n. DERECEDEN GERİLİM/AKIM TRANSFER FONKSİYONLARININ CFA KULLANILARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

MUHAMMET CİHAT MUMCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Danışman: Prof. Dr. Fuat ANDAY

İstanbul
T.C. Maltepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Temmuz, 2018

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Muhammet Cihat MUMCU'nun "N. Dereceden Gerilim/Akım Transfer Fonksiyonlarının Cfa Kullanılarak Gerçekleştirilmesi" başlıklı tezi 03.08.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans/~~Doktora~~ tezi **oy birliğiyle** ~~/ oy çokluğuyla~~ olarak kabul edilmiştir.

Unvanı. Adı ve Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :Prof.Dr. Üyesi Fuat ANDAY	.....
Üye :Doç.Dr. Serkan TOPALOĞLU	.....
Üye :Dr.Öğr. Üyesi Burhan Demir ÖNER	.....

Prof.Dr. İlter BÜYÜKDIĞAN

Enstitü Müdürü

	ŞEKİL ONAY SAYFASI	Doküman No	FR-105
		İlk Yayın Tarihi	20.12.2017
		Revizyon Tarihi	
		Revizyon No	
		Sayfa	1/2

Revizyon Takip Tablosu

REVİZYON NO	TARİH	AÇIKLAMA
00	20.12.2017	İlk yayın.

ŞEKİL ONAY SAYFASI

07/08/2018

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE,

Aşağıda bilgileri bulunan lisansüstü öğrencinin tezi şekil yönünden tarafımca incelenmiş ve Enstitüye teslim edilmesi uygun bulunmuştur.

Velilerden
Doç. Dr. Nevin Taşdelen
Anabilim Dalı Başkanı
Adı-Soyadı
İmza

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI SOYADI	Muhammet Cihat MUMCU
ÖĞRENCİ NUMARASI	151405101
ANABİLİM DALI	Elektrik Elektronik
PROGRAMI	(X) YÜKSEK LİSANS ( ) DOKTORA ( ) SANATTA YETERLİK
DANIŞMANI	Prof. Dr. Fuat ANDAY
TEZ BAŞLIĞI	n. Dereceden Gerilim/Akım Transfer Fonksiyonlarının CFA Kullanılarak Gerçekleştirilmesi
SAVUNMA TARİHİ	03.08.2018
e-posta	m.cihatmumcu@gmail.com

İç Kapak	☒ Var ☐ Yok
Jüri Onay Sayfası	☒ Var ☐ Yok
Etik İlke ve Kurallara Uyum Beyanı	☒ Var ☐ Yok

Hazırlayan İlgili Birim	Kalite Koordinatörü Dr. Öğr. Üyesi Şafak GÜNDÜZ	Kurumsal Yetkili Prof. Dr. Belma AKŞİT

(Doküman No: FR-105; Yayın Tarihi 20.12.2017; Revizyon Tarihi: ; Revizyon No:00)

	ŞEKİL ONAY SAYFASI	Doküman No	FR-105
		İlk Yayın Tarihi	20.12.2017
		Revizyon Tarihi	
		Revizyon No	
		Sayfa	2/2

İntihal Raporu	☒ Var ☐ Yok
Teşekkür Sayfası	☒ Var ☐ Yok
Öz (Başlık-Öz-Anahtar Sözcükler)	☒ Var ☐ Yok
Abstract (Title-Abstract-Key Words)	☒ Var ☐ Yok
İçindekiler	☒ Var ☐ Yok
Çizelgeler Listesi	☒ Var ☐ Yok
Şekiller Listesi (varsa)	☐ Şekil yok ☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Kısaltmalar Listesi	☒ Var ☐ Yok
Tablolar Listesi (varsa)	☐ Tablo yok ☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Ekler Listesi (varsa)	☐ Ek yok ☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Özgeçmiş	☒ Var ☐ Yok
Sayfa Genişliği	☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Yazı Tipi	☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Referans Kullanımı	☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Kaynakça Yazımı	☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir
Ekler (varsa)	☐ Ek yok ☒ Uygundur ☐ Uygun Değildir

Hazırlayan İlgili Birim	Kalite Koordinatörü Dr. Öğr. Üyesi Şafak GÜNDÜZ	Kurumsal Yetkili Prof. Dr. Belma AKŞİT

(Doküman No: FR-105; Yayın Tarihi 20.12.2017; Revizyon Tarihi: ; Revizyon No:00)

maltepe üniversitesi	ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI	Doküman No	FR-178
		İlk Yayın Tarihi	01.03.2018
		Revizyon Tarihi	
		Revizyon No	00
		Sayfa	1/1

Revizyon Takip Tablosu

REVİZYON NO	TARİH	AÇIKLAMA
00	01.03.2018	İlk yayın.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI

07/08/2018

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarından bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilmeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; çalışmanın Maltepe Üniversitesinde kullanılan "bilimsel intihal tespit programı" ile tarandığını ve öngörülen standartları karşıladığını beyan ederim.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

M. Cihat

Muhammet Cihat MUMCU

nth-order

ORIGINALITY REPORT

15%	5%	2%	11%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Akdeniz University Student Paper	7%
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Student Paper	3%
3	acikarsiv.ankara.edu.tr Internet Source	1%
4	nlab.ee.tokushima-u.ac.jp Internet Source	1%
5	www.ehm.yildiz.edu.tr Internet Source	1%
6	polen.itu.edu.tr Internet Source	1%
7	Gunes, E.. "An nth-order allpass voltage transfer function synthesis using commercially available active components", Microelectronics Journal, 199909 Publication	<1%

Current Conveyors, 2015.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bana yol gösteren, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve akademik hayatım boyunca kendisini örnek alacağım çok değerli hocam Prof. Dr. Fuat ANDAY'a, akademik hayata ilk adımı atmamamı sağlayan ve yaptığım tüm çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Fatma SARICA'ya, yüksek lisans öğrenimim süresince destekleriyle beni motive eden Maltepe Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünün kıymetli hocalarına, hayatımın her evresinde bana rehberlik eden, maddi manevi desteklerini bir an olsun eksiltmeyen aileme ve her zaman yanımda olan eşime en içten sevgi,saygı ve teşekkürlerimle…

Muhammet Cihat MUMCU

07/2018

ÖZ

n. DERECEDEN GERİLİM/AKIM TRANSFER FONKSİYONLARININ CFA İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Muhammet Cihat MUMCU
Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı
Danışman: Prof. Dr. Fuat ANDAY
Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018

Bu tezde, işaret akış diyagramı yönteminden yararlanılarak, n. dereceden gerilim ve akım transfer fonksiyonlarının CFA elemanı ile gerçekleştirilmesi konusu ele alınmıştır. İlk olarak CFA elemanı tanıtılmış, bu aktif elemanın temel özelllikleri ve CFA'lı temel devreler incelenmiştir. n. dereceden gerilim ve akım transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla, önce CFA elemanlı bir temel alt-devre verilmiş, alt-devrenin analizi yapılarak, alt-devreye karşılık düşen alt-graf elde edilmiştir. Bu alt-graftan oluşan, n. dereceden gerilim ve akım transfer fonksiyonlarının işaret akış diyagramları elde edilmiş ve bu işaret akış diyagramlarına karşılık düşen aktif devreler verilmiştir. Örnek olarak üçüncü dereceden Butterworth tipi hem gerilim hem de akım modlu alçak geçiren, yüksek geçiren, band söndüren, band geçiren ve tüm geçiren filtre fonksiyonları gerçekleştirilmiş ve PSPICE programı ile simülasyonları yapılmıştır.

Anahtar Sözcükler: 1. Gerilim/Akım modlu devreler ; 2. CFA; 3. İşaret akış diyagramı

ABSTRACT

REALIZATION OF NTH-ORDER VOLTAGE/CURRENT TRANSFER FUNCTIONS USING CFA

Muhammet Cihat MUMCU
Master Thesis
Electrical and Electronic Engineering Programme
Thesis Advisor: Prof. Dr. Fuat ANDAY
Graduate School of Natural and Applied Science of Maltepe University, 2018

In this thesis, voltage and current transfer functions were realized with CFA element by using the signal flow graph method. Firstly, CFA element had been introduced, basic features and circuits of CFA are examined.The sub-circuit of CFA was given and sub-circuit analysis was performed to obtain the corresponding sub-graph to the sub-circuit according to the definition of CFA in order to realize the nth-order voltage and current transfer functions.Signal flow graphs, which consist of sub-graph of CFA, are obtained and active circuits corresponding to these signal flow graphs are given. Current mode and voltage mode third-order Butterworth-type lowpass, highpass, band reject, band pass and all pass filter functions have been realized as an example and simulations of these have been performed by using PSPICE program.

Keywords: 1. Voltage/Current mode circuits ; 2. CFA; 3. Signal flow graph

İÇİNDEKİLER

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI 2
ŞEKİL ONAY SAYFASI 3
İLKE VE KURALLARA UYUM BEYANI 5
İNTİHAL RAPORU 6
TEŞEKKÜR 7
ÖZ 8
ABSTRACT 9
İÇİNDEKİLER 10
TABLOLAR LİSTESİ 12
ŞEKİLLER LİSTESİ 13
SİMGELER 16
KISALTMALAR 17
ÖZGEÇMİŞ 18
BÖLÜM 1. GİRİŞ 19
1.1 Tez Konusunun Kapsamı 21
1.2 Tez Konusu İle İlgili Çalışmalar 21
BÖLÜM 2. AKIM GERİBESLEMELİ KUVVETLENDİRİCİ (CFA) 25
2.1 AD844 Aktif Elemanı 26
2.2 CFA İle Gerçekleştirilen Temel Devreler 28
2.2.1 Tek Girişli Gerilim Kuvvetlendirici Devresi 28
2.2.2 Genel *n* Girişli Gerilim Toplayıcı Devresi 29
2.2.3 Genel Bir Girişli Akım Kuvvetlendirici Devresi 30
2.2.4 Gerilim Kontrollü Gerilim Kaynağı (GKGK) 31
2.2.5 Gerilim Kontrollü Akım Kaynağı (GKAK) 32
2.2.6 Akım Kontrollü Gerilim Kaynağı (AKGK) 32
2.2.7 Akım Kontrollü Akım Kaynağı (AKAK) 33

BÖLÜM 3. n. DERECEDEN AKTİF SÜZGEÇ DEVRELERİNİN ELDE EDİLMESİ 34
3.1 n. Dereceden Gerilim Modlu Aktif Filtre Sentezi 35
3.2 n. Dereceden Akım Modlu Aktif Filtre Sentezi 40
BÖLÜM 4. ÜÇÜNCÜ DERECEDEN BUTTERWORTH TİPİ GERİLİM VE AKIM MODLU FİLTRE UYGULAMARINA İLİŞKİN ÖRNEKLER 44
4.1 Gerilim Modlu Filtre Devreleri 44
4.1.1 Gerilim Modlu Alçak Geçiren Filtre Sentezi 44
4.1.2 Gerilim Modlu Yüksek Geçiren Filtre Sentezi 47
4.1.3 Gerilim Modlu Band Geçiren Filtre Sentezi 49
4.1.4 Gerilim Modlu Band Söndüren Filtre Sentezi 54
4.1.5 Gerilim Modlu Tüm Geçiren Filtre Sentezi 56
4.2 Akım Modlu Filtre Devreleri 59
4.2.1 Akım Modlu Alçak Geçiren Filtre Sentezi 59
4.2.2 Akım Modlu Yüksek Geçiren Filtre Sentezi 61
4.2.3 Akım Modlu Band Geçiren Filtre Sentezi 64
4.2.4 Akım Modlu Band Söndüren Filtre Sentezi 68
4.2.5 Akım Modlu Tüm Geçiren Filtre Sentezi 70
BÖLÜM 5. SONUÇLAR 73
EK 75
KAYNAKÇA 76

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Genel bir girişli gerilim modlu temel devreler. 29
Tablo 2.2 Genel bir girişli akım modlu temel devreler. 31

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 CFA elemanın sembölü 25
Şekil 2.2 AD844 blok diyagramı. 26
Şekil 2.3 AD844 sadeleştirilmiş devre şeması 27
Şekil 2.4 Tek girişli genel gerilim kuvvetlendirici devresi ve işaret akış diyagramı 28
Şekil 2.5 n girişli genel gerilim toplayıcı devresi ve işaret akış diyagramı. 29
Şekil 2.6 Tek girişli genel akım kuvvetlendirici devresi ve işaret akış diyagramı. 30
Şekil 2.7 CFA ile gerçekleştirilen GKGK devresi. 31
Şekil 2.8 CFA ile gerçekleştirilen GKAK devresi. 32
Şekil 2.9 CFA ile gerçekleştirilen AKGK devresi 32
Şekil 2.10 CFA ile gerçekleştirilen AKAK devresi. 33
Şekil 3.1 Akım/Gerilim modlu alt devre 34
Şekil 3.2 Akım/Gerilim modlu alt-graf 35
Şekil 3.3 n çift için - Q(s) payda polinomunu sağlayan işaret akış diyagramı. 36
Şekil 3.4 n tek için Q(s) payda polinomunu sağlayan işaret akış diyagramı. 36
Şekil 3.5 n çift için a_n kazançlı ileri yola sahip işaret akış diyagramı. 37
Şekil 3.6 n tek için a_n kazançlı ileri yola sahip işaret akış diyagramı. 37
Şekil 3.7 n çift için - G(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 38
Şekil 3.8 n tek için - G(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 38
Şekil 3.9 n çift için $G(s) = -P(s)/Q(s)$ transfer fonksiyonu devresi. 39
Şekil 3.10 n tek için $G(s) = -P(s)/Q(s)$ transfer fonksiyonu devresi. 39
Şekil 3.11 n çift için - α(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 40
Şekil 3.12 n tek için - α(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı 41
Şekil 3.13 n çift için $\alpha(s) = -P(s)/Q(s)$ fonksiyonuna ilişkin devre. 41
Şekil 3.14 n tek için $\alpha(s) = -P(s)/Q(s)$ fonksiyonuna ilişkin devre. 42
Şekil 4.1 Alçak geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 44
Şekil 4.2 Gerilim modlu alçak geçiren filtre devresi. 45
Şekil 4.3 Gerilim modlu alçak geçiren filtre devresinin genlik grafiği. 46
Şekil 4.4 Gerilim modlu alçak geçiren filtre devresinin faz grafiği. 46
Şekil 4.5 Yüksek geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 47

Şekil 4.6 Gerilim modlu yüksek geçiren filtre devresi. 47
Şekil 4.7 Gerilim modlu yüksek geçiren filtre devresinin genlik grafiği. 48
Şekil 4.8 Gerilim modlu yüksek geçiren filtre devresinin faz grafiği. 49
Şekil 4.9 Eşitlik (4.5)'teki band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 49
Şekil 4.10 Eşitlik (4.6)'daki band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 50
Şekil 4.11 (4.5) fonksiyonunu gerçekleyen gerilim modlu band geçiren filtre devresi.. 50
Şekil 4.12 (4.6) fonksiyonunu gerçekleyen gerilim modlu band geçiren filtre devresi.. 51
Şekil 4.13 Şekil 4.10'daki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği 52
Şekil 4.14 Şekil 4.10'daki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği..... 52
Şekil 4.15 Şekil 4.11'deki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği 53
Şekil 4.16 Şekil 4.11'deki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği..... 53
Şekil 4.17 Band söndüren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 54
Şekil 4.18 Gerilim modlu band söndüren filtre devresi. 54
Şekil 4.19 Gerilim modlu band söndüren filtre devresinin genlik grafiği. 55
Şekil 4.20 Gerilim modlu band söndüren filtre devresinin faz grafiği. 56
Şekil 4.21 Tüm geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 56
Şekil 4.22 Gerilim modlu tüm geçiren filtre devresi. 57
Şekil 4.23 Gerilim modlu tüm geçiren filtre devresinin genlik grafiği. 58
Şekil 4.24 Gerilim modlu tüm geçiren filtre devresinin faz grafiği. 58
Şekil 4.25 Akım modlu alçak geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı 59
Şekil 4.26 Akım modlu alçak geçiren filtre devresi..... 59
Şekil 4.27 Akım modlu alçak geçiren filtre devresinin genlik grafiği..... 60
Şekil 4.28 Akım modlu alçak geçiren filtre devresinin faz grafiği. 61
Şekil 4.29 Akım modlu yüksek geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı..... 61
Şekil 4.30 Akım modlu yüksek geçiren filtre devresi. 62
Şekil 4.31 Akım modlu yüksek geçiren filtre devresinin genlik grafiği. 63
Şekil 4.32 Akım modlu yüksek geçiren filtre devresinin faz grafiği. 63
Şekil 4.33 Eşitlik (4.11)'deki Akım modlu band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 64

Şekil 4.34 Eşitlik (4.12)'deki akım modlu band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. 64
Şekil 4.35 (4.11) fonksiyonunu gerçekleyen akım modlu band geçiren filtre devresi. . 65
Şekil 4.36 (4.12) fonksiyonunu gerçekleyen akım modlu band geçiren filtre devresi ... 65
Şekil 4.37 Şekil 4.34'deki akım modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği. ... 66
Şekil 4.38 Şekil 4.34'deki akım modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği. 66
Şekil 4.39 Şekil 4.35'deki akım modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği 67
Şekil 4.40 Şekil 4.35'deki akım modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği. 67
Şekil 4.41 Akım modlu band söndüren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı 68
Şekil 4.42 Akım modlu band söndüren filtre devresi. 68
Şekil 4.43 Akım modlu band söndüren filtre devresinin genlik grafiği. 69
Şekil 4.44 Akım modlu band söndüren filtre devresinin faz grafiği 70
Şekil 4.45 Akım modlu tüm geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı. . 70
Şekil 4.46 Akım modlu tüm geçiren filtre devresi. 71
Şekil 4.47 Akım modlu tüm geçiren filtre devresinin genlik grafiği. 72
Şekil 4.48 Akım modlu tüm geçiren filtre devresinin faz grafiği. 72

SİMGELER

C	**:** Kapasite
$\hat{C}$	**:** Ölçeklenmiş kapasite
f_c	**:** Köşe frekansı
I	**:** Akım
L	**:** Endüktans
R	**:** Direnç
$\hat{R}$	**:** Ölçeklenmiş direnç
V	**:** Gerilim
Y	**:** Admittans

KISALTMALAR

AC	**:** Alternative Current (Alternatif Akım)
AKAK	**:** Akım Kontrollü Akım Kaynağı
AKGK	**:** Akım Kontrollü Gerilim Kaynağı
CC	**:** Current Conveyor (Akım Taşıyıcı)
CCII	**:** Second Generation Current Conveyor (II. Nesil Akım Taşıyıcı)
CDBA	**:** Current Differencing Buffered Amplifier (Gerilim İzleyicili Akım Fark Kuvvetlendiricsi)
CFA	**:** Current Feedback Amplifier (Akım Geribeslemeli Kuvvetlendirici)
CFCCII	**:** Current Follower Second Generation Current Conveyor (Akım İzleyicili II. Nesil Akım Taşıyıcı)
CFTA	: Current Follower Transconductance Amplifier (Akım İzleyicili Geçişiletkenliği Kuvvetlendiricisi)
CMOS	**:** Complimentary Metal Oxide Semiconductor
DVCC	: Differential Voltage Current Conveyor (Farksal Gerilim Akım Taşıyıcı)
ECII	: Electronically Tunable Second Generation Current Conveyor (Elektronik olarak ayarlanabilen II. Nesil Akım Taşıyıcı)
GKAK	: Gerilim Kontrollü Akım Kaynağı
GKGK	**:** Gerilim Kontrollü Gerilim Kaynağı
MTC	**:** Mixed Translineer Cell (Karışık Translineer Hücre)
MOCCII	: Multiple Output Second Generation Current Conveyors (Çok çıkışlı II. Nesil Akım Taşıyıcı)
OPAMP	**:** Operational Amplifier (İşlemsel Kuvvetlendirici)
OTA	: Operational Transconductance Amplifier (İşlemsel Geçişiletkenliği Kuvvetlendiricisi)

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet Cihat MUMCU

Elektrik Elektronik Mühendisliği

Eğitim

Derece	*Yıl*	*Üniversite, Enstitü, Anabilim/Anasanat Dalı*
Y.Ls.	2018	Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği, İSTANBUL
Ls.	2015	Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği (İngilizce),GAZİANTEP
Lise	2009	Gülkent Anadolu Lisesi, ISPARTA

İş/İstihdam

Yıl	*Görev*
2016 -	Araştırma Görevlisi - Maltepe Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
2015- 16	Test Mühendisi -Yupana Telekomünikasyon A.Ş

Mesleki Birlik/Dernek Üyelikleri

Yıl	*Kurum*
2015 -	Üye: EMO
2018 -	Üye: IEEE

Kişisel Bilgiler

Doğum yeri ve yılı : Şanlıurfa / 26.01.1992 Cinsiyet:Erkek
Yabancı diller : İngilizce
GSM / e-posta : 0 543 305 19 92 / m.cihatmumcu@gmail.com

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik-Elektronik devrelerinde en çok kullanılan analog devrelerin başında filtreler gelir. Pasif direnç, endüktans ve kapasite elemanlarıyla gerçekleştirilen filtre devreleri, endüktans elemanının; yüksek frekanslarda lineer olmaması, histerisiz etkisi, çekirdek kayıpları, istenmeyen kuplajları, alçak frekanslarda büyük boyutu, üretim güçlüğü gibi çeşitli dezavantajlarından dolayı, tasarımcıları farklı çalışmalar yapmaya zorlamış ve aktif devre elemanlarının bulunmasına sebep olmuştur. Tümdevre teknolojisinin gelişmesiyle birlikte çok küçük hacimlere sığdırılmış, değişik yapılarda aktif devre elemanları ortaya çıkmıştır. Aktif devre elemanları, filtre tasarımında köklü değişikliklere neden olmuşlardır. Bunların başında pasif direnç, endüktans, kapasite elemanlarıyla gerçekleştirilen filtre devrelerinin, aynı zamanda aktif elemanlarla birlikte sadece kapasite elemanları (Aktif-C), sadece direnç elemanları (Aktif-R) ya da bunların her ikisi birden kullanılarak da tüm filtre tiplerinin gerçekleştirilmesi gelir (Sedef, 1994). Analog elektronik devre tasarımında uzun yıllar boyunca gerilim modlu işlemsel kuvvetlendiriciler (OPAMP) temel devre elemanı olarak kullanılagelmiştir. Gerilim modlu OPAMP'lar, analog devre tasarımında yaygın olarak kullanılsa da belli başlı dezavantajlar göstermektedir. Bu dezavantajlar kısaca şu şekilde özetlenebilir:

a) Kazanç-Bant Genişliği (KBG) çarpımının sabit olması. Belli bir frekansta veya bant genişliğinde çalışması istenilen bir OPAMP devresinin maksimum kazancı, KBG çarpımının sabit olması nedeniyle sınırlanmıştır.

b) Değişim oranının (Slew Rate) düşük olması. OPAMP içeren bir devrede, girişte meydana gelen bir değişmenin çıkışa yansıma hızı düşüktür.

c) OPAMP'ların dinamik çalışma aralığının sınırlı olması ve düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda kullanımlarının zor olması.

Yukarıda verilen dezavantajları içeren gerilim modlu devrelerin alternatifi olarak akım modlu olarak çalışan, giriş ve çıkış işaretleri akım cinsinden olan akım taşıyıcılar ve akım taşıyıcı tabanlı aktif devre elemanları önerilmiştir (Demirtaş, 2014).

Akım taşıyıcı tabanlı aktif devre elemanlarının başında akım geribeslemeli kuvvetlendiriciler (CFA) gelmektedir. Daha geniş bant aralığında çalışabilme, yüksek değişim oranı (slew rate), yüksek frekanslarda daha verimli çalışabilme, dinamik

çalışma alanının daha büyük olması, düşük güç gereksinimi gibi özelliklerinden dolayı CFA'nın literatürde yaygın olarak kullanılmaya başladığı görülmektedir. Bu tezde de CFA elemanı kullanılarak n. dereceden akım ve gerilim transfer fonksiyonları gerçekleştirilmiştir.

Elektrik-elektronik devrelerinin tasarlanması ve bu devrelerdeki elemanlara ilişkin devre parametrelerinin hesabı devre sentezinin konusudur. Devre sentezi aktif ve pasif devre sentezi olarak iki kısımda incelenebilir. Pasif devre sentezinde, sadece pasif devre elemanları kullanılarak devreler sentezlenir. Aktif devre sentezinde ise, pasif devre elemanlarına ek olarak en az bir aktif eleman kullanılarak devreler sentezlenmektedir.

Aktif devre sentezinde sunulan yöntemler kendi aralarında iki gruba ayrılabilir (Anday F. , 1981).

Bunlar;

1) Devre modelinin öncelikle seçildiği yöntemler.
   a) Ayrıştırma yöntemi
   b) Katsayıları eşleştirme yöntemi
2) Devre modelinin öncelikle seçilmediği yöntemler.
   a) Durum denklemleri yöntemi
   b) İşaret-akış diyagramı ya da blok-diyagramı yöntemi
   c) Pasif devre sentezinin uygulandığı yöntemler

olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmada, aktif devrelerin gerçekleştirilmesinde işaret akış diyagramı yöntemi kullanılmıştır.

Bilindiği gibi, işaret akış diyagramları, bir denklem sistemine ilişkin olarak düğümlerden ve bu düğümlere bağlı yönlenmiş dallardan oluşan diyagramlardır. Denklem sistemindeki değişkenler, bu diyagramlarda düğümlere ilişkin olarak düğüm değişkenleri ile; denklem sistemindeki katsayılar da düğümleri birleştiren dallara ilişkin dal transmitansları ile gösterilmektedir. Öte yandan, ele alınan herhangi bir devrenin işaret akış diyagramı çizilebilmekte; ayrıca, transfer fonksiyonları da işaret akış diyagramları ile gösterilebilmektedir. Bunun yanında, herhangi bir işaret akış diyagramı diğer bir diyagrama dönüştürülebilmektedir. Bu özellikler de işaret akış yönteminin devre sentezinde güçlü bir metod olmasını sağlamaktadır.

Bir devre fonksiyonun bu yolla gerçekleştirilebilmesi için, öncelikle kullanılacak olan aktif elemanı bulunduran alt-devreler ele alınmakta, bu alt-devrelerin analizi yapılarak bu devrelere ilişkin işaret akış diyagramları elde edilmektedir. Sentez böylece, gerçekleştirilmesi istenen devre fonksiyonuna ilişkin olarak, ele alınan alt-devrelere ait olan alt-diyagramlardan oluşan bir işaret akış diyagramının elde edilmesine, bu diyagramdan da elde edilen dönüşüm kurallarından yararlanılarak, aktif devreye geçişe dayandırılmış olmaktadır (Güneş O. , 1998).

1.1 Tez Konusunun Kapsamı

Bu tez çalışması 5 ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölümde tez çalışmasının amacı ve önemi, tezin kapsamı ve konuyla ilgili yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

İkinci bölümde CFA elemanı ve simülasyonda kullanılan AD844 aktif elemanı tanıtılmıştır. Ayrıca CFA ile gerçekleştirilen temel devreler verilmiştir.

Üçüncü bölümde CFA elemanı bulunduran bir alt-devre ele alınarak bu alt-devrenin analizi yapılmış ve alt-devreye ilişkin at-graf belirlenmiştir. Bu alt-graftan oluşan n. dereceden gerilim ve akım transfer fonksiyonlarına ilişkin işaret akış diyagramları elde edilmiştir. Son olarak , bu işaret akış diyagramlarına karşılık düşen aktif devreler verilmiştir.

Dördüncü bölümde akım ve gerilim modunda çalışan üçüncü dereceden Butterworth türü alçak geçiren, yüksek geçiren, band geçiren, band söndüren ve tüm geçiren filtre devreleri verilmiştir. PSPICE programı ile simülasyonları yapılmış ve Bode diyagramları çizilmiştir.

Beşinci ve son bölümde ise sonuçlar ve öneriler bulunmaktadır.

1.2 Tez Konusu İle İlgili Çalışmalar

Literatürde, akım modlu devrelerin gelişimi iki önemli çalışma sonucunda başlamıştır. Bunlar;

Smith ve Sedra tarafından Akım Taşıyıcılar (CC) olarak bilinen yeni yapı taşlarının önerilmesi (Smith & Sedra, 1968) ve 1975 yılında Gilbert tarafından sözde translineer devrelerinin tanıtılmasıdır (Gilbert, 1975).

Toumazou, Payne ve Lidgey, gerilim ve akım geribesleme arasındaki ilişkiyi genelleştirmişler ve akım taşıyıcı tabanlı CFA elemanını incelemişlerdir (Toumazou, Payne, & Lidgey, 1993).

Bowers, akım modlu devrelerde kullanılan CFA elemanının avantaj ve dezavantajlarını özetlemiştir (Bowers, 1993).

Acar, İşaret akış diyagramı yöntemi ve CFA elemanı kullanılarak, gerilim modlu n. dereceden transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin metod önermiştir (Acar, 1996).

Soliman, çalışmasında CFA'nın temel özelliklerini vermiş ve aktif eleman olarak CFA kullanılan devrelerin analizlerini yapmıştır (Soliman, 1996).

Lidgey ve Hayathleh, CFA ile OPAMP'ın avantajlarını ve dezavantajlarını yaptıkları çalışmada göstermişlerdir (Lidgey & Hayatleh, 1997).

Güneş ve Anday, CFA'lı gerilim modlu n. dereceden alçak geçiren filtrelerin oluşturulmasına ilişkin esnek ve basit bir sentez yöntemi sunmuşlar ve buna uygun devreler vermişlerdir (Güneş & Anday, 1997).

Güneş ve Anday, CFA elemanı kullanılarak, herhangi bir gerilim modlu n. dereceden tüm geçiren transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yeni bir sentez yöntemi önermişlerdir (Güneş & Anday, 1999).

Feng, Wang, Zang ve Ren, çalışmalarında akım aynalarını temel alan ve kayıpsız entegratörler kullanılarak bir akım modlu n. dereceden filtrenin gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermişlerdir (Feng, Wang, Zang, & Ren, 2011).

Anday ve Sedef, CFA elemanı kullanılarak gerilim modlu n. dereceden alçak geçiren transfer fonksiyonun gerçekleştirilmesine ilişkin genel bir sentez yöntemi önermişlerdir (Anday & Sedef, 2000).

Kuntman ve Uygur, analog sinyal işleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve OPAMP'lara alternatif olarak önerilen, içlerinde CFA'nın da olduğu aktif elemanları tanıtmışlardır (Kuntman & Uygur, 2012).

Literatür çalışmaları, analog devre uygulamalarında CFA elemanın kullanılmasının araştırmacılara çok büyük avantajlar sağladığını göstermiştir. Bu çalışmalara ek olarak literatürde n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının çeşitli aktif elemanlarla gerçekleştirilmesine ilişkin şu çalışmalar da bulunmaktadır:

Güneş ve Anday, işaret akış diyagramı yöntemi ve CFCCII aktif elemanı kullanılarak akım modlu n. dereceden alçak geçiren filtrelerin gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermişlerdir (Güneş & Anday, 1995).

Acar ve Özoğuz, n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının CDBA kullanılarak gerçekleştirilmesine ilişkin sentez yöntemi önermişlerdir (Acar & Özoğuz, 2000).

Chang ve Al-Hashimi, OTA ve kapasitör kullanılarak n. dereceden akım transfer fonksiyonlarına ilişkin yeni bir sentez yöntemi önermişlerdir (Chang & Al-Hashimi, 2003).

Minaei vd., ECCII aktif elemanı kullanılarak n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermişlerdir (Minaei, Sayin, & Kuntman, 2006).

Tu vd., n çift olmak üzere, akım modlu n. dereceden OTA-C eliptik filtrelerin gerçekleştirilmesine ilişkin analiz yapmışlardır (Tu, Ross, & Chang, 2006).

Zhang vd., minimum sayıda DVCC aktif elemanı kullanarak, akım modlu n. dereceden filtre fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermişlerdir (Zhang, Zhou, & Xiao, 2011).

Feng vd., akım aynaları kullanarak, akım modlu n. dereceden filtre fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermişlerdir (Feng, Wang, Zang, & Ren, 2011).

Jiang vd., işaret akış diyagramı yöntemi, MODVCC ve DVCC aktif elemanları kullanarak, n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının sentezine ilişkin yöntem önermişlerdir (Jiang, Zhou, & Xu, 2012).

Intawichai ve Tangsrirat, işaret akış diyagramı yöntemiyle n. dereceden tüm geçiren transfer fonksiyonlarının CFTA aktif elemanıyla gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermişlerdir (Intawichai & Tangsrirat, 2013).

Lee, kaskad bağlı n+1 sayıda CCII aktif elemanı, n adet topraklanmış kapasitör ve n adet topraklanmış direnç kullanılarak, n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermiştir (Lee, 2013).

Tangsrirat, işaret akış diyagramı yöntemiyle n. dereceden tüm geçiren ve tüm kutuplu akım transfer fonksiyonlarının, CFTA elemanı ve topraklanmış kapasitör kullanılarak gerçekleştirilmesine ilişkin yöntem önermiştir (Tangsrirat, 2014).

Limpaibool vd., akım modlu n. dereceden merdiven tipi alçak geçiren filtrenin MOCCCII aktif elemanı kullanılarak gerçekleştirilmesini sağlamışlardır (Limpaibool, Kunto, & Prommee, 2015).

Kumar ve Paul, akım modlu n. dereceden tek girişli çok çıkışlı (SIMO) filtrelerin, MOCCII aktif elemanı kullanılarak gerçekleştirilmesine ilişkin bir yöntem önermişlerdir (Kumar & Paul, 2018).

Bu literatür çalışması sonucunda:

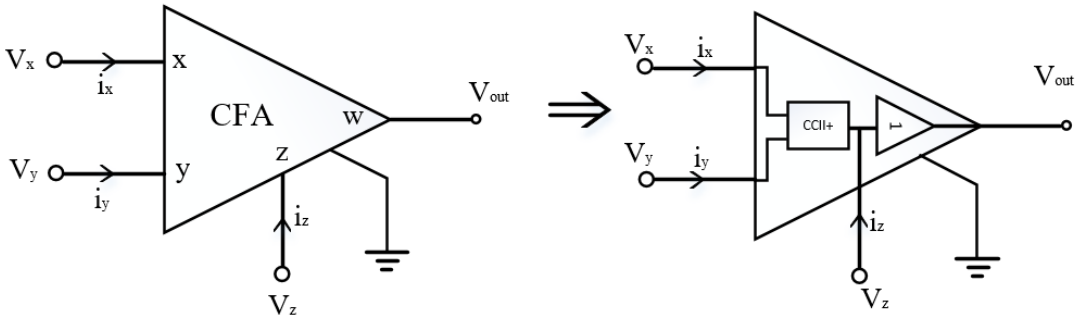
n. dereceden gerilim transfer fonksiyonlarının CFA ile gerçekleştirilmesine ilişkin çeşitli çalışmaların bulunduğu görülmüş; elde edilecek yeni devrede kullanılacak eleman sayısını azaltmaya yönelik bir çalışma yapılmıştır.

Literatürde, n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının CFA elemanı ile gerçekleştirilmesine ilişkin bir yöntem olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada CFA elemanı kullanılarak n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yeni bir yöntem önerilerek yeni devreler elde edilmiştir.

BÖLÜM 2. AKIM GERİBESLEMELİ KUVVETLENDİRİCİ (CFA)

Araştırmacılar, gerilim ve akım modlu devrelerin gerçekleştirilmesine yönelik incelemelerinin sonucunda, bir dizi yapı blokları ve kavramları önermişlerdir. Literatürde geçmişten günümüze yaygın olarak kullanılan geleneksel gerilim modlu opamplara alternatif olarak gösterilen CFA'nın kullanımı, sinyal işleme uygulamalarında; değişim oranı performansının mükemmel olması, geniş band aralığına sahip olması ve düşük güce gereksinim duyması gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Bu bölümde CFA elemanı tanıtılmış, tanım bağıntıları, devre sembolleri verilmiştir. Filtre devrelerinin simülasyon ile gerçekleştirilmesi aşamasında kullanılmış olan AD844 elemanının analizi yapılmıştır. Daha sonra CFA ile gerçekleştirilen temel devreler verilmiştir.

CFA,ikinci nesil akım taşıyıcı (CCII+) ve gerilim tamponunun (voltage buffer) kaskad bağlanması sonucunda elde edilen, 5 uçlu aktif devre elemanıdır. CFA elemanına ait semboller Şekil 2.1'de verilmiştir.



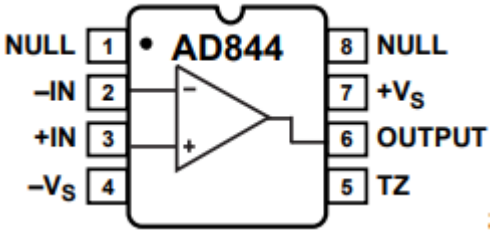
Şekil 2.1 CFA elemanın sembölü

CFA elemanın lineer tanım bağıntısı (2.1)'deki hibrid matrisiyle verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} iy \\ Vx \\ iz \\ Vout \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vy \\ ix \\ Vz \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

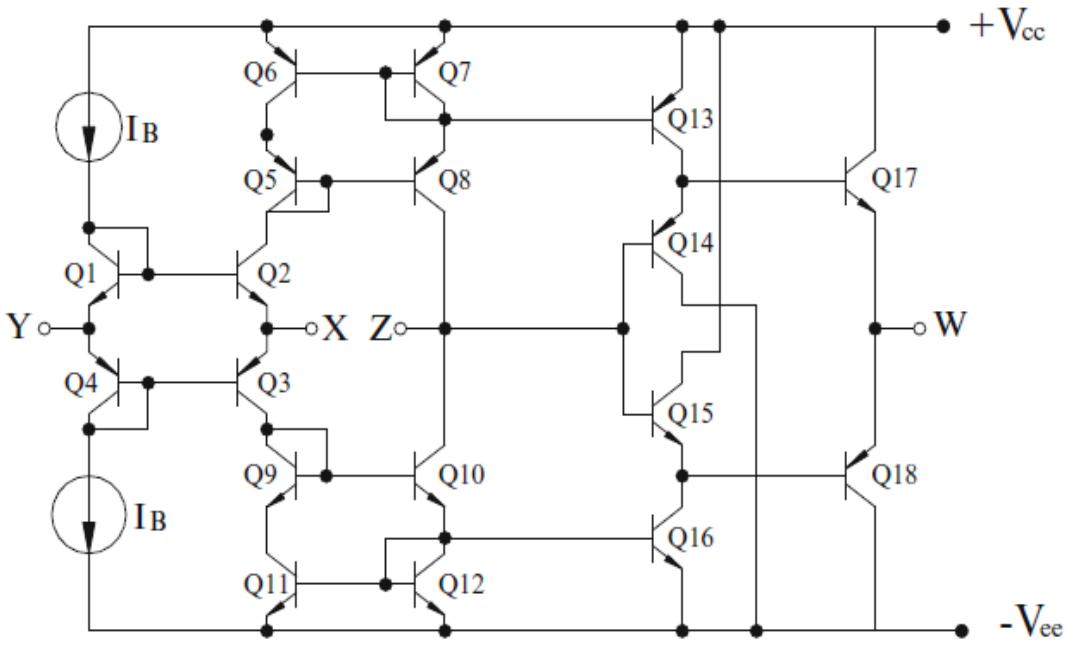
2.1 AD844 Aktif Elemanı

AD844, Analog Devices şirketi tarafından üretilmiş, yüksek hızlı monolitik (akım geribeslemeli) işlemsel yükselteçtir. Yüksek bant genişliği ve hızlı sinyal cevabını birleştirirek çalışmaktadır. Akım-gerilim dönüşümü uygulamalarında ve evirici yükselteç olarak kullanılmak üzere optimize edilmiş olmasına rağmen, birçok evirici olmayan uygulamada kullanım için de uygundur. AD844' e ait blok diyagramı Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2 AD844 blok diyagramı.

AD844 yerine geleneksel op-amp'lar kullanılabilmektedir. Fakat AD844'ün akım geri besleme mimarisi sonucunda daha iyi AC performans, yüksek doğrusallık ve son derece net bir darbe tepkisi alınmaktadır. Bu tip mimariye sahip bir aktif eleman, öncelikli olarak geri besleme direnci tarafından belirlenen ve kapalı döngü kazancından neredeyse bağımsız olan bir kapalı döngü bant genişliği sağlamaktadır. AD844, geleneksel op-amp'lar ve çeşitli akım geribeslemeli kuvvetlendiricinin etkilendiği değişim oranı kısıtlamalarından etkilenmemektedir. Yükselme ve düşme süreleri temel olarak çıkış seviyesinden bağımsızdır. Ayarlama süresi 100ns mertebesindedir ve kazançtan bağımsızdır. ± 4,5V ile 18V arasında çalışabilmekte ve harici devre kullanarak çok yüksek kapasitif yükler ile birlikte çalışabilmektedir. AD844'e ait sadeleştirilmiş devre şeması Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 AD844 sadeleştirilmiş devre şeması

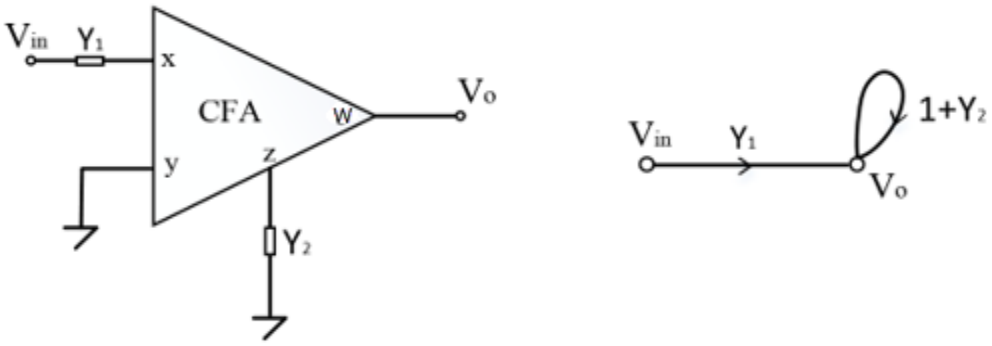
Şekil 2.3'te verilen AD844 iç mimarisinde, Q1-Q4 transistörleri karışık translineer hücre (MTC) olarak yapılandırılırken, Q2 ve Q3 transistörlerinin kollektör akımları, pnp tipi Q5-Q8 transistörleri ve npn tipi Q9-Q12 transistörlerinden oluşan modifiye edilmiş iki Wilson Akım Aynası tarafından i_x akımının bir kopyası oluşturularak Z ucuna iletilmektedir. Her biri I_B'ye eşit olan iki sabit akım kaynağı, Q1 ve Q4 transistörlerinin emitör akımlarını eşitlemeye zorlayarak, Y ucuna bir V_y gerilimi uygulandığında i_y giriş akımının 0 olmasını sağlar. Eğer Z ucunda harici bir yük ya da empedans olduğunda, polarlama akımlarını Q13 ve Q16 transistörlerinin sağladığı, gerilim izleyiciden geçen bir V_z gerilimi oluşmaktadır. Oluşan V_z gerilimi V_w gerilimine eşittir (AD844 Data Sheet, 2017).

2.2 CFA İle Gerçekleştirilen Temel Devreler

Bu bölümde araştırmalarda ve literatürde kullanılan CFA'lı temel devreler incelenmiş ve bu devrelere ilişkin işaret akış diyagramları verilmiştir. Bu devreler, akım ve gerilim transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde yardımcı olmalarından dolayı temel yapı taşları olarak öngörülmektedir.

2.2.1 Tek Girişli Gerilim Kuvvetlendirici Devresi

Tek girişli gerilim kuvvetlendiricisine ait devre ve işaret akış diyagramı Şekil 2.4'te verilmiştir. Devrede verilen Y_1 ve Y_2 admitans olup birimi Ω^{-1}'dir.



Şekil 2.4 Tek girişli genel gerilim kuvvetlendirici devresi ve işaret akış diyagramı

Bu devreye ait çıkış gerilimi ifadesi (2.2)'de verilmiştir.

$$V_o = -\frac{Y_1}{Y_2} V_{in} \tag{2.2}$$

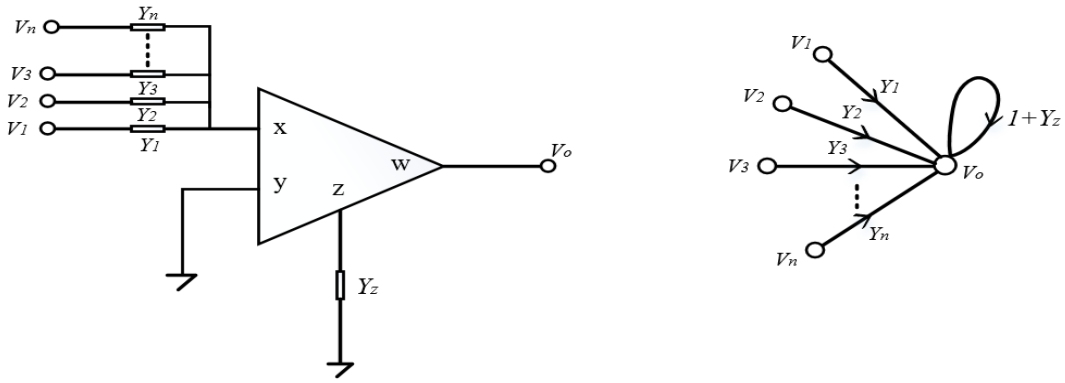
Bu devredeki Y_1 ve Y_2 admitans elemanları yerine farklı pasif elemanlarının kullanılmasıyla oluşturulmuş gerilim modlu devreler Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1 Genel bir girişli gerilim modlu temel devreler.

DEVRELER	$Y_1\ (\Omega^{-1})$	$Y_2\ (\Omega^{-1})$	$V_o(s)/V_{in}(s)$	İşaret Akış Diyagramı
Gerilim Kuvvetlendirici	G1	G2	$-(G_1/G_2)$	V_{in} G_1 V_o $1+G_2$
İntegral Alıcı	G1	sC2	$-(G_1/sC_2)$	V_{in} G_1 V_o $1+sC_2$
Türev Alıcı	sC1	G2	$-(sC_1/G_2)$	V_{in} sC_1 V_o $1+G_2$
Kayıplı İntegral Alıcı	G1	G2+sC2	$-(G_1/G_1+sC_2)$	V_{in} G_1 V_o $1+(G_2+sC_2)$
Kayıplı Türev Alıcı	G1+sC1	G2	$-(G_1+sC_2/G_1)$	V_{in} G_1+sC_1 V_o $1+G_2$

2.2.2 Genel *n* Girişli Gerilim Toplayıcı Devresi

n girişe sahip gerilim toplayıcısına ilişkin devre ve işaret akış diyagramı Şekil 2.5'te verilmiştir. Görüldüğü üzere devre, Şekil 2.4'te verilen devrelerin genelleştirilmiş halidir.



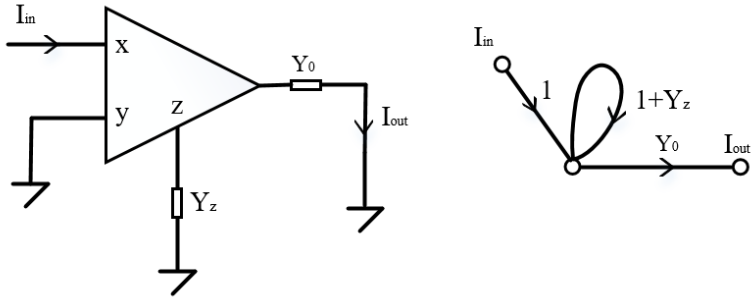
Şekil 2.5 *n* girişli genel gerilim toplayıcı devresi ve işaret akış diyagramı.

Bu devrelere ait çıkış gerilimi ifadesi (2.3)'de verilmiştir.

$$V_o = -\left(\frac{Y_1}{Y_z}V_1 + \frac{Y_2}{Y_z}V_2 + \frac{Y_3}{Y_z}V_3 + \cdots + \frac{Y_n}{Y_z}V_n\right) \tag{2.3}$$

2.2.3 Genel Bir Girişli Akım Kuvvetlendirici Devresi

Tek girişli akım kuvvetlendiricisine ilişkin devre ve işaret akış diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir. Devrede verilen Y_z ve Y_o admitans olup birimi Ω^{-1}'dir.



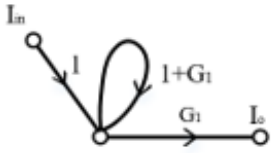
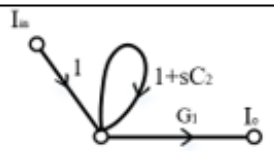
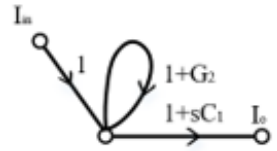
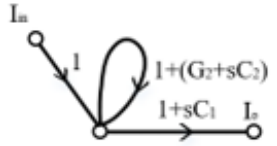
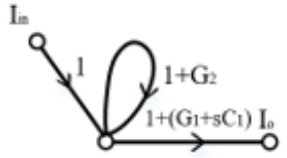
Şekil 2.6 Tek girişli genel akım kuvvetlendirici devresi ve işaret akış diyagramı.

Bu devreye ait çıkış akımı ifadesi (2.4)'te verilmiştir.

$$I_o = -\frac{Y_o}{Y_z}I_{in} \tag{2.4}$$

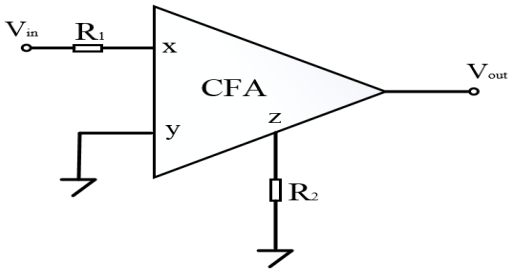
Bu devredeki Y_o ve Y_z admitans elemanları yerine farklı pasif elemanlarının kullanılmasıyla oluşturulmuş gerilim modlu devreler Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2 Genel bir girişli akım modlu temel devreler.

DEVRELER	$Y_o(\Omega^{-1})$	$Y_z(\Omega^{-1})$	$I_o(s)/I_{in}(s)$	İşaret Akış Diyagramı
Gerilim Kuvvetlendirici	G1	G2	$-(G_1/G_2)$	
İntegral Alıcı	G1	sC2	$-(G_1/sC_2)$	
Türev Alıcı	sC1	G2	$-(sC_1/G_2)$	
Kayıplı İntegral Alıcı	G1	G2+sC2	$-(G_1/G_1+sC_2)$	
Kayıplı Türev Alıcı	G1+sC1	G2	$-(G_1+sC_2/G_1)$	

2.2.4 Gerilim Kontrollü Gerilim Kaynağı (GKGK)

Gerilim kontrollü gerilim kaynağına ilişkin CFA ile gerçekleştirilmiş devre Şekil 2.7'de verilmiştir.



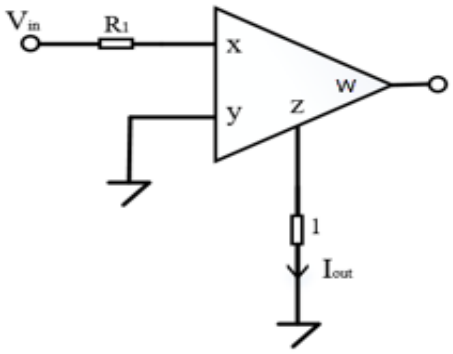
Şekil 2.7 CFA ile gerçekleştirilen GKGK devresi.

Devrenin analizi yapılırsa;

$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$ eşitliği elde edilir.

2.2.5 Gerilim Kontrollü Akım Kaynağı (GKAK)

Gerilim kontrollü akım kaynağına ilişkin CFA ile gerçekleştirilmiş devre Şekil 2.8'de verilmiştir.



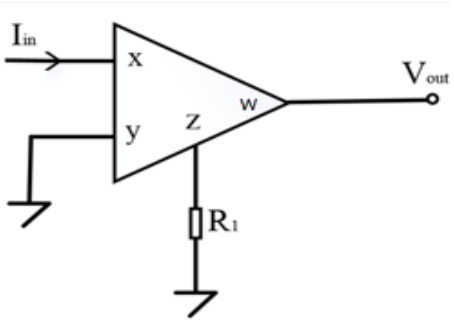
Şekil 2.8 CFA ile gerçekleştirilen GKAK devresi.

Devrenin analizi yapılırsa;

$I_{out} = -\frac{1}{R_1} V_{in}$ eşitliği elde edilir.

2.2.6 Akım Kontrollü Gerilim Kaynağı (AKGK)

Akım kontrollü gerilim kaynağına ilişkin CFA ile gerçekleştirilmiş devre Şekil 2.9'da verilmiştir.



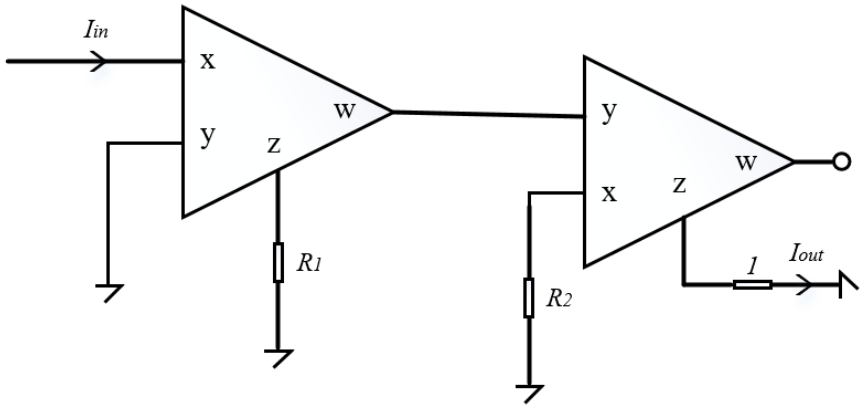
Şekil 2.9 CFA ile gerçekleştirilen AKGK devresi

Devrenin analizi yapılırsa;

$V_{out} = -R_1 I_{in}$ eşitliği elde edilir.

2.2.7 Akım Kontrollü Akım Kaynağı (AKAK)

Akım kontrollü akım kaynağına ilişkin CFA ile gerçekleştirilmiş devre Şekil 2.10'da verilmiştir.



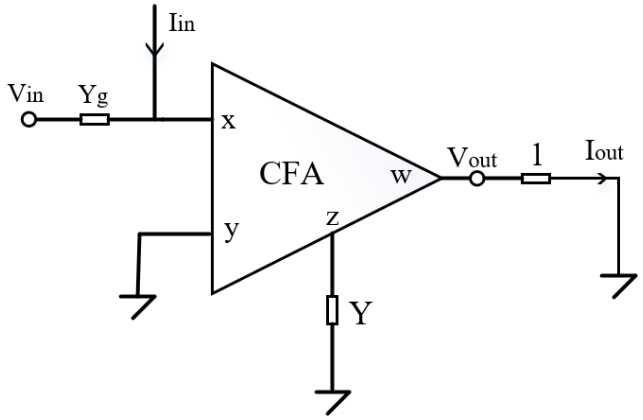
Şekil 2.10 CFA ile gerçekleştirilen AKAK devresi.

Devrenin analizi yapılırsa;

$I_{out} = -\frac{R_1}{R_2} I_{in}$ eşitliği elde edilir (Senani, Bhaskar, Singh, & Singh, 2013).

BÖLÜM 3. N. DERECEDEN AKTİF SÜZGEÇ DEVRELERİNİN ELDE EDİLMESİ

Aktif filtre sentezinde, transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. İşaret akış diyagramı yöntemi sağladığı kolaylıklardan dolayı özellikle n. dereceden süzgeç fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde en çok kullanılan yöntemdir. Bu bölümde gerilim ve akım transfer fonksiyonlarının CFA ile gerçekleştirilmesinde kullanılacak bir temel alt-devre verilmiş, bu alt-devrenin analizi yapılarak, alt-devreye ilişkin alt-graf elde edilmiştir. Alt-devre alt-graf ilişkisinden dönüşüm kuralları belirlenmiştir. Daha sonra, n. dereceden en genel gerilim ve akım transfer fonksiyonlarına ilişkin bu alt-graftan oluşan işaret akış diyagramları elde edilmiştir. Son olarak, dönüşüm kuralları uyarınca bu işaret akış diyagramlarına karşılık düşen aktif devreler elde edilmiştir. Bu amaçla şekil 3.1'deki alt-devre ele alınsın.



Şekil 3.1 Akım/Gerilim modlu alt devre

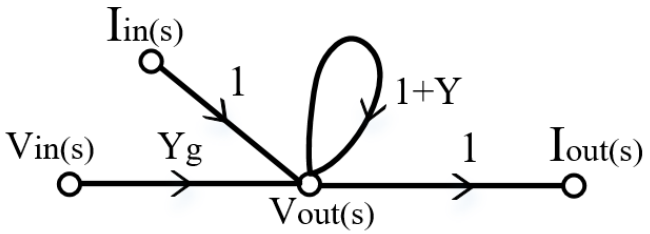
CFA'nın (2.1)'de verilen tanım bağıntılarından yararlanarak, alt-devrenin analizi yapılırsa:

$$\left(I_{in} + Y_g.V_{in}\right) = -Y.V_{out} \tag{3.1}$$

ve

$$I_{out} = 1.V_{out} \tag{3.2}$$

eşitlikleri verilebilir. Bu eşitliklere karşılık düşen bir işaret akış diyagramı Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Akım/Gerilim modlu alt-graf

Şekil 3.1'deki alt-devre ve bu devreye ilişkin Şekil 3.2'deki alt-graf incelenecek olursa şu dönüşüm kuralları verilebilir:

Y_g kazançlı bir dala, Yg admittans değerine sahip bir eleman devrenin giriş düğümü ile CFA'nın x ucu arasına bağlanır. Admittans fonksiyonu öz-çevre kazancından 1 eksik olan elemanlar, bir ucu CFA'nın z ucuna diğer ucu toprağa bağlanır. Akım modlu bir fonksiyon için ise; bunlara ek olarak CFA'nın x ucuna bağımsız bir akım kaynağı ve bir ucu CFA'nın w çıkış ucuna diğer ucu da toprağa bağlı olan 1Ω'luk bir direnç eklenir.

Bu çalışmada n. dereceden süzgeç fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinde izlenecek yol, Mason kazanç bağıntısı uyarınca Şekil 3.2'de verilen alt graflardan oluşan uygun işaret akış diyagramlarının elde edilmesi ve dönüşüm kuralları uyarınca da CFA'lı aktif devrelere geçilmesidir.

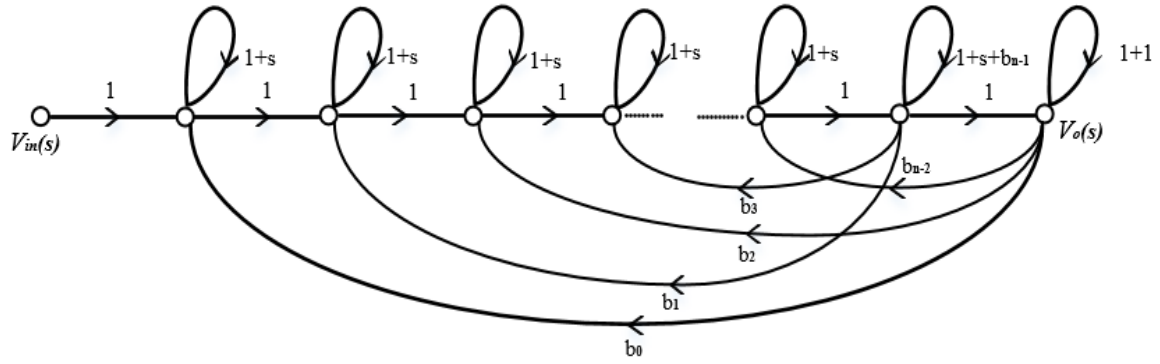
3.1 n. Dereceden Gerilim Modlu Aktif Filtre Sentezi

n. dereceden bir gerilim transfer fonksiyonu eşitlik (3.3)'de verildiği gibi ele alınsın.

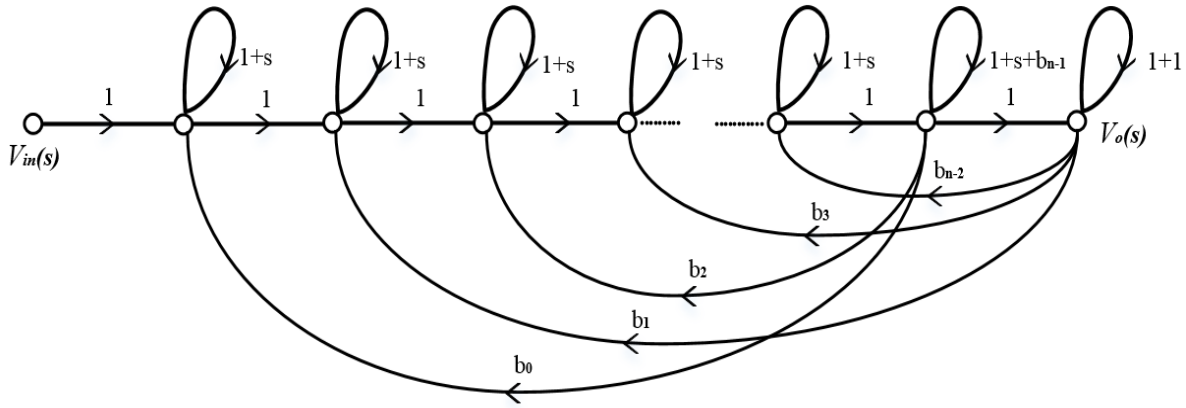
$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ \ldots + \ a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \ \ldots + b_1 s + b_0} \qquad (3.3)$$

İlk olarak, Mason kazanç bağıntısı uyarınca ve CFA'ya ait Şekil 3.2'de verilen alt-graflardan oluşan, eşitlik (3.3)'de verilen n. dereceden transfer fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramları elde edilecektir.

Mason kazanç bağıntısı uyarınca, G(s) transfer fonksiyonunun Δ=Q(s) payda polinomunu, n'in çift dereceleri ve n'in tek dereceleri için sağlayan, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'deki işaret akış diyagramları ele alınsın (Anday F. , 1972).

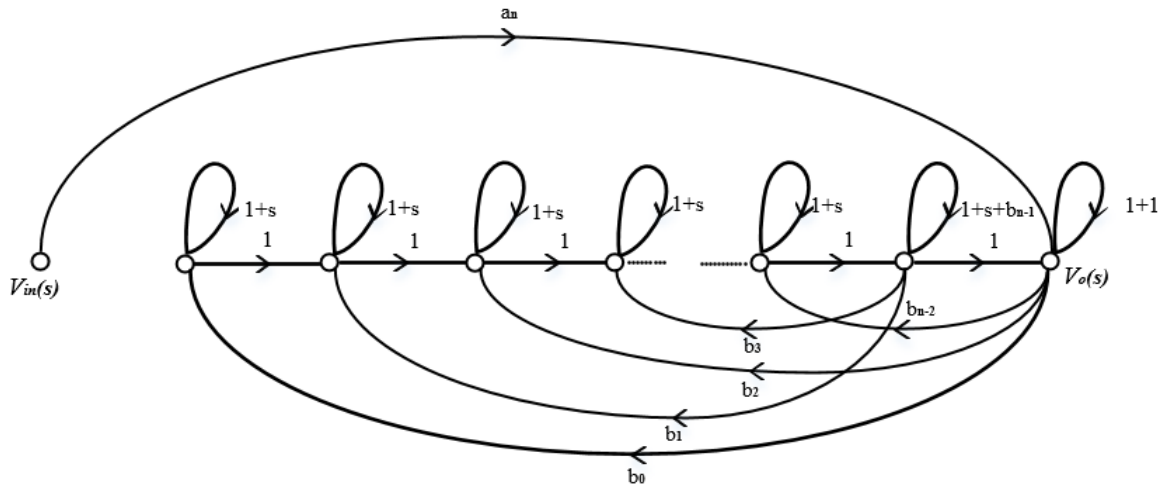


Şekil 3.3 n çift için - Q(s) payda polinomunu sağlayan işaret akış diyagramı.

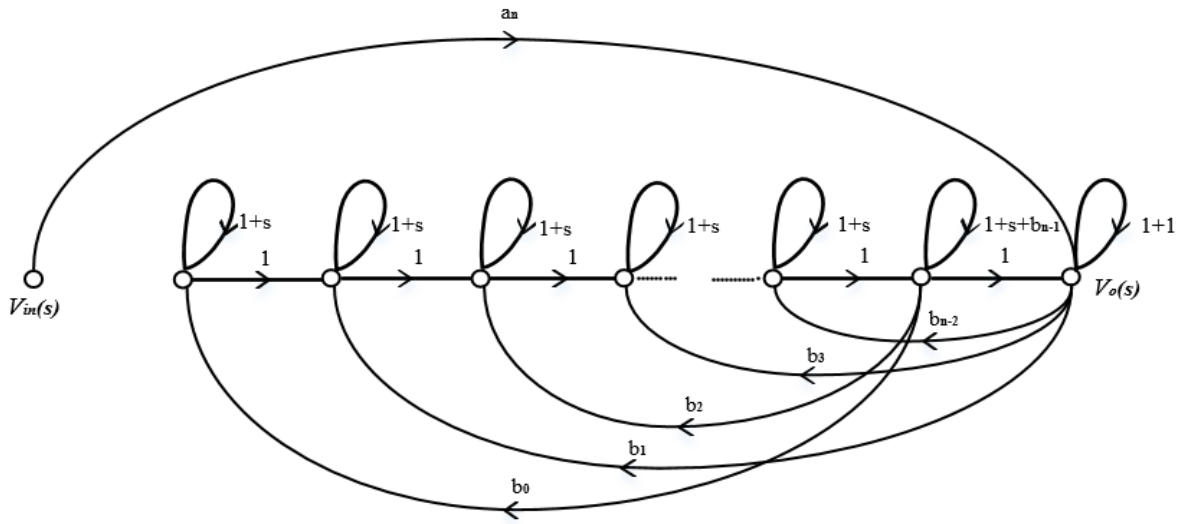


Şekil 3.4 n tek için Q(s) payda polinomunu sağlayan işaret akış diyagramı.

İkinci adımda, Δ=Q(s) payda polinomunu sağlayan bu işaret akış diyagramlarına Mason kazanç bağıntısı uyarınca, $\sum T_k \Delta_k = P(s)$ pay polinomunu sağlayacak şekilde ileri yollar eklenmiştir. Bu amaçla ilk olarak her iki işaret akış diyagramına a_n kazançlı ve (n+1). düğüme yönlenmiş bir ileri yol eklenmiş ve Şekil 3.5 ve 3.6'da gösterilmiştir.



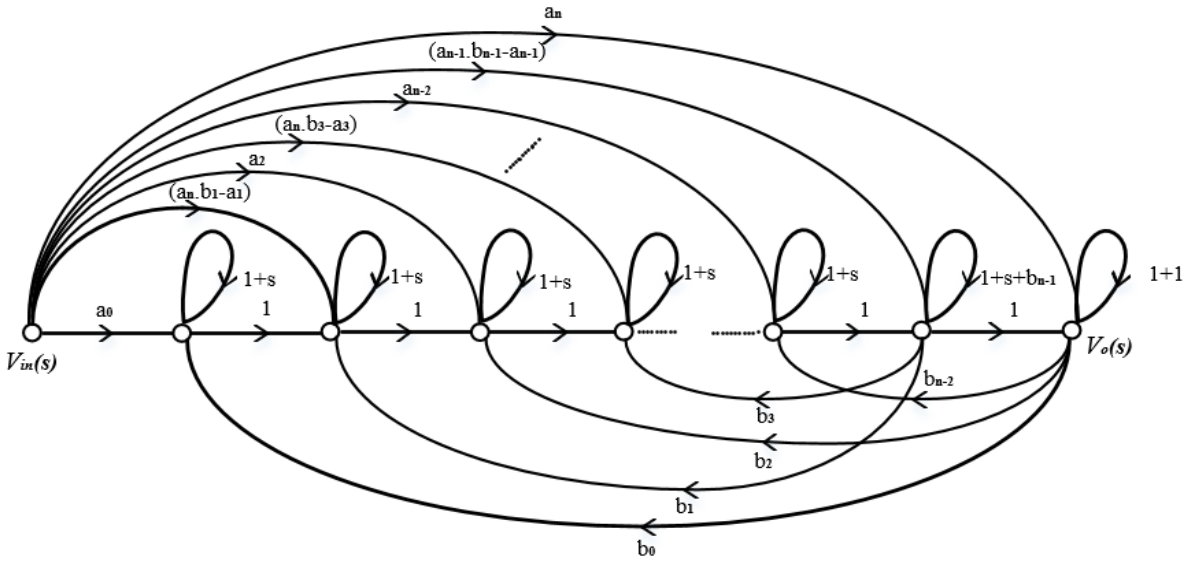
Şekil 3.5 n çift için a_n kazançlı ileri yola sahip işaret akış diyagramı.



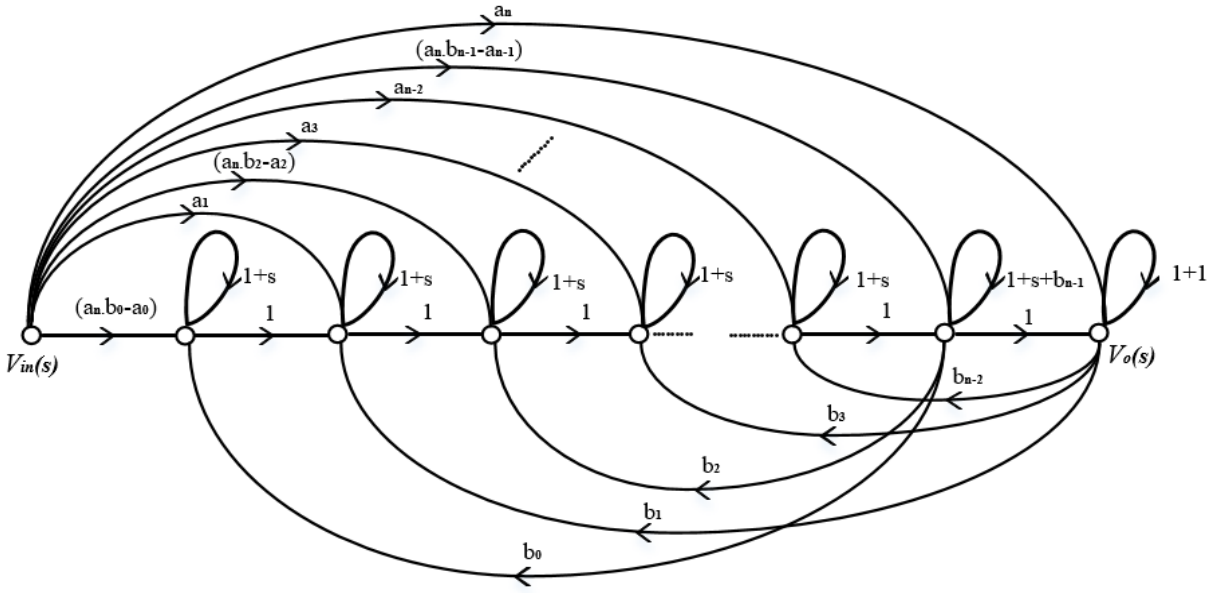
Şekil 3.6 n tek için a_n kazançlı ileri yola sahip işaret akış diyagramı.

Bu ileri yolun eklenmesi sonucunda eşitlik (3.3)'de verilen G(s) transfer fonksiyonunun P(s) pay polinomundaki n tek için -$a_n s^n$, n çift için $a_n s^n$ elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.5 ve 3.6'da görüldüğü üzere, bu ileri yolun dokunmadığı düğümler sonucunda, n çift için '$a_n b_1 s + a_n b_3 s^3 + \cdots + a_n b_{n-1} s^{n-1}$' tek katsayılı terimler; n'in tek dereceleri için ise '$-a_n b_0 - a_n b_2 s^2 - \cdots - a_n b_{n-1} s^{n-1}$' çift katsayılı terimler gelmektedir.

İstenmeyen bu terimlerin yok edilmesi ve eşitlik (3.3)'deki P(s) pay polinomunun sağlanması amacıyla diyagrama uygun ileri yollar sokulmuş ve sonucunda Şekil 3.7 ve 3.8'de gösterilen işaret akış diyagramları elde edilmiştir.

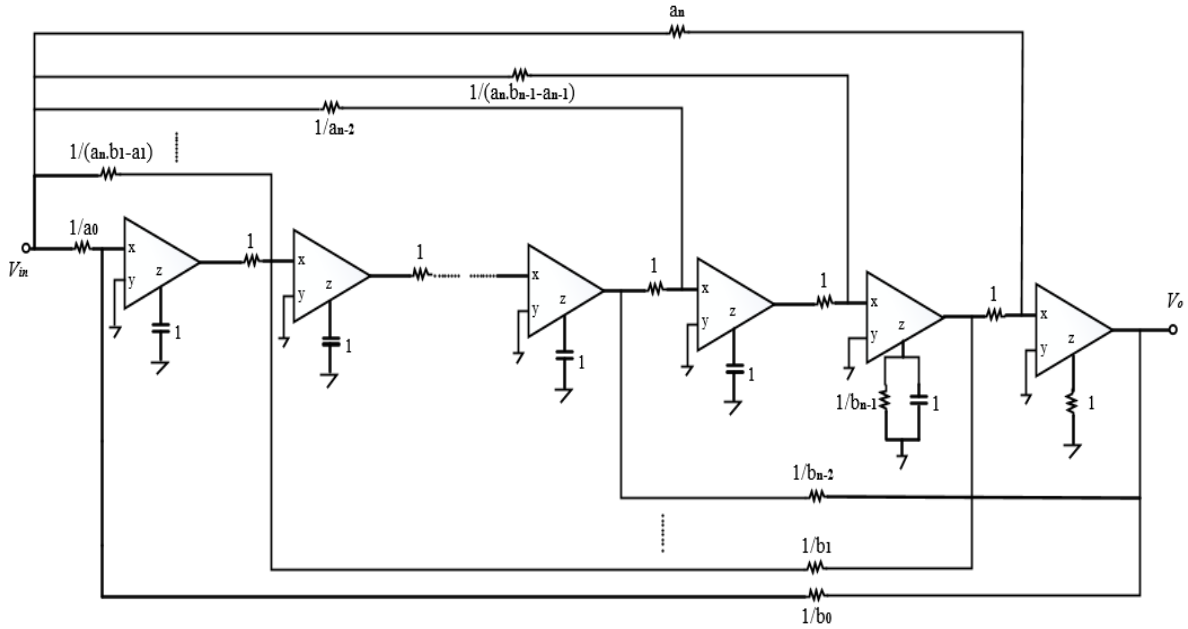


Şekil 3.7 n çift için - G(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

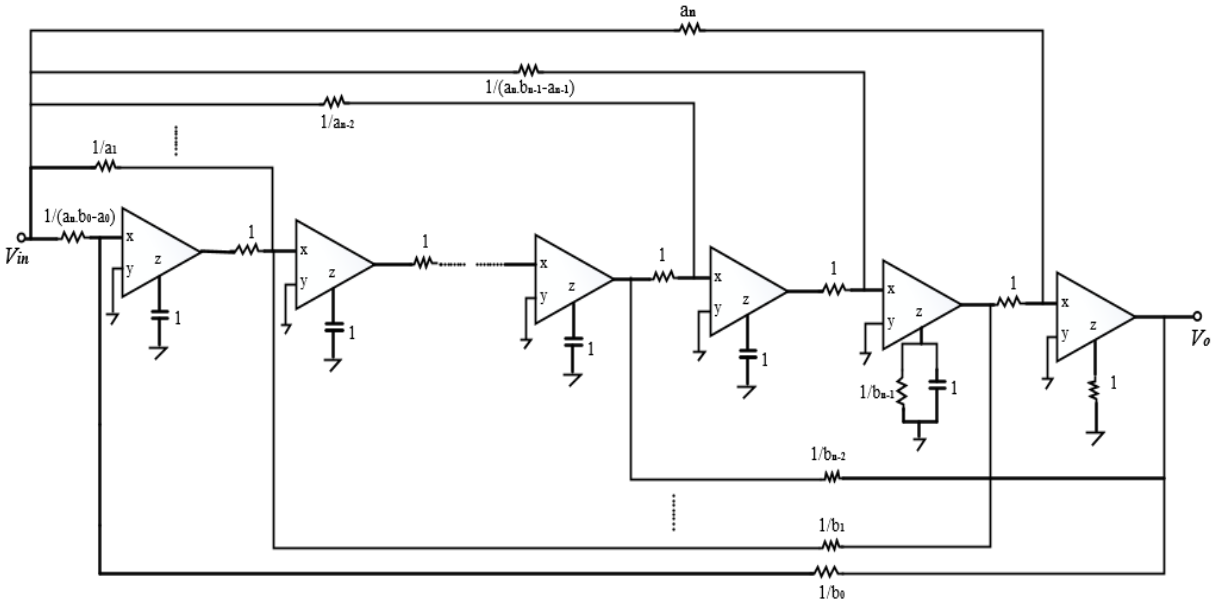


Şekil 3.8 n tek için - G(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

Şekil 3.2'de verilen alt-graftan yararlanılarak elde edilen Şekil 3.7 ve 3.8'deki bu diyagramların gerçekleştirilmesi sonucunda, Şekil 3.9 ve 3.10 devreleri elde edilmiştir.



Şekil 3.9 n çift için $G(s) = -\frac{P(s)}{Q(s)}$ transfer fonksiyonu devresi.



Şekil 3.10 n tek için $G(s) = -\frac{P(s)}{Q(s)}$ transfer fonksiyonu devresi.

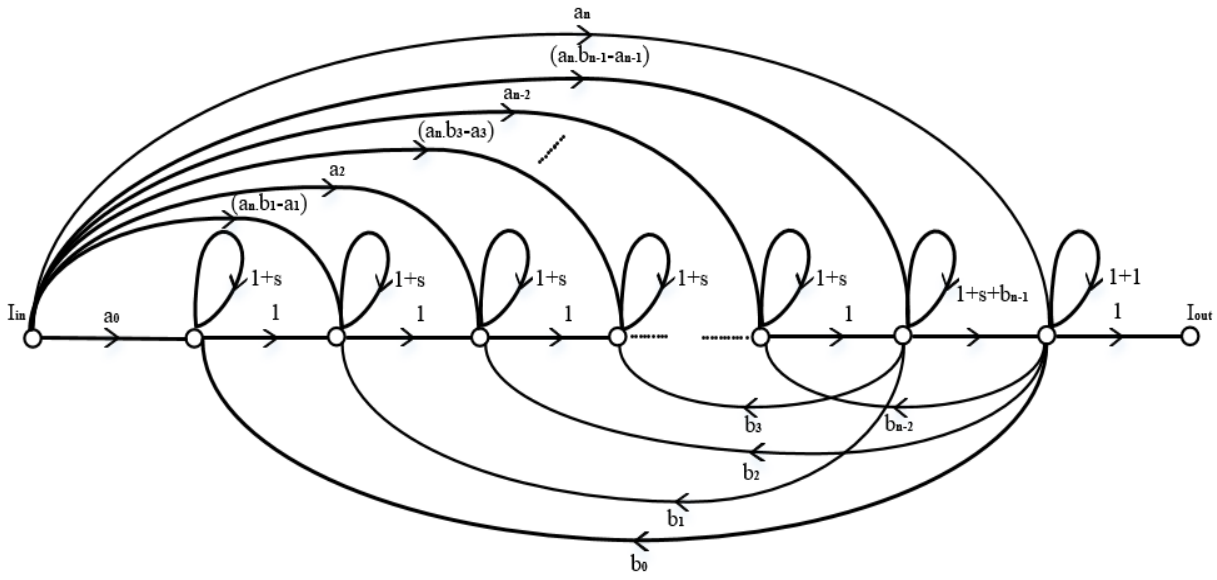
Her iki aktif filtre devresi içinde n. dereceden eşitlik (3.3)'deki fonksiyonu gerçekleştirmek için n+1 sayıda CFA elemanı, n adet eşit değerde bir ucu topraklı kapasitör ve 3n+2 sayıda direnç kullanılmıştır. Acar tarafından önerilen, n. dereceden gerilim transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yöntemde ise aynı sayıda aktif eleman ve kapasitör gerekirken, 5n+3 sayıda direnç kullanılmıştır (Acar, 1996). Sonuç olarak da direnç sayısı (2n+1) azaltılmış olmaktadır.

3.2 n. Dereceden Akım Modlu Aktif Filtre Sentezi

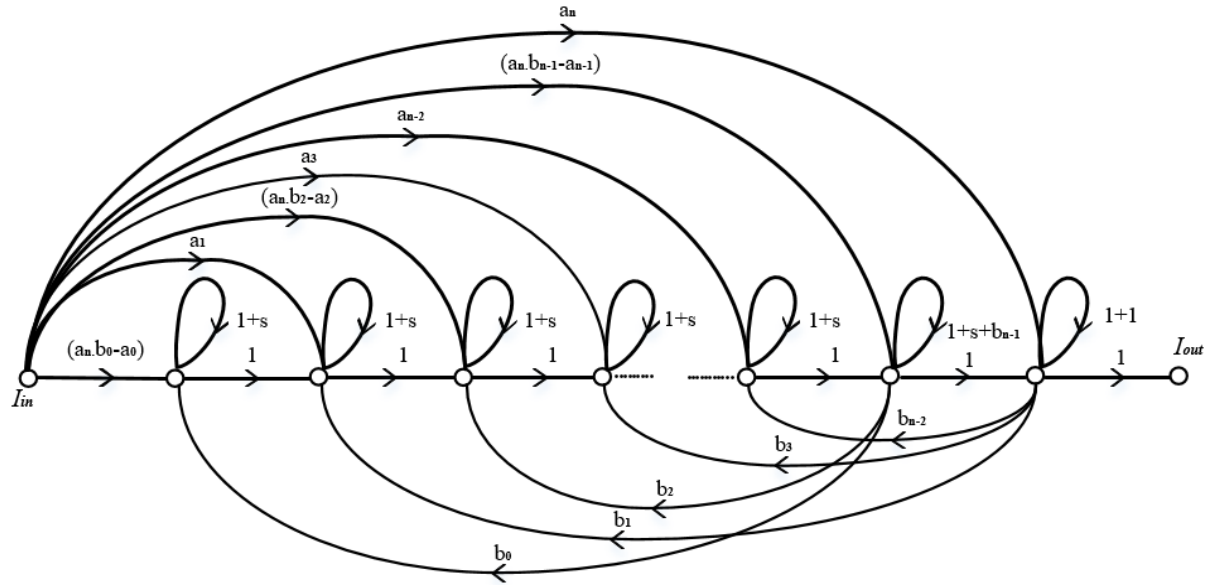
n. dereceden akım transfer fonksiyonu;

$$\alpha(s) = \frac{I_{out}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{a_n s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ \ldots + \ a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \ \ldots + b_1 s + b_0} \qquad (3.4)$$

biçiminde ele alınsın. n.dereceden gerilim modlu devrelerin gerçekleştirilmesinde izlenen yol, n. dereceden akım modlu devrelerin gerçekleştirilmesinde de kullanılmış ve sonuç olarak, (3.4) akım transfer fonksiyonuna ilişkin, n'in çift ve tek olması durumlarına göre, uygun işaret akış diyagramları şekil 3.11 ve 3.12'de gösterildiği gibi verilmiştir.

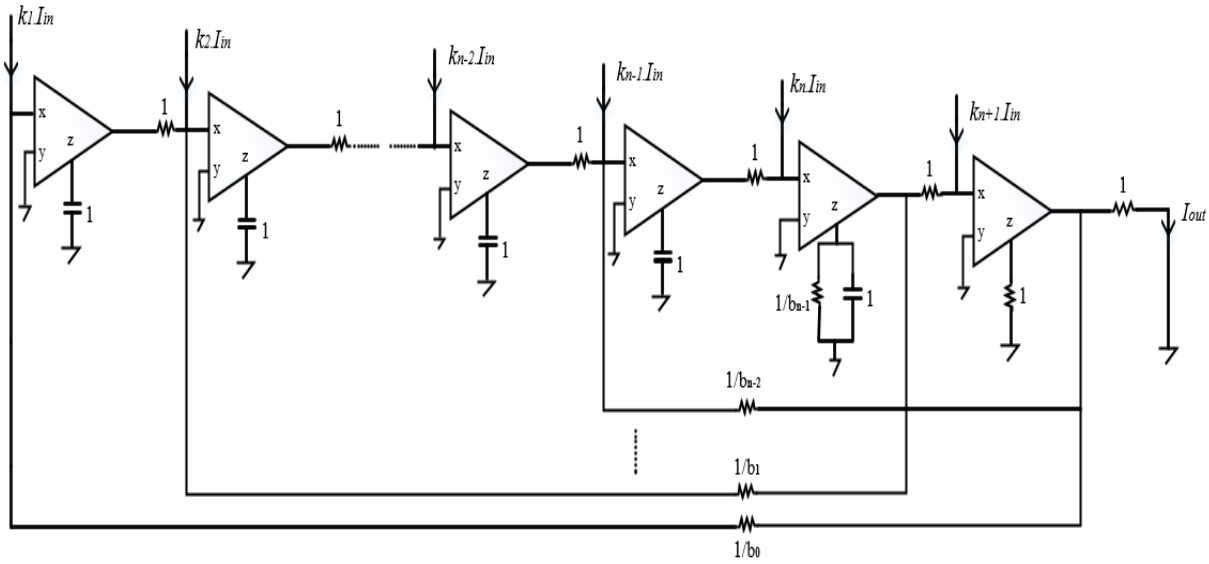


Şekil 3.11 n çift için - α(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.



Şekil 3.12 n tek için - α(s) fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı

Şekil 3.2'de verilen alt-graftan yararlanılarak, Şekil 3.11 ve 3.12'deki bu diyagramların gerçekleştirilmesi sonucunda, Şekil 3.13 ve 3.14 devreleri elde edilmiştir.



Şekil 3.13 n çift için $\alpha(s) = -\frac{P(s)}{Q(s)}$ fonksiyonuna ilişkin devre.

Şekil 3.13'teki devrede görüldüğü üzere, işaret akış diyagramındaki her bir ileri yol, $k_i.I_{in}$ kazançlı bağımsız bir akım kaynağına karşılık düşmektedir. Bu bağımsız akım kaynaklarına ait k_i değerleri (i=1,2,3,….,n+1) :

$k_1 = a_0$

$k_2 = (a_n.b_1 - a_1)$

$k_3 = a_2$

.

.

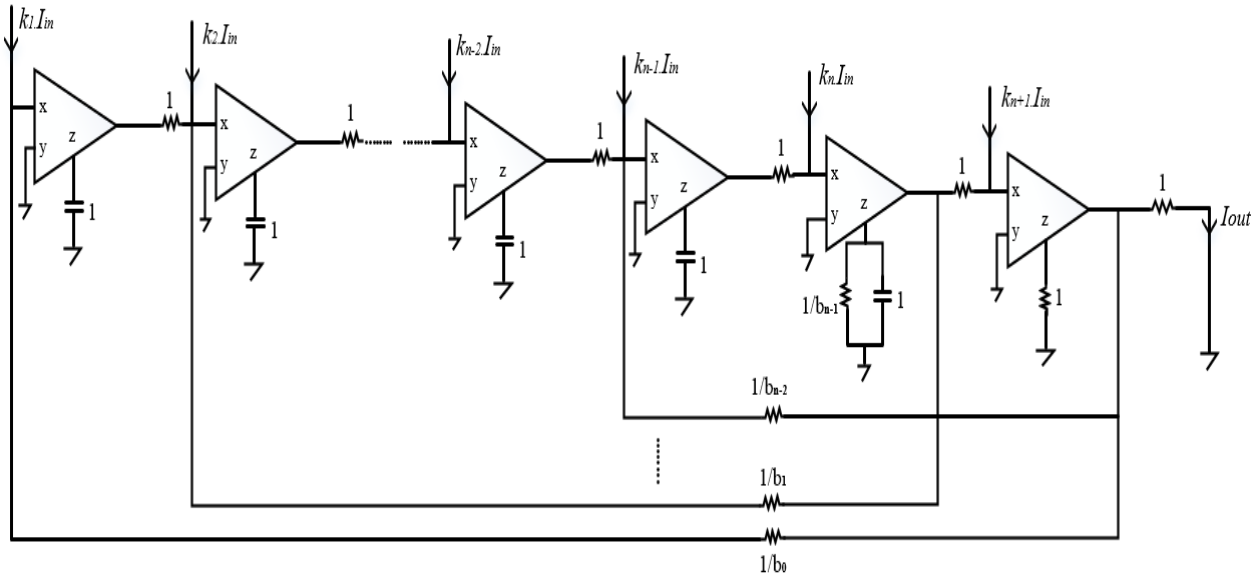
.

$k_{n-1} = a_{n-2}$

$k_n = (a_n.b_{n-1} - a_{n-1})$

$k_{n+1} = a_n$

olarak belirlenebilir.



Şekil 3.14 n tek için $\alpha(s) = -\frac{P(s)}{Q(s)}$ fonksiyonuna ilişkin devre.

Şekil 3.14'teki bağımsız akım kaynaklarına ait k_i değerleri ise (i=1,2, 3, …, n+1):

$k_1 = (a_n.b_0 - a_0)$

$k_2 = a_1$

$k_3 = (a_n.b_2 - a_2)$

.

.

.

$k_{n-1} = a_{n-2}$

$k_n = (a_n.b_{n-1} - a_{n-1})$

$k_{n+1} = a_n$

olarak belirlenebilir.

Her iki aktif filtre devresi için de n. dereceden (3.4) transfer fonksiyonunu gerçekleştirmek için n+1 sayıda CFA elemanı, n+1 adet bağımsız akım kaynağı, n adet eşit değerde bir ucu topraklı kapasitör ve 2n+1 sayıda direnç kullanılmış olmaktadır.

BÖLÜM 4. ÜÇÜNCÜ DERECEDEN BUTTERWORTH TİPİ GERİLİM VE AKIM MODLU FİLTRE UYGULAMARINA İLİŞKİN ÖRNEKLER

Bu bölümde, 3.kısımda verilen n. dereceden gerilim ve akım modlu CFA'lı devreler yardımıyla, üçüncü dereceden gerilim ve akım modlu Butterworth tipi aktif filtrelerin sentezi gerçekleştirilmiş ve PSPICE programı kullanılarak simülasyonları yapılmıştır. Filtre devrelerinde CFA olarak, program kütüphanesinden AD844 aktif elemanı kullanılmıştır. Bu elemana ilişkin devre şeması EK bölümünde verilmiştir.

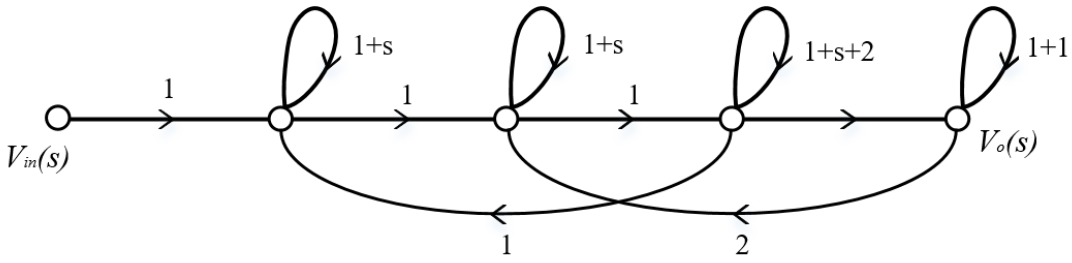
4.1 Gerilim Modlu Filtre Devreleri

Bölüm 3'te verilen CFA'lı devreler uyarınca, 3. dereceden gerilim modlu Butterworth alçak geçiren, yüksek geçiren, band geçiren, band söndüren ve tüm geçiren filtre devreleri verilmiştir.

4.1.1 Gerilim Modlu Alçak Geçiren Filtre Sentezi

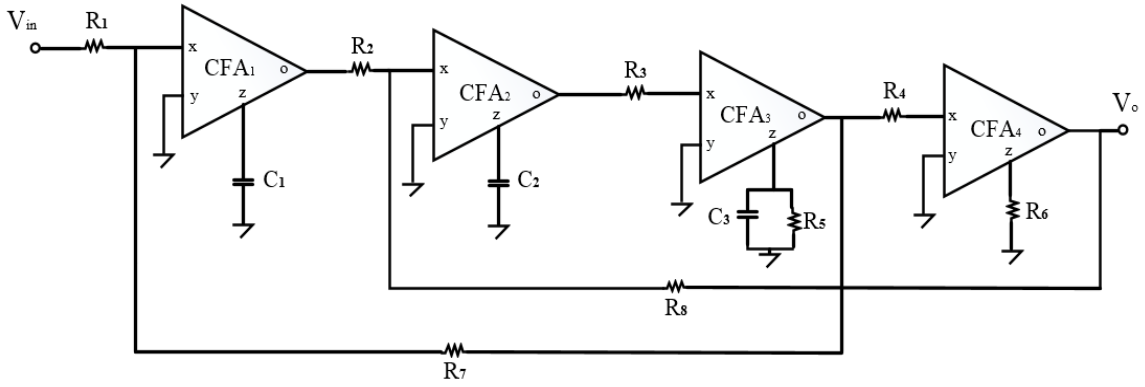
Üçüncü dereceden Butterworth tipi alçak geçiren filtre devresinin gerilim transfer fonksiyonu (4.1)'de verilmiştir. Transfer fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.1}$$



Şekil 4.1 Alçak geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

CFA'lı alt devre-alt graf ikilisinden yararlanılarak belirlenen dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.1'de verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen alçak geçiren filtre devresi şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Gerilim modlu alçak geçiren filtre devresi.

Şekil 4.2 devresinde normalize eleman değerleri:

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = 0.5\Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1F$

olarak belirlenmiştir.

Alçak geçiren filtre devresinin köşe frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Denormalize eleman değerleri, verilen normalize eleman değerlerine genlik ve frekans ölçeklemesi yapılarak elde edilmiştir.

Genlik ölçekleme katsayısı (A) ve frekans ölçekleme katsayısı (B) olmak üzere, denormalize direnç ve kapasitör değerleri, (4.2) ve (4.3) eşitlikleriyle belirlenmiştir.

$$\hat{C} = \frac{1}{A.B}.C\ (F) \tag{4.2}$$

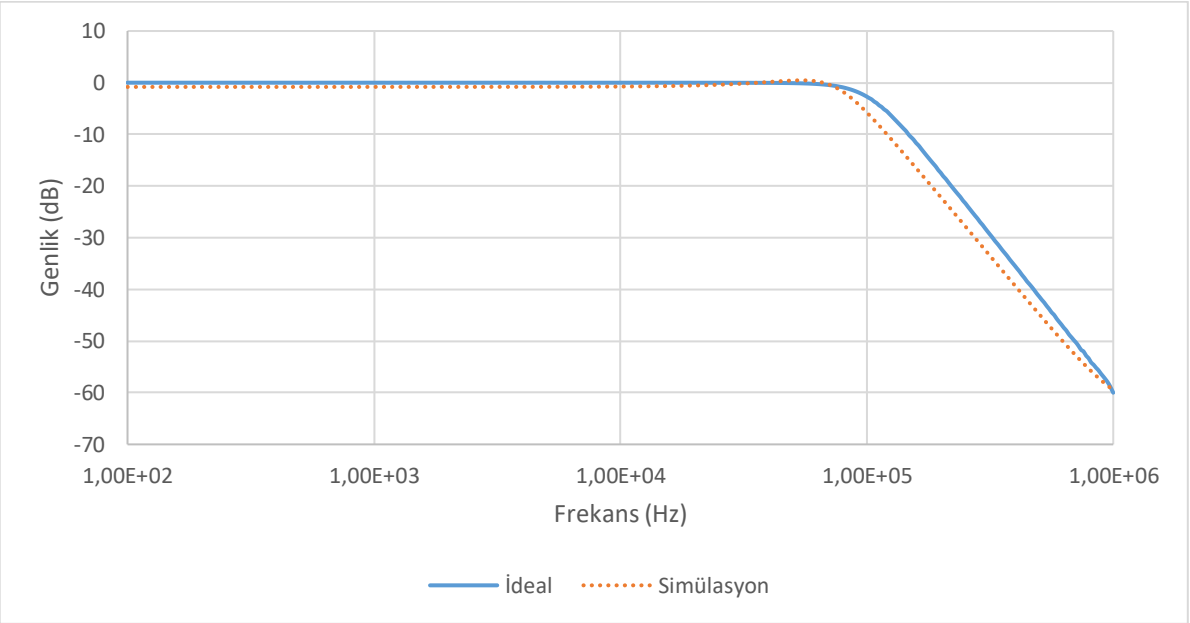
$$\hat{R} = A.R\quad (\Omega) \tag{4.3}$$

$B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ olmak üzere denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir.

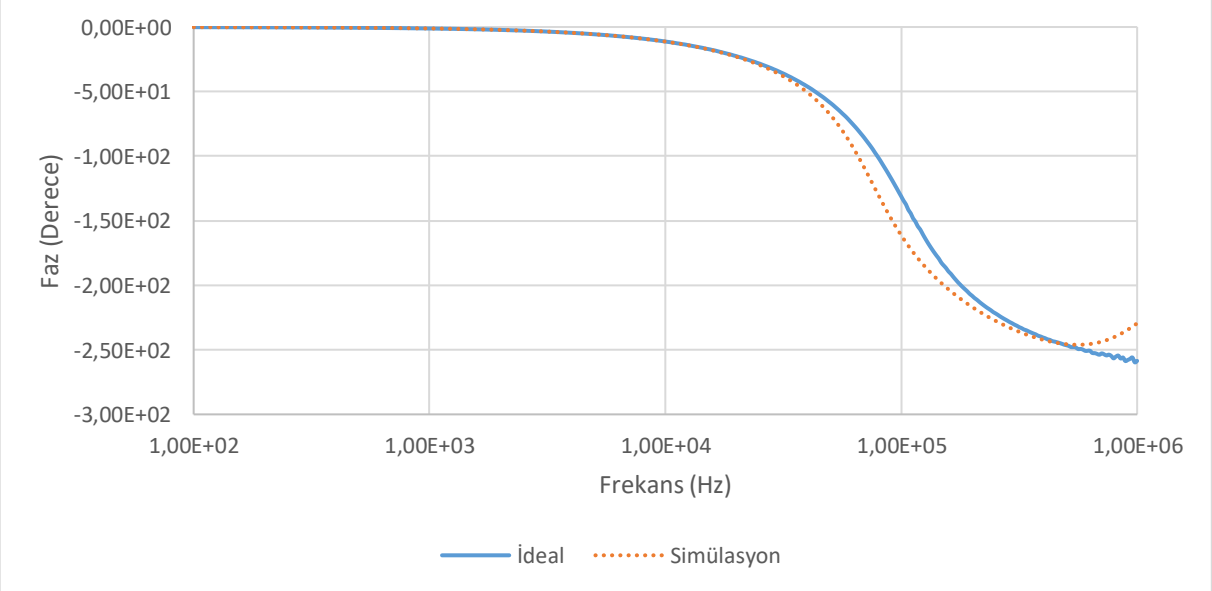
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = 1\ k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59nF$

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = 0.5k\Omega$

Şekil 4.2'deki devrenin girişine, 0.1V değere sahip AC gerilim uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Gerilim modlu alçak geçiren filtre devresinin genlik grafiği.

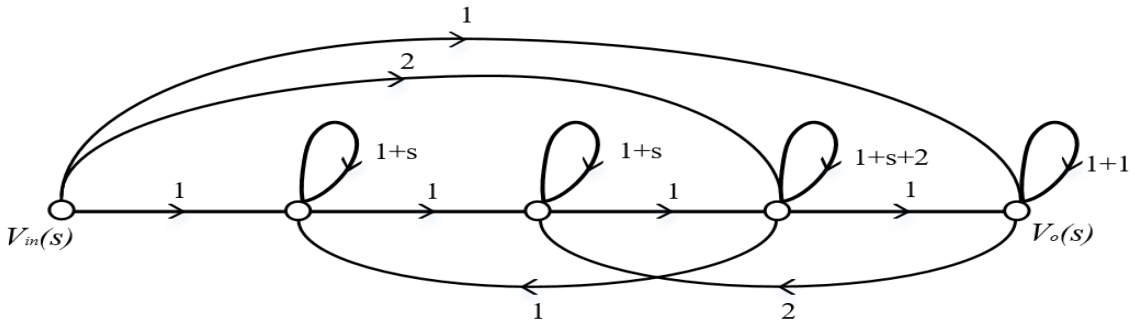


Şekil 4.4 Gerilim modlu alçak geçiren filtre devresinin faz grafiği.

4.1.2 Gerilim Modlu Yüksek Geçiren Filtre Sentezi

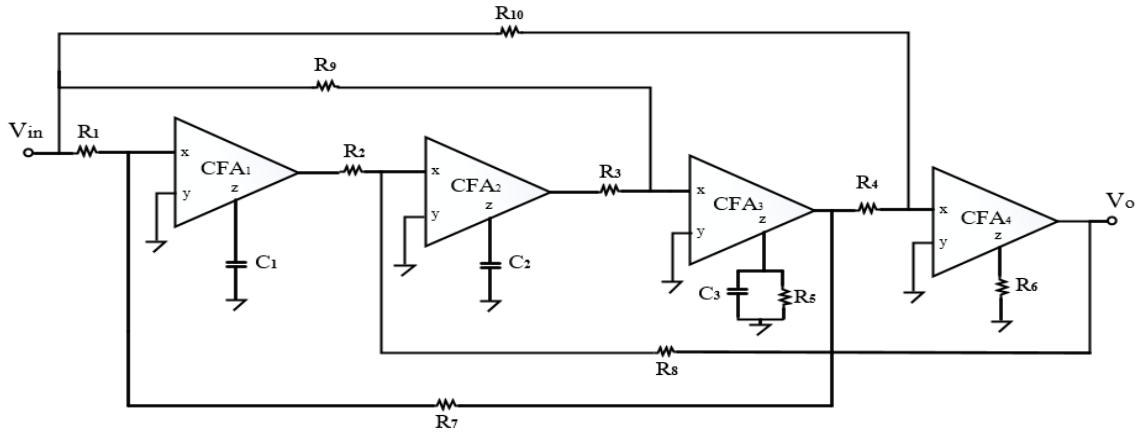
Üçüncü dereceden Butterworth tipi yüksek geçiren filtre devresinin gerilim transfer fonksiyonu, eşitlik (4.4)'te verilmiştir.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-s^3}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.4}$$



Şekil 4.5 Yüksek geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

Üçüncü bölümde açıklandığı gibi, (4.4) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.5'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.5'de verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen yüksek geçiren filtre devresi de Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 Gerilim modlu yüksek geçiren filtre devresi.

Şekil 4.6 devresinde normalize eleman değerleri:

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = R_{10} = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = R_9 = 0.5\Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1F$

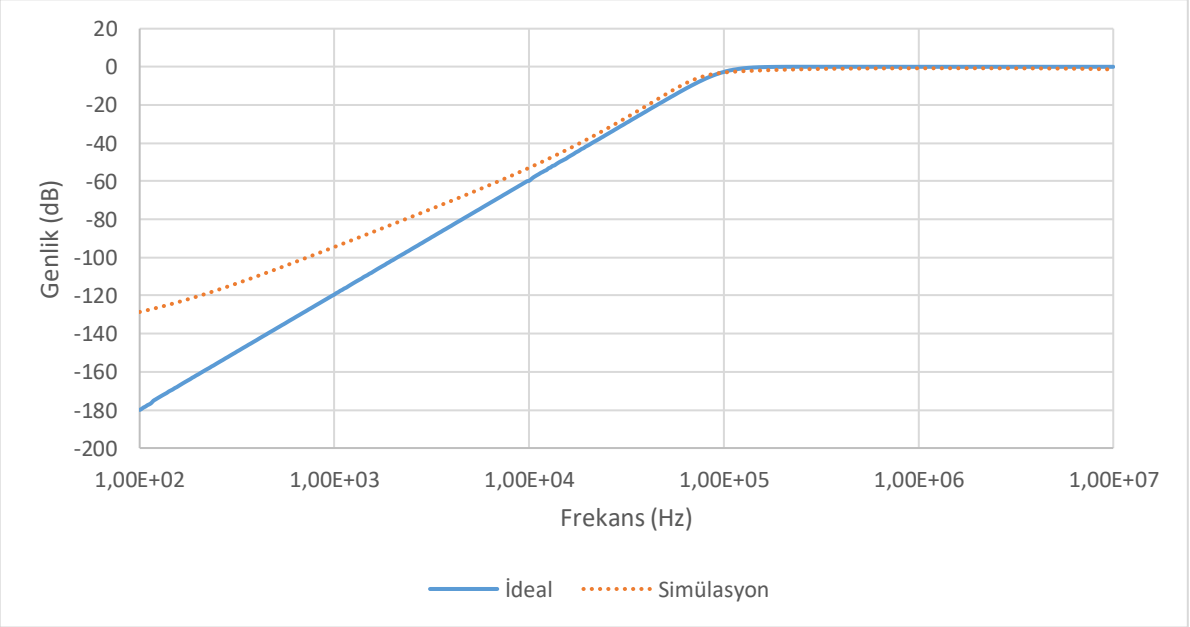
olarak belirlenmiştir.

Yüksek geçiren filtre devresinin köşe frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ olmak üzere Şekil 4.6'ya ait denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

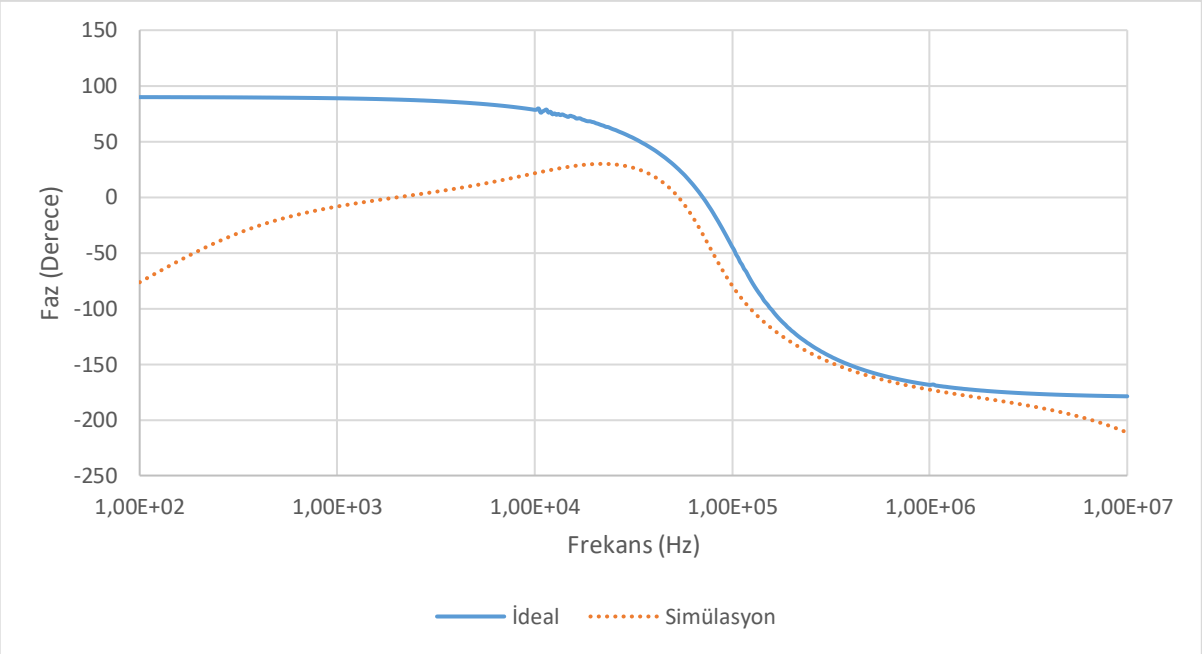
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = \hat{R}_{10} = 1\ k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59nF$

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = \hat{R}_9 = 0.5k\Omega$

Şekil 4.6'daki devrenin girişine, 0.1V değere sahip AC gerilim uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.7 ve 4.8'te verilmiştir.



Şekil 4.7 Gerilim modlu yüksek geçiren filtre devresinin genlik grafiği.



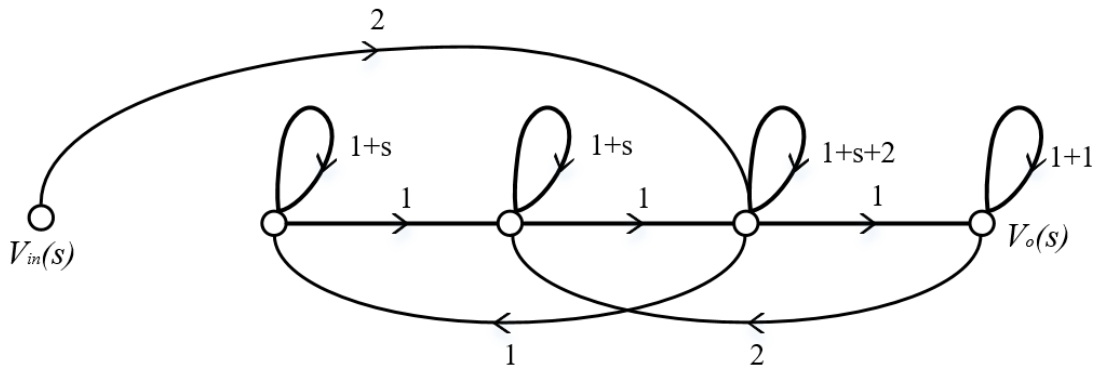
Şekil 4.8 Gerilim modlu yüksek geçiren filtre devresinin faz grafiği.

4.1.3 Gerilim Modlu Band Geçiren Filtre Sentezi

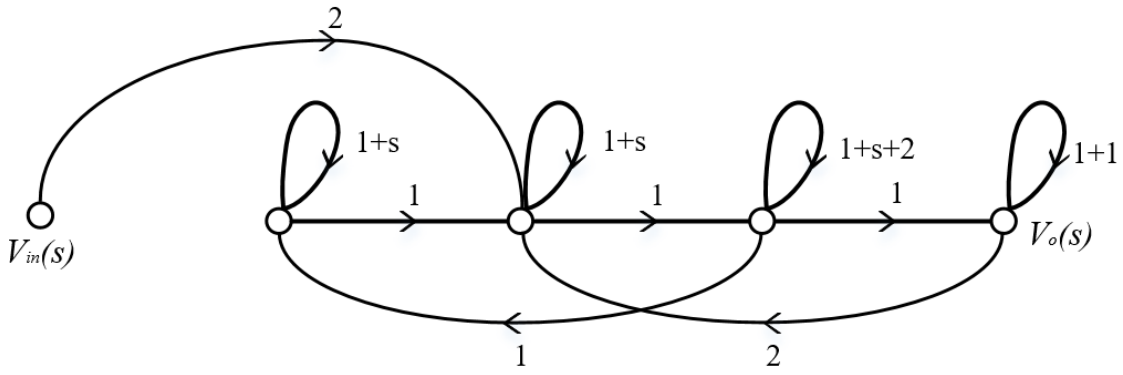
Üçüncü dereceden Butterworth tipi band geçiren filtre devresinin gerilim transfer fonksiyonları (4.5) ve (4.6)'da verilmiştir.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{2s^2}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.5}$$

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-2s}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.6}$$

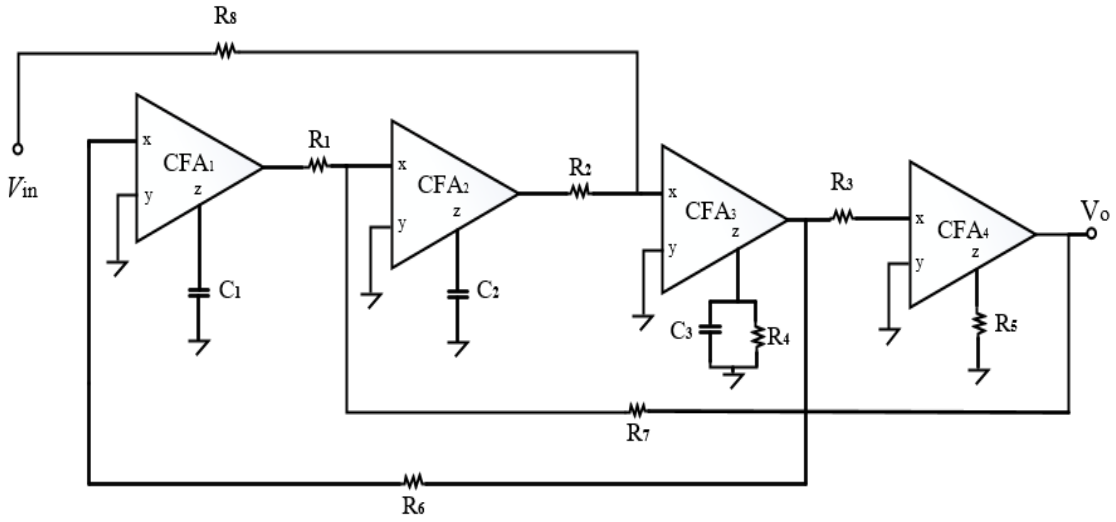


Şekil 4.9 Eşitlik (4.5)'teki band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

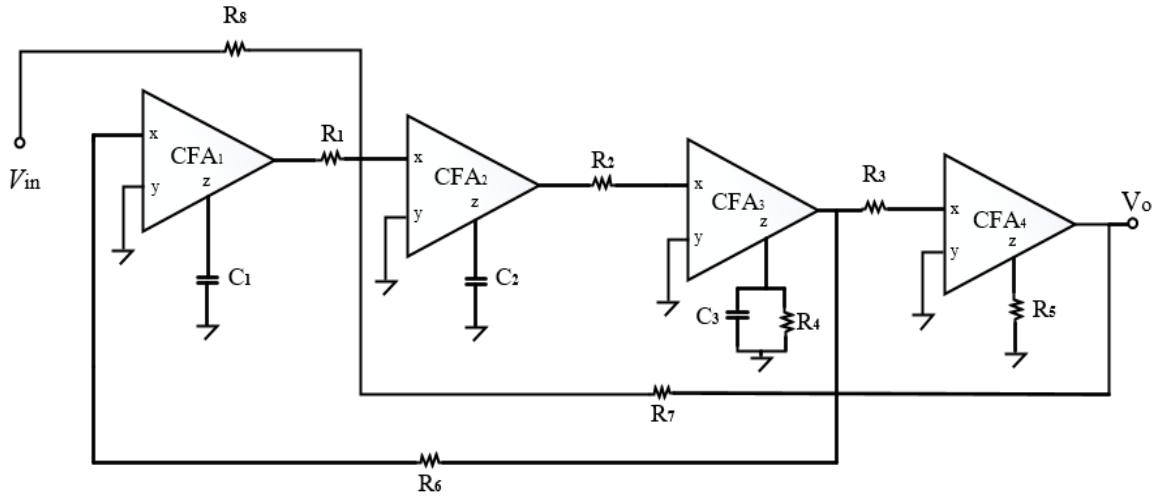


Şekil 4.10 Eşitlik (4.6)'daki band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

(4.5) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.9'da, (4.6) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.10'da gösterildiği gibidir. Dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.9 ve 4.10'da verilen işaret akış diyagramlarına karşılık düşen, Şekil 4.11 ve 4.12'de verilen devreler elde edilmiştir.



Şekil 4.11 (4.5) fonksiyonunu gerçekleyen gerilim modlu band geçiren filtre devresi.



Şekil 4.12 (4.6) fonksiyonunu gerçekleyen gerilim modlu band geçiren filtre devresi.

Şekil 4.10 ve 4.11 devrelerinde normalize eleman değerleri:

$R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = 1\ \Omega$, $R_4 = R_7 = R_8 = 0.5\ \Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1$ F

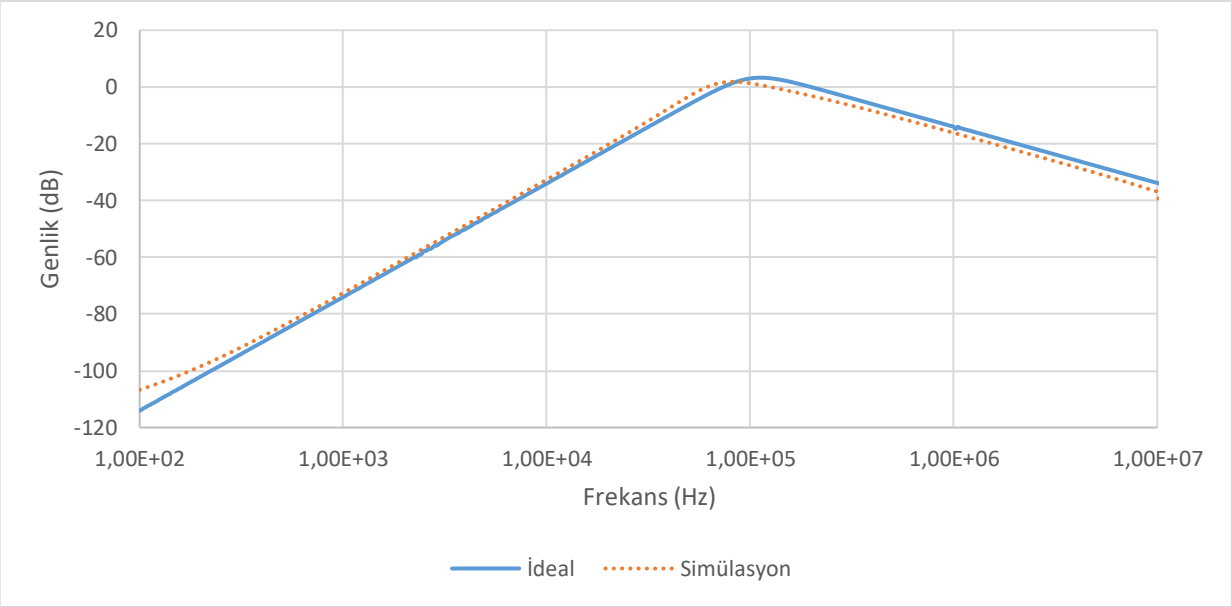
olarak belirlenmiştir.

Band geçiren filtre devresinin merkez frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ olmak üzere Şekil 4.11 ve 4.12'ye ait denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

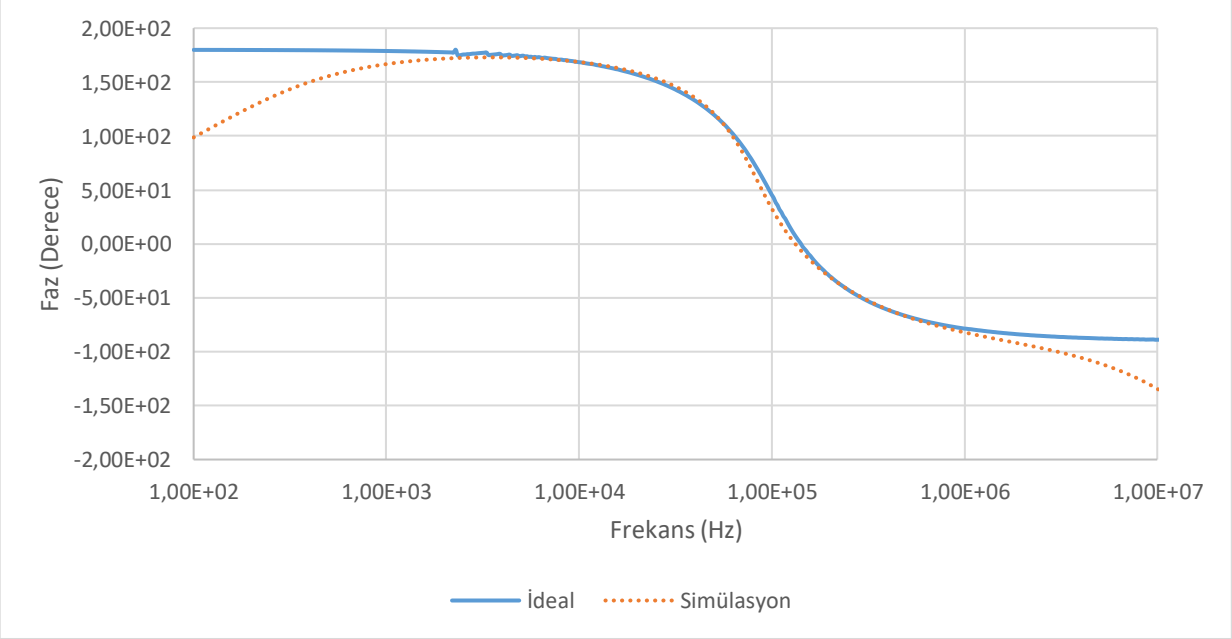
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_5 = \hat{R}_6 = 1$ kΩ, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59$ nF

$\hat{R}_4 = \hat{R}_7 = \hat{R}_8 = 0.5$ kΩ

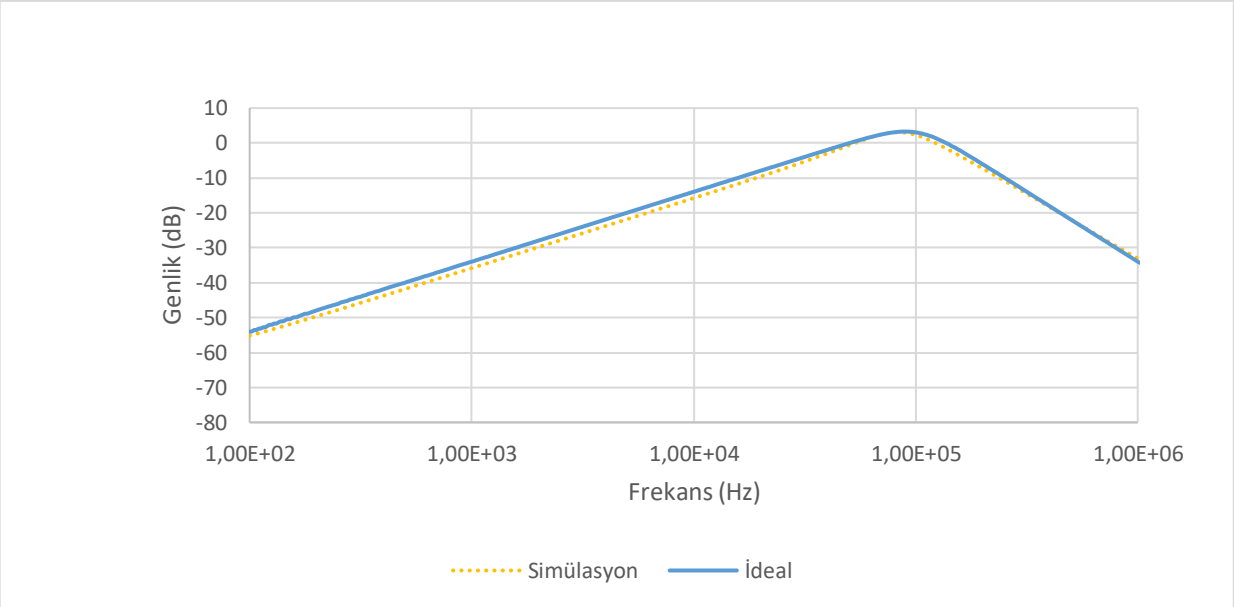
Şekil 4.11 ve 4.12'deki devrelerin girişine, 0.1V değere sahip AC gerilim uygulanmıştır. AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.13,4.14,4.15 ve 4.16'da verilmiştir.



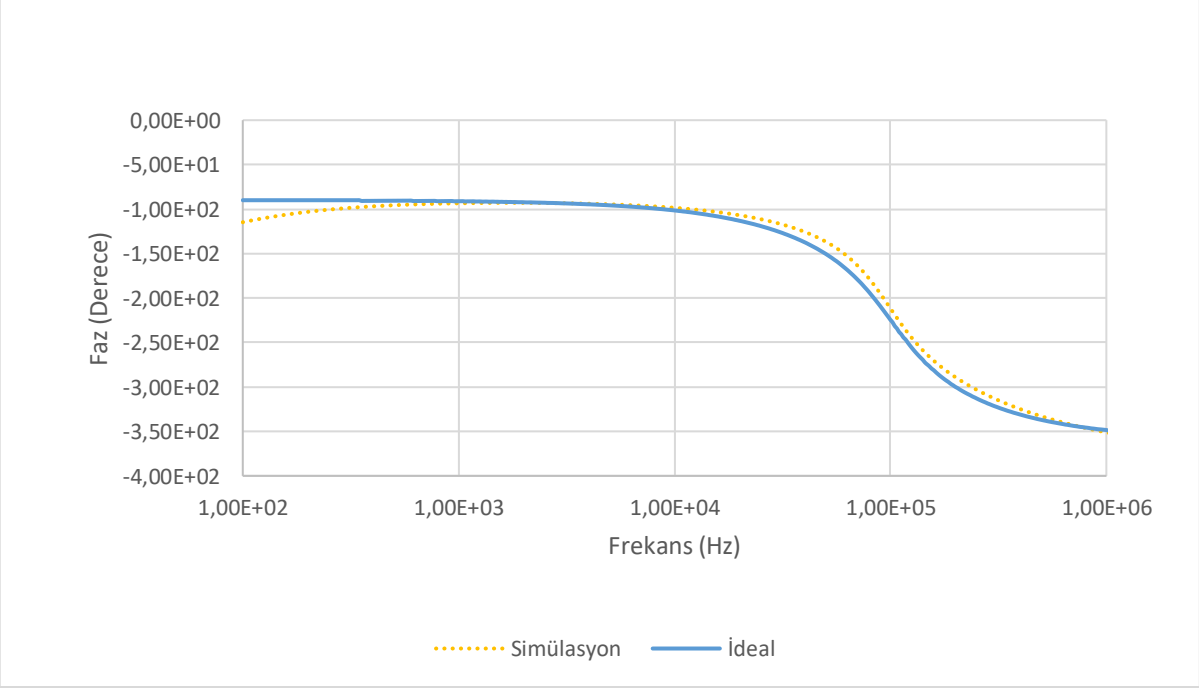
Şekil 4.13 Şekil 4.11'deki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği.



Şekil 4.14 Şekil 4.11'deki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği.



Şekil 4.15 Şekil 4.12'deki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği.

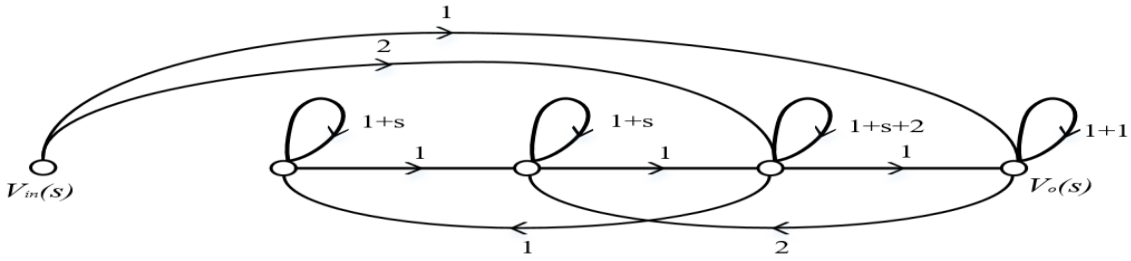


Şekil 4.16 Şekil 4.12'deki gerilim modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği.

4.1.4 Gerilim Modlu Band Söndüren Filtre Sentezi

Üçüncü dereceden Butterworth tipi band söndüren filtre devresinin gerilim transfer fonksiyonu (4.7)'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-s^3 - 1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.7}$$



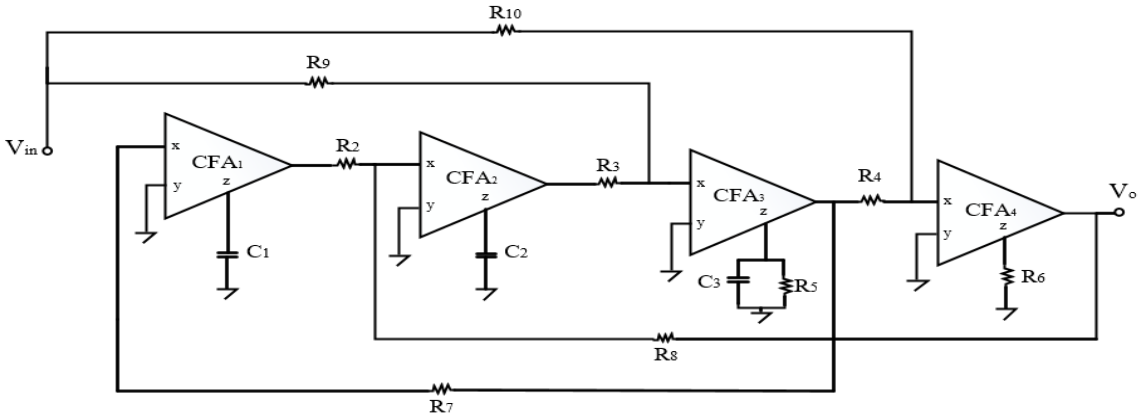
Şekil 4.17 Band söndüren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

Üçüncü bölümde açıklandığı gibi, (4.7) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.17'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.17'de verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen band söndüren filtre devresi Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.18 devresinde normalize eleman değerleri:

$R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = R_{10} = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = R_9 = 0.5\Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1F$

olarak belirlenmiştir.



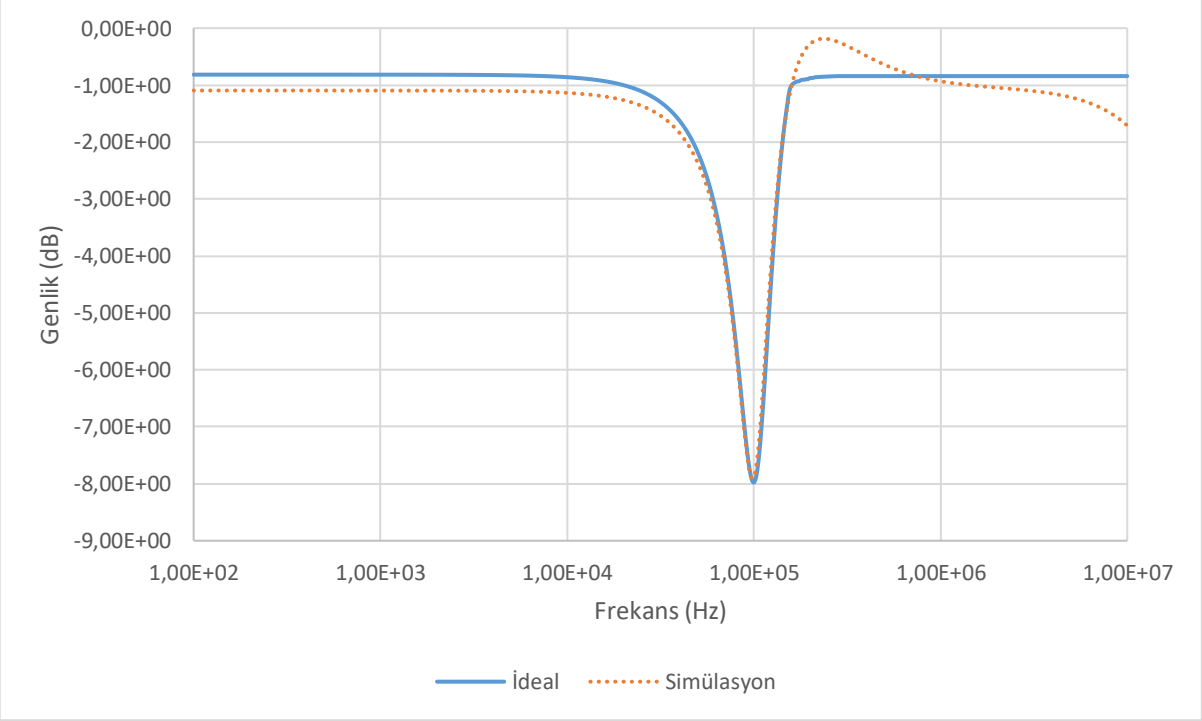
Şekil 4.18 Gerilim modlu band söndüren filtre devresi.

Band söndüren filtre devresinin merkez frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. B = $2\pi.10^5$, A = 10^3 olmak üzere Şekil 4.18'e ait denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

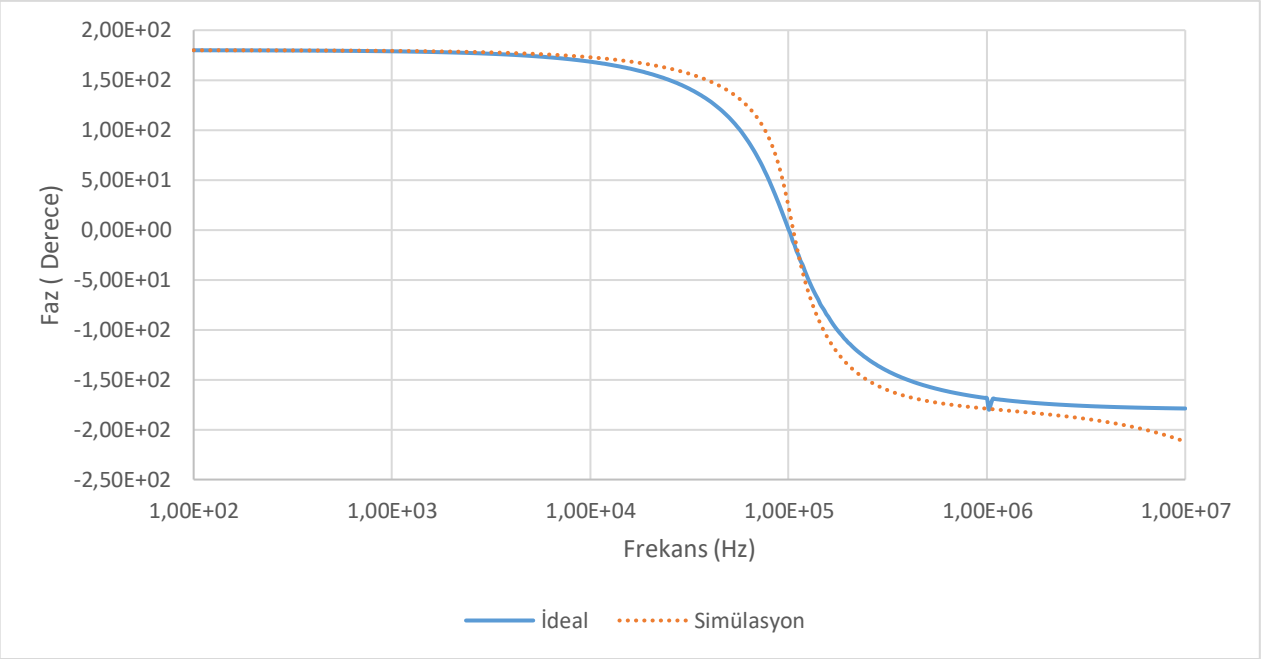
$\hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = \hat{R}_{10} = 1\ k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59nF$

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = \hat{R}_9 = 0.5k\Omega$

Şekil 4.18'deki devre girişine, 0.1V değere sahip AC gerilim uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.19 ve 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.19 Gerilim modlu band söndüren filtre devresinin genlik grafiği.

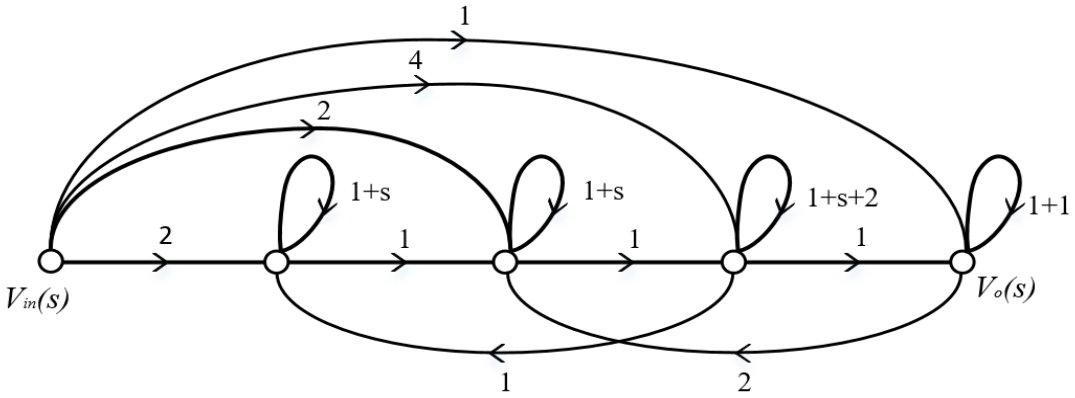


Şekil 4.20 Gerilim modlu band söndüren filtre devresinin faz grafiği.

4.1.5 Gerilim Modlu Tüm Geçiren Filtre Sentezi

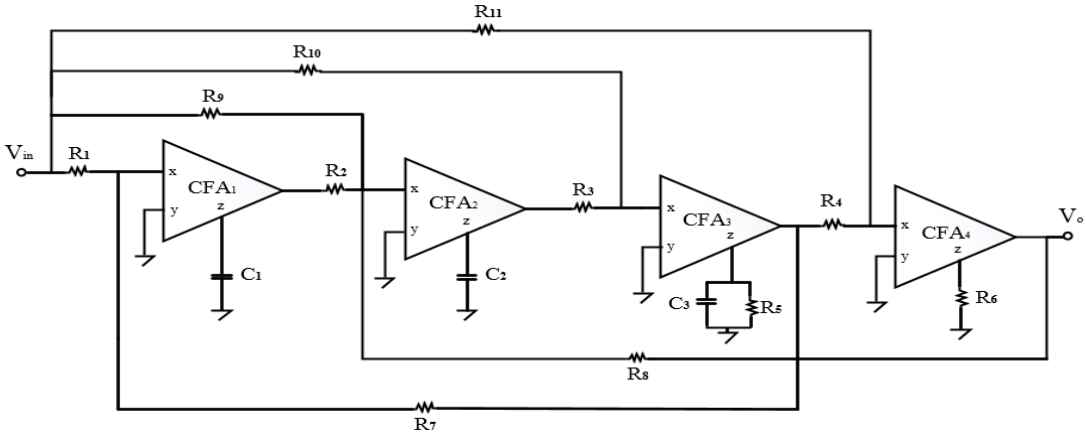
Üçüncü dereceden Butterworth tipi tüm geçiren filtre devresinin gerilim transfer fonksiyonu (4.8)'de verilmiştir.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_{in}(s)} = \frac{-s^3 + 2s^2 - 2s + 1}{s^3 + 2s^2 + 2s^1 + 1} \tag{4.8}$$



Şekil 4.21 Tüm geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

Üçüncü bölümde açıklandığı gibi, (4.9) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.21'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.21'de verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen tüm geçiren filtre devresi Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22 Gerilim modlu tüm geçiren filtre devresi.

Şekil 4.22 devresinde normalize eleman değerleri:

$R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = R_{11} = 1\ \Omega$, $R_1 = R_5 = R_8 = R_9 = 0.5\ \Omega$, $R_{10} = 0.25k\Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1F$

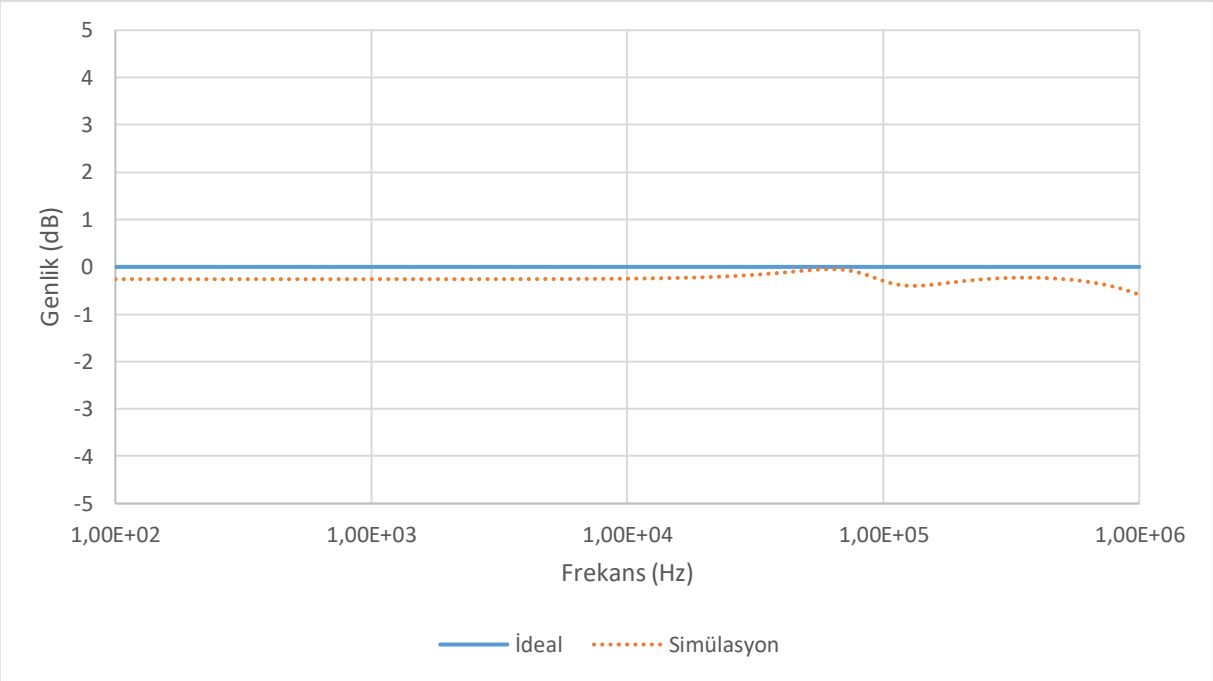
olarak belirlenmiştir.

Tüm geçiren filtre devresinin merkez frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^4$ olmak üzere şekil 4.22'ye ait denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

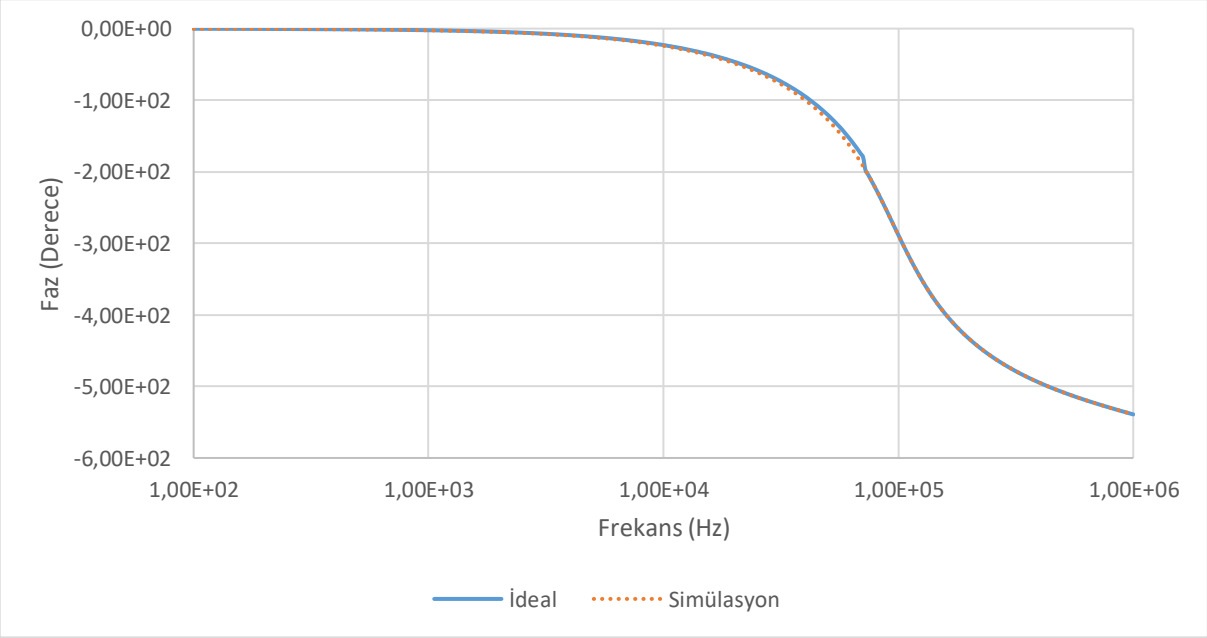
$\hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = \hat{R}_{11} = 10k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 0.159nF$

$\hat{R}_1 = \hat{R}_5 = \hat{R}_8 = \hat{R}_9 = 5k\Omega$ $\quad \hat{R}_{10} = 2.5k\Omega$

Şekil 4.22'deki devrenin girişine, 0.1V değere sahip AC gerilim uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.23 ve 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.23 Gerilim modlu tüm geçiren filtre devresinin genlik grafiği.



Şekil 4.24 Gerilim modlu tüm geçiren filtre devresinin faz grafiği.

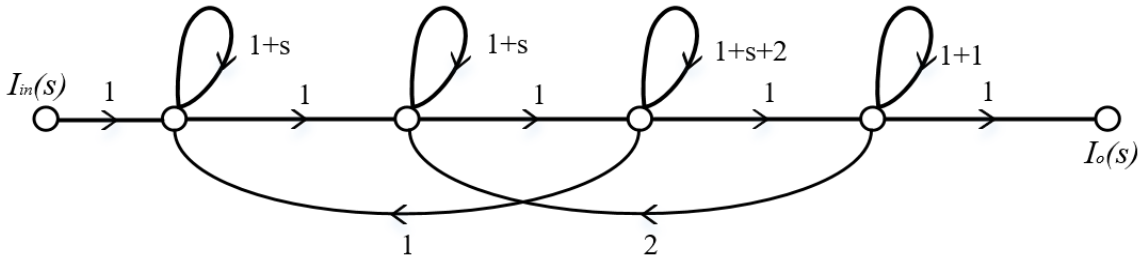
4.2 Akım Modlu Filtre Devreleri

Bölüm 3'te verilen CFA'lı devreler uyarınca 3. dereceden Butterworth tipi akım modlu alçak geçiren, yüksek geçiren, band geçiren, band söndüren ve tüm geçiren filtre devreleri verilmiştir.

4.2.1 Akım Modlu Alçak Geçiren Filtre Sentezi

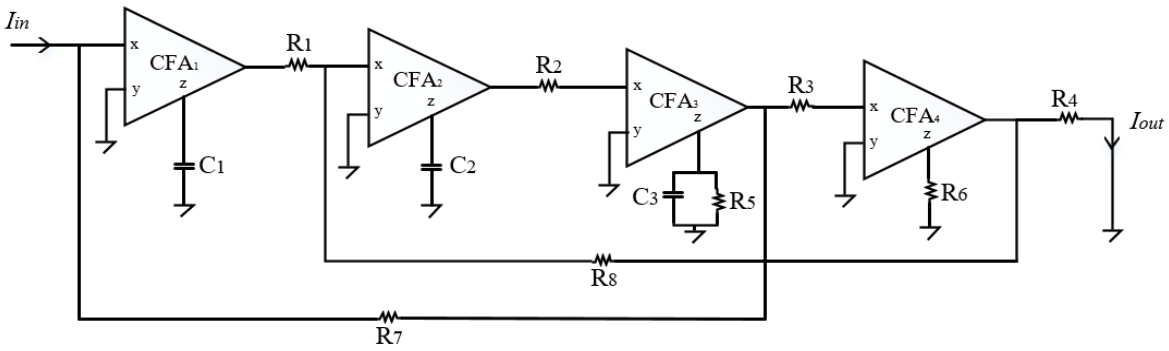
Üçüncü dereceden Butterworth tipi alçak geçiren filtre devresinin akım transfer fonksiyonu (4.9)'da verilmiştir. Transfer fonksiyonuna ilişkin elde edilen işaret akış diyagramı Şekil 4.24'te gösterilmiştir.

$$\alpha(s) = \frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.9}$$



Şekil 4.25 Akım modlu alçak geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

CFA'lı alt devre-alt graf ikilisinden yararlanılarak belirlenen dönüşüm kuralları uyarınca Şekil 4.25'te verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen alçak geçiren filtre devresi şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.26 Akım modlu alçak geçiren filtre devresi.

Şekil 4.26 devresinde normalize eleman değerleri:

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = 0.5\ \Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1$ F

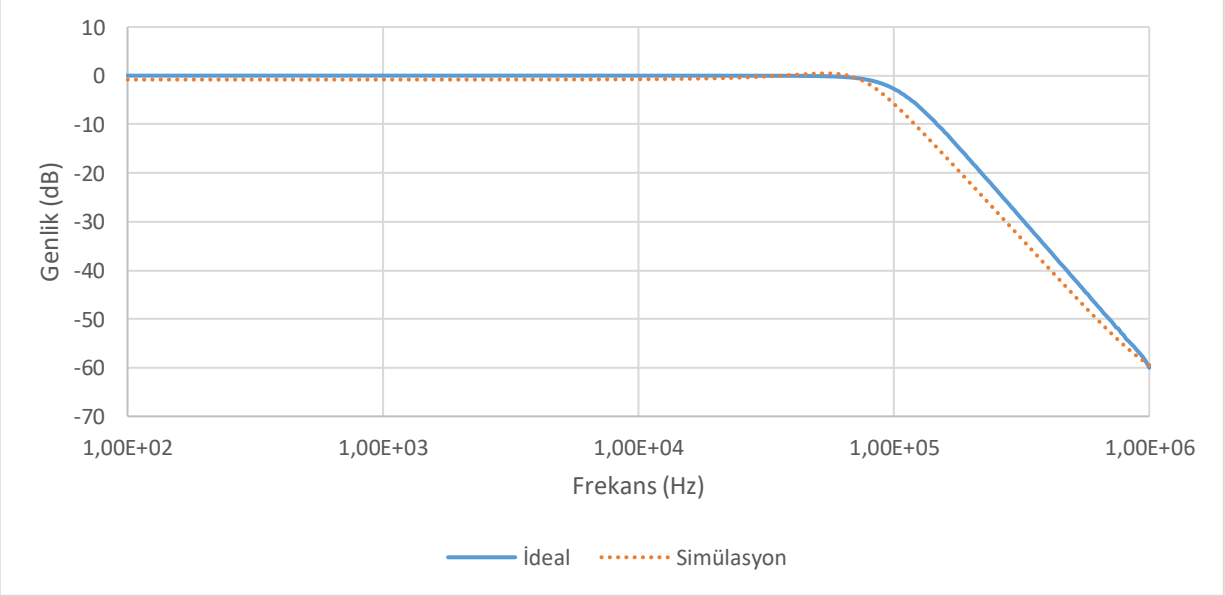
olarak belirlenmiştir.

Alçak geçiren filtre devresinin köşe frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerilim modlu devrelerde olduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Devrede kullanılan tüm kapasitör değerleri eşit ve $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ alınarak denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

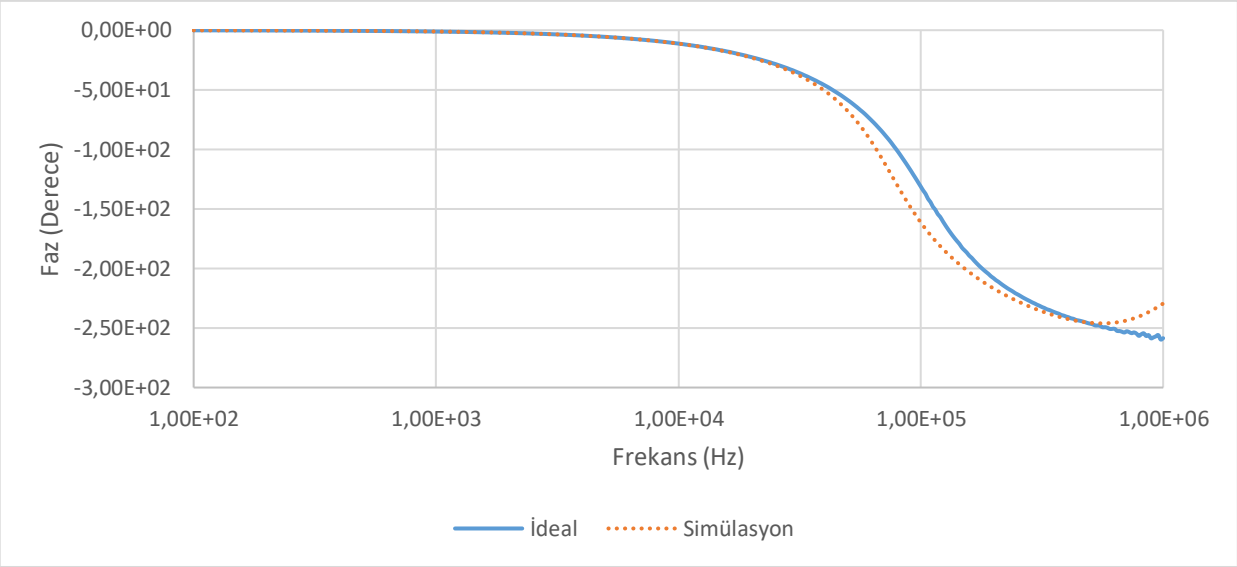
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = 1k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59nF$

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = 0.5k\Omega$

Şekil 4.26'daki devrenin girişine 0.1A değere sahip AC akım uygulanmıştır. AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.27 ve 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.27 Akım modlu alçak geçiren filtre devresinin genlik grafiği

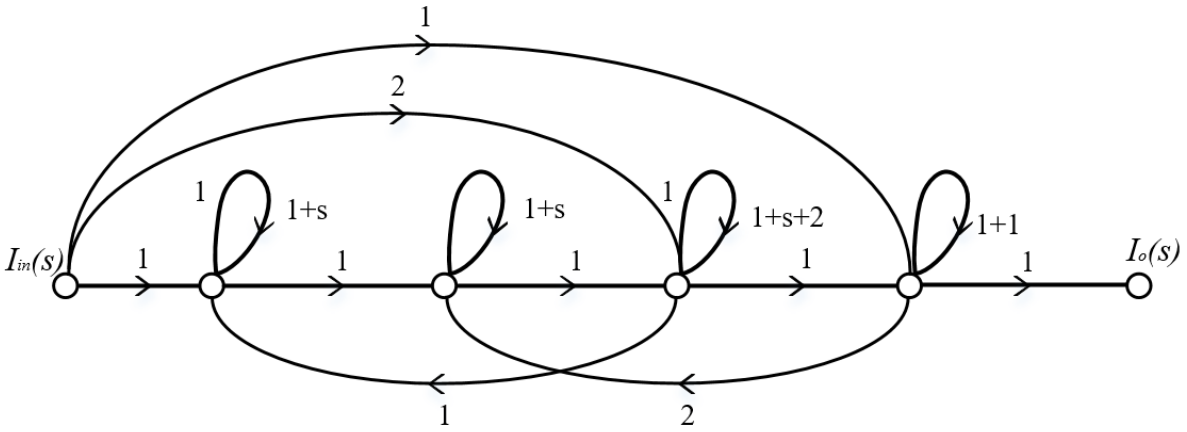


Şekil 4.28 Akım modlu alçak geçiren filtre devresinin faz grafiği.

4.2.2 Akım Modlu Yüksek Geçiren Filtre Sentezi

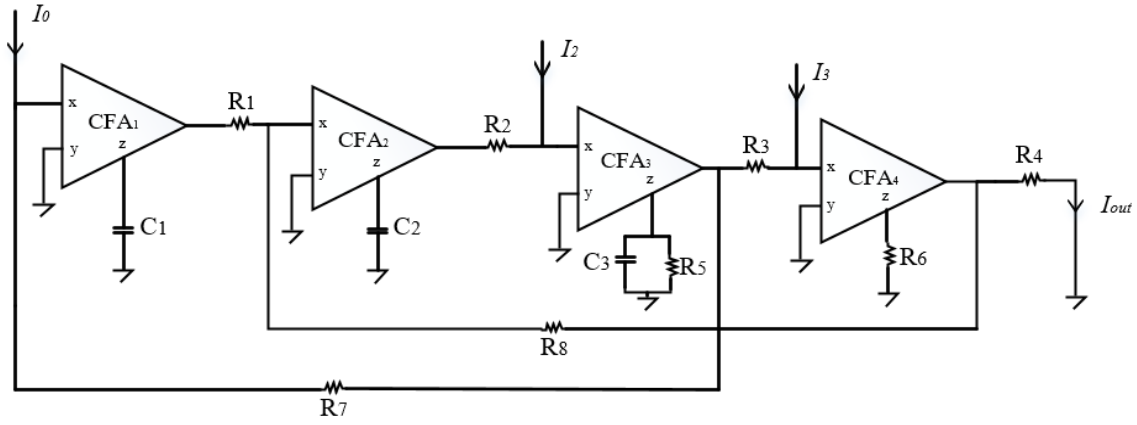
Üçüncü dereceden Butterworth tipi yüksek geçiren filtre devresinin akım transfer fonksiyonu (4.10)'de verilmiştir.

$$\alpha(s) = \frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = \frac{-s^3}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.10}$$



Şekil 4.29 Akım modlu yüksek geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

Üçüncü bölümde açıklandığı gibi, (4.10) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.29'da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Döüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.29'da verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen, Şekil 4.30'da verilen yüksek geçiren filtre devresi elde edilmiştir.



Şekil 4.30 Akım modlu yüksek geçiren filtre devresi.

Şekil 4.30'daki devrede görüldüğü üzere, işaret akış diyagramındaki her bir ileri yol, I_{in} giriş akımına bağlı bağımsız akım kaynağına karşılık düşmektedir.

Şekil 4.30 devresinde normalize eleman değerleri ve bağımsız akım kaynaklarına ilişkin bağıntılar:

$I_0 = I_{in}$

$I_2 = 2.I_{in}$

$I_3 = I_{in}$

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = 0.5\ \Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1$ F

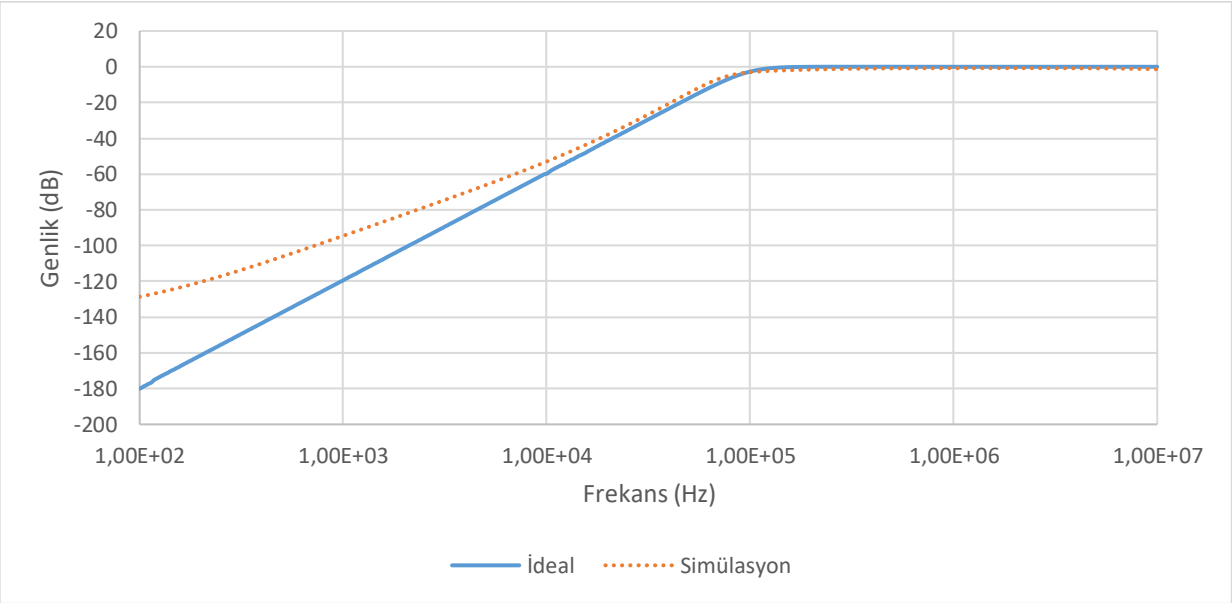
olarak belirlenmiştir.

Yüksek geçiren filtre devresinin köşe frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ olmak üzere şekil 4.30'a ait denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

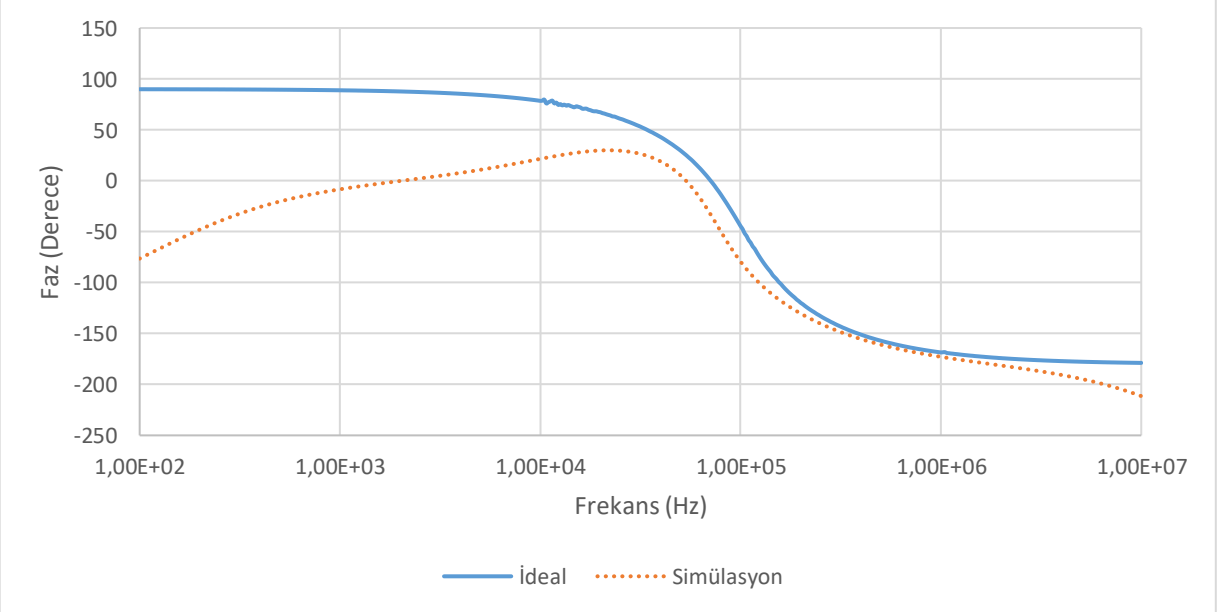
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = 1k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59nF$

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = 0.5k\Omega$

Şekil 4.30 devresinde, I_{in} = 0.1A AC olarak alınmış ve her bir bağımsız akım kaynağı verilen bağıntılar hesaba katılarak devreye uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.31 ve 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.31 Akım modlu yüksek geçiren filtre devresinin genlik grafiği.



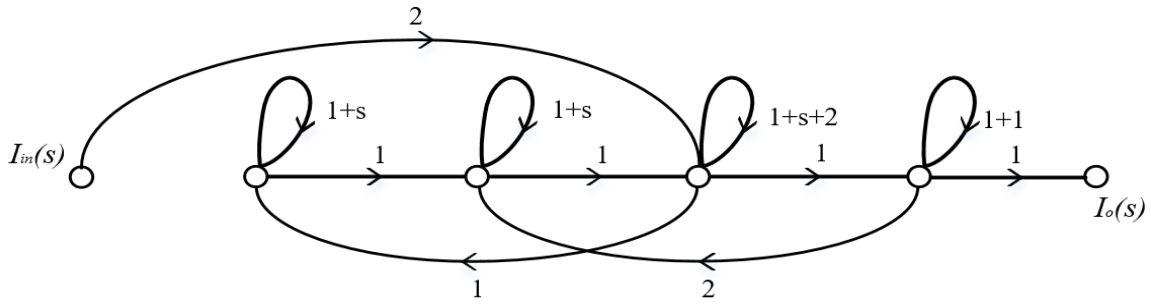
Şekil 4.32 Akım modlu yüksek geçiren filtre devresinin faz grafiği.

4.2.3 Akım Modlu Band Geçiren Filtre Sentezi

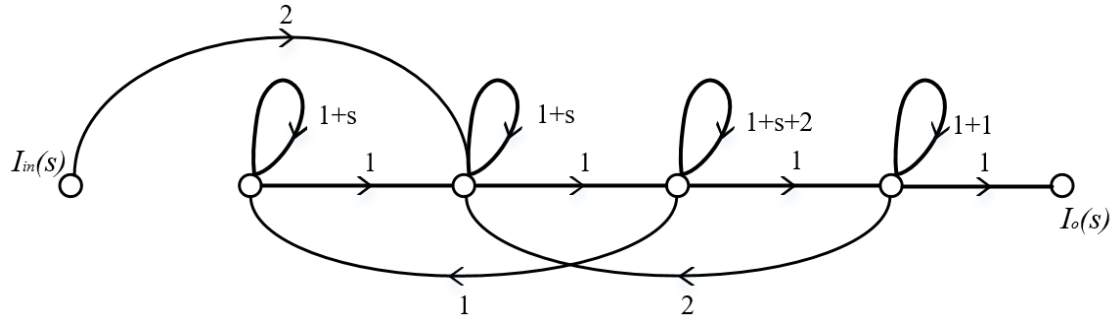
Üçüncü dereceden Butterworth tipi band geçiren filtre devresinin akım transfer fonksiyonları (4.11) ve (4.12)'de verilmiştir.

$$\alpha(s) = \frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = \frac{2s^2}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.11}$$

$$\alpha(s) = \frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = \frac{-2s}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.12}$$

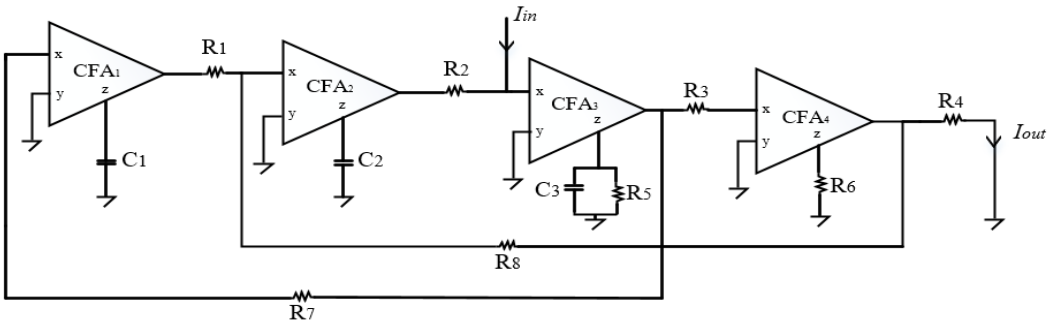


Şekil 4.33 Eşitlik (4.11)'deki Akım modlu band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

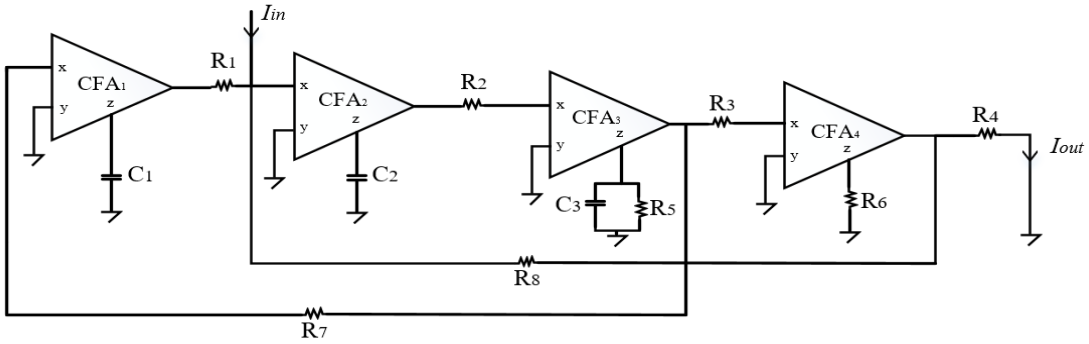


Şekil 4.34 Eşitlik (4.12)'deki akım modlu band geçiren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

(4.11) ve (4.12) eşitliklerine karşılık düşen işaret akış diyagramları Şekil 4.33 ve 4.34'te gösterildiği gibidir. Dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.33 ve 4.34'te verilen işaret akış diyagramlarına karşılık düşen, Şekil 4.35 ve 4.36'da verilen devreler elde edilmiştir.



Şekil 4.35 (4.11) fonksiyonunu gerçekleyen akım modlu band geçiren filtre devresi.



Şekil 4.36 (4.12) fonksiyonunu gerçekleyen akım modlu band geçiren filtre devresi.

Her iki devre için normalize eleman değerleri:

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = 0.5\Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1F$

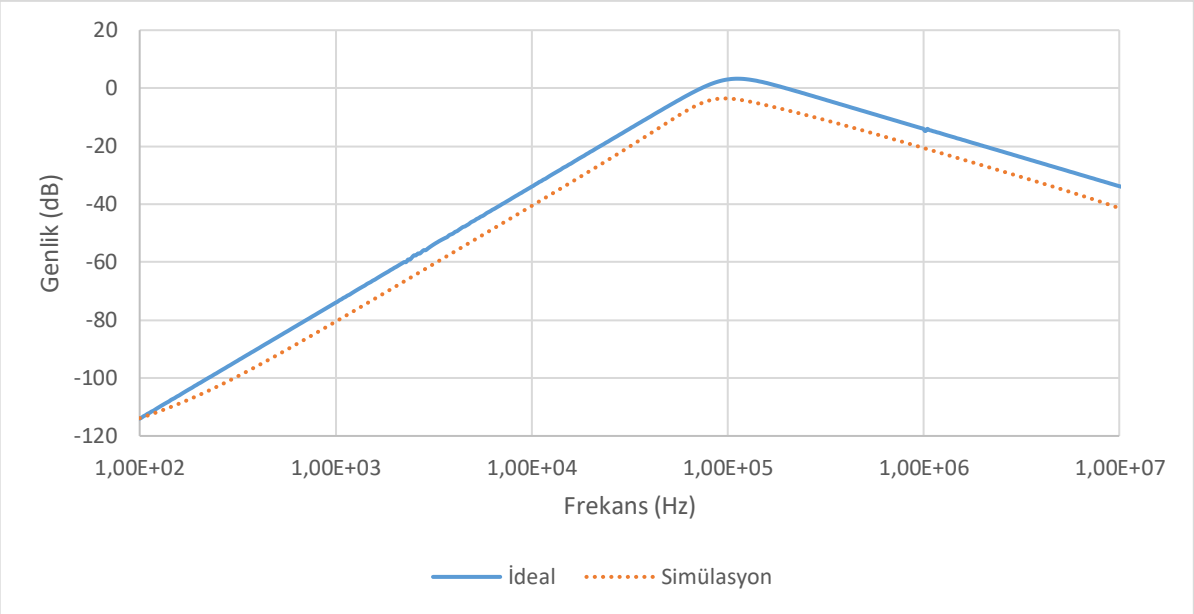
olarak belirlenmiştir.

Band geçiren filtre devresinin merkez frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ olmak üzere Şekil 4.35 ve 4.36'daki devrelere ait denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

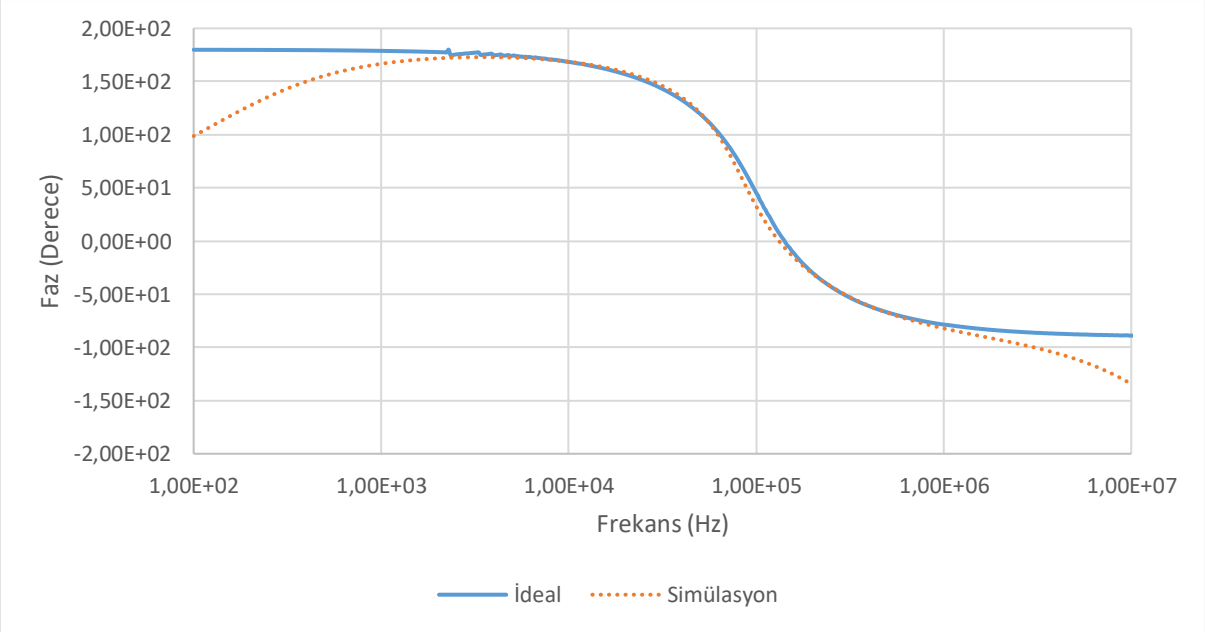
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = 1\ k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59nF$

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = 0.5k\Omega$

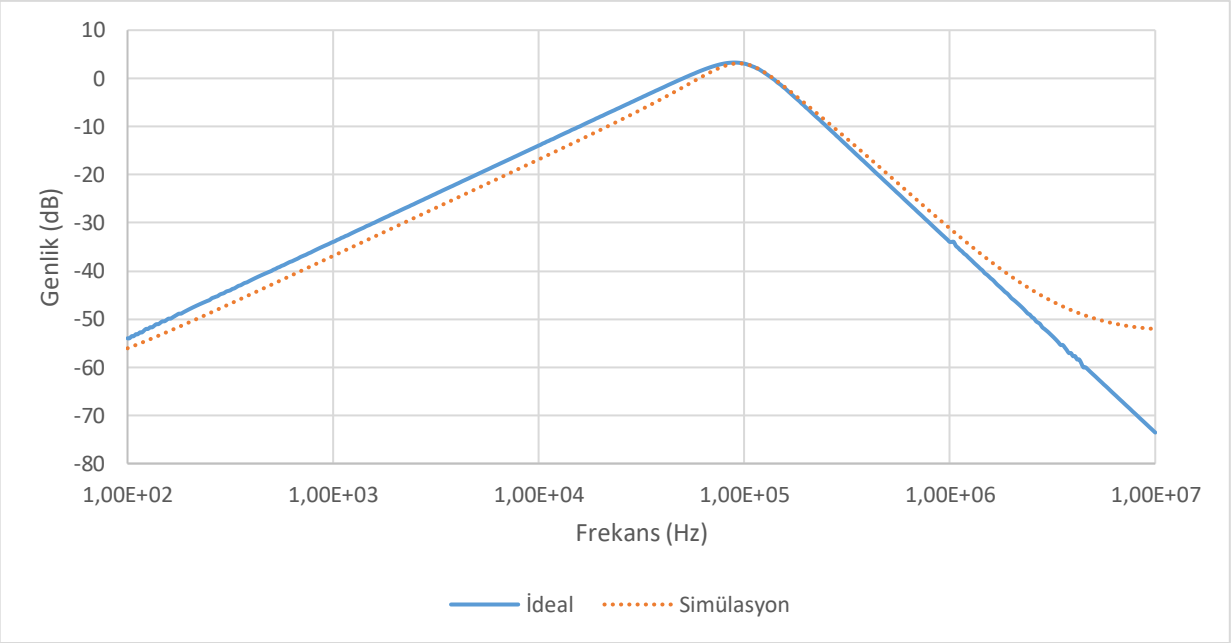
Her iki devrenin girişine, 0.1A değere sahip AC akım uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.37,4.38,4.39 ve 4.40'da verilmiştir.



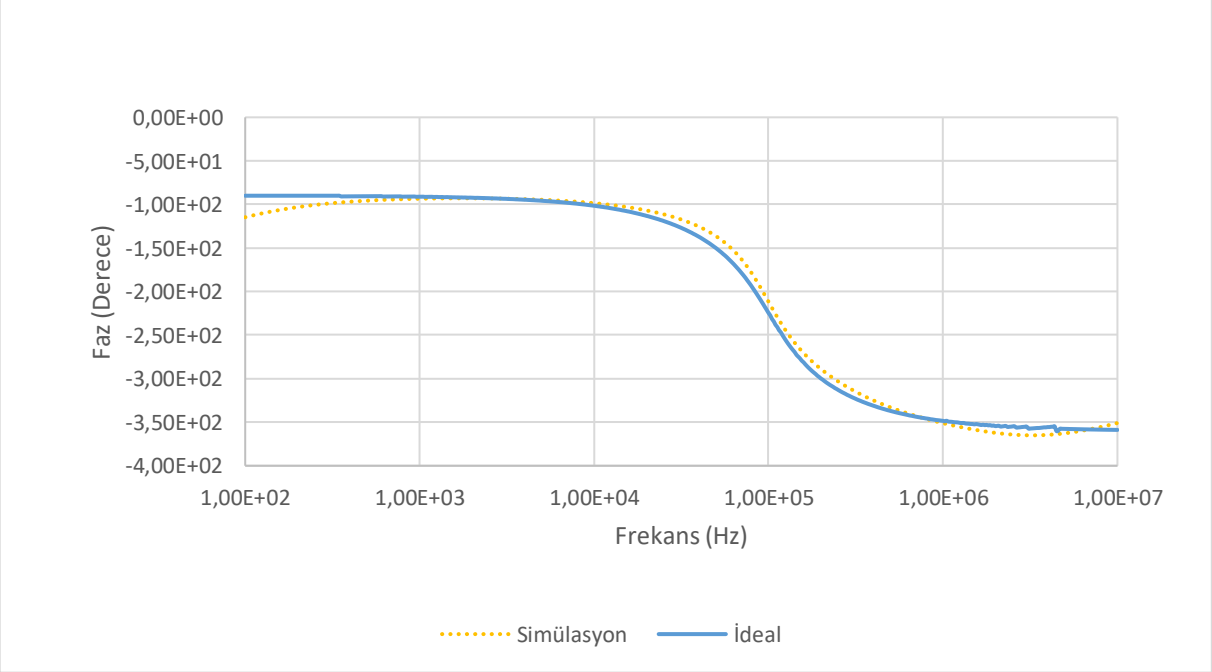
Şekil 4.37 Şekil 4.35'teki akım modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği.



Şekil 4.38 Şekil 4.35'teki akım modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği.



Şekil 4.39 Şekil 4.36'daki akım modlu band geçiren filtre devresinin genlik grafiği.

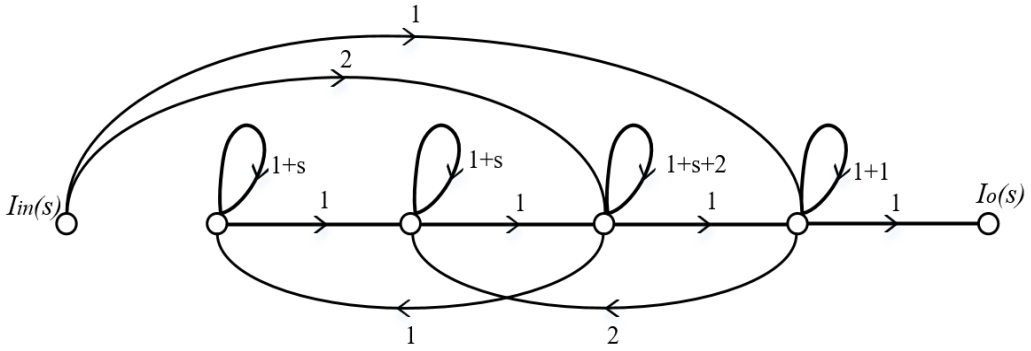


Şekil 4.40 Şekil 4.36'daki akım modlu band geçiren filtre devresinin faz grafiği.

4.2.4 Akım Modlu Band Söndüren Filtre Sentezi

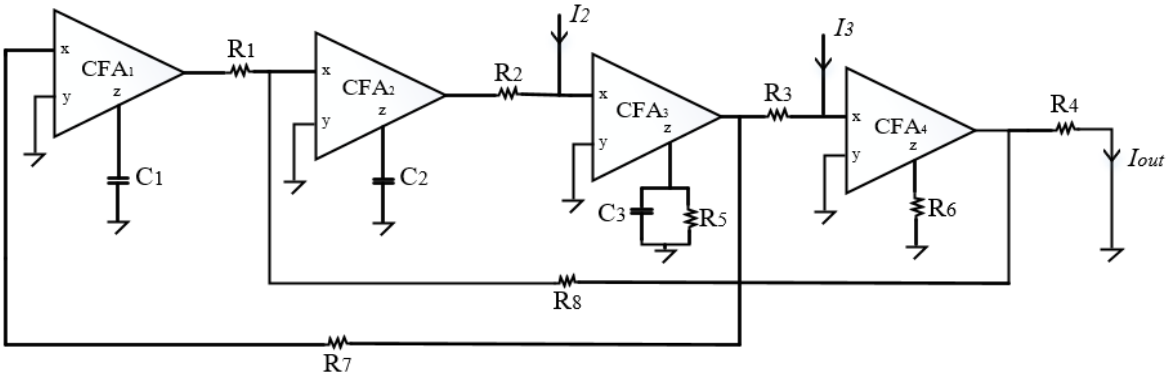
Üçüncü dereceden Butterworth tipi band söndüren filtre devresinin akım transfer fonksiyonu (4.13)'te verilmiştir.

$$\alpha(s) = \frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = \frac{-s^3 - 1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.13}$$



Şekil 4.41 Akım modlu band söndüren filtre fonksiyonuna ilişkin işaret akış diyagramı.

Üçüncü bölümde açıklandığı gibi, (4.13) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.41'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.41'de verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen, Şekil 4.42'de verilen band söndüren filtre devresi elde edilmiştir.



Şekil 4.42 Akım modlu band söndüren filtre devresi.

Şekil 4.42 devresinde normalize eleman değerleri ve bağımsız akım kaynaklarına ait bağıntılar:

$I_2 = 2.I_{in}$

$I_3 = I_{in}$

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = 0.5\ \Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1$ F

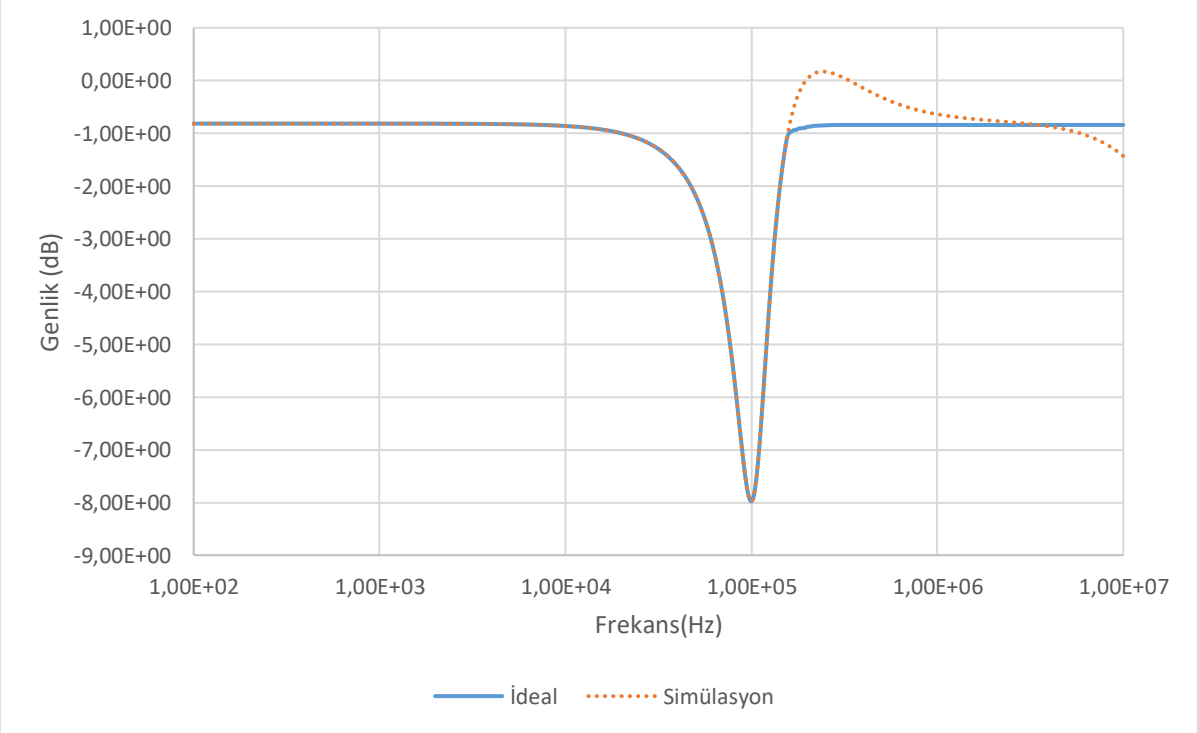
olarak belirlenmiştir.

Band söndüren filtre devresinin merkez frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ olmak üzere Şekil 4.42 devresinde denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir:

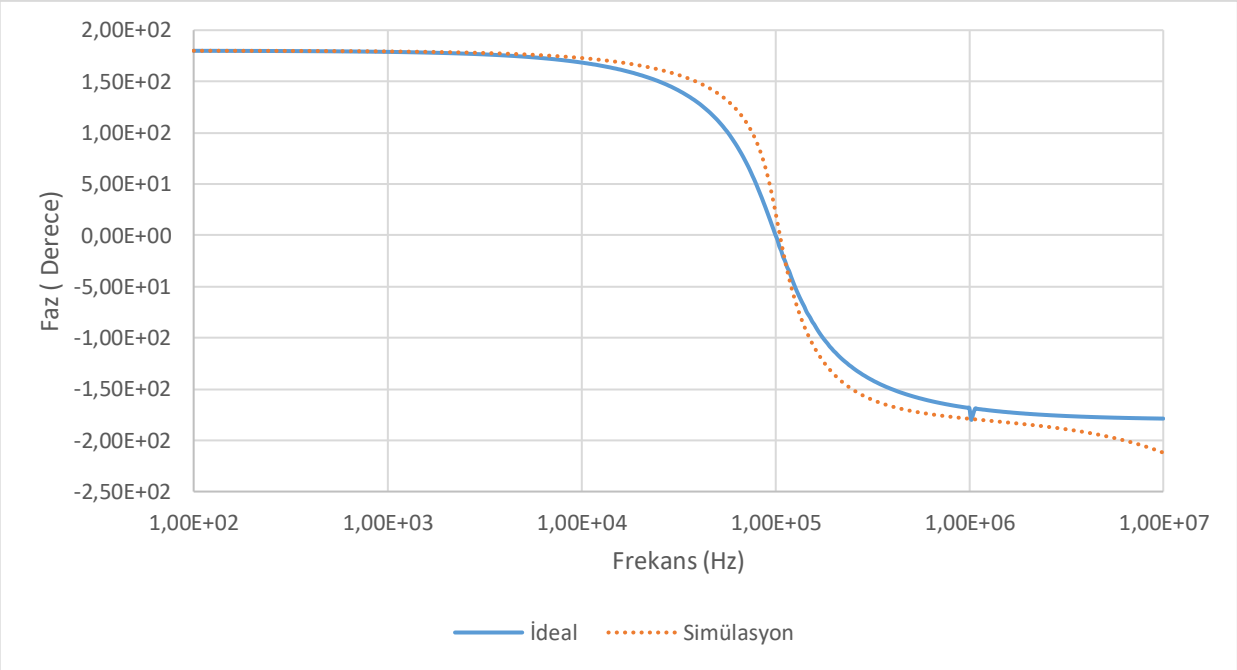
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = 1\ k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59$ nF

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = 0.5\ k\Omega$

Şekil 4.42 devresinde, $I_{in} = 0.1$ A AC olarak alınmış ve her bir bağımsız akım kaynağı verilen bağıntılar hesaba katılarak devreye uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.43 ve 4.44'te verilmiştir.



Şekil 4.43 Akım modlu band söndüren filtre devresinin genlik grafiği.

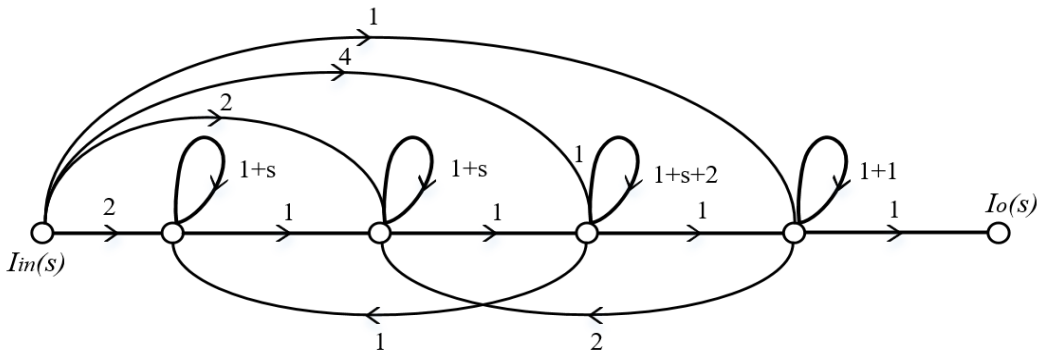


Şekil 4.44 Akım modlu band söndüren filtre devresinin faz grafiği.

4.2.5 Akım Modlu Tüm Geçiren Filtre Sentezi

Üçüncü dereceden Butterworth tipi tüm geçiren filtre devresinin akım transfer fonksiyonu (4.14)'te verilmiştir.

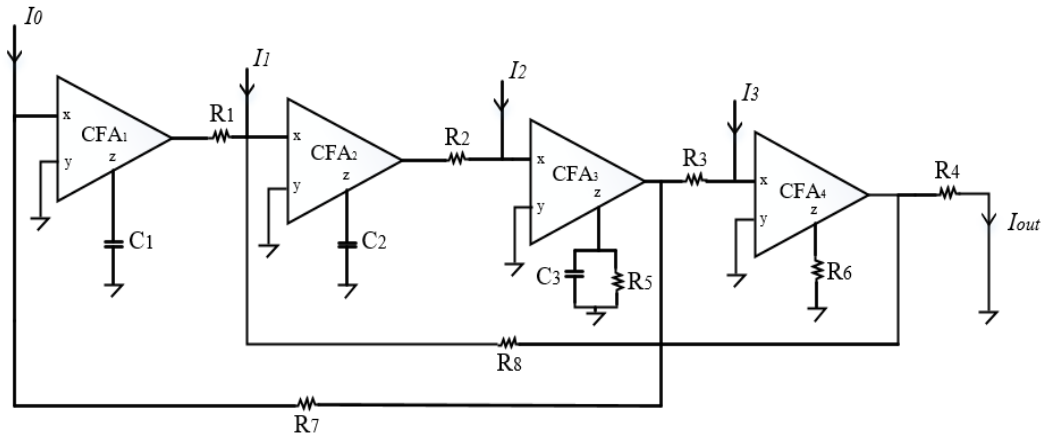
$$\alpha(s) = \frac{I_o(s)}{I_{in}(s)} = \frac{-s^3 + 2s^2 - 2s + 1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \tag{4.14}$$



Şekil 4.45 Akım modlu tüm geçiren filtre fonksiyonuna ait işaret akış diyagramı.

Üçüncü bölümde açıklandığı gibi, (4.14) eşitliğine karşılık düşen işaret akış diyagramı Şekil 4.45'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Dönüşüm kuralları uyarınca, Şekil 4.45'te verilen işaret akış diyagramına karşılık düşen, Şekil 4. 46'da verilen tüm geçiren filtre devresi elde edilmiştir.



Şekil 4.46 Akım modlu tüm geçiren filtre devresi.

Şekil 4.46'daki devrede görüldüğü üzere, işaret akış diyagramındaki her bir ileri yol, I_{in} giriş akımına bağlı bağımsız akım kaynağına karşılık düşmektedir. Şekil 4.46 devresinde normalize eleman değerleri ve bağımsız akım kaynaklarına ait bağıntılar:

$I_0 = 2.\ I_{in}$

$I_1 = 2.\ I_{in}$

$I_2 = 4.I_{in}$

$I_3 = I_{in}$

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1\ \Omega$, $R_5 = R_8 = 0.5\Omega$

$C_1 = C_2 = C_3 = 1F$

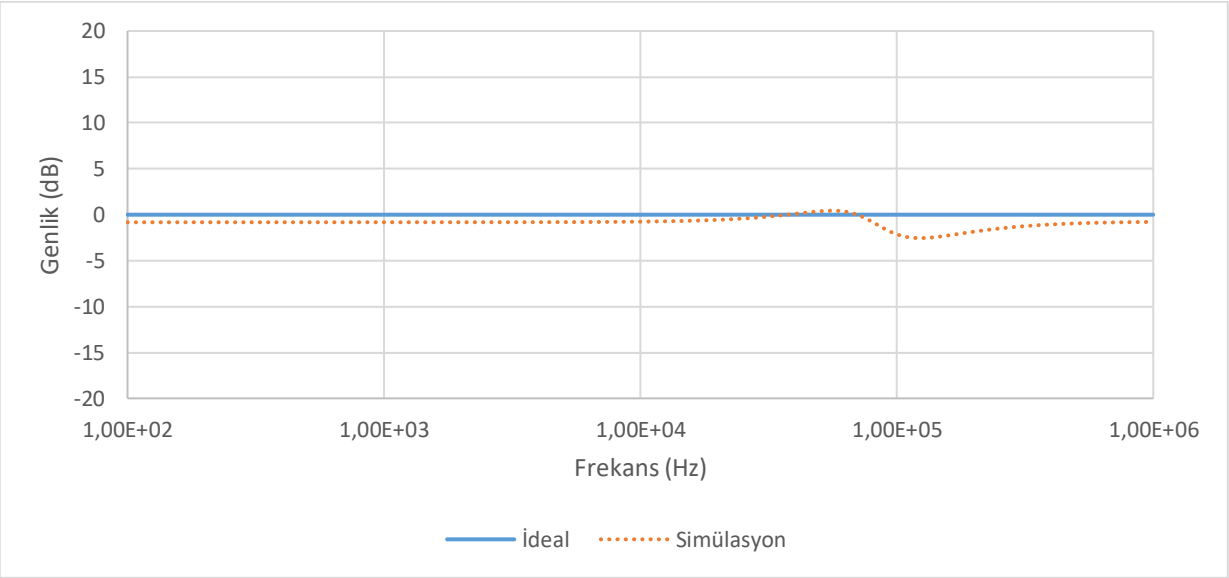
olarak belirlenmiştir.

Yüksek geçiren filtre devresinin merkez frekansını 100KHz'e uyarlamak için denormalizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. $B = 2\pi.10^5$, $A = 10^3$ olmak üzere şekil 4.46 devresine ait denormalize eleman değerleri aşağıdaki gibidir.

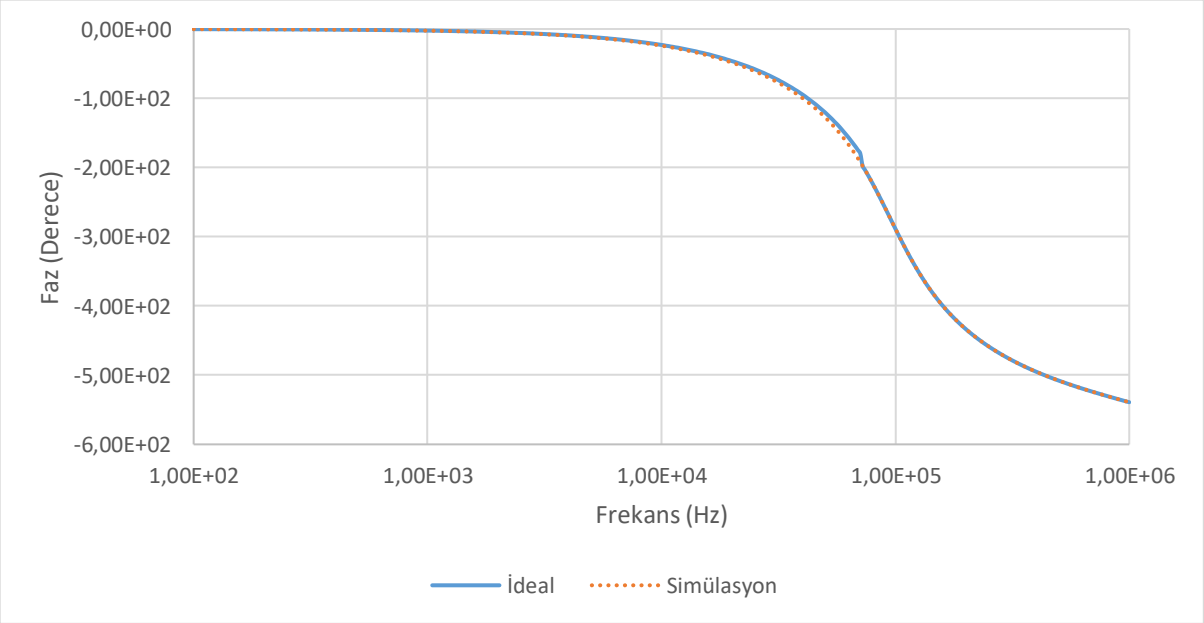
$\hat{R}_1 = \hat{R}_2 = \hat{R}_3 = \hat{R}_4 = \hat{R}_6 = \hat{R}_7 = 1\ k\Omega$, $\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}_3 = 1.59nF$

$\hat{R}_5 = \hat{R}_8 = 0.5k\Omega$

Şekil 4.46 devresinde, I_{in} = 0.1A AC olarak alınmış ve her bir bağımsız akım kaynağı verilen bağıntılar hesaba katılarak devreye uygulanmıştır.AC analize göre elde edilen genlik ve faz grafikleri Şekil 4.47 ve 4.48'de verilmiştir.



Şekil 4.47 Akım modlu tüm geçiren filtre devresinin genlik grafiği.



Şekil 4.48 Akım modlu tüm geçiren filtre devresinin faz grafiği.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu tezde, avantajlarından dolayı aktif eleman olarak CFA seçilmiş ve bu elemana ilişkin tanım bağıntıları, devre şeması gibi temel özellikleri verilmiş ve CFA'lı temel devrelerin analizleri yapılmıştır. PSPICE programında kullanılan AD844 elemanına ait devre şeması ve blok diyagramı verilmiş, çalışma şekli incelenmiştir.

Gerilim ve akım transfer fonksiyonlarının geçekleştirilmesinde işaret akış diyagramı yöntemi kullanılmıştır. Bu işaret akış diyagramı yönteminde, öncelikle CFA elemanı bulunduran bir alt-devre ele alınmış ve bu alt-devrenin analizi yapılarak, alt-devreye ilişkin alt-graf elde edilmiştir. Daha sonra, gerçekleştirilmesi istenen fonksiyonlara ilişkin, bu alt-graftan oluşan işaret akış diyagramları elde edilmiş, bu diyagramlardan da elde edilen dönüşüm kuralları uyarınca, aktif devrelere geçilmiştir.

Bu yöntem uyarınca, n. dereceden gerilim ve akım transfer fonksiyonları CFA elemanı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde, n. dereceden gerilim transfer fonksiyonlarının CFA ile gerçekleştirilmesine ilişkin çeşitli çalışmalar bulunmakta olup, Acar tarafından önerilen yöntemde (n+1) sayıda CFA elemanı, n adet eş değerde kapasitör ve (5n+3) sayıda direnç kullanılmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda ise, n. dereceden gerilim transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin önerilen yöntemde (n+1) sayıda CFA elemanı, n adet eş değerde bir ucu topraklanmış kapasitör ve (3n+2) sayıda direnç kullanılmıştır. Böylece direnç sayısı (2n+1) azaltılmış olmaktadır.

Yapılan literatür çalışması sonucunda, n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının CFA elemanı ile gerçekleştirilmesine ilişkin bir yöntem bulunmadığı görülmüştür. Bu çalışmada CFA elemanı kullanılarak, n. dereceden akım transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesine ilişkin yeni bir yöntem önerilmiş; yeni devreler elde edilmiştir. Bu devrelerde (n+1) sayıda CFA elemanı, n adet eş değerde bir ucu topraklanmış kapasitör, (2n+1) sayıda direnç ve (n+1) sayıda bağımsız akım kaynağı kullanılmıştır.

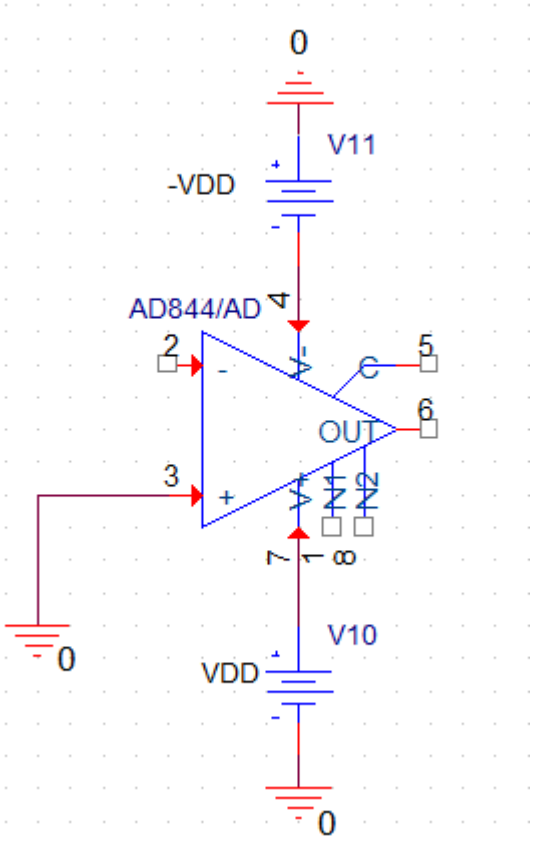
İşaret akış diyagramı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu akım ve gerilim modlu devrelerde, bütün elemanların bir ucu topraklı olarak gerçeklenmiştir. Bu sayede, gerçekleştirilen devrelerde parazitik etkiler aza indirgenmiştir.

Örnek olarak, üçüncü dereceden Butterworth türü gerilim ve akım modlu alçak geçiren, yüksek geçiren, band geçiren, band söndüren ve tüm geçiren filtre fonksiyonları önerilen yöntem uyarınca gerçekleştirilmiş, PSPICE programı yardımıyla simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, gerilim ve akım modlu tüm filtre devrelerinde, teorik sonuçlarla simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

EK

AD844 ELEMANI PSPICE DEVRESİ

Tezde 3. dereceden Butterworth türü gerilim ve akım modlu devrelerin simülasyonlarında kullanılan AD844 elemanına ilişkin devre şekilde verilmiştir.



AD844 elemanı devresi

Şekildeki devrede, 2 numaralı uç CFA'nın x ucuna, 3 numaralı uç CFA'nın y ucuna, 5 numaralı uç CFA'nın z ucuna, 6 numaralı uç CFA'nın w ucuna karşılık düşmektedir.

KAYNAKÇA

Acar, C. (1996). Nth-order voltage transfer function synthesis using a commercially available active component: signal-flow graph approach. *Electronic Letters,32*, 1933-1934.

Acar, C., & Özoğuz, S. (2000). nth-order current transfer function synthesis using current differencing buffered amplifier: signal-flow graph approach. *Microelectronics Journal,31*, 49-53.

AD844 Data Sheet. (2017). Analog Devices Web Sitesi: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD844.pdf adresinden alındı

Anday, F. (1972). Active Realisation of nth-order allpass transfer functions. *Electronic Letters,8*, 399-400.

Anday, F. (1981). *Aktif Filtre Sentezi.* İstanbul: Tübitak Yayınları.

Anday, F., & Sedef, H. (2000). Nth-order Lowpass Voltage Transfer Function Synthesis Using Current Feedback Amplifier. *Frequenz-International Journal of Telecommunication*, 209-210.

Bowers, D. F. (1993). The so-called current-feedback operational amplifier-technological breakthrough or engineering curiosity? *International Symposium on Circuits and Systems* (s. 1054-1057). IEEE .

Chang, C.-M., & Al-Hashimi, B. M. (2003). Analytical synthesis of current-mode high-order OTA-C filters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1188 - 1192.

Demirtaş, M. (2014). Akım Taşıyıcı Tabanlı Aktif Devre Elemanlarının İncelenmesi. *Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya*.

Feng, J., Wang, C., Zang, M., & Ren, Y. (2011). Realization of Current-Mode General Nth-Order Filter Based on Current Mirrors. *3rd International Conference on Advanced Computer Control* (s. 367-370). IEEE.

Gilbert, B. (1975). TRANSLINEAR CIRCUITS: A PROPOSED. *Electronics Letters,11,1*, 14-16.

Güneş, E. O., & Anday, F. (1995). Realisation of current-mode low pass filters using CFCCIIs. *Electronics Letters,31,* 2161-2162.

Güneş, E. O., & Anday, F. (1999). An nth-order allpass voltage transfer function synthesis using commercially available active components. *Microelectronics Journal,30,* 895-898.

Güneş, E., & Anday, F. (1997). CFA based fully integrated nth-order lowpass filter. *Electronic Letters,33,* 571-573.

Güneş, O. (1998). Akım Taşıyıcılar ve Akım Taşıyıcı Tabanlı Aktif Elemanlarla Transfer Fonksiyonlarının Gerçekleştirilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul*.

Intawichai, K., & Tangsrirat, W. (2013). Signal flow graph realization of nth-order current-mode allpass filters using CFTAs. *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology* (s. 1-6). IEEE.

Jiang, J., Zhou, X., & Xu, W. (2012). Nth-order current transfer function synthesis using DVCCs: signal-flow graph approach. *International Journal of Electronics*, 482-496.

Kumar, A., & Paul, S. K. (2018). Nth order current mode universal filter using MOCCCIIs. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 95*, 181-193.

Kuntman, H. H., & Uygur, A. (2012). New possibilities and trends in circuit design for analog signal processing. *International Conference on Applied Electronics* (s. 1-9). IEEE.

Lee, C.-N. (2013). Fully Cascadable High-Order Current-Mode CCII-Based Universal Filter. *International Conference on Fuzzy Theory and Its Application* (s. 441-445). IEEE.

Lidgey, F. J., & Hayatleh, K. (1997). Current-feedback operational amplifiers and applications. *Electronics & Communication Engineering Journal, 9*, 176-182.

Limpaibool, P., Kunto, T., & Prommee, P. (2015). Design of High-order Current-mode Ladder Low-pass Filters Using MOCCCIIs. *International Symposium on Multimedia and Communication Technology*, (s. 34-37).

Minaei, S., Sayin, O. K., & Kuntman, H. (2006). Nth-Order Current Transfer Function Synthesis Using a High-Performance Electronically Tunable Current Conveyor. *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, (s. 15-18).

Sedef, H. (1994). Akım Taşıyıcıları Kullanılarak Aktif Devre Sentezinde Yeni Olanaklar. *Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul*.

Senani, R., Bhaskar, D., Singh, A., & Singh, V. (2013). *Current Feedback Operational Amplifiers and Their Applications.* Springer.

Smith, K., & Sedra, A. (1968). The Current Conueyor*-A New Circuit Building Block. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 1368-1369.

Soliman, A. M. (1996). Applications of the Current Feedback Operational Amplfiers. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 265-302.

Tangsrirat, W. (2014). SFG Synthesis of General High-Order All-Pass and All-Pole Current Transfer Functions Using CFTAs. *The Scientific World Journal*, 1-8.

Topaloglu, S., Sagbas, M., & Anday, F. (2012). Three-input single-output second-order filters using current-feedback amplifiers. *International Journal of Electronics and Communications*, 683-686.

Toumazou, C., Payne, A., & Lidgey, J. (1993). Current-Feedback Versus Voltage Feedback Amplifiers: History, Insight and Relationships. *International Symposium on Circuits and Systems* (s. 1046-1049). IEEE.

Tu, S.-H., Ross, J. N., & Chang, C.-M. (2006). Analytical Synthesis of Current-Mode High-Order Single-Ended-Input OTA and Equal-Capacitor Elliptic Filter Structures With the Minimum Number of Components. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 2195 - 2210.

Zhang, P.-h., Zhou, X.-f., & Xiao, S. (2011). A Current-Mode Nth-order Multifunction Filter Using Minimum number of DVCCs. *International Conference on Network Computing and Information Security* (s. 323-326). IEEE.