayılı) süzgeç ile karşılaştırılmıştır. Süzgeç cevabında α'nın değerinin düşmesiyle süzgeç derecesinin de başarılı bir şekilde düştüğü geçiş bandındaki genişlemeden anlaşılmaktadır.



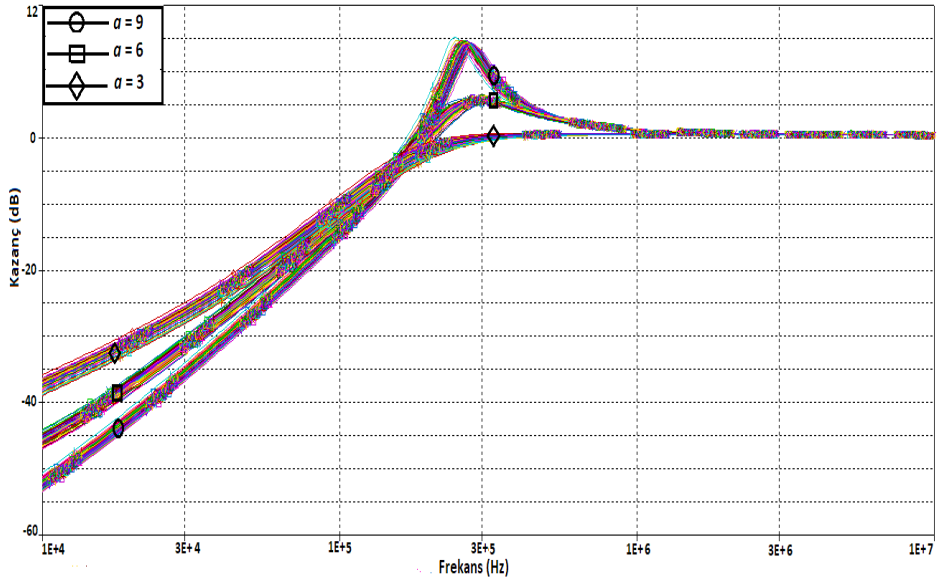
Şekil 4.1.b. Kesirli dereceli yüksek geçiren süzgecin faz cevabı

Şekil 4.1.b.'de CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin yüksek geçiren süzgeç için faz cevabı verilmiştir. Cevapta α+1=1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9 kesirli derece değerleri 2. derece (tam sayılı) süzgeç ile karşılaştırılmıştır. Süzgeç cevabında α'nın değerinin düşmesiyle süzgeç derecesinin de başarılı bir şekilde düştüğü faz eğrilerindeki dikliğin azalmasından açıkça anlaşılmaktadır.



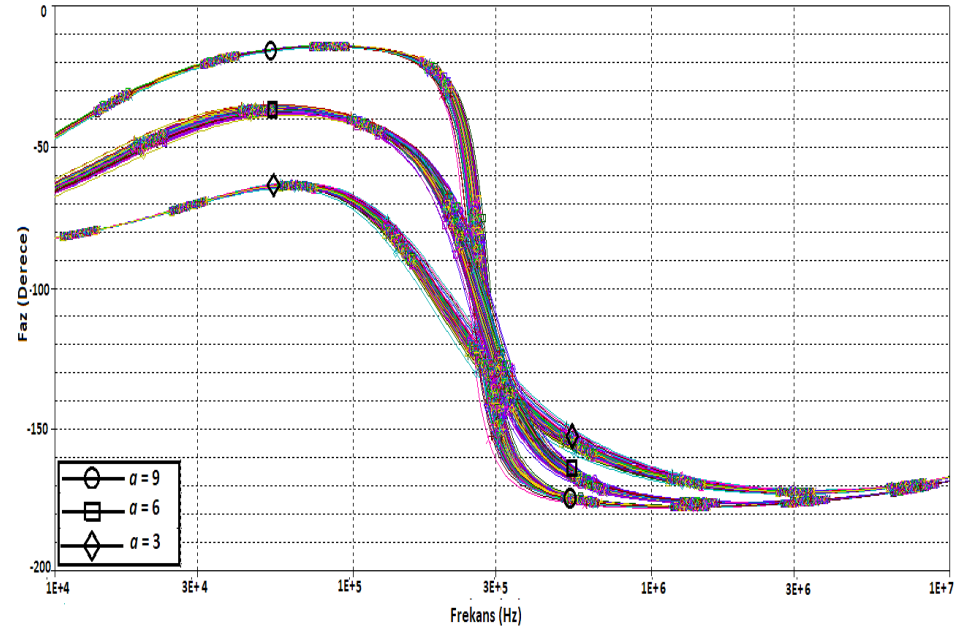
Şekil 4.1.c. Kesirli dereceli yüksek geçiren süzgecin zaman cevabı

Şekil 4.1.c.'de CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin yüksek geçiren süzgeç için zaman cevabı verilmiştir. Cevapta giriş ve çıkışın (α+1=1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9) zaman ortamında benzetimi yapılarak faz kaydırma durumu gösterilmiştir.



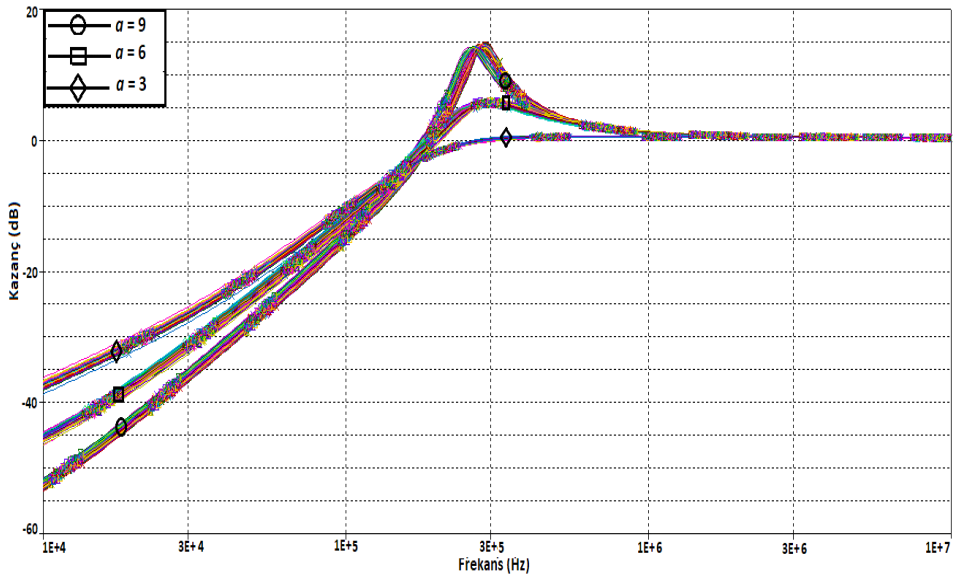
Şekil 4.1.d. R1, R2, R3, Ra, Rb, Rc, Rd, Re, Rf değerlerinin %5 Gaussian değişimi için Monte-Carlo yüksek geçiren süzgeç kazanç cevabı

Şekil 4.1.d.'de CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin yüksek geçiren süzgeç için Monte-Carlo kazanç grafiği verilmiştir. Süzgeçte kullanılan direnç değerlerinin %5'lik değişimi için kazanç cevaplarının değişimi, süzgeç derecesinin 1.3, 1.6, 1.9 değerleri için gösterilmiştir. Direnç değerlerindeki değişimlerin süzgeç cevabında çok küçük değişikliklere neden olduğu görülmektedir.



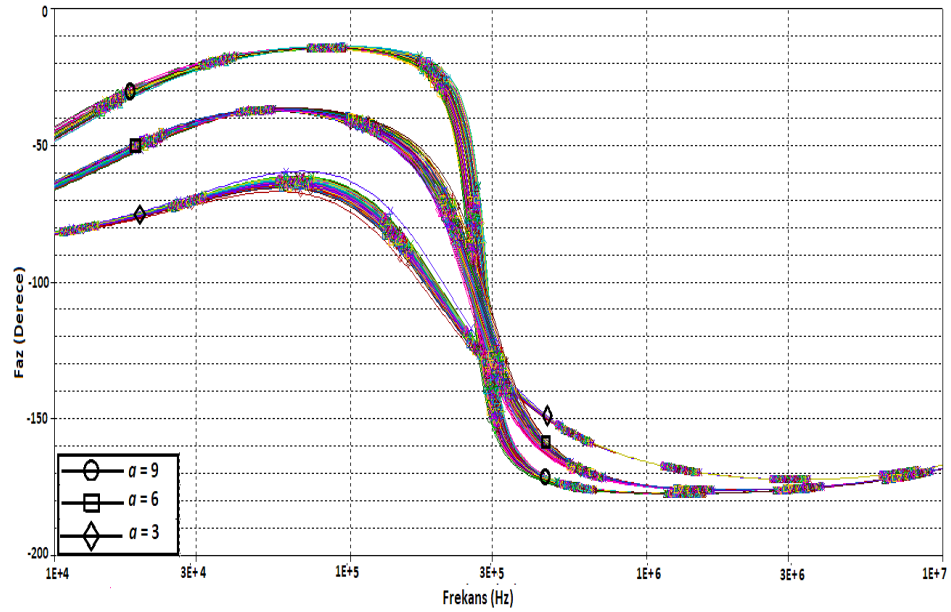
Şekil 4.1.e. R1, R2, R3, Ra, Rb, Rc, Rd, Re, Rf değerlerinin %5 Gaussian değişimi için Monte-Carlo yüksek geçiren süzgeç faz cevabı

Şekil 4.1.e.'de CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin yüksek geçiren süzgeç için Monte-Carlo faz grafiği verilmiştir. Süzgeçte kullanılan direnç değerlerinin %5'lik değişimi için faz cevaplarının değişimi, süzgeç derecesinin 1.3, 1.6, 1.9 değerleri için gösterilmiştir. Direnç değerlerindeki değişimlerin süzgeç cevabında çok küçük değişikliklere neden olduğu görülmektedir.



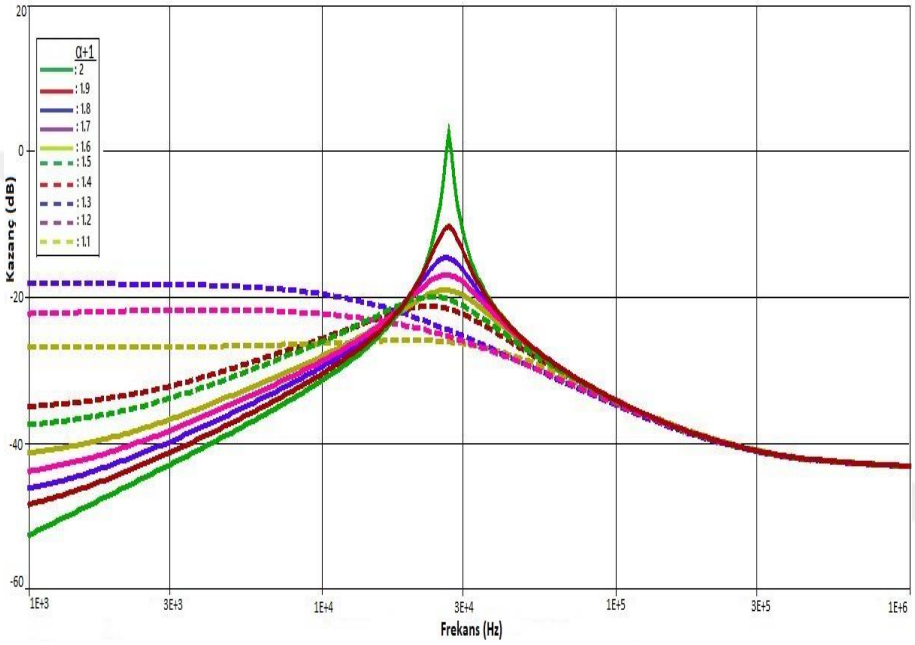
Şekil 4.1.f. C2, Cb, Cc, Cd, Ce, Cf değerlerinin %5 Gaussian değişimi için Monte-Carlo yüksek geçiren süzgeç kazanç cevabı

Şekil 4.1.f.'de CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin yüksek geçiren süzgeç için Monte-Carlo kazanç grafiği verilmiştir. Süzgeçte kullanılan kondansatör değerlerinin %5'lik değişimi için kazanç cevaplarının değişimi, süzgeç derecesinin 1.3, 1.6, 1.9 değerleri için gösterilmiştir. Kondansatör değerlerindeki değişimlerin süzgeç cevabında çok küçük değişikliklere neden olduğu görülmektedir.



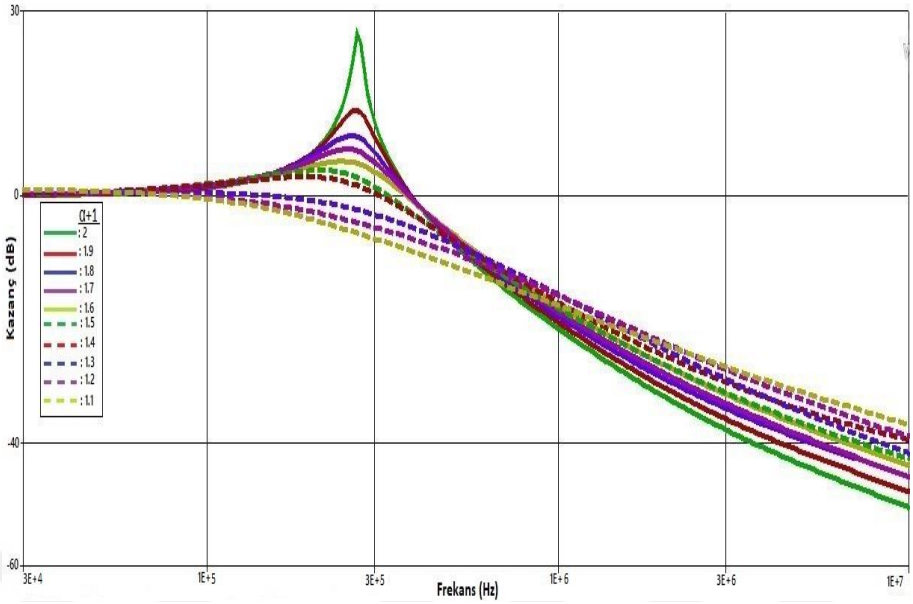
Şekil 4.1.g. C2, Cb, Cc, Cd, Ce, Cf değerlerinin %5 Gaussian değişimi için Monte-Carlo yüksek geçiren süzgeç faz cevabı

Şekil 4.1.g.'de CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin yüksek geçiren süzgeç için Monte-Carlo faz grafiği verilmiştir. Süzgeçte kullanılan kondansatör değerlerinin %5'lik değişimi için faz cevaplarının değişimi, süzgeç derecesinin 1.3, 1.6, 1.9 değerleri için gösterilmiştir. Kondansatör değerlerindeki değişimlerin süzgeç cevabında çok küçük değişikliklere neden olduğu görülmektedir.



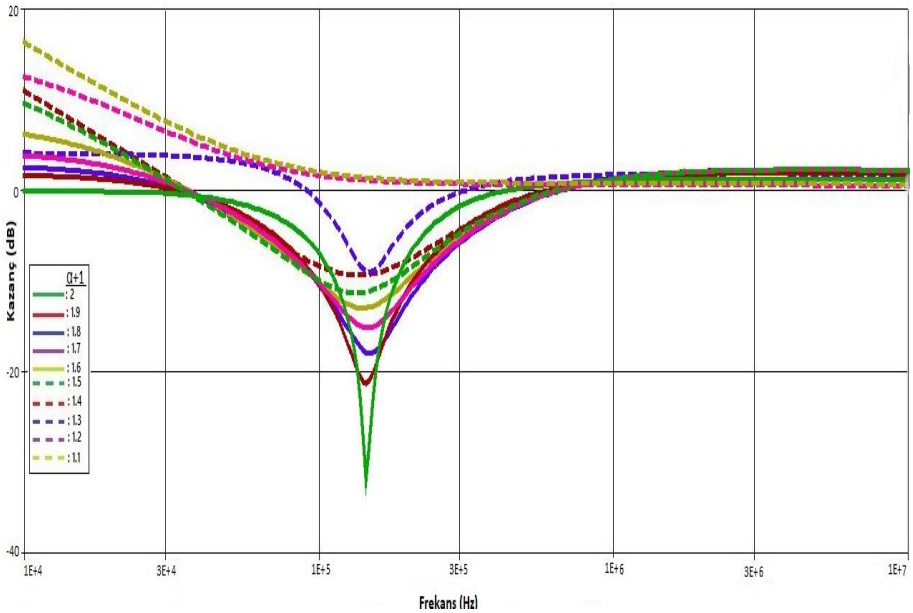
Şekil 4.2. Kesirli dereceli bant geçiren süzgecin genlik cevabı

Şekil 4.2.'de CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin bant geçiren süzgeç için kazanç cevabı verilmiştir. Cevapta α+1=1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9 kesirli derece değerleri 2. derece (tam sayılı) süzgeç ile karşılaştırılmıştır. Süzgeç cevabında α'nın değerinin düşmesiyle süzgeç derecesinin de başarılı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Ancak bant geçiren süzgeç, birinci derece ile sağlanamadığından α+1 değeri bire yaklaştıkça cevabın bozulduğu, eğrinin bant geçiren süzgeç cevabından uzaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4.3. Kesirli dereceli alçak geçiren süzgecin genlik cevabı

Şekil 4.3.'te CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin alçak geçiren süzgeç için kazanç cevabı verilmiştir. Cevapta α+1=1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9 kesirli derece değerleri 2. derece (tam sayılı) süzgeç ile karşılaştırılmıştır. Süzgeç cevabında α değerinin düşmesiyle süzgeç derecesinin de başarılı bir şekilde düştüğü geçiş bandındaki genişlemeden açıkça anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4. Kesirli dereceli bant durduran süzgecin genlik cevabı

Şekil 4.4.'te CCII ile tasarlanan akım modlu, ikinci derece süzgecin kesirli derece modeli uygulanan halinin bant durduran süzgeç için kazanç cevabı verilmiştir. Cevapta α+1=1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8,1.9 kesirli derece değerleri 2. derece (tam sayılı) süzgeç ile karşılaştırılmıştır. Süzgeç cevabında α değerinin düşmesiyle süzgeç derecesinin de başarılı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Ancak bant durduran süzgeç birinci derece ile sağlanamadığından α+1 değeri bire yaklaştıkça cevabın bozulduğu, eğrinin bant durduran süzgeç cevabından uzaklaştığı görülmektedir.

Benzetim sonuçlarından anlaşıldığı gibi kesirli derece farklı tepkilerde sonuçlar vererek süzgeç tasarımına büyük esneklik sağlamıştır. Kesirli derece modelinin her devreye kolayca uygulanabilmesi ise en büyük avantajıdır. Pasif elemanlı devrelere (Radvan ve ark., 2007), aktif elemanlı devrelere (Freeborn ve ark., 2014), gerilim modlu devrelere (Freeborn, 2015), akım modlu devrelere (Bertsias ve ark., 2019) başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

İkinci çalışmada kesirli derece modelinin farklı ortamlarda üretilen devrelere de uygulanabilirliğini göstermek için daha önce tasarlanmış bir logaritmik ortam süzgecine (Kırçay ve Çam) kesirli derece uygulanmıştır. Logaritmik ortam süzgeçlerinin tasarımını anlamak için aşağıda kısaca anlatılmıştır.

4.2. Kesirli Derece Modelinin Logaritmik Ortam Süzgecine Uygulanması

4.2.1. Logaritmik ortam süzgeçlerin tanımı

Logaritmik ortam süzgeçleri, yüksek frekans, düşük güç tüketimi, düşük gerilimle çalışma ve düşük gürültü nedeniyle birçok çalışmaya konu olmuştur. İhtiyaçlara cevap vermesi, ekonomik olması ve entegre teknolojisine uyumu başta gelen avantajlarıdır. Bu nedenle, keşfiyle beraber ilgiyi üzerinde toplamış, farklı çalışmalara konu olmuştur.

Logaritmik ortamlı süzgeç anlayışıyla linnerleştirme problemi büyük oranda çözülmüştür. Lineerleştirme devre tasarım ve analizinde büyük kolaylıklar sağladığından dolayı vazgeçilemeyen bir özelliktir. Ancak devreleri lineer olarak kabul etmek ya devreleri kısıtlı bir çalışma aralığına hapsetmek ya da belli hatalara tolerans göstermek anlamına gelmektedir. Logaritmik ortamlı süzgeçlerde ise giriş ve çıkış lineer olduğundan tasarımı ve analizi kolay, süzme işleminin yapıldığı yer

nonlineer olduğundan yüksek oranda doğruluk sağlar. Sonuç olarak devrenin giriş ve çıkışı lineerliğin getirdiği kolaylıktan faydalanmak için lineer özellikte olurken; asıl işlemin yapıldığı süzme kısımda ise nonlineer olarak sinyal işlenmektedir. Böylece analiz ve sentezi kolay, doğruluğu ve performansı yüksek süzgeçler tasarlanmaktadır. Logaritmik ortamlı süzgeçlerin anlaşılması için bilinmesi gereken bazı ifadeler vardır. Bu ifadeler linnerlik, akım-gerilim modlu devreler ve translineer yapıdır.

4.2.2. Lineerlik

Geleneksel devrelerde, elemanlar veya devre sadece tanımlanan aralıklarda lineer olarak kabul edilmektedir. Bunun sonucu olarak da, devrede eleman sayısı arttıkça devrenin çalışma aralığı da daralmaktadır. Logaritmik ortamlı süzgeçlerde ise devre elemanlarının lineer olmayan doğal tepkilerinin kullanılması ile giriş çıkış arasında lineerlik sağlanmaktadır. Böylece devre elemanlarının tamamı herhangi bir kısıtlamaya maruz kalmadan doğal tepkileri ile çalışmaktadır. Bu yapı ile devrenin çalıma aralığının genişlemesiyle, devre daha yüksek doğruluk ile çalışmış olmaktadır.

Lineerlik devrelerde tasarım ve analizler için oldukça önemlidir. Ancak lineerlik devrelerde bazı kabuller ve çalışma alanı sınırlılıklarını da beraberinde getirmektedir. Lineer özelliğe sahip olmayan devreleri lineerleştirmek için genellikle iki yöntem kullanılır:

- Devre elemanları dar bir bölgede çalıştırılmak zorunda bırakılır. Bu durumda devre elemanlarının özelliklerine ve sayısına bağlı olarak çalışma alanı da daralır. Devre elemanı sayısı arttıkça sistemin performansı düşer.
- Lineer olmayan elemanlar için yaklaşık bir lineerlik fonksiyonu oluşturulabilir. Bu durumda da devre, bazı noktalarda veya aralıklarda doğru sonuçlar verirken bazı noktalarda da hatalı sonuçlar verir.

4.2.3. Akım / gerilim modlu devreler

Elektrik devrelerinde gerilim ve akım birbirinden ayrılamayan iki büyüklüktür. Nitekim akımın oluşması gerilime bağlıdır. Ancak devrelerde işlenen işareti belirlemek devre yapısı ve analizi yönünden önemlidir.

Uzun yıllar boyunca gerilim modlu devreler ön planda kalmış, bu yönde devreler tasarlanmıştır. Özellikle 1947 yılında gerilim modlu devre elemanlarının tasarlanması (Op-amp gibi), gerilim modlu devrelerin tasarımında belli bir artışa neden olmuştur. 1960'lı yılların sonlarına kadar neredeyse tüm devreler gerilim modlu olarak üretilmiştir. Uzun yıllar gerilim modlu olarak üretilen devreler, akım taşıyıcıların ve diğer akım moda uyumlu devre elemanlarının üretimiyle beraber yerini gittikçe akım modlu devre elemanlarına bırakamaya başlamıştır.

1970'li yıllarda translineer perensibi ortaya atılarak akım modlu devrelerde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir (Gilbert, 1975). Daha sonraki yıllarda akım modlu devreler üzerinde çalışmalar yapılmış, akım modlu devrelerin gerilim modlu devrelere göre daha yüksek performansla çalıştığı kanıtlanmıştır (Wilson, 1989). Böylece eşitlik ve denklemlerde akım kullanılmış, transfer fonksiyonları akım türünden verilmeye başlanmıştır.

Akım modlu devre yapısına karşı ilgi artsa da 1990'lı yıllara kadar bu konuda yeterince çalışma yapılmamıştır. Transistör ve fet gibi akım modlu devre elemanlarının kolayca entegre edilebilmesi bu konuda yapılan çalışmaların artmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmalarla; akım modlu devrelerde geniş bant aralığı, doğruluğun yüksek olması, doğrusallık, yüksek süzgeç hızı, devre tasarımında ve analizindeki kolaylıklar gibi üstünlükleri olduğu tespit edilmiştir. Özellikle son yıllarda düşük güçle çalışan devrelerin önem kazanması logaritmik ortamlı süzgeçlere karşı ilgiyi arttırmıştır. Yıllar önce ortaya atılan ve gün geçtikçe önemi daha da artan akım modlu devrelerin üstünlükleri aşağıda verilmiştir (Aslanalp, 2003).

- Düşük gerilimle çalışır.
- Düşük güç tüketimine sahiptir.
- Düşük parazitik etkiye sahiptir.
- İşlevsel esneklikleri yüksektir.
- Geniş çalışma frekans bandına sahiptir.
- Yüksek kazanç değerine sahiptir.

Elektronik devrelerde kullanılan gerilim değeri V seviyesinde iken, akım değerleri µA-mA seviyesindedir. Devrede V seviyesi gibi yüksek gerilimler yerine µA-mA gibi

daha düşük seviyelerdeki akımların olması devrenin daha düşük güçle çalışmasını sağlamaktadır. Devredeki gerilim seviyesinin düşmesi devre elemanlarının uç gerilimleri arasındaki gerilim farklarını da azaltacağından dolayı devredeki gürültü oranını da minimum seviyeye indirmektedir. Ayrıca gerilim yerine akım işaretinin işlenmesi genlik seviyesinin 100-10000 kat düşmesini sağlayarak devrenin hassasiyetini arttırmaktadır.

Yapılan çalışmalar ve ortaya konan sonuçlar akım modlu devrelerin gerilim modlu devrelere göre daha yüksek kazanç değerlerine sahip olduğunu göstermektedir (Aslanalp, 2003). Logaritmik ortamlı süzgeçlerin kazanç ve faz cevaplarının elektronik olarak ayarlanabilir olması da kontrol konusunda büyük kolaylıklar sağlayarak bu süzgeçlerin önemini arttırmıştır.

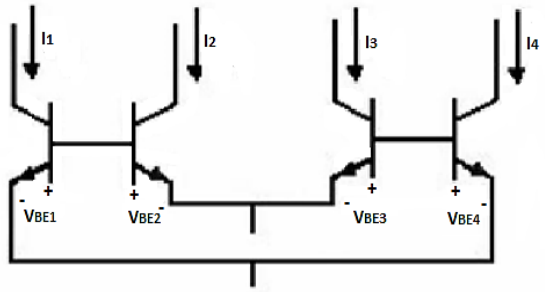
4.2.4. Translineer prensibi

Lineerlik, analizlerde ve devre tasarımında büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Ancak lineer olmayan devre elemanlarını lineer olarak kabul etmek ya devreyi dar bir alanda incelemeye mecbur bırakmakta ya da belli aralıklarda yapılan hatalara tolerans göstermeyi gerekli kılmaktadır.

Gilbert tarafından 1975 yılında translineer prensibi ortaya konmuştur. Gilbert bu çalışmada transistörün kollektör akımıyla geçiş iletkenliği arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanarak bu prensibe ulaşmıştır. Bu prensip kapalı çevrim oluşturan transistörlerin (BJT) akımları arasında lineer bir ilişkinin olduğu mantığına dayanmaktadır (Gilbert, 1975). Kapalı çevrim oluşturan gerilimlerin toplamı sıfıra eşittir. Transistörlerin akım ve gerilimi arasında doğrusal olmayan üstel bir bağıntı vardır. Logaritmanın özellikleri kullanılarak gerilimlerin sıfıra eşitlenmesi ve yapılan sadeleştirmelerle akımlar arasında lineer bir ilişki ortaya çıkmaktadır. Transistörlerin üstel fonksiyonları yardımıyla logaritma ve üs alma gibi devreler tasarlanırken, translineer prensibi sayesinde doğrusal olmayan devre elemanlarının uygun bağlantıları sayesinde doğrusal olmayan devre elemanları doğrusal eşitlikler vermektedir. Lineer devrelerin analiz ve sentezlerinin kolay olması, nonlineer devrelerin ise doğruluk oranlarının yüksek olması translineer prensibinin bize sağladığı avantajları ortaya koymaktadır.

Translinner prensibin sağladığı kolaylıklar kısa süre içerinde fark edilerek farklı devrelerde uygulama alanı bulmuştur. Bu prensip, akım modlu devrelerin yaygınlaşmasıyla beraber hız kazanmış, bu prensibin kullanıldığı devreler akım modlu devreler sınıfına dahil olmuştur.

Translineer devreler kapalı çevrim oluşturan gerilimlerden faydalanarak akımlar arasında doğrusal bir ilişki ortaya koyan devre yapılarıdır. Translineer devre örneği Şekil 4.5.'te verilmiştir (Aslanalp, 2003).



Şekil 4.5. Translineer devre örneği (Aslanalp, 2003)

$$V_{BE1} + V_{BE3} = V_{BE2} + V_{BE4} \tag{4.1}$$

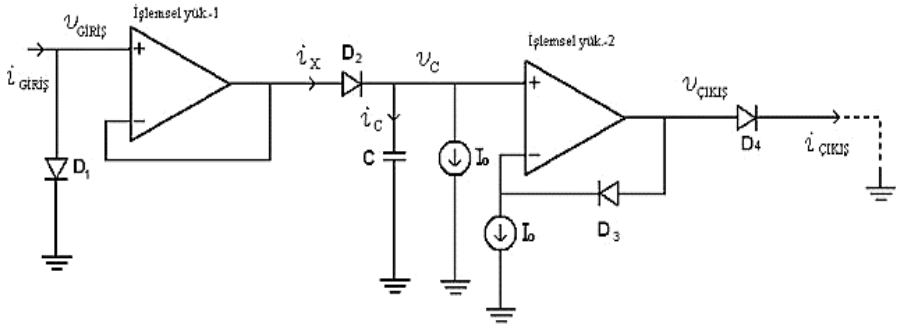
$$V_T \ln \frac{I_1}{I_S} + V_T \ln \frac{I_3}{I_S} = V_T \ln \frac{I_2}{I_S} + V_T \ln \frac{I_4}{I_S} \tag{4.2}$$

$$V_T \ln \left(\frac{I_1 I_3}{I_S I_S}\right) = V_T \ln \left(\frac{I_2 I_4}{I_S I_S}\right) \tag{4.3}$$

$$I_1 I_3 = I_2 I_4 \tag{4.4}$$

Şekil 4.5.'teki transistörlerin gerilim denkleminden (4.1) VBE eşitlikleri yazılıp (4.2), logaritmanın özellikleri kullanılarak (4.3) Deklem 4.4'teki akım denklemi elde edilmektedir. Bu da logaritmik ortam devre tasarımının yolunu açmaktadır.

4.2.5. Adams'ın devresi



Şekil 4.6. Adams'ın devresi (Aslanalp, 2003)

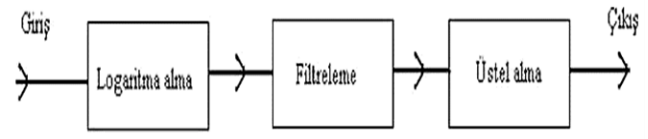
Logaritmik ortamlı devre anlayışı Adams tarafından ortaya atılmıştır. Adams, devresinde doğrusal olmayan devre elemanlarıyla doğrusal transfer fonksiyonu veren bir devre tasarlamıştır. Adams devresinde op-amp, diyot, akım kaynağı ve kondansatör kullanmıştır. Şekil 4.6.'da görülen Adams'ın tasarladığı devrenin çalıma prensibi kısaca şu şekildedir:

Öncelikle girişine uygulanan sinyalin logaritması alınarak sinyal sıkıştırılır daha sonra logaritması alınan işaret devre elemanları ile temel süzme fonksiyonunu gerçekleştirir. Devrenin çıkışında ise süzgeçlenmiş sinyalin üsteli alınarak sinyal genişletilir. Dolayısıyla devre üç ana bölümden oluşur:

1. Giriş işaretinin logaritmasının alınması (işaretin sıkıştırılması, lineer kısım)

2. Süzgeçleme (nonlineer kısım)

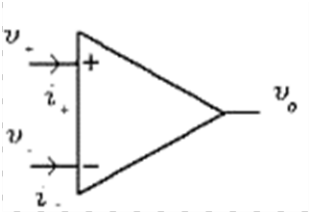
3. Çıkış işaretinin üstelinin alınması (işaretin genişletilmesi, lineer kısım)



Şekil 4.7. Logaritmik süzgeçlerin çalışma prensibi (Aslanalp, 2003)

Şekil 4.7.' de logaritmik ortam süzgeçlerinin blok yapısı verilmiştir (Aslanalp, 2003). Giriş ve çıkış lineerliğin avantajlarına sahip iken süzgeçleme işleminin yapıldığı kısım ise doğru bir süzgeçleme için nonlineer özellik göstermektedir. Adams'ın devesinde

kullanılan devre elemanları aşağıdaki gibidir. Şekil 4.8.'de op-ampın sembolü verilmiştir (Aslanalp, 2003).



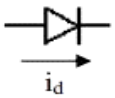
Şekil 4.8. Op-amp sembolü (Aslanalp, 2003)

$$i_+ = i_- = 0 \quad (4.5.)$$

Op-ampın girişleri arasında çok yüksek bir direnç bulunduğundan (teorikte sonsuz) giriş akımları sıfıra eşittir (4.5).

$$v_+ = v_- \quad (4.6)$$

Op-ampın giriş uçları aynı gerilime sahiptir. Dolayısıyla girişleri arasında gerilim farkı yoktur (4.6). Şekil 4.9.'da diyot sembolü, Denklem 4.7'de diyotun akım denklemi yer almaktadır (Aslanalp, 2003).



Şekil 4.9. Diyot sembolü (Aslanalp, 2003)

$$I_d = I_s \, e^{\frac{V_d}{V_T}} \quad (4.7)$$

$$V_T = \frac{k\,T}{q} \quad (4.8)$$

V_T = Sıcaklığa bağlı gerilim (thermal voltage)

k = Boltzmann sabiti (1.3806568 x 10E-23 JK-1)

T= Kelvin(sıcaklık)

q = Bir elektronun yükü (1.602 x 10E-19C)

I_S= Diyotun sızıntı akımı

Adams'ın devresi analiz edildiğinde akım modlu, birinci dereceden alçak geçiren bir süzgeç olduğu görülmektedir (4.9). Süzgecin transfer fonksiyonu Denklem 4.9'da, süzgecin kesim frekansı Denklem 4.10'da verilmiştir (Aslanalp, 2003).

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{\omega_0}{S+\omega_0} \tag{4.9}$$

$$\frac{I_0\, k}{C} = \omega_0 \tag{4.10}$$

Denklemlerde;

ω_0: kesim frekansı,

C: kondansatör,

k: katsayıdır.

Adams'ın devresinin avantajları:

- Akım modlu olması
- Sinyali sıkıştırıp genişletmesi

Adams'ın devresinin dezavantajları:

- Devre elemanı sayısının fazla olması
- Gerilim modlu devre elemanlarının kullanılması (Op-amp)
- Ortaya bir sistematik koymaması

Adams'ın devresinin dezavantajlarından dolayı o yıllarda bu fikir dikkate alınmamış; yıllar sonra Frey'in bu devrelere bir sistematik getirmesiyle (durum uzayı yöntemi) bu devreler popülerlik kazanmıştır (Frey, 1993).

4.2.6. Logaritmik ortamda süzgeç tasarım örneği

Uzun yıllar boyunca logaritmik ortamda süzgeçler üretilmiş, farklı derecelerde ve özelliklerde süzgeçler ortaya konmuştur. Ancak logaritmik ortam süzgeçlerine henüz kesirli derece uygulanmamıştır. Logaritmik ortam süzgeçlerine kesirli derece modelinin uygulanabildiğini göstermek amacıyla daha önce tasarlanan ikinci derece,

evrensel bir süzgece (Kırçay ve Çam) kesirli derece modeli uygulanarak kesirli derece modelinin farklı ortamlarda üretilen süzgeçlerde de verimli olarak çalıştığı ispat edilmeye çalışılmıştır.

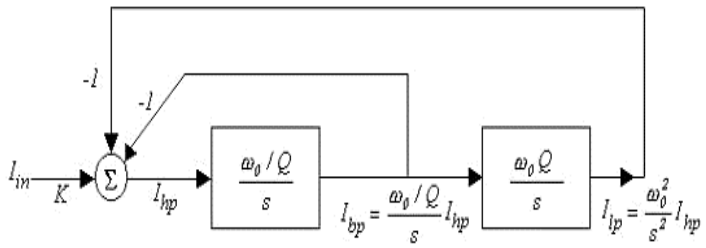
Ali KIRÇAY ve Uğur ÇAM tarafından, tasarlanan bu devre ikinci dereceden evrensel bir süzgeç olup devrede yüksek geçiren, bant geçiren ve alçak geçiren süzgeçlerden oluşmaktadır. Ayrıca yüksek geçiren ve alçak geçiren süzgeçlerin toplamından bant durduran süzgeç, bant durduran ve bant geçiren süzgecin farkından da tüm geçiren süzgeç elde edilebilmektedir. Süzgeç tasarlanırken durum uzay yöntemi, çift integratör bloğu ve aritmetik işlem blokları kullanılmıştır. Devre aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır: Yüksek geçiren süzgecin transfer fonksiyonu Denklem 4.11'de yer almaktadır (Kırçay ve Çam).

$$\frac{I_{hp}}{I_{in}} = \frac{K\,S^2}{S^2+S\left(\frac{\omega_0}{Q}\right)+{\omega_0}^2} \tag{4.11}$$

Denklem 4.11 düzenlenirse Denklem 4.12 elde edilir (Kırçay ve Çam).

$$I_{hp} = K\,I_{in} - \frac{\omega_0/Q}{S} I_{hp} - \frac{{\omega_0}^2}{S^2} I_{hp} \tag{4.12}$$

Denklem 4.12'de görüldüğü gibi yüksek geçiren süzgeç çift integratör ve aritmetik bloğu ile tasarlanmaktadır. Denklemin sağındaki ikinci ifade bant geçiren süzgeci, denklemin sağındaki üçüncü ifade ise alçak geçiren süzgeci vermektedir. Denklem 4.12'nin blok şeması Şekil 4.10.'daki gibidir (Kırçay ve Çam).



Şekil 4.10. Logaritmik ortam, evrensel süzgeç blok şeması (Kırçay ve Çam)

Şekil 4.10.'da birinci integratörün çıkışı ($\frac{\omega_0/Q}{S}\ I_{hp}$) bant geçiren süzgeç bağıntısını vermektedir. İkinci integratörün çıkışı ($\frac{{\omega_0}^2}{S^2} I_{hp}$) alçak geçiren süzgeç bağıntısını vermektedir (Kırçay ve Çam). Yüksek geçiren süzgeç bağıntısını elde etmek için ise aritmetik blok kullanılmaktadır. Denklem 4.13'te bant geçiren süzgecin transfer fonksiyonu, Denklem 4.14'te alçak geçiren süzgecin transfer fonksiyonları verilmiştir (Kırçay ve Çam).

$$T_{bp} = \frac{(\omega_0/Q)}{S}\ \frac{I_{hp}}{I_{in}} = \frac{K\,(\omega_0/Q)S}{S^2+S(\omega_0/Q)+{\omega_0}^2} \tag{4.13}$$

$$T_{lp} = \frac{{\omega_0}^2}{S^2}\ \frac{I_{hp}}{I_{in}} = \frac{K{\omega_0}^2}{S^2+S(\omega_0/Q)+{\omega_0}^2} \tag{4.14}$$

Denklem 4.15'te integratöre ait eşitlik verilmiştir. İntegratörün paydasında yer alan s ifadesi; eklendiği devrenin payındaki s ifadeleri ile sadeleşerek yüksek geçiren süzgeçten bant geçiren süzgeci, bant geçiren süzgeçten alçak geçiren süzgeci elde etmekte kullanılmaktadır (Kırçay ve Çam).

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{S} \tag{4.15}$$

Denklem 4.15'te içler dışlar çarpımı yapılırsa;

$$\dot{y} = ku \tag{4.16}$$

$$x_1 = y \tag{4.17}$$

$$\dot{x_1} = ku \tag{4.18}$$

Denklem 4.16, 4.17, 4.18' de *u* giriş *y* çıkış x_1 durum değişkenidir. Denklem 4.18'e Denklem 4.19'daki aktarım fonksiyonları uygulanırsa Denklem 4.20 elde edilir (Kırçay ve Çam).

$$x_1 = I_s\, e^{\frac{V_1}{V_t}}, \qquad u = I_s\, e^{\frac{V_0}{V_t}} \tag{4.19}$$

$$\dot{x} = I_s \frac{1}{V_t} \dot{V_1} e^{\frac{V_1}{V_t}} \quad (4.20)$$

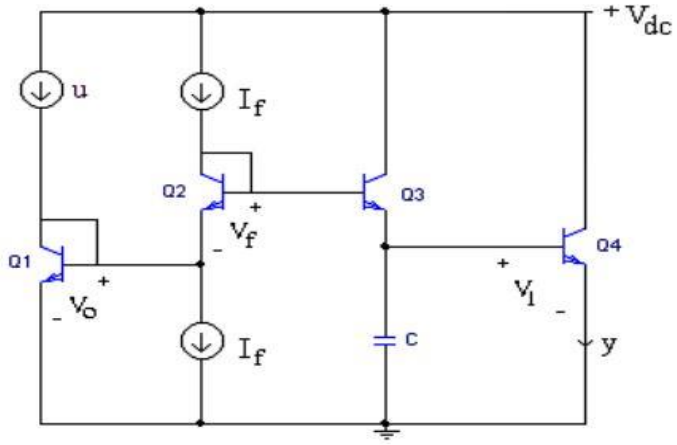
Denklem 4.18'de, Denklem 4.19 ve Denklem 4.20 yerine yazıldıktan sonra Denklem 18'in iki tarafı $CV_t / I_s e^{\frac{V_1}{V_t}}$ ile çarpılırsa Denklem 4.21 elde edilir. Denklem 4.21'in sol tarafı kondansatör akımına, sağ tarafı transistör kollektör akımına benzer (Kırçay ve Çam).

$$C\dot{V_1} = kCV_t e^{\frac{V_0 - V_1}{V_t}} \quad (4.21)$$

kCV_t ifadesine I_f denirse ($I_f = kCV_t$) ve I_f ifadesi $I_f = I_s e^{\frac{V_{f2}}{V_t}}$ şeklinde üstel bağıntıya eşitlenirse Denklem 4.22 elde edilir (Kırçay ve Çam).

$$C\dot{V_1} = I_S e^{\frac{V_0 + V_f - V_1}{V_t}} \quad (4.22)$$

Denklem 4.22'nin sol tarafı bir kondansatör akımını, sağ tarafı transistör akımını ifade eder. Denklem 4.22'ye bağlı tasarlanan integratör Şekil 4.11.'deki gibidir (Kırçay ve Çam).



Şekil 4.11. İntegratör devresi (Kırçay ve Çam)

1. integratör devresinde: $k = \omega_0/Q$ ise $\frac{\omega_0}{Q} = \frac{I_{f1}}{C_1 V_t}$

2. integratör devresinde: $k = \omega_0 Q$ ise $\omega_0 Q = \frac{I_{f2}}{C_2 V_t}$

Devrede üç çıkış bulunmakta bu çıkışlar yüksek geçiren süzgeç, bant geçiren süzgeç ve alçak geçiren süzgeçtir. Denklem 4.23'te yüksek geçiren süzgece ait transfer fonksiyonu, Denklem 4.24'te bant geçiren süzgece ait transfer fonksiyonu ve Denklem 4.25'te alçak geçiren süzgece ait transfer fonksiyonu verilmiştir (Kırçay ve Çam).

$$\frac{I_{hp}}{I_{in}} = \frac{KS^2}{S^2 + S\frac{I_{f1}}{C_1 V_t} + \frac{I_{f1}}{C_1 V_t}\frac{I_{f2}}{C_2 V_t}} \tag{4.23}$$

$$\frac{I_{bp}}{I_{in}} = \frac{KS\frac{I_{f1}}{C_1 V_t}}{S^2 + S\frac{I_{f1}}{C_1 V_t} + \frac{I_{f1}}{C_1 V_t}\frac{I_{f2}}{C_2 V_t}} \tag{4.24}$$

$$\frac{I_{lp}}{I_{in}} = \frac{K\frac{I_{f1}}{C_1 V_t}\frac{I_{f2}}{C_2 V_t}}{S^2 + S\frac{I_{f1}}{C_1 V_t} + \frac{I_{f1}}{C_1 V_t}\frac{I_{f2}}{C_2 V_t}} \tag{4.25}$$

Bu devrelerde;

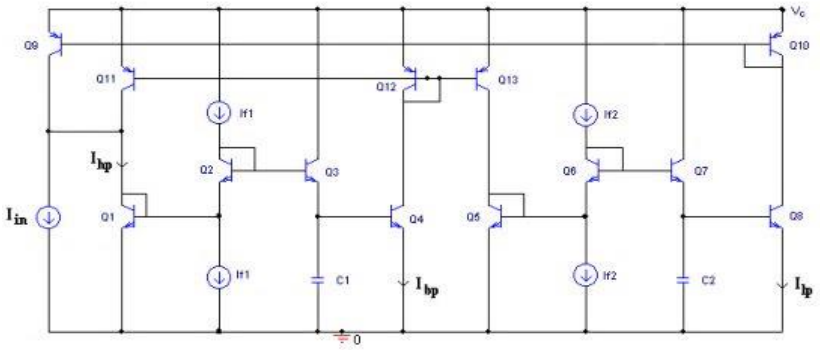
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{I_{f1}}{C_1 V_t}\frac{I_{f2}}{C_2 V_t}} \tag{4.26}$$

$$Q = \sqrt{\frac{I_{f2}}{C_1 V_t} / \frac{I_{f1}}{C_2 V_t}} \tag{4.27}$$

$$k = K \tag{4.28}$$

$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{I_{f1}}{C_1 V_t} \tag{4.29}$$

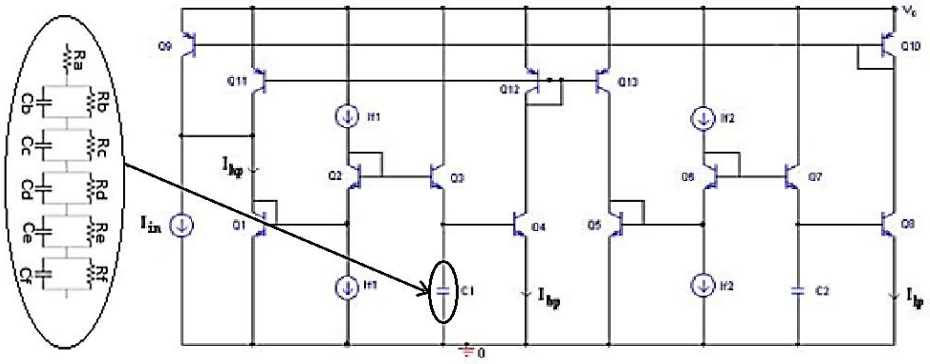
Transfer fonksiyonlarından; kesim frekansı Denklem 4.26'da, kalite faktörü Denklem 4.27'de, kazanç değeri Denklem 4.28'de, bant genişliği Denklem 4.29'da verilmiştir (Kırçay ve Çam). Devre hesaplanan transfer fonksiyonlarına göre integratör bloklarıyla tasarlandığında Şekil 4.12'deki evrensel süzgeç devresi elde edilir (Kırçay ve Çam).



Şekil 4.12. Logaritmik ortam evrensel süzgeç (Kırçay ve Çam)

4.2.7. Logaritmik ortam süzgecine kesirli derecenin uygulanması

Farklı derecelerde süzgeçler üretilebilmektedir. Ancak süzgeçlerde bir üst dereceye çıkmak veya bir alt dereceye inmek için farklı bir süzgeç dizaynı gerekmektedir. Kesirli derecede iki tam sayı arasında, α değerinin hassasiyetine bağlı olarak, istenildiği sayıda süzgeç üretilebilmektedir. Üstelik bunun için yeni bir süzgeç dizaynına gerek kalmadan. Kesirli derece modelinde kullanılan elemanların değerlerinin istenilen α büyüklüğü için hesaplanıp yerine yazılması ve modelin devrede istenilen kapasite yerine konulması yeterlidir. Şekil 4.12.'de verilen devrede C_1 yerine Şekil 3.17.'deki modelin konulması ve istenilen α değerleri için modeldeki elemanlara Çizelge 3.1.'deki değerlerin verilmesi ile kesirli derece elde edilir. Modele kesirli derecenin uygulanışı Şekil 4.13.'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Logaritmik ortam süzgecine kesirli derecenin uygulanışı

Şekil 4.13.'teki gibi devreye kesirli derecenin uygulanmasıyla transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi değişmektedir.

$$H_{HP}^{FO}(s) = \frac{I_{hp}}{I_{in}} = \frac{KS^{\alpha+1}}{S^{\alpha+1}+S^{\alpha}\frac{I_{f1}}{C_1V_t}+\frac{I_{f1}}{C_1V_t}\frac{I_{f2}}{C_2V_t}} \quad (4.30)$$

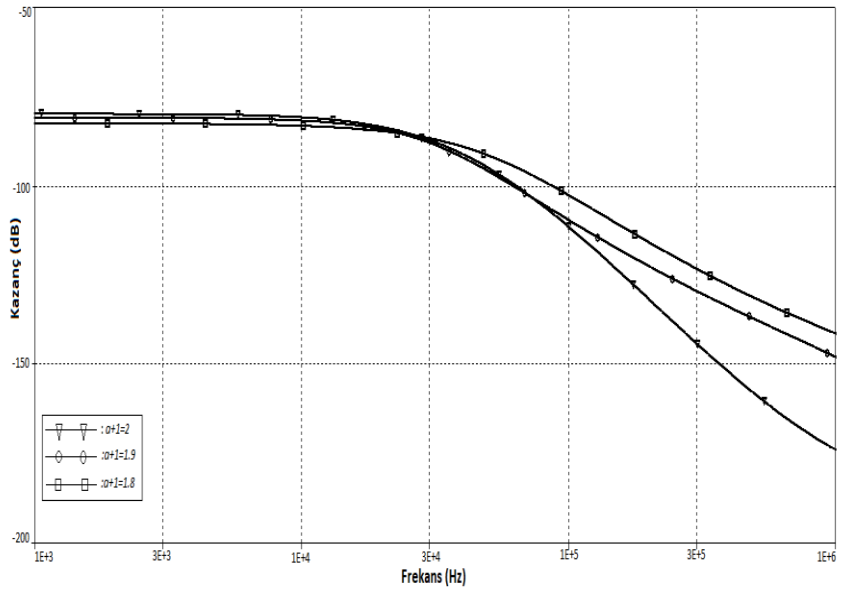
$$H_{BP}^{FO}(s) = \frac{I_{bp}}{I_{in}} = \frac{KS^{\alpha}\frac{I_{f1}}{C_1V_t}}{S^{\alpha+1}+S^{\alpha}\frac{I_{f1}}{C_1V_t}+\frac{I_{f1}}{C_1V_t}\frac{I_{f2}}{C_2V_t}} \quad (4.31)$$

$$H_{LP}^{FO}(s) = \frac{I_{lp}}{I_{in}} = \frac{K\frac{I_{f1}}{C_1V_t}\frac{I_{f2}}{C_2V_t}}{S^{\alpha+1}+S^{\alpha}\frac{I_{f1}}{C_1V_t}+\frac{I_{f1}}{C_1V_t}\frac{I_{f2}}{C_2V_t}} \quad (4.32)$$

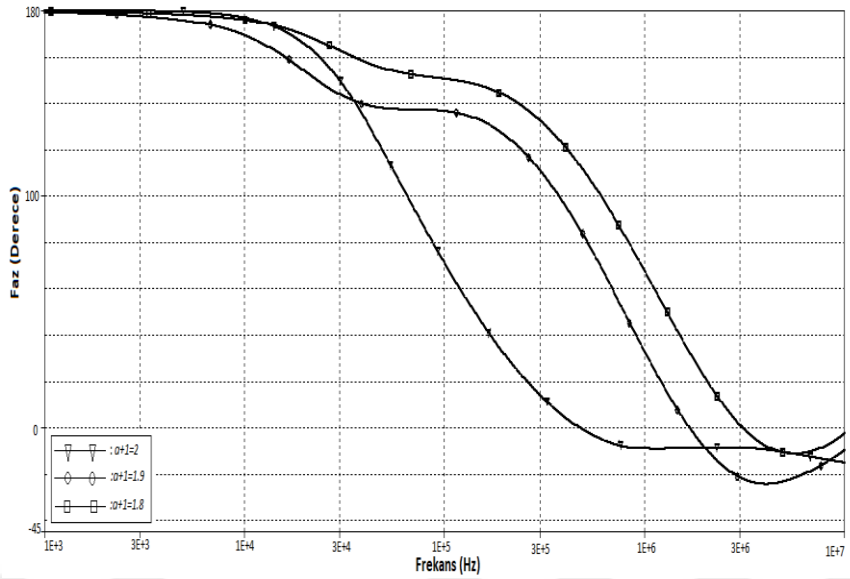
Denklem 4.30'da kesirli derece yüksek geçiren süzgeç, Denklem 4.31'de kesirli derece bant geçiren süzgeç ve Denklem 4.32'de kesirli derece alçak geçiren süzgece ait transfer fonksiyonları verilmiştir.

4.2.8. Kesirli derece logaritmik ortam süzgeç benzetimleri

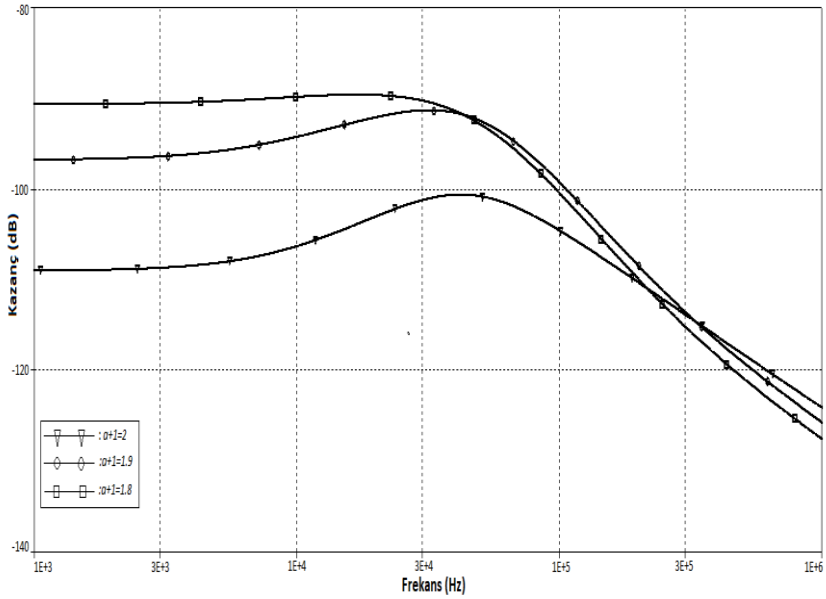
Şekil 4.13'teki devre; $K = 1, VCC = 1.2\ v, V_t = 25.6\ v,\ I_{f1} = 5\mu A,\ I_{f2} = 15\ \mu A,\ C_2 = 300\ pF$ ve AT&T CBIC-R(NR200N-2X NPN, PR200N-2X PNP) transistör modelleri için logaritmik ortam alçak geçiren süzgeç, bant geçiren süzgeç ve yüksek geçiren süzgeçlerin α=0.8, 0.9 değerleri için kazanç ve faz cevapları Pspice programıyla çizdirilmiş, cevaplar ikinci derece süzgeç ile karşılaştırılmıştır.



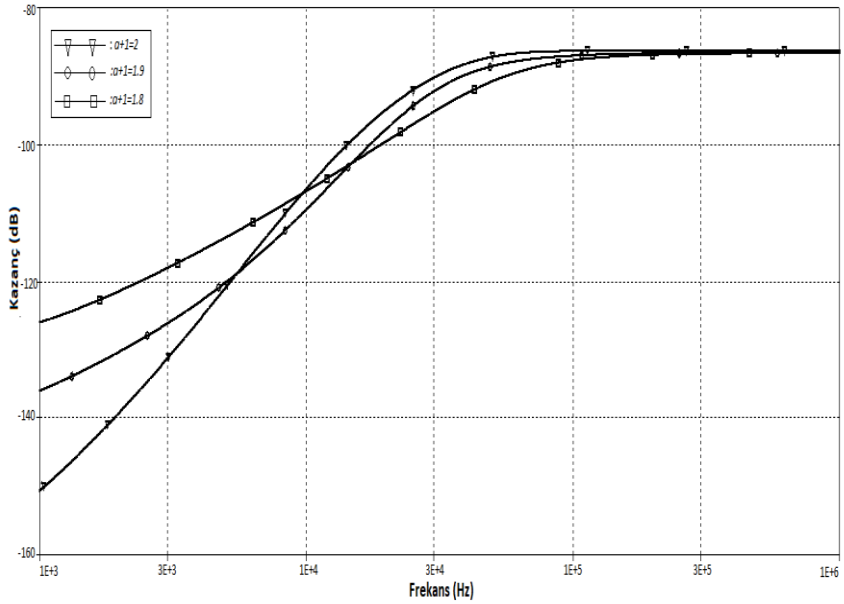
Şekil 4.14.a. Logaritmik ortam kesirli dereceli alçak geçiren süzgeç genlik cevabı (α+1 = 1.8, 1.9 ve 2)



Şekil 4.14.b. Logaritmik ortam kesirli dereceli alçak geçiren süzgeç faz cevabı (α+1 = 1.8, 1.9 ve 2)



Şekil 4.15. Logaritmik ortam kesirli dereceli bant geçiren süzgeç genlik cevabı (α+1 = 1.8, 1.9 ve 2)



Şekil 4.16. Logaritmik ortam kesirli dereceli yüksek geçiren süzgeç genlik cevabı (α+1=1.8, 1.9 ve 2)

Şekil 4.14.a.'da logaritmik ortam alçak geçiren süzgeç kazanç cevabı, Şekil 4.14.b.'de logaritmik ortam alçak geçiren süzgeç faz cevabı, Şekil 4.15.'te logaritmik ortam bant geçiren süzgeç kazanç cevabı, Şekil 4.16.'da logaritmik ortam yüksek geçiren süzgeç kazanç cevabı verilmiştir. Logaritmik ortam süzgeçlerinin düşük güçle çalışması, süzgeç cevaplarının modeldeki yüksek direnç ve kondansatörlerden dolayı çok iyi sonuç vermediği görülmektedir. Buna karşın modelin farklı ortamda üretilen logaritmik ortamlı süzgeçlere kolayca uygulanabildiği görülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

CCII ile akım modlu, evrensel bir süzgeç tasarlanarak α'nın 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 değerleri için devreye kesirli derece modeli uygulanmış, başarılı sonuçlar (Şekil 4.1a,b,c,d,e,f,g, Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4.) elde edilmiştir. Bununla beraber kesirli derecelerin farklı ortamlarda tasarlanan devrelere uygulanabildiğini göstermek için logaritmik ortamda üretilen evrensel, akım modlu bir süzgece (Kırçay ve Çam) kesirli derece modeli uygulanarak sonuçlar analiz edilmiştir. Ulaşılan sonuçlar (Şekil 4.14a,b, Şekil 4.15., Şekil 4.16.) kesirli derece modelinin tüm devrelere uygulanabildiğini göstermiştir. Analiz sonuçları ve benzetimler değerlendirildiğinde kesirli derece uygulamasının avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanır.

Avantajları:

- Devre yapısı değişmeden, devrenin çok sayıda tepki verebilmesini sağlamaktadır. İki tam sayı arasında α değerinin hassasiyetine bağlı olarak sonsuz sayıda farklı tepki verebilen süzgeç tasarlanabilmektedir (Şekil 4.1a, Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4.).
- Sağladığı esneklik sayesinde süzgeçlere cevaplarındaki istenmeyen dalgalanmaları, süzgeç tepkisini en az değiştirecek şekilde düzeltmeye imkan sağlamaktadır (Şekil 4.1a, Şekil 4.3.).
- Kesirli derece uygulaması için yeni bir devre tasarımına gerek kalmadan mevcut süzgece modelin uygulanmasıyla kesirli derece sağlanabilmektedir (Şekil 3.20., Şekil 4.12.).
- Yüksek dereceli süzgeçler tasarlamak yerine istenilen cevaplar düşük dereceli, kesirli dereceli süzgeçler ile elde edilebilmektedir.
- Her devreye uygulanabilmektedir. Pasif elemanlı devrelere (Radvan ve ark. , 2007), aktif elemanlı devrelere (Freeborn ve ark., 2014), gerilim modlu devrelere (Freeborn, 2015), akım modlu devrelere (Bertsias ve ark., 2019) başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu çalışmada da tamamen farklı bir tasarım

yöntemi gerektiren logaritmik ortamlı evrensel bir süzgece (Kırçay ve Çam) kesirli derece başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Şekil 4.14a,b, Şekil 4.15., Şekil 4.16.).

Dezavantajları:

- Kesirli derece uygulaması süzgeç derecesini düşürdüğü için geçiş bandını genişletmektedir (Şekil 4.1b).
- Kesirli derece modelinde (Şekil 3.11.) çok sayıda eleman kullanılması ve bu eleman değerlerinin yüksek olması (Çizelge 3.1.) devrede güç tüketimine ve gürültüye neden olmaktadır.

5.2. Öneriler

Bu dezavantajların giderilmesi amacıyla kesirli derece modelinde iyileştirmelerde bulunacak çalışmaların yapılması ümit edilmektedir. Kesirli derece modelinde;

- Kapasite değerlerinin düşürülmesi
- Direnç değerlerinin düşürülmesi
- α değerinin hassasiyetini düşürmeden modeldeki eleman sayısının düşürülmesi
- Modeldeki elemanların değerlerinin elektronik olarak ayarlanabilmesi

şeklinde yapılan iyileştirmeler modeli ve uygulanışını daha kullanışlı hale getirecektir.

KAYNAKLAR

GİLBERT, B., 1975. Translinear circuits: A proposed classification. Electronics letters, 11(1): 14-16.

WİLSON, B., 1989. Analogue Current Mode Circuits. Int. J. Elect. Enging Educ., 26(3):206-223.

FREY, D. R., 1993. A General Class Of Current Mode Filter IEEE International Symposium on Circuits and Systems. pp. 1435- 1438.

VİNAGRE, B. M., PODLUBNY, I., HERNANDEZ, A. ve FELİU, V., 2000. Some approximations of fractional order operators used in control theory and applications. Fractional calculus and applied analysis, 3(3):231-248.

PODLUBNY, I., PETRAS, I., VİNAGRE, B. M., O'LEARY, P. ve DORCAK L., 2002. Analogue realizations of fractional-order controllers. Nonlinear Dynamics, 29(1):281-296.

ARSLANALP, R., 2003. Logaritmik ortamda eliptik süzgeç yaklaşımının gerçeklenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 159s.

YILMAZ, Ş. S., 2005. Logaritmik ortam süzgeçlerinin sistematik sentezi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 150s.

KIRÇAY, A. ve ÇAM, U., 2007. State-space synthesis of current-mode first-order log-domain filters. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 14(3):399-416.

RADWAN, A. G., SOLİMAN, A. M. ve ELWAKİL, A. S., 2008. First-order filters generalized to the fractional domain. Journal of Circuits, Systems, and Computers, 17(01):55-66.

RADWAN, A., ELWAKİL, A. ve SOLİMAN, A., 2008. Fractional-order sinusoidal oscillators: Design procedure and practical examples. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 55(7):2051-2063.

MAUNDY, B., ELWAKİL, A. S. ve FREEBORN, T. J., 2011. On the practical realization of higher-order filters with fractional stepping. *Signal Processing*, 91(3):484-491.

RADWAN, A. G., SHAMİM, A. ve SALAMA, K. N., 2011. Theory of fractional order elements based impedance matching Networks. IEEE Microw Wireless Comp Lett, 21(3):120-122.

DİNDAR, M., 2013. Video frekans uygulamaları için A sınıfı logaritmik ortam eliptik süzgeç tasarımı. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli, 102s.

ALİ, A. S., RADWAN, A. G. ve SOLİMAN, A. M., 2013. Fractional order Butterworth filter: active and passive realizations. IEEE journal on emerging and selected topics in circuits and systems, 3(3):346-354.

FREEBORN, T., MAUNDY, B. ve ELWAKİL, A. S., 2015. Approximated fractional order Chebyshev lowpass filters. Mathematical Problems in Engineering.

FREEBORN, T. J., 2016. Comparisonof (1 + α) Fractional-Order Transfer Functions to Approximate Lowpass Butterworth Magnitude Responses. Circuits, Systems and Signal Processing, 35(6):1983-2002.

KUBANEK, D. ve FREEBORN, T., 2018. (1+ α) fractional-order transfer functions to approximate low-pass magnitude responses with arbitrary quality factor. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 83:570-578.

ABDELATY, A. M., RADWAN, A. G., ELWAKİL, A. S. ve PSYCHALİNOS, C., 2018. Transient and steady-state response of a fractional-order dynamic PV model under different loads. Circuits Syst, 27(02):1850023.

DVORAK, J., JERABEK, J., POLESAKOVA, Z., KUBANEK, D. ve BLAZEK, P., 2019. Multifunctional Electronically Reconfigurable and Tunable Fractional-Order Filter. Elektronika ir Elektrotechnika, 25(1):26-30.

BERTSİAS, P., PSYCHALİNOS, C., ELWAKİL, A. S. ve MAUNDY, B., 2019. Minimum MOS Transistor Count Fractional-Order Voltage-Mode and Current-Mode Filters. Technologies, 7(4):85.

ŞEN, F., 2019. Akım taşıyıcılar kullanılarak kesirli dereceli evrensel süzgeç tasarımının gerçekleştirilmesi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa, 86s.

KIRÇAY, A. ve ÇAM, U., Akım Modlu, Çok Fonksiyonlu Logaritmik Ortam Süzgeç Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi.

ŞEN, F. ve KIRÇAY, A., 2021. MO-CCCII Based Current-Mode Fractional-Order Universal Filter. Journal of Circuits, Systems and Computers, 30(08):2150132.

EKLER

EK 1: Pspice için kullanılan AT & T CB IC- R transistör modeli (Kırçay ve Çam, 2007)

*NR200N-2X NPN TRANSISTOR
.MODEL NX2 NPN (Rb=262.5 Irb=0 Rbm=12.5 Rc=25 Re=0.5 Bf=137.5
+ Is=242E-18 Eg=1.206 Xti=2 Xtb=1.538 Ikf=13.94E-3 Br=0.7258 Nf=1
+ Vaf=159.4 Ise=72E-16 Ne=1.713 Ikr=4.396E-3 Nr=1.0 Var=10.73 Isc=0 Nc=2
+ Tf=0.43E-9 Tr=0.43E-8 Cje=0.428E-12 Vje=0.5 Mje=0.28 Cjc=1.97E-13
+ Vjc=0.5 Mjc=0.3 Xcjc=0.065 Cjs=1.17E-12 Vjs=0.64 Mjs=0.4 Fc=0.5

*PR200N-2X PNP TRANSISTOR
.MODEL PX2 PNP (Rb=163.5 Irb=0 Rbm=12.27 Rc=25 Re=1.5 Bf=110
+ Is=147E-18 Eg=1.206 Xti=1.7 Xtb=1.866 Ikf=4.718E-3 Br=0.04745 Nf=1
+ Vaf=51.8 Ise=50.2E-16 Ne=1.65 Ikr=12.96E-3 Nr=1.0 Var=9.96 Isc=0 Nc=2
+ Tf=0.610E-9 Tr=0.610E-8 Cje=0.36E-12 Vje=0.5 Mje=0.28 Cjc=0.328E-13
+ Vjc=0.8 Mjc=0.4 Xcjc=0.074 Cjs=1.39E-12 Vjs=0.55 Mjs=0.35 Fc=0.5)