

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAREKÖK ORTAM FİLTRELERİNİN DURUM UZAYI GENEL TASARIM
YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI**

**DOKTORA TEZİ
Şaziye SURAV YILMAZ**

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah T. TOLA

HAZİRAN 2013


DOKTORA TEZ ONAY FORMU

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 081662006 nolu öğrencisi Şaziye SURAV YILMAZ tarafından hazırlanan “**KAREKÖK ORTAM FİLTRELERİNİN DURUM UZAYI GENEL TASARIM YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Abdullah T. TOLA (PAÜ) 
(Jüri Başkanı)

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Uğur YÜCEL (PAÜ) 

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Erkan YÜCE (PAÜ) 

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Zübeyir ÜNLÜ (İYTE) 

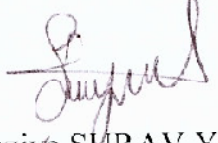
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Remzi ARSLANALP (PAÜ) 

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
19/06/2013.. tarih ve ..19/8..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Nuri KOLSUZ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İmza
Öđrenci Adı Soyadı


Şaziye SURAV YILMAZ

ÖNSÖZ

Bu çalışmada analog filtre yapılarından biri olan karekök ortam filtre devrelerinin A sınıfı ve AB sınıfı devre yapılarında sistematik sentezine yönelik genel tasarım yöntemleri önerilmiştir. Önerilen yöntemler genel bir çözüm sunmaktadır ve bu yöntemler ile farklı tür ve derecelerden filtrelerin tasarımları gerçekleştirilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen sentez yöntemleri ile birinci dereceden beşinci dereceye kadar farklı türlerden filtre tasarımları yapılmıştır. Tasarlanan filtre devrelerinin PSpice programında benzetimleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yapılan analiz sonucunda önerilen yöntemler ile tasarlanmış olan devrelerin iyi bir çalışma performansı ortaya koyduğu ve özellikle AB sınıfı yapıda tasarlanan devrelerin yüksek dinamik giriş işareti aralığına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Doktora tez çalışmalarım süresince değerli zamanını benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile her konuda bana teşvik edici yönetimi ve olumlu eleştirileriyle rehberlik eden, değerli danışman hocam Doç. Dr. Abdullah T. TOLA'ya emeklerinden dolayı şükran borçluyum.

Değerli çalışma arkadaşlarıma ve fikirleri ile tezin gelişmesine katkıda bulunan hocalarım Prof. Dr. Uğur YÜCEL'e, Doç. Dr. Erkan YÜCE'ye, Yrd. Doç. Dr. Remzi ARSLANALP'e ve yetişmemde emeği geçen tüm hocalarıma en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenimim süresince, yıllarca ve şefkatle beni destekleyen sevgili aileme minnettarım.

Ayrıca, tez çalışmalarım sırasında gösterdikleri anlayış ve sabrından dolayı sevgili eşime ve biricik oğluma da çok teşekkür ederim.

Haziran 2013

Şaziye SURAV YILMAZ
Elektrik-Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Literatür Özeti.....	3
1.2.1 ELIN Devreler.....	3
1.2.2 Bipolar translineer ve MOS translineer devreler.....	4
1.2.3 Karekök alma ve kare alma/bölme bloğu tasarımları.....	5
1.2.4 Karekök ortam devrelerinin işaret akış diyagramı ve blok modelleme yöntemleri ile tasarımı.....	8
1.2.5 Karekök ortam devrelerinin durum uzayı sentez yöntemi ile tasarımı.....	10
1.2.6 AB Sınıfı Karekök Ortam Devreleri.....	13
1.3 Tezin Akışı.....	15
2. TEMEL KAVRAMLAR.....	16
2.1 MOS Transistör Elemanı ve Çalışması	16
2.1.1 Zayıf Evirtim Bölgesi	17
2.1.2 Doymasız bölge.....	18
2.1.3 Doyum bölgesi	19
2.2 Translineer Devre Prensibi	19
2.2.1 Bipolar translineer prensibi.....	19
2.2.2 MOS translineer prensibi.....	21
2.3 Geometrik-Ortalama (Karekök) Alma Devresi	24
2.4 Çıkış Katı Devreleri	27
2.4.1 A Sınıfı çıkış katı yükseltici devre yapısı	27
2.4.2 B Sınıfı çıkış katı yükseltici devre yapısı	29
2.4.3 AB Sınıfı çıkış katı yükseltici devre yapısı.....	30
2.5 Durum Uzayı Sentez Yöntemi.....	31
2.5.1 Companion-III tekniği kullanılarak sistem denklemlerinin elde edilmesi	35
3. A SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRELERİNİN DURUM UZAYI SENTEZ YÖNTEMİ KULLANILARAK SİSTEMATİK TASARIMI.....	38
3.1 Durum Uzayı Sentez Yöntemi Kullanılarak Genelleştirilmiş A Sınıfı Karekök Ortam Filtresi Tasarım Yöntemi.....	39
4. A SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMALARI	48
4.1 Birinci Dereceden Tüm Geçiren Karekök Ortam Filtresi Tasarımı.....	48
4.1.1 Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresinin PSpice analizi	52
4.2 İkinci Dereceden Tüm Geçiren Karekök Ortam Filtresi Tasarımı	56

4.2.1 İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresinin PSpice analizi	60
4.3 Beşinci Dereceden Alçak Geçiren Butterworth Filtresinin Karekök Ortamda Tasarımı.....	67
4.3.1 Beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinin doğrudan tasarımı	67
4.3.2 Beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinin PSpice analizi	72
4.3.3 Kaskat bağlantı yöntemi ile beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi tasarımı	80
4.3.4 Kaskat bağlantı yöntemi ile tasarlanan beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresinin PSpice analizi	83
5. KAREKÖK ORTAM FİLTRELERİNİN AB SINIFI FARK ALAN YAPIDA SİSTEMATİK SENTEZİ	91
5.1 Durum Uzayı Sentez Yöntemi Kullanılarak Karekök Ortam Devresi Tasarımı ve Karşılaşılan Güçlükler	92
5.2 Karekök Ortam Devrelerinin AB Sınıfı Fark Alan Yapıda Tasarımı	94
5.2.1 AB sınıfı fark alan devre yapıda tasarım alternatif teori-I.....	96
5.2.2 AB sınıfı fark alan devre yapısında tasarım alternatif teori-II	99
6. BİRİNCİ DERECEDEDEN AB SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMALARI	102
6.1 Giriş.....	102
6.2 Birinci Dereceden Alçak Geçiren Filtre Devresi Tasarımı	102
6.2.1 Birinci dereceden alçak geçiren filtre devresi tasarımı-I.....	103
6.2.2 Birinci dereceden alçak geçiren filtre devresi tasarımı-II.....	106
6.2.3 Birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları	107
6.3 Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Filtre Devresi Tasarımı.....	114
6.3.1 Birinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi tasarımı-I	114
6.3.2 Birinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi tasarımı-II.....	115
6.3.3 Birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları	118
6.4 Birinci Dereceden Tüm Geçiren Filtre Devresi Tasarımı	123
6.4.1 Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren karekök ortam filtresi tasarımı-I	124
6.4.2 Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren karekök ortam filtresi tasarımı-II	124
6.4.3 Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları	126
7. İKİNCİ DERECEDEDEN AB SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMALARI.....	133
7.1 Giriş.....	133

7.2 İkinci Dereceden Alçak Geçiren Karekök Ortam Filtre Devresi Tasarımı	133
7.2.1 İkinci dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I.....	134
7.2.2 İkinci dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II	137
7.2.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları.....	142
7.3 İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Karekök Ortam Filtre Devresi Tasarımı..	147
7.3.1 İkinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I	147
7.3.2 İkinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II.....	150
7.3.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları.....	151
7.4 İkinci Dereceden Band Geçiren Filtre Devresi Tasarımı	156
7.4.1 İkinci dereceden band geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I	156
7.4.2 İkinci dereceden band geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II	158
7.4.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları.....	161
7.5 İkinci Dereceden Çentik Geçiren Filtre Devresi Tasarımı	167
7.5.1 İkinci dereceden çentik filtre devresi alternatif tasarımı-I.....	168
7.5.2 İkinci dereceden çentik filtre devresi alternatif tasarımı-II	169
7.5.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden karekök ortam çentik filtreleri analiz sonuçları.....	172
7.6 İkinci Dereceden Tüm Geçiren Filtre Devresi Tasarımı.....	179
7.6.1 İkinci dereceden tüm geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I.....	179
7.6.2 İkinci dereceden tüm geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II.....	182
7.6.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları.....	183
8. ÜÇÜNCÜ DERECEDEDEN AB SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMASI	189
8.1 Giriş.....	189
8.2 Üçüncü Dereceden Alçak Geçiren Karekök Ortam Filtre Devresi Tasarımı .	189
8.2.1 Üçüncü dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I.....	190
8.2.2 Üçüncü dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II.....	190
8.2.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları.....	194
9. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME	198
KAYNAKLAR.....	200
EKLER.....	206
ÖZGEÇMİŞ	207

KISALTMALAR

BJT	: Çift Kutuplu Jonksiyon Transistör
MOSFET	: Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör
MOS	: Metal Oksit Yarıiletken
PMOS	: P-Kanal Metal Oksit Yarıiletken
NMOS	: N-Kanal Metal Oksit Yarıiletken
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken
BTL	: Bipolar Translineer
MTL	: MOS Translineer
KAK	: Kirchhoff Akımlar Kanunu
KGK	: Kirchhoff Gerilimler Kanunu
TL	: Translineer
SRD	: Karekök Ortam
THD	: Toplam Harmonik Bozulma
Q	: Kalite faktörü
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
VLSI	: Çok Geniş Ölçekli Tümeleşim

TABLO LİSTESİ

Tablolar

4.1: Şekil 2.6'da devre şekli verilen karekök alma bloklarında kullanılan transistörlerin boyutları	52
4.2: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistörlerin boyutları	53
4.3: Şekil 2.6'da devre şekli verilen karekök alma blokları içerisinde kullanılan transistörlerin boyutları	61
4.4: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistörlerin boyutları	61
4.5: Farklı kalite faktörü değerleri için Şekil 4.6'da verilen devredeki bazı MOS transistörlerin boyutları	66
4.6: Beşinci dereceden karekök ortam filtresi karekök alma blokları içerisinde ve çıkışlarında kullanılan transistör boyutları	72
4.7: Beşinci dereceden karekök ortam filtresinde akım aynalarında kullanılan transistör boyutları	76
4.8: Beşinci dereceden karekök ortam filtresi akım yönlendirici blok yapısında kullanılan transistör boyutları	76
4.9: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden filtre devresi karekök alma blokları ve çıkışlarında kullanılan transistör boyutları	83
4.10: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden filtre devresi transistör boyutları	87
6.1: Birinci dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-I için kullanılan transistör boyutları	109
6.2: Birinci dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-II için kullanılan transistör boyutları	109
6.3: PSpice programından elde edilen alçak geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	111
6.4: Birinci dereceden yüksek geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-I için kullanılan transistör boyutları	118
6.5: Birinci dereceden yüksek geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-II için kullanılan transistör boyutları	118
6.6: PSpice programından elde edilen yüksek geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	121
6.7: Şekil 6.19'da verilen birinci dereceden tüm geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi transistör boyutları	128
6.8: Şekil 6.20'de verilen birinci dereceden tüm geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi transistör boyutları	128
6.9: PSpice programından elde edilen tüm geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	130
7.1: Şekil 7.1'de verilen devre yapısında kullanılan bazı akım aynalarına ait akım kopyalama oranları	137
7.2: Şekil 7.2'de verilen karekök ortam filtresinde kullanılan bazı akım aynalarına ait akım kopyalama oranları	140
7.3: Şekil 7.1'deki ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	142
7.4: Şekil 7.2'deki ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	143

7.5: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden alçak geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	145
7.6: Şekil 7.9'daki ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	153
7.7: Şekil 7.10'daki ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	153
7.8: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden yüksek geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	156
7.9: Şekil 7.15'daki ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	161
7.10: Şekil 7.16'deki ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	163
7.11: Şekil 7.23'de verilen ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresinde kullanılan transistör boyutları	174
7.12: Şekil 7.24'da verilen ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresinde kullanılan transistör boyutları	174
7.13: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden çentik filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	178
7.14: Şekil 7.31'daki ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	185
7.15: Şekil 7.32'deki ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	185
7.16: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden tüm geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	188
8.1: Şekil 8.1'de verilen üçüncü dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	194
8.2: Şekil 8.2'de verilen üçüncü dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları	195
8.3: PSpice programından elde edilen üçüncü dereceden alçak geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri	197

ŞEKİL LİSTESİ

Şekiller

2.1: (a) NMOS transistör modeli (b) PMOS transistör modeli	17
2.2: Dört transistörlü bipolar translineer çevrim	20
2.3: Dört transistörlü a) yukarı-aşağı tip b) yığılanmış tip MOS translineer devre yapısı.....	23
2.4: Karekök alma bloğu	24
2.5: (a) PMOS (b) NMOS transistörler ile tasarlanmış temel karekök alma devrelerinin genel yapısı	25
2.6: Karekök alma bloğu iç yapısı (Yu ve diğ. 2005a).....	27
2.7: BJT elemanları ile tasarlanmış A sınıfı çıkış katı yükselteç devresi	28
2.8: A sınıfı çıkış katı yükselteç devresi çıkış işareti.....	29
2.9: BJT elemanları ile tasarlanmış B sınıfı çıkış katı yükselteç devresi.....	29
2.10: B sınıfı çıkış katı yükselteç devresi çıkış işareti.....	30
2.11: BJT elemanları ile tasarlanmış AB sınıfı çıkış katı yükselteç devresi.....	30
2.12: AB sınıfı çıkış katı yükselteç devresi çıkış işareti	31
4.1: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi.....	51
4.2: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi zaman ortamı cevabı.....	53
4.3: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi frekans ortamı cevabı	54
4.4: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi ayarlanabilir faz cevabı	55
4.5: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi çıkışından elde edilen toplam harmonik bozulma oranı	55
4.6: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi	59
4.7: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi zaman ortamı cevabı ..	62
4.8: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi frekans ortamı cevabı.....	62
4.9: Tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde farklı I_f değerleri için elde edilen faz cevabı.....	63
4.10: Çıkış işaretindeki toplam harmonik bozulma oranı	63
4.11: Çıkış işareti gürültü seviyesi.....	64
4.12: I_f akımlarının %10 Gaussian değişimi sonucu elde edilen genlik ve faz cevabı	64
4.13: Kondansatör değerlerinin %5 Gaussian değişimi sonucu elde edilen genlik ve faz cevabı	65
4.14: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi farklı kalite faktörü (Q) değerleri için frekans ortamı cevabı	66
4.15: Beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi	71
4.16: Tasarlanan devrede kullanılan tek çıkışlı akım aynası modellerine ait	73
4.17: Tasarlanan devrede kullanılan çift çıkışlı akım aynası modellerine ait	74
4.18: Tasarlanan devrede kullanılan akım yönlendirici modellerine ait.....	75
4.19: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi zaman ortamı cevabı	77
4.20: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi genlik cevabı	78
4.21: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi faz cevabı	78
4.22: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir faz cevabı ..	79
4.23: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi	79
4.24: Birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi	84

4.25: İkinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi-1.....	85
4.26: İkinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi-2.....	86
4.27: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi zaman ortamı cevabı.....	88
4.28: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi genlik cevabı.....	88
4.29: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi faz cevabı.....	89
4.30: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir faz cevabı.....	90
4.31: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi toplam harmonik bozulma oranı.....	90
5.1: Genel AB sınıfı yapısı.....	94
6.1: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi.....	105
6.2: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi.....	108
6.3: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devrelerinin genlik cevabı	110
6.4: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devrelerinin faz cevabı...111	111
6.5: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri zaman ortamı cevabı.....	111
6.6: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi (AT-I) ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	112
6.7: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi (AT-II) ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	112
6.8: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları.....	113
6.9: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri çıkış işareti gürültü seviyeleri.....	113
6.10: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi.....	116
6.11: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi.....	117
6.12: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devrelerinin genlik cevabı.....	119
6.13: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devrelerinin faz cevabı	120
6.14: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri zaman ortamı cevabı.....	120
6.15: AT-I kullanılarak tasarlanmış birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	121
6.16: AT-II kullanılarak tasarlanmış birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	122
6.17: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları.....	122
6.18: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri çıkış işareti gürültü seviyeleri.....	123
6.19: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi.....	125

6.20: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi	127
6.21: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devrelerinin genlik cevabı	129
6.22: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devrelerinin faz cevabı ...	129
6.23: Birinci dereceden tüm geçiren filtre devrelerine ait zaman ortamı cevabı	130
6.24: Şekil 6.19'daki gibi tasarlanan birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı	131
6.25: Şekil 6.20'deki gibi tasarlanan birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı	131
6.26: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları	132
6.27: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devreleri çıkış işareti gürültü seviyeleri	132
7.1: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi	138
7.2: AT-II kullanılarak tasarlanmış ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi	141
7.3: İkinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi genlik cevabı	143
7.4: İkinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi faz cevabı	144
7.5: Tasarlanan ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri zaman ortamı cevabı	144
7.6: Şekil 7.1'de verilen ikinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	145
7.7: Şekil 7.2'de verilen ikinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	146
7.8: İkinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları	146
7.9: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi	149
7.10: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi	152
7.11: İkinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri genlik cevabı	154
7.12: Şekil 7.9'daki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı	154
7.13: Şekil 7.10'daki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı	155
7.14: İkinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları	155
7.15: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresi	159
7.16: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresi	162
7.17: İkinci dereceden AB sınıfı band geçiren filtre devresi genlik cevabı.....	164
7.18: Şekil 7.15'da verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	164
7.19: Şekil 7.16'de verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	165

7.20: Şekil 7.15’de verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi farklı kalite faktörü değerleri için genlik cevabı.....	166
7.21: Şekil 7.16’de verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi farklı kalite faktörü değeri için genlik cevabı.....	166
7.22: İkinci dereceden AB sınıfı band geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları	167
7.23: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresi	170
7.24: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresi	173
7.25: Şekil 7.23’deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi genlik ve faz cevabı.....	175
7.26: Şekil 7.24’deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi genlik ve faz cevabı.....	175
7.27: Şekil 7.23’deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi ayarlanabilir genlik cevabı	176
7.28: Şekil 7.24’deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi ayarlanabilir genlik cevabı	176
7.29: Şekil 7.23’de verilen ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresinin farklı Q değeri için genlik cevabı	177
7.30: Şekil 7.24’de verilen ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresinin farklı Q değeri için genlik cevabı	178
7.31: AT-I kullanılarak elde edilmiş AB sınıfı ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi	181
7.32: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi	184
7.33: Şekil 7.31’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren filtresi frekans ortamı cevabı	186
7.34: Şekil 7.32’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren filtresi frekans ortamı cevabı	186
7.35: Şekil 7.31’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtresi ayarlanabilir frekans cevabı.....	187
7.36: Şekil 7.32’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtresi ayarlanabilir frekans cevabı.....	187
7.37: İkinci dereceden tüm geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları	188
8.1: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi	192
8.2: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi	193
8.3: Üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri genlik cevabı..	195
8.4: Şekil 8.1’de verilen üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	196
8.5: Şekil 8.2’de verilen üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı.....	196
8.6: Üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları	197

SEMBOL LİSTESİ

C_{JS}	: Katkılanmış bölge kapasite değeri
C_{ox}	: <i>Gate</i> -oksit tabakasının birim alan başına düşen kapasite değeri
g	: BJT transistör geçiş iletkenliği katsayısı
I_C	: <i>Kollektör</i> akımı
i_D	: <i>Drain</i> akımı
I_S	: Transistör doyum akımı
L	: Transistör kanal uzunluğu değeri
v_{BE}	: <i>Baz-Emitör</i> gerilimi
v_{DS}	: <i>Drain-Source</i> gerilimi
v_{GS}	: <i>Gate-Source</i> gerilimi
V_S	: Kaynak Gerilimi
V_T	: Sıcaklığa bağlı gerilim değeri
W	: Transistör kanal genişliği değeri
V_{TH}	: Transistör eşik gerilimi
μ_n	: MOS transistörün hareketlilik katsayısı
β	: MOS transistörün geçiş iletkenliği faktörü

ÖZET

KAREKÖK ORTAM FİLTRELERİNİN DURUM UZAYI GENEL TASARIM YÖNTEMİ VE UYGULAMALARI

Bu çalışmada, translineer devreler grubunun bir üyesi olan karekök ortam devreleri için yeni tasarım yöntemleri geliştirilmiştir.

Tezin genel amacı, istenilen derecede karekök ortam filtrelerinin tasarımı için sistematik sentez yöntemi geliştirmektir. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak daha önce ikinci dereceden bir uygulaması sunulmuş olan A sınıfı devre yapısındaki bir sentez yöntemi genelleştirilmiştir. Bu sistematik sentez yöntemi durum uzayı yöntemi kullanılarak önerilmiştir. Genelleştirilen A sınıfı sistematik tasarım yöntemi kullanılarak birinci, ikinci ve daha yüksek dereceden filtre devreleri tasarlanmış ve çalışma performanslarının değerlendirilmesi için PSpice programında benzetimleri yapılmıştır.

İkinci olarak, durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak AB sınıfı karekök ortam filtreleri için genel bir sentez yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen teori tasarımcılara istenen dereceden filtrelerin tasarımı için birden çok alternatif sunmaktadır. Tez kapsamında bu alternatif tasarımlardan yalnızca ikisi için birinci ve ikinci dereceden tüm filtre türleri tasarlanmış ve incelenmiştir. Bu iki alternatif tasarım kullanılarak yapılan tasarımların PSpice programında benzetimleri yapılmış ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, karekök ortam filtrelerinin tasarımı için A sınıfı ve AB sınıfı devre yapıları için sistematik sentez yöntemleri geliştirilmiştir ve bu yöntemler kullanılarak farklı filtre devreleri tasarlanmış ve benzetimleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karekök ortam filtreleri, A sınıfı filtreler, AB sınıfı filtreler, Fark alan yapıda filtreler, Durum uzayı sentez yöntemi

SUMMARY

GENERAL STATE SPACE DESIGN METHOD AND APPLICATIONS OF SQUARE ROOT DOMAIN FILTERS

In this study, new design methods were developed for the square-root domain (SRD) filters, which is included in translinear circuit structure.

The aim of the thesis is to develop a systematic synthesis method for the design of SRD filters of any order. For this purpose, firstly a previously proposed systematic synthesis method in Class A structure has been generalized. A systematic general synthesis method is offered using state space method. Using this theory, first, second and higher order filters are designed and simulated in PSpice in order to investigate the developed method's performance.

Secondly, a general design theory is developed for Class AB type square root domain filters using state space synthesis method. The developed theory gives the researchers several options to design any order filter. Selected two options are investigated in detail by designing first and second order filters. These two alternative circuits are simulated in PSpice and analysis results are compared.

As a result, systematic synthesis methods are developed in both Class A and Class AB type for square root domain filters and several filters are designed and simulated.

Keywords: Square root domain filters, Class A filters, Class AB filters, Differential type filters, State space synthesis method

1. GİRİŞ

Elektronik teknolojisinin gelişmesi ve günümüzde kullanılan pek çok sistemin elektronik elemanlara ihtiyaç duyması ile analog elektronik devrelerin özelliklerine yönelik çalışmalar daha önemli hale gelmiş ve bu devrelere olan ihtiyaç giderek artmıştır. Doğada işlenen ya da kontrol edilen işaretlerin çoğunun analog yapıya sahip olmasının bir sonucu olarak analog elektronik teknolojisi konusundaki gelişmeler her zaman önem arz edecektir.

Analog elektronik devre teknolojisinde farklı işlevlerde pek çok devre türü mevcuttur. Bu devreler çalışma amaçlarına, özelliklerine ve çalışma aralıklarına göre farklı işlevlere göre gruplandırılabilir. Elektronik sistemlerin çoğunda kullanılan ve önemli bir işleve sahip olan devre yapılarından biri de neredeyse tüm elektronik sistemlerde gerekli olan filtre devreleridir. Filtre devreleri herhangi bir frekans aralığında girişinden uygulanan işareti geçiren ya da durduran frekans seçici bir fonksiyon gibi davranan elektronik devre yapılarıdır (Sedra ve Smith, 2007).

Filtre devreleri konusundaki gelişmeler tasarlanan devrenin kullanım alanına göre değişmekle birlikte tasarımcılar daha çok yaptıkları tasarımlarda; yüksek çalışma aralığı, yüksek frekanslarda bozulma oranı, düşük parazit etki, ayarlanabilir çalışma frekansı, düşük gerilim, düşük güç tüketimi ve daha az elemanla gerçekleştirilebilir gibi özellikleri iyileştirmeye çalışmaktadır. Tüm bunları sağlayabilmek için her geçen gün yapılan yeni çalışmalar filtre devreleri konusunda yeni topolojilerin geliştirilmesine ve yeni yaklaşımların ortaya atılmasına sebep olmaktadır (Frey, 1993, 1996, Eskiyeerli ve Payne, 2000, Çakır ve diğ. 2005, Eskiyeerli ve Payne, 2000, Frey 1993, Yüce ve diğ. 2008, Metin ve Cicekoglu, 2009). Son yıllarda karekök ortam devreleri de bu yaklaşım çeşitlerinden biri olarak literatürde yerini almaktadır (Eskiyeerli ve Payne, 2000, Yu ve diğ. 2005a, Psychalinos, 2007a, 2007b, Psychalinos, 2008)

Karekök ortam devreleri genel anlamda ELIN (Externally Linear Internally Nonlinear) devreler sınıfının translineer devre yapıları alt sınıfı içerisinde yer

almaktadır. Bu sebeple tezin bu bölümünde en genel sınıflandırma olan ELIN devrelerden başlayarak karekök ortam devrelerinin ortaya atılması süreci ve sonrasında geliştirilmiş olan teoriler, yenilikler, gelişmeler konusundaki çalışmalar ayrıntılı olarak sunulmuştur.

1.1 Tezin Amacı

Tez kapsamında genel olarak karekök ortam filtre devrelerinin tasarımı konusunda A sınıfı devre yapısı ve AB sınıfı fark alan devre yapısı kullanılarak sistematik bir sentez yöntemi geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda kullanılacak olan yöntem durum uzayı sentez yöntemi olarak seçilmiştir. Ayrıca durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilen farklı tasarım alternatifleri içerisinde gerilim modlu tasarım alternatifi seçilmiş ve bu şekilde tasarlanacak olan devrelerde blok yapı olarak yalnızca karekök alma blok yapısının kullanılması planlanmıştır.

Literatür çalışmasında ilk olarak kullanılan sentez yöntemi ile istenen tasarımların yapılmasında ortaya çıkacak problemler veya kısıtlamalar tespit edilmiştir. Bunun için literatürde birinci ve ikinci dereceden filtre devresi fonksiyonları kullanılarak ve yalnızca karekök alma blok yapıları ile tasarlanmış olan devreler ayrıntılı olarak incelenmiştir (Yu ve diğ. 2000, 2003, 2005a, 2005b, Ölmez ve Cam, 2009, Yu ve Lin, 2010, Ölmez ve Çam, 2010). Sonraki aşamada benzer yapıda karekök ortam filtrelerinin tasarımı konusunda literatürde sistematik bir sentez yöntemi olarak sunulmuş olan mevcut yöntemler ayrıntılı olarak incelenmiştir (Eskiyerli ve diğ. 1996a, 1996b, Yu ve diğ. 2005a, Yu, 2005). Bu yöntemlerin özellikle yüksek dereceden devrelerin tasarımı konusunda ortaya koyduğu performanslar değerlendirilmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar yapılan çalışmaların çoğunun yüksek dereceden devre tasarımlarını kaskat bağlantı yöntemi ile yapmakta olduğunu göstermektedir. Ayrıca bugüne kadar yapılmış olan çalışmalarda kullanılan yöntemler ile yalnızca karekök alma blokları kullanılarak devre tasarlanırken istenen her transfer fonksiyonunun gerçekleştirilmesinde, özellikle yüksek dereceden devrelerin doğrudan transfer fonksiyonu kullanılarak tasarımının yapılmasında bazı kısıtlamalar ile karşılaşıldığı gözlenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda ilk olarak yüksek dereceden devrelerin tasarımlarını uygun şekilde yapabilecek aynı zamanda iyi bir çalışma performansı sunacak bir sentez yöntemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için ilk olarak A sınıfı devre

yapısında sistematik bir sentez yöntemi ortaya konulması üzerinde durulmuştur. A sınıfı devre yapısında sistematik bir yöntem geliştirilebilmesi için daha önce ikinci dereceden bir devre uygulamasında kullanılan yöntem üzerinde ayrıntılı çalışmalar yapılmış ve bu yöntem daha yüksek dereceden sistemler için genelleştirilmiştir.

Tez kapsamında ayrıca ikinci bir sistematik sentez yöntemi olarak AB sınıfı yapının kullanılması üzerinde durulmuştur. Bu şekilde tasarlanacak devrelerin farklı sistematik sentez alternatifini sunmasının yanında, yüksek dinamik giriş aralığına sahip olması hedeflenmiştir. Hedefler çerçevesinde A sınıfı yapıda genelleştirilen sentez yöntemi ve AB sınıfı yapıda geliştirilen yöntem ile istenen transfer fonksiyonunun karekök ortamda tasarlanabilmesi tezin temel amacını teşkil etmektedir.

1.2 Literatür Özeti

Elektronik devre teknolojisinin önemli bir kolunu oluşturan analog elektronik devre yapıları günümüzde her türlü sistem içerisinde çokça kullanılmaktadır ve bu açıdan elektronik teknolojide önemli bir yere sahiptir. Gelişen teknolojiye paralel olarak analog elektronik teknolojide, farklı devre yapıları, sentez yöntemleri ve yeni tasarımlar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Karekök ortam filtrelerini de kapsayan ve en genel devre grubu olan ELIN devrelerden başlayarak konunun gelişimi doğrultusunda günümüze kadar yapılan çalışmalar hakkında ayrıntılı bir literatür çalışması bu bölümde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

1.2.1 ELIN Devreler

Analog elektronik sistemlerde önemli olan işaretlerin en doğru ve verimli bir şekilde işlenerek çıkışa en ideal yapıda iletilebilmesidir. Bu amaçla günümüze kadar çok farklı işaret işleme teknikleri uygulanmıştır. Analog işaret işleme teknikleri içerisinde 1990 yılında ilk kez farklı bir işaret işleme yöntemi olarak *Companding* kavramı katılmıştır (Tsividis, 1990). *Companding* tekniği işlenen işaretin gürültü seviyesini düşürmekte ve bu teknik ile daha küçük boyutta ve yüksek kalite faktörüne sahip devreler tasarlanması mümkün olmaktadır. Bu teknik sağladığı üstünlüklerden dolayı günümüze kadar pek çok kez kullanılmıştır. Bu devreler ortaya atıldıktan sonra daha genel ifadesi ile ELIN devreler olarak genelleştirilmiştir (Tsividis, 1997). ELIN devre teorisi giriş ve çıkış işaretlerinin kendi aralarında doğrusal olduğunu ancak devre içerisinde işlenen işaretin doğrusal olmayan bir

ortamda işlendiğini ifade etmektedir. Bu devrelerin en çok karşılaşılan örnekleri logaritmik ortam devreleri ve karekök ortam devreleridir.

1.2.2 Bipolar translineer ve MOS translineer devreler

Translineer devreler, analog elektronik teknolojisinde yüksek dinamik giriş aralığı, düşük gerilim ihtiyacı ve düşük güç tüketimi gibi avantajlar ortaya koyan bir yapı olarak Gilbert tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır (Gilbert, 1975). Bu prensip kapalı bir çevrim oluşturan bipolar transistörlerin akım ve gerilimleri arasındaki üstel uç bağıntıları temel alınarak ve transistörün *kollektör* akımı ile geçiş iletkenliği (A/V) arasındaki doğrusal ilişki kullanılarak oluşturulmuştur (Gilbert, 1975, Mulder ve diğ. 1999). Temel prensip olarak bipolar transistörler üzerinde uygulanan translineer devre teorisi daha sonraları zayıf evirtim bölgesinde çalışan MOS transistörlerin üstel akım-gerilim karakteristiği kullanılarak MOS transistörler üzerinde de uygulanmıştır (Vittoz ve Fellrath, 1977, Gotterredona ve diğ., 1999, Mich, 2008). Zayıf evirtim bölgesinde çalışan MOS transistörler ile translineer devre yapısı elde etmek mümkün olsa da bu yapılarda kullanılan MOS transistörlerin çalışma alanı kısıtlarından dolayı bipolar transistörler kadar yaygın ve kullanımı kolay değildir (Mich, 2008). Diğer bir ifade ile zayıf evirtim bölgesinde çalışan MOS transistörlerin sınırlı dinamik giriş işareti aralığına sahip olmaları ve hızlarının düşük olması bu tür translineer devrelerin genel uygulamalarda kullanılabilirliğini sınırlandırmıştır. Bu kısıtlamalar MOS transistörlerin zayıf evirtim bölgesinde çalıştırılması yerine doyum bölgesinde çalıştırılması ve bu durumdaki transistörün *drain* akım ile *gate-source* gerilimi arasındaki karesel ilişkinin kullanılması fikrini ortaya çıkarmıştır (Bult ve Wallinga, 1987, Seevinck ve Wiegerink, 1991). Doyum bölgesinde çalışan MOS transistörlerin kullanılması ile 1991 yılında genelleştirilmiş translineer kavramı ortaya atılmıştır (Seevinck ve Wiegerink, 1991). Yapılan bu çalışma, benzer şekilde Bipolar transistörlere uygulanan tekniğin doyum bölgesinde çalışan MOS transistörlere uygulanabileceğini ortaya koymuş ve translineer devre teorisini Bipolar Translineer ve MOS Translineer (MTL) olarak iki başlık altında toplamıştır (Seevinck ve Wiegerink, 1991). Bu çalışmada, translineer devrelerin gruplandırılmasının yanında MTL devrelere ait verilen örnek devreler de kendi içerisinde iki farklı türü oluşturmaktadır. Bu yönüyle 1991 yılında yapılmış olan bu çalışma MTL devreler içerisinde iki farklı yapıyı oluşturan ve daha sonra yığınlanmış tip devre yapısı ve

yukarı-aşağı tip devre yapısı olarak adlandırılan tasarımların ve devamında karekök ortam devrelerinin de temellerini atmıştır.

Literatürde MTL devrelerin günümüze kadar kullanılmış farklı uygulama alanları olmakla birlikte bu uygulamaların en önemlilerinden biri de karekök ortamı devreleridir. Karekök ortamı devrelerine ait ilk uygulamalardan biri 1996 yılında önerilmiş olan integratör devresidir (Eskiyerli ve diğ., 1996a). Yapılan bu çalışmada akım modlu MTL yapıda karekök alma devresi blok olarak kullanılmış ve durum uzayı sentez yönteminden yararlanılarak karekök ortamda tasarlanmış ilk integratör devresi ortaya atılmıştır. Bu çalışma, karekök ortamı devreleri ile ilgili daha sonra yapılan pek çok çalışmaya da ışık tutmuştur.

Tez kapsamında, MTL devre yapıları içerisinde çok kullanılan karekök ortam filtre devreleri konusunda literatürde rastlanmamış devre yapıları geliştirilmiş ve ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmalarda karekök alan devre bloğu temel blok model olarak kullanılmış olup yapılan devre tasarımları yalnızca bu blok yapı ve bazı aktif ve pasif elemanlar çerçevesinde şekillendirilmiştir.

1.2.3 Karekök alma ve kare alma/bölme bloğu tasarımları

Karekök alma ve kare alma-bölme devre blokları literatürde MTL devre yapısı kullanılarak yapılan tasarımlar içerisinde ve karekök ortam devrelerinin tasarımında en çok kullanılan ve çalışılan devre bloklarındandır. Bu devreler matematiksel olarak iki giriş akımının çarpımlarının karekökü (geometrik ortalaması) ya da bir akımın karesinin diğer bir akıma bölümü (kare alıcı-bölücü) gibi fonksiyonlara ihtiyaç duyulan tüm sistemlerde kullanılabilir. Karekök alma ve kare alma-bölme devre blokları yapısal olarak MTL devre mimarisinde olduklarından dolayı düşük gerilim ihtiyacı, düşük güç tüketimi ve yüksek dinamik giriş aralığı gibi üstünlüklere de sahiptirler. Şimdiye kadar yapılan çalışmalara bakıldığında farklı özelliklerde analog elektronik devre tasarımı yapılırken pek çok devre yapısında karekök alma devresi ve/veya kare alma-bölme devresi kullanıldığı gözlenmiştir.

Bu devre bloklarının temel yapısını oluşturan MTL devresi 1991 yılında ortaya atılmıştır (Seevinck ve Wiegerink, 1991). Yapılan bu çalışma MTL teknolojisinin ilk ortaya atıldığı çalışma olmasının yanında karekök ortam devre tasarımları konusunda yapılan pek çok çalışmanın da temelini oluşturur niteliktedir. Daha sonra tamamen

MOS transistörler kullanılarak tasarlanmış olan ve iki akımın geometrik ortalamasını çıkış akımı olarak veren devre yapısı ortaya konmuştur (Eskiyerli ve diğ., 1996a, 1996b). Yapılan bu çalışmalarda 1991 yılında ortaya atılan MTL temel yapısı kullanılarak karekök ortam devresi tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan bu devre yapısı blok olarak kullanılmış ve ilave transistörler de eklenerek karekök ortamda tamamen MOS transistörler ile tasarlanmış bir integral alıcı devresi sunulmuştur.

Daha sonra yapılan farklı çalışmalarda 1991 yılında önerilmiş olan MTL devre yapılarındaki farklılıklar isimlendirilerek devre yapıları iki gruba ayrılmıştır. Devre topolojilerinde kullanılan ve MTL çevrimi oluşturan transistörlerin bağlantı şekline göre tasarlanan karekök alma ve kare alma-bölme devre yapıları yığılmış tip ve yukarı aşağı tip devreler olarak iki farklı şekilde isimlendirilmiştir (Seevinck ve Wiegerink, 1991, Eskiyerli ve Payne, 2000). Bu devreler daha sonra blok yapı olarak ele alınıp pek çok araştırmada integral alıcı devresi ve farklı türlerde filtre devresi tasarımlarında temel blok yapılar olarak kullanılmışlardır (Eskiyerli ve Payne, 2000, Lopez-Martin ve Carlosena, 2001a,2001b, Yu ve diğ., 2000, 2003,2005a, 2005b). Bu konu ile ilgili 2000 yılında yapılan bir çalışmada yığılmış tip karekök alma bloğu ve kare alıcı/bölücü bloğu ikinci dereceden band geçiren ve alçak geçiren çıkışları veren bir filtre devresi tasarımında kullanılmıştır (Eskiyerli ve Payne, 2000). Araştırmacılar bu çalışmada önerdikleri devreye ait farklı analiz sonuçlarını vermişler ve doğrusal olmayan alt devre yapısı kullanılarak tasarlanmış bir filtre devresinin performansına yönelik genel bir fikir sunmuşlardır.

Geometrik ortalama alma devresi ve kare alma-bölme devreleri kullanılarak tasarlanmış farklı bir CMOS çarpıcı-bölücü devresi 2001 yılında ortaya konmuştur. (Lopez-Martin ve Carlosena, 2001a). Yapılan bu çalışma iki farklı çarpıcı-bölücü devresine ait devre yapılarını ve performans analizlerini içermektedir. Önerilen ilk çarpıcı-bölücü devre tasarımında yığılmış tip karekök alma devresi ve kare alma-bölme devresi kullanılmıştır. Benzer devre yapısı daha sonra yukarı-aşağı tip karekök alma devresi ve kare alma-bölme devresi kullanılarak tasarlanmıştır. Elde edilen çarpıcı-bölücü devresi uygulamaları ayrıntılı olarak bu çalışmada incelenmiştir. Son olarak önerilen devre yapılarının analizleri yapılarak performansları değerlendirilmiş ve bu devrelerin karekök ortam sistemlerine, yapay sinir ağlarına ve bulanık donanım sistemlerine uygunluğu belirtilmiştir.

Yapılan farklı bir çalışmada ise yine yukarı-aşağı tip MTL devre yapısı kullanılarak farklı bir karekök alma devresi tasarlanmıştır (Psychalinos ve Vlassis, 2002a). Önerilen bu devre yapısı daha sonra çarpıcı-bölücü devresi tasarımında kullanılmıştır. Tasarlanan bu devrenin daha önce yayınlanmış başka çarpıcı/bölücü devrelerin performansları ile karşılaştırması yapılmıştır (Lopez-Martin ve Carlosena, 1999, Psychalinos ve Vlassis, 2002a). Bu çalışmada önerilen devre yapısı kullanılarak yeni bir fark alıcı devresi 2004 yılında aynı yazarlar tarafından tasarlanmış ve analiz sonuçları sunulmuştur (Vlassis ve Psychalinos, 2004).

Karekök alma devresi ve kare alma-bölme devresi günümüzde pek çok örnek uygulamada özellikle karekök ortam devresi uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu devre yapılarında girişten alınan iki akım değerinin, ya geometrik-ortalaması alınır ya da bu akımlardan birinin karesi alınarak diğerine bölünür ve bu şekilde çıkış akımları giriş akımlarının matematiksel bir fonksiyonu olarak elde edilir. Teorik olarak devrelerin matematiksel analizi doğru sonuçlar verse de devrede kullanılan elemanların ideal olmayan etkilerinden dolayı pratik olarak devreden hatasız çıkış almak mümkün değildir. Bu konu üzerine yapılan farklı bir çalışma ile mevcut blok devre yapıları üzerinde bazı değişiklikler yapılarak bu iki devrenin daha yüksek doğrulukta çalışması sağlanmıştır (Menekay, 2007). Araştırmada daha önce kullanılan karekök alma ve kare alma-bölme devreleri kullanılmış ve bu devre yapılarında özellikle translineer çevrimin bulunduğu transistörler arasına bir aktif direnç elemanı eklenmek suretiyle devre yapısında bazı değişiklikler yapılmıştır. Devre yapısında yapılan değişiklik ile çıkıştan elde edilen işaretin matematiksel analiz sonuçlarına daha yakın sonuçlar vermesi yani kullanılan devrelerin doğruluğunun artırılması sağlanmıştır (Menekay, 2007). Daha sonra geliştirilen doğruluğu artırılmış devre blokları kullanılarak farklı devre tasarımı yapılmış ve sonuçların ideal duruma yakınlığı sunulmuştur (Menekay, 2007, Menekay ve Kuntman, 2008, Menekay ve diğ., 2006, 2008, 2009a, 2009b).

Tez kapsamında yapılan tüm tasarımlarda, 1996 yılında ortaya atılmış olan ve günümüze kadar pek çok çalışmada kullanılmış olan yığınlanmış tip MTL tekniği kullanılarak tasarlanmış karekök alma devresi kullanılmıştır. Kullanılan devre yapısı ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak analizleri ile birlikte sunulmuştur.

1.2.4 Karekök ortam devrelerinin işaret akış diyagramı ve blok modelleme yöntemleri ile tasarımı

Günümüzde karekök ortamı devreleri ile ilgili farklı sentez yöntemleri kullanılarak yapılmış çok miktarda integral alıcı devresi, filtre devresi, osilatör devresi ve fark alıcı devresi uygulamaları bulunmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmı daha önceki bölümde ayrıntılı literatürünü verdiğimiz karekök alma ve/veya kare alma-bölme devre bloklarını kullanarak yapılmıştır. Yapılan çalışmalar karekök ortam devrelerinin düşük besleme gerilimi, yüksek dinamik giriş aralığı, kesim frekansının ayarlanabilir olması ve düşük güç tüketimi gibi üstünlüklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Karekök ortam devrelerinin tasarımında kullanılan farklı sentez yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden işaret akış diyagramı ve blok modelleme ile sentez yöntemleri ile yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur (Lopez-Martin ve Carlosena, 2001a, De La Cruz-Blas ve diğ., 2007, Psychalinos ve Vlassis, 2002b, 2002c, Psychalinos, 2007a, 2007b, 2008, Stoumpou ve diğ., 2009, Stoumpou ve Psychalinos, 2011, Ragheb ve Soliman, 2006). Literatür taramasının bu kısmında bu iki yöntem kullanılarak yapılmış çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir.

İşaret akış diyagramı yaklaşımı ilk kez 2002 yılında karekök ortam devrelerinin tasarımında kullanılmaya başlanmıştır (Psychalinos ve Vlassis, 2002b). Daha sonra genel bir yaklaşım olarak sunulan bu sentez yöntemi ile akım modlu geometrik ortalama alma ve çarpıcı/bölücü devrelerinden oluşturulmuş karekök ortam integral alıcı devresi tasarlanmıştır (Psychalinos ve Vlassis, 2002c). Bu çalışmada işaret akış diyagramı sentez yöntemi kullanarak karekök ortam devresi tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan devrelerin yüksek doğruluk oranı, düşük gerilim ihtiyacı ve karmaşık olmayan tasarım işlemleri gibi avantajlara sahip olduğu belirtilmiştir.

Yüksek dereceden karekök ortam filtresi tasarımları yapılabilmesi amacı ile 2007 yılında işaret akış diyagramı yönteminden de faydalanılarak karekök ortam dalga filtresi tasarlanmıştır (Psychalinos, 2007a). Önerilen bu yöntem ile ilk olarak bobin ve kondansatör elemanlarının dalga eşdeğer modelleri iki kapılı bir alt devre elamanı olarak karekök ortamında elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu modeller yardımı ile LC basamak yöntemi ile tasarlanmış 5. dereceden alçak geçiren bir filtre devresinin dalga eşdeğeri oluşturulmuş ve ilk defa karekök ortam dalga filtresi

tasarımı yapılmıştır (Psychalinos, 2007a). Yine işaret akış diyagramından yola çıkarak karekök ortamda tasarlanmış kayıpsız integral alıcı ve ağırlıklı toplama bloğu tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bu devreler LC basamak yöntemi ile tasarlanmış üçüncü dereceden bir eliptik filtre devresinde eşdeğer eleman olarak kullanılmış ve karekök ortamda tasarlanmış ilk eliptik filtre devresi elde edilmiştir (Psychalinos, 2007b). Tasarlanan filtre devresinin analiz sonuçlarına göre düşük çalışma gerilimi, elektronik ayarlanabilirlik gibi üstünlüklere sahip olduğu görülmüştür.

Karekök ortam devrelerinin tasarımında farklı bir yöntem olarak LC basamak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş beşinci dereceden alçak geçiren bir filtre devresi tasarlanmıştır (Psychalinos, 2008). Araştırmacı bu çalışmada ilk olarak bobin, kondansatör ve direnç gibi pasif devre elemanlarının karekök ortam eşdeğerlerini tasarlamıştır (Psychalinos, 2008). Daha sonra tasarladığı her bir eleman eşdeğerini beşinci dereceden LC basamak tipi alçak geçiren bir filtre devresinde yerlerine yerleştirmiş ve farklı bir karekök ortam filtresi tasarımı ortaya koymuştur. Tasarlanan devrenin analiz sonuçları, devrenin DC güç tüketimi, doğrusallık, hassasiyet ve dinamik giriş aralığı gibi özelliklerinin iyi olduğunu ortaya koymuştur (Psychalinos, 2008).

Farklı bir yöntem olarak FLF(Follow the Leader Feedback) mimarisi kullanılarak tasarlanmış karekök ortamı filtreleri de literatürde mevcuttur (Stoumpou ve diğ., 2009). Araştırmacılar bu çalışmada n . dereceden çok fonksiyonlu ve düşük gerilimli filtre devresini karekök alma ve çarpıcı bölücü bloklar kullanarak tasarlamışlardır. Yüksek dereceden tasarım örneği olarak 5. dereceden çok fonksiyonlu karekök ortam filtresinin sunulduğu çalışma karekök alma, çarpıcı/bölücü ve toplama blokları kullanılarak tasarlanmıştır. Analiz sonuçlarında önerilen yapının rezonans frekansı ve kazancının elektronik olarak ayarlanabilmesi ve düşük besleme gerilimine ihtiyaç duyması gibi özelliklerinden dolayı düşük gerilimli analog işlem blokları için uygun olduğu gösterilmiştir (Stoumpou ve diğ., 2009).

Son yıllarda yapılan farklı bir çalışmada doğrusal dönüşüm (LT) yöntemi kullanılarak tasarlanmış karekök ortam filtresi sunulmuştur (Stoumpou ve Psychalinos, 2011). Sunulan yöntemde öncelikle doğrusal dönüşüm yöntemi ile bobin, kondansatör ve direnç gibi pasif elemanların eşdeğer modelleri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu modeller üçüncü dereceden pasif bir eliptik filtre

topolojisinde yerine yerleştirilmiş ve üçüncü dereceden eliptik karekök ortam filtre devresi elde edilmiştir (Stoumpou ve Psychalinos, 2011).

Karekök ortam devrelerinin sistematik tasarımına yönelik kullanılan diğer bir sentez yöntemi de doğrusal *transkondüktör* (gm-C) elemanlarının karekök eşdeğer modelinin elde edilmesi ile devrelerin tasarlanmasıdır (Ragheb ve Soliman, 2006, Menekay ve diğ. 2008, Fouad ve Soliman, 2005). Bu yöntem ile öncelikle farklı giriş ve çıkışa sahip doğrusal *transkondüktör* elemanlarının karekök ortam eşdeğerleri elde edilir (Ragheb ve Soliman, 2006, Menekay ve diğ. 2008). Literatürde karekök ortamda tasarlanmış eşdeğer *transkondüktör* elemanları kullanılarak yapılan osilatör devre yapısı ve fark alıcı devre yapısı gibi analog elektronik devre uygulamaları mevcuttur (Ragheb ve Soliman, 2006, Fouad ve Soliman, 2005).

1.2.5 Karekök ortam devrelerinin durum uzayı sentez yöntemi ile tasarımı

Karekök ortamı devrelerinin tasarımında ilk ortaya atıldığı günden bu yana çok kullanılan sentez yöntemlerinden biri durum uzayı sentez yöntemidir. Durum uzayı sentez yöntemi tasarım kolaylığı, genelleştirilmeye uygunluğu ve bir çok sisteme uygulanabilir olması gibi üstünlüklerinden dolayı pek çok araştırmacı tarafından tercih edilmiştir.

Durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak tasarlanmış ilk karekök ortamı devresi 1996 yılında ortaya konmuştur (Eskiyerli ve diğ. 1996a). Yapılan bu çalışmada tasarlanacak olan devreye ait sistem denklemlerinden yola çıkılarak devre denklemleri karekök ortamda tasarım yapmaya uygun yapıda elde edilmiş ve karekök ortamda tasarlanmış ilk kayıplı integral alıcı devre tasarlanmıştır (Eskiyerli ve diğ. 1996a). Tasarlanan kayıplı integral alıcı devre yapısı daha sonra durum uzayı sentez yöntemi yardımı ile ikinci dereceden alçak geçiren ve band geçiren filtre devresi tasarımlarında da kullanılmıştır (Eskiyerli ve diğ. 1996b).

Durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak karekök ortamı devreleri tasarlanırken kullanılan sentez yöntemleri aynı olsa da farklı blok yapıları ile devre tasarımları yapmak mümkündür. Bu konuda farklı araştırmacılar çeşitli yapılarda pek çok uygulama devresi sunmuşlardır (Eskiyerli ve diğ. 1996a, Lopez-Martin ve Carlosena, 2001a, 2001b, Yu ve diğ., 2000, De La Cruz-Blas ve diğ., 2007, Arslanalp ve Tola, 2007, Kircay ve diğ., 2009, Yu 2010, Ölmez, 2011). Yapılmış olan çalışmalarda durum uzayı sentez yöntemi ile, giriş, çıkış ve durum değişkeni bilgileri akım olan

birinci ve ikinci dereceden farklı filtre tasarımları mevcuttur (Eskiyerli ve Payne 2000, Yu ve Lin 2010). Bu devreler akım modlu olup sistem denklemlerinde kullanılan eşleştirme fonksiyonu seçimine bağlı olarak elde edilen devre denklemleri herhangi bir akımın karesi ve başka bir akıma bölümü ya da iki akımın çarpımlarının karekökü gibi ifadeler içermektedir. Bu sebeple, tasarlanan devrelerde çoğunlukla karekök alma devresi ve kare alma-bölme devresi olarak adlandırılan bu bloklar birlikte hatta çoğunlukla arka arkaya bağlanmak suretiyle kullanılmıştır.

Durum uzayı sentez yöntemi ile yapılan diğer bazı çalışmalarda giriş, çıkış ve durum değişkeni bilgileri gerilim olarak kabul edilmiş ve eşleştirme fonksiyonları sistem denklemlerine bu formda uygulanmaktadır. Dolayısıyla tasarlanan devre gerilim modlu olarak elde edilmektedir. Bu tür devre tasarımlarında elde edilen devre denklemleri iki akımın çarpımının karekökü şeklinde olduğundan dolayı çoğunlukla yalnızca karekök alma bloklarının kullanılması yeterli olmaktadır (Ölmez ve Cam, 2010, Yu ve diğ., 2000). Literatürde bu şekilde yalnızca karekök alma bloğu kullanılarak tasarlanmış birinci ve ikinci dereceden pek çok filtre devresi ve osilatör devresi bulunmaktadır (Yu ve diğ., 2000, 2003, 2005a, Ölmez ve Çam, 2009, 2010, Surav Yılmaz ve Tola, 2011a, Surav Yılmaz ve diğ., 2011, 2013). Yapılan çalışmaların geneline bakıldığında bu devrelerin gerilim modlu devreler içerisinde performans anlamında iyi sonuçlar verdiği ve düşük çalışma gerilimi, düşük güç tüketimi ve elektronik ayarlanabilirlik gibi pek çok üstünlüğe sahip oldukları görülmektedir (Yu ve diğ., 2000, Yu, 2005, Ölmez ve Çam, 2009, 2010, Surav Yılmaz ve Tola, 2011a, Surav Yılmaz ve diğ. 2013).

Günümüzde karekök devrelerinin mantığı ile yapılmış pek çok çalışma vardır. Ancak yapılan çalışmaların çoğu devre tasarımı kolaylıkla yapılabilecek şekilde sistem denklemlerinin seçilmesi ile elde edilmiştir (Eskiyerli ve Payne 1996a, 2000, Lopez-Martin ve Carlosena 2001, Yu ve diğ. 2000, 2010). Bunun dışında tamamen sistematik tasarım yapabilmek için önerilmiş bazı yöntemler de mevcuttur (Ölmez, 2011, Yu, 2005). Araştırmacılar önerdikleri yöntemleri kullanılarak literatürde daha önce önerilmiş olanlardan farklı olarak durum uzayı sentez yöntemi kullanarak yüksek dereceden devre tasarımları ortaya koymuşlardır (Yu, 2010, Ölmez, 2011). Ortaya konan bu yöntemler tez çalışmasına yakınlığı sebebi ile ayrıntılı olarak incelenmiş ve aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

2010 yılında karekök ortam devrelerinin sistematik sentezine yönelik önerilen bir yöntem ile ilk olarak transfer fonksiyonundan *companion* tekniği kullanılarak sistem denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen sistem denklemlerinde yalnızca karekök alma blokları kullanarak devre tasarımı yapabilmek için sistem denklemlerinde fazladan kalan sabit terimler devre denklemlerinde bir akım kaynağı olarak modellenmiştir. Bu şekilde birinci ve ikinci dereceden devrelerin tasarımına yönelik genel bir yöntem sunulmuş daha yüksek mertebeden devreler için ise birinci ve ikinci dereceden devrelerin kaskat bağlantısı yolu ile tasarım yapılabileceği belirtilmiştir (Yu, 2010).

2011 yılında yapılan farklı bir çalışma da yalnızca karekök alma blokları kullanılarak karekök ortam devrelerinin sistematik tasarımının yapıldığı farklı bir çalışma sunulmuştur (Ölmez, 2011). Yapılan bu çalışmada da birinci ve ikinci dereceden tüm devre alternatifleri sistematik olarak tasarlanabilmektedir. Bu çalışma da sistematik bir yöntem ortaya koyarken sistem denklemlerinde devre tasarımı için ortaya çıkan fazla terimlerin devre modelinde sabit bir akım kaynağı ile tolere edilmesi yoluna gitmiştir. Bu şekilde birinci ve ikinci dereceden istenen tüm transfer fonksiyonlarının gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca önerilen yöntem kullanılarak KHN ve Tow-Thomas devre yapılarında karekök ortam filtreleri gerçekleştirilmiştir (Ölmez ve Cam 2009, 2010). Yüksek dereceden tasarımlar ise daha önceki yönteme benzer olarak kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilerek önerilen yöntem genel hale getirilmiştir (Ölmez, 2011).

Durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak yalnızca karekök alma blokları ile devre tasarımı yapmak oldukça kullanışlı kolay ve basit bir yöntemdir. Bununla birlikte şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğunda, tamamen genelleştirilmiş bir yöntem ile kaskat bağlantı yapılmaksızın doğrudan yüksek dereceden tasarımlar ortaya koymaya yönelik çalışmalar çok kısıtlıdır. Bazı genel sentez yöntemleri önerilmiştir. Ancak bu konuda literatürde sunulan çalışmaların çoğunda yüksek dereceden tasarım yaparken kaskat bağlantı yönteminin tercih edildiği örnekler verilmiştir. Bunun önemli bir sebebi, yüksek dereceden devrelere ait transfer fonksiyonunun ve sonrasında elde edilen sistem denklemlerinin doğrudan devre tasarımında ekstra terimler içermesi ve bu terimlerin devrelerin doğrudan tasarımını zorlaştırmasıdır.

Tez kapsamında yoğun olarak durum uzayı sentez yöntemi ve blok yapı olarak yalnızca karekök alma blokları kullanılarak sistematik bir yöntem ortaya konmuştur.

Bunu yaparken en genel anlamda transfer fonksiyonundan sistem denklemleri elde edilmiş ve sistem denklemlerinde tasarım için sıkıntılı olan herhangi bir durum olduğunda bu kısıtın aşılabilmesi amacı ile elde edilen sistem denklemlerinin uygunlaştırılması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla ilk kez 2007 yılında ikinci dereceden bir filtre uygulamasında kullanılan yöntem (Arslanalp, Tola, 2007) üzerinde farklı çalışmalar yapılmış ve yöntem geliştirilerek sistematik hale getirilmiştir. Daha sonra buna paralel olarak AB sınıfı fark alan yapıda farklı bir sistematik sentez yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistematik sentez yöntemi farklı türden ve dereceden filtre devrelerine uygulanmış, her bir devreye ait ayrıntılı PSpice analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

1.2.6 AB Sınıfı Karekök Ortam Devreleri

Literatür özeti kapsamında incelenecek olan son sınıflandırma karekök ortam devrelerinde AB sınıfı devre yapısı kullanılarak yapılan çalışmaları içermektedir. Analog elektronik devre tasarımında AB sınıfı devre yapısının kullanımı devrelerin güç tüketimi ve dinamik giriş aralığı gibi bazı özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir (Ananda Mohan, 2003, Sedrave Smith, 2007). AB sınıfı devrelerin bu gibi üstünlüklerinin yanında devrede kullanılan eleman sayısını artırması açısından bir dezavantajı da mevcuttur. Bu kapsamda günümüze kadar yapılmış çalışmalar incelendiğinde karekök ortamı devrelerinde AB sınıfı yapının kullanıldığı çalışmalar oldukça azdır (De La Cruz-Blas ve diğ., 2004, 2005, Al-Gahtani, 2006, Farshidi ve Sayedi, 2007, Farshidi, 2010, De La Cruz-Blas ve Feely, 2008).

Karekök ortam devrelerinin AB sınıfı yapıda tasarımına yönelik yapılan ilk çalışma düşük gerilimli CMOS karekök ortamı filtrelerinin tasarımında yeni bir AB sınıfı doğrusal *transkondüktör* elemanı kullanarak gerçekleştirilmiştir (De La Cruz-Blas ve diğ., 2004). Bu çalışmada öncelikli olarak yeni bir AB sınıfı doğrusal *transkondüktör* devresi içyapısı önerilmiştir. AB sınıfı devre yapısında önerilen bu *transkondüktör* elemanlarından üç adet kullanılarak birinci dereceden alçak geçiren bir karekök ortamı filtresi tasarlanmıştır (De La Cruz-Blas ve diğ., 2004). Tasarlanan devrenin analiz sonuçları değerlendirildiğinde düşük kaynak gerilimi, düşük tasarım alanı ihtiyacı ve düşük güç tüketimi gibi üstünlüklere sahip olduğu gözlenmiştir. Aynı araştırma ekibi daha sonra önerdikleri bu AB sınıfı doğrusal *transkondüktör* yapısını kullanarak ikinci dereceden bir karekök ortam filtre devresi geliştirmişlerdir (De La

Cruz-Blas ve diğ., 2005). Çalışmada tasarlanan devrenin uygulamasına ait ayrıntılı analiz sonuçları sunulmuştur. 2004 yılında önerilmiş olan AB sınıfı *transkondüktör* devre yapısı kullanılarak başka devreler tasarlama fikri daha sonra başka araştırmacıların da ilgisini çekmiştir (Al-Gahtani, 2006). Bu çalışmada araştırmacılar AB sınıfı *transkondüktör* elemanı kullanılarak tasarlanmış karekök ortam filtresi üzerinde çıkış katındaki genişletici (expander) blok yapısında bazı değişiklikler yaparak birinci dereceden farklı bir alçak geçiren filtre devresi uygulaması şeklinde sunmuşlardır (Al-Gahtani, 2006).

Gerçek anlamda AB sınıfı yapı kullanılarak tasarlanmış bir karekök ortam filtresi 2007 yılında FG-MOS (Floating Gate MOS) transistörler kullanılarak tasarlanmıştır. Çalışma sonunda akım modlu çift çıkış fonksiyonu veren ikinci dereceden bir karekök ortam filtresi önerilmiştir (Farshidi ve Sayedi, 2007). Devre tasarımında karekök ortam integral alıcı blokları kullanılarak tasarlanmış iki adet ikinci dereceden A sınıfı filtre devresi kullanılmıştır. Karekök ortamda tasarlanmış integratör bloklarının her biri için iki adet kare alıcı/bölücü ve iki adet geometrik ortalama alma bloğu kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca kullanılan her bir blok yapı MOS ve FG-MOS transistörler birlikte kullanılarak tasarlanmıştır (Farshidi ve Sayedi, 2007).

AB sınıfı yapı kullanılarak yapılan bir başka çalışmada, araştırmacılar karekök ortamda tasarlanmış doğrusal *transkondüktör* (gm-C) elemanı kullanarak ikinci dereceden karekök ortam filtresi ilk olarak tasarlamışlardır (De La Cruz Blas ve Feely, 2008). Daha sonra tasarladıkları bu filtre devresinden iki adet kullanarak ve bir adet giriş akımı bölücü devresi kullanarak AB sınıfı devre yapısını bu tasarımlar ile gerçekleştirmişlerdir (De La Cruz Blas ve Feely, 2008). Önerilen devre PSpice programında Level-1 MOS transistör modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında önerilen bu yapının *companding* devre ve entegre edilebilir devre özelliklerini sağladığı belirtilmiştir.

Şimdiye kadar karekök ortam filtreleri konusunda yapılmış olan çalışmalar ayrıntılı olarak incelendiğinde; karekök ortam filtrelerinin yalnızca karekök alma blokları kullanılarak durum uzayında tasarımı yapılırken her türden filtre devresinin doğrudan ve/veya kaskat bağlantı ile tasarımını mümkün kılacak genel bir sentez yönteminin olmadığı tespit edilmiştir. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak üzere tez kapsamında A sınıfı ve AB sınıfı fark alan devre yapılarında karekök ortam filtrelerinin

tasarlanabilmelerini sağlayacak sistematik sentez yöntemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

1.3 Tezin Akışı

Bölüm 2’de tez çalışmasının temelini oluşturan bilgiler genel hatları ile sunulmuştur. Bunun için karekök ortam filtrelerinde kullanılan temel devre elemanı olan MOS transistörün çalışma alanları ve karakteristikleri tanımlanmıştır. Daha sonra translineer çevrim ve MOS translineer çevrim ilkeleri örnek devreler üzerinde genel hatları ile anlatılmıştır. MOS translineer devre grubu içerisinde yer alan karekök alma devresi ve tez içerisinde kullanılacak olan devre yapısı verilmiş ve bu devrenin analizi ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu bölümde son olarak tez çalışmasında kullanılan durum uzayı sentez yöntemi ve bu yöntemde sistem denklemlerinin elde edilmesi aşamasında kullanılan *Companion-III* yöntemi tanıtılmıştır.

Bölüm 3’te karekök ortam filtrelerinin A sınıfı devre yapısında sistematik tasarımı için genelleştirilmesi yapılan yöntem n . dereceden bir sistem için ayrıntılı olarak sunulmuştur. Genelleştirilen bu yöntemin örnek uygulamaları olarak tasarlanan birinci dereceden, ikinci dereceden ve beşinci dereceden farklı karekök ortam filtresi uygulamaları ayrıntılı tasarım aşamaları ile birlikte Bölüm 4’te sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca yapılan tüm tasarımlara ait PSpice programı analizleri verilmiştir.

Bölüm 5’te tezin amacı çerçevesinde A sınıfı devre yapısından farklı olarak AB sınıfı fark alan devre yapısı kullanılarak karekök ortam filtre devresi tasarımını mümkün kılan genel bir sentez yöntemi önerilmiştir. Birden fazla çözüm yöntemi sunacak şekilde geliştirilen yöntemin yalnızca iki farklı tasarım alternatifi üzerinde ayrıntılı olarak durulmuş ve bu alternatiflere ait ayrıntılı tasarım basamakları Bölüm 5’te sunulmuştur.

Bölüm 6 tez kapsamında Bölüm 5’te geliştirilen sentez yönteminin birinci dereceden üç farklı filtre devresi üzerinde uygulamalarını içermektedir. Benzer şekilde Bölüm 7’de aynı yöntemin ikinci dereceden beş farklı tür filtre devresi uygulaması sunulmuştur. Bölüm 8’de ise üçüncü dereceden alçak geçiren filtre devresi uygulaması verilmiştir.

Son olarak Bölüm 9’da tezin bir değerlendirmesi yapılarak sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

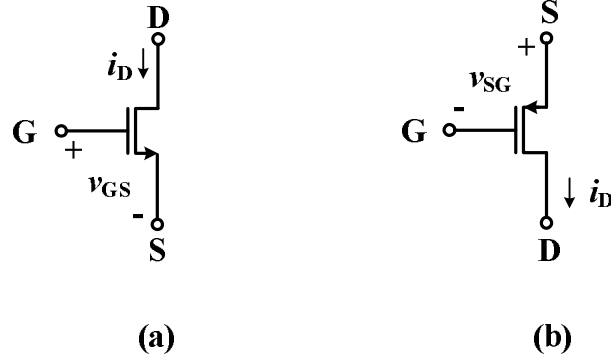
2. TEMEL KAVRAMLAR

Bu bölümde, tezde kullanılan temel kavramlar, teoremler ve devre yapılarına ait bilgiler sunulacaktır. Karekök ortam devrelerinin temelini oluşturan elemanlar, yapılar, teoremler ile tez kapsamında kullanılmakta olan devre yapıları ve bu devre yapılarına ait bazı özelliklerin tanımlanması bu bölümde sunulmaktadır.

2.1 MOS Transistör Elemanı ve Çalışması

Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör olarak bilinen MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistör) günümüzde mikroelektronik devreler konusunda yapılan çalışmaların pek çoğunda kullanılmaktadır (Seevinck, 1990, Razavi, 2008). Bu elemanlar daha kısa ifadesi ile MOS transistörler olarak tanımlanmaktadır. MOS transistörler başlangıçta yoğun olarak dijital elektronik sistemlerin tasarımında kullanılmakta iken zamanla analog entegre devre teknolojisindeki gelişmeler, analog ve dijital sistemlerin birbirine çok yakın çalışması ve işaretlerin bu iki sistem arasında dönüşümlerine ihtiyaç olması gibi etkenler sebebiyle analog elektronik sistemlerde de sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır.

MOS transistörler kanal bölgelerinde kullanılan yarıiletken malzemelerin cinsine göre NMOS ya da PMOS transistörler olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Bir MOS transistör kanal bölgesi n tipi malzemeden oluşmuş ise NMOS transistör olarak isimlendirilir ve bu tür transistörlerde akım yönü transistörün *drain* ucundan *source* ucuna doğrudur. Diğer taraftan kanal bölgesi p tipi malzemeden oluşmuş transistörler PMOS olarak isimlendirilir ve bu transistörlerde akım yönü *source* ucundan *drain* ucuna doğrudur. NMOS ve PMOS transistörlerin genel gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir. Burada D transistörün *drain* ucunu, S transistörün *source* ucunu, G transistörün *gate* ucunu belirtmektedir. i_D akımı transistör üzerinden geçen *drain* akımı ve v_{GS} gerilimi ise transistörün *gate-source* uçları arasındaki gerilim farkını ifade etmektedir.



Şekil 2.1: (a) NMOS transistör modeli (b) PMOS transistör modeli

Günümüzde NMOS ve PMOS transistör elemanları filtre, osilatör, türev alıcı, integral alıcı vb. devrelerin tasarımında çokça kullanılmaktadır. Bu transistörler, tasarımcının tercihiyle farklı çalışma bölgelerinde çalıştırılabilmektedir. Bunun sebebi aynı transistörün farklı çalışma koşullarında farklı karakteristik özelliklere ve uç bağıntılarına sahip olmasıdır.

MOS transistörlerin temel olarak üç farklı çalışma bölgesine sahip olduğu bilinmektedir. Bunlar zayıf evirtim (*Weak Inversion*) bölgesi, doymasız (*Triode*) bölge ve doyum (*Saturation*) bölgesidir. Bu bölgeler MOS transistöre uygulanan giriş gerilimi ve üzerinden geçen i_D akımına göre belirlenmektedir. Bu durum transistörün ilgili çalışma bölgesinde sahip olduğu karakteristiğe göre kullanılmak istenen devre yapısını da belirler. Örneğin bir MOS transistör yükselteç olarak çalıştırılacak ise doyum bölgesinde; anahtarlama elemanı olarak çalıştırılacaksa da zayıf evirtim ya da doymasız bölgede çalıştırılmalıdır (Sedra ve Smith, 2007). Bununla beraber son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda, zayıf evirtim bölgesinde çalışan MOS transistörler bu çalışma alanındaki uç bağıntılarının özelliklerinden dolayı farklı logaritmik ortam devrelerinin tasarımında (Frey, 2000, Python ve diğ., 1999) ve doyum bölgesinde çalışan MOS transistörler ise karekök ortam devreleri gibi pek çok farklı elektronik devrelerin tasarımında kullanılabilmektedir (Eskiyerli ve diğ. 1996a, 1996b, Eskiyerli ve Payne, 2000, Yu ve diğ., 2000, Lopez-Martin ve Carlosena, 2001).

2.1.1 Zayıf Evirtim Bölgesi

Bu çalışma bölgesi MOS transistörün karakteristik olarak bipolar transistördeki benzer üstel bir uç bağıntısına sahip olduğu aralıktır. NMOS transistör için v_{GS} gerilim değeri transistörün eşik gerilimi olan V_{TH} geriliminden küçük ise bu durumda

transistör zayıf evirtim bölgesinde çalışmaktadır. Bu bölgede çalışan bir transistörün i_D akımı ile v_{GS} gerilimi arasında üstel bir ilişki vardır ve bu durumdaki bir MOS transistör bipolar transistör gibi üstel uç bağıntısına sahip olmaktadır (Gray ve diğ., 2009, Sedra ve Smith, 2007). Zayıf evirtim bölgesinde çalışan bir NMOS transistöre ait i_D akımı Denklem (2.1)'de verildiği gibidir (Gray ve diğ., 2009).

$$i_D = \frac{W}{L} I_t \exp\left(\frac{v_{GS} - V_{TH}}{nV_{TH}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{v_{DS}}{V_{TH}}\right)\right] \quad (2.1)$$

Burada, W transistörün kanal genişliğini, L transistörün kanal boyu uzunluğunu, I_t akımı $v_{GS}=V_{TH}$ olduğu durumda transistör üzerinden geçen i_D akımını, v_{DS} ise transistörün *drain* ile *source* uçları arasındaki gerilim farkını ifade etmektedir. Denklem (2.1)'de yer alan n parametresi ise Denklem (2.2)'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$n = 1 + \frac{C_{JS}}{C_{ox}} \quad (2.2)$$

Burada C_{JS} katkılanmış (*depletion*) bölge kapasite değeri ve C_{ox} *gate-oksit* tabakasının birim alan başına düşen kapasite değerini ifade etmektedir.

2.1.2 Doymasız bölge

MOS transistöre ait diğer bir çalışma bölgesi “omik bölge” olarak ta bilinen doymasız bölgedir. Eğer bir NMOS transistörde v_{GS} gerilimi V_{TH} geriliminden büyük iken aynı zamanda v_{DS} gerilimi de $v_{GS} - V_{TH}$ geriliminden küçük ise bu durumda transistör doymasız bölgede çalışmaktadır. Bu bölgede çalışan bir transistörün v_{DS} geriliminin $2*(v_{GS} - V_{TH})$ geriliminden çok küçük olma durumu söz konusu ise bu durumda mevcut transistör *drain-source* uçları arasına bağlanmış olan doğrusal olmayan gerilim kontrollü bir direnç elemanı gibi davranmaktadır (Gray ve diğ., 2009). Doymasız bölgede çalışan bir NMOS transistöre ait i_D akımı, Denklem (2.3)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[2(v_{GS} - V_{TH})v_{DS} - v_{DS}^2\right] \quad (2.3)$$

Burada μ_n MOS transistörün çoğunluk taşıyıcılarının hareketlilik katsayısını ifade etmektedir.

2.1.3 Doyum bölgesi

MOS transistöre ait en çok kullanılan çalışma bölgesi olarak bilinen bölge aktif çalışma bölgesi yani doyum bölgesidir. Eğer bir NMOS transistörde v_{GS} gerilimi V_{TH} geriliminden büyük iken aynı zamanda v_{DS} gerilimi de $v_{GS} - V_{TH}$ geriliminden büyük ise bu durumda transistör doyum bölgesinde çalışıyor kabul edilmektedir. Doyum bölgesinde çalışan bir NMOS transistörlerin i_D akımının v_{GS} gerilimi ve v_{DS} gerilimine bağlı olarak ifadesi Denklem (2.4)'de verildiği gibidir.

$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda v_{DS}) \quad (2.4)$$

2.2 Translineer Devre Prensibi

Translineer devre prensibi ilk kez 1975 yılında Gilbert tarafından ortaya atılmıştır (Gilbert, 1975). Gilbert ortaya koyduğu bu prensipte ileri yönde kutuplanmış p-n jonksiyonlarının kapalı bir çevrim oluşturması halinde elemanlar üzerinden geçen akımların arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Translineer devre prensibi temel olarak bir bipolar (BJT) transistörün *kollektör* akımı (i_C) ile geçiş iletkenliği katsayısı arasındaki doğrusallık ilişkisine dayanmaktadır (Toumazou, 1990). Bu prensip ismini transistörün geçiş iletkenliği katsayısının transistörün akımı ile doğrusal değişmesine paralel olarak bu iki terimin (Transconductance-Linear) birleşiminden almaktadır. Bipolar transistörlerde ortaya çıkan bu doğrusal ilişki transistörün i_C akımı ve *baz-emitör* (v_{BE}) gerilimi arasındaki logaritmik ilişkinin sonucudur (Toumazou, 1990). Buna bağlı olarak başlangıçta yalnızca bipolar transistör üzerinde ortaya konan bu ilişkinin daha sonra benzer matematiksel uç denklemlerine sahip olan diyot ve zayıf evirtim bölgesinde çalışan MOS transistör için de geçerli olduğu ortaya konmuştur.

2.2.1 Bipolar translineer prensibi

Bipolar translineer prensibi genelleştirilmiş translineer prensibi olarak da adlandırılmaktadır. Translineer prensibi temel olarak bipolar transistörler üzerinde

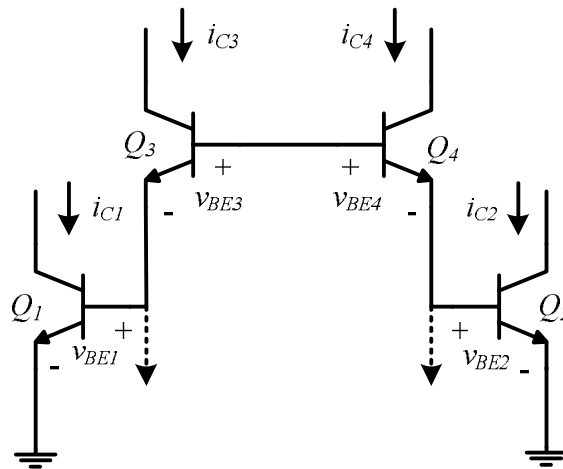
ortaya konduğundan dolayı genel anlamda translineer bir devreden bahsedildiğinde doğrudan bipolar transistörler kullanılarak oluşturulmuş bir devre yapısı aklı gelmektedir. Bipolar translineer prensibi temel olarak *baz-emitör* jonksiyonu ileri yönde kutuplanmış olan bir bipolar transistörün i_C akımı ile v_{BE} gerilimi arasında Denklem (2.5)'de verilen ilişki kullanılarak oluşturulmuştur.

$$i_C = I_s e^{\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)} \quad (2.5)$$

Bipolar transistörler kullanılarak bir translineer çevrim elde edilebilmesi için oluşturulan devrede dikkat edilmesi gereken üç husus şu şekilde sıralanabilir:

- Devrede mevcut *baz-emitör* jonksiyonu ileri yönde kutuplanmış tüm transistörlerin *baz-emetör* uçları kapalı bir çevrim oluşturacak şekilde bağlanmış olmalıdır.
- Oluşturulan çevrim içerisindeki tüm npn transistörlerin saat yönü istikametindeki *baz-emitör* jonksiyonlarının sayısı saat yönünün tersi istikametteki *baz-emitör* jonksiyon sayısına eşit olmalıdır.
- Oluşturulan çevrim içerisindeki tüm pnp transistörlerin saat yönü istikametindeki *baz-emitör* jonksiyonlarının sayısı saat yönünün tersi istikametteki *baz-emitör* jonksiyon sayısına eşit olmalıdır.

Translineer devre yapısının oluşması için gerekli olan bu şartlar doğrultusunda dört adet NPN transistör kullanılarak elde edilmiş bipolar translineer devre yapısı Şekil 2.2'de verilmiştir



Şekil 2.2: Dört transistörlü bipolar translineer çevrim

Bu devrede kapalı çevrim boyunca Kirchoff Gerilimler Kanunu (KGK) uygulandığında her bir transistörün v_{BE} gerilimleri arasında Denklem (2.6)'daki gibi bir ilişki olduğu görülmektedir.

$$v_{BE1} + v_{BE3} = v_{BE2} + v_{BE4} \quad (2.6)$$

Denklem (2.5)'de verilen bipolar transistörün uç bağıntısındaki akım eşitliği, Denklem (2.6)'daki denklemde yerine konursa Denklem (2.7)'de verilen eşitlik elde edilir.

$$V_T \ln\left(\frac{i_{C1}}{I_S}\right) + V_T \ln\left(\frac{i_{C3}}{I_S}\right) = V_T \ln\left(\frac{i_{C2}}{I_S}\right) + V_T \ln\left(\frac{i_{C4}}{I_S}\right) \quad (2.7)$$

Devrede kullanılan transistörlerin aynı ortamda çalıştırıldığı ve özelliklerinin aynı olduğu kabul edilirse bu denklemde her bir transistörün sıcaklığa bağlı gerilim değeri (V_T) ve doyma akımı (I_S) değerleri eşit olur. Bu durum göz önünde bulundurularak ve logaritma fonksiyonunun özellikleri de kullanılarak denklem düzenlendiğinde Şekil 2.2'de verilen devrenin her bir transistörü üzerinden geçen akımlar arasında Denklem (2.8)'de verilen bağıntının olduğu görülmektedir.

$$i_{C1} \cdot i_{C3} = i_{C2} \cdot i_{C4} \quad (2.8)$$

2.2.2 MOS translineer prensibi

Translineer devreler fikri bipolar transistörler ile ortaya atılmışsa da ilerleyen yıllarda gelişen teknolojiye paralel olarak MOS transistörlerin de bu devre yapılarında kullanılması gündeme gelmiştir. 1991 yılında yapılan bir çalışma ile translineer devre yapıları Bipolar translineer ve MOS translineer devreler (MTL) olarak gruplandırılmıştır (Seevinck ve Wiegerink, 1991). Yapılan bu gruplandırmaya göre Bipolar translineer devreler bipolar transistörün üstel uç bağıntısını kullanırken, MOS translineer devreler ise doyum bölgesinde çalışan MOS transistörlerin i_D akımı ile v_{GS} gerilimi arasındaki karesel ilişkiyi kullanmaktadır.

Doyum bölgesinde çalışan bir MOS transistöre ait uç denklemleri Denklem (2.4)'de verilmiştir. Bu denklemde kanal genişliği modülasyonu etkisi ihmal edilirse ($\lambda = 0$)

doyum bölgesinde çalışan bir MOS transistöre ait i_D akımının ifadesi Denklem (2.9)'da verildiği gibi olur.

$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_{TH})^2 \quad (2.9)$$

Daha önce de belirtildiği gibi Denklem (2.9)'da μ_n MOS transistörün hareketlilik katsayısı, C_{ox} gate-oksit tabakasının birim alan başına düşen kapasite değerini ve W/L ise MOS transistörün kanal en/boy oranını göstermektedir. Denklem (2.9)'da transistör özelliklerini içeren bu katsayılar ile ilgili Denklem (2.10)'da verilen kabullenme yapıldığında doyum bölgesinde çalışan MOS transistörün uç bağıntıları Denklem (2.11)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\beta = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \quad (2.10)$$

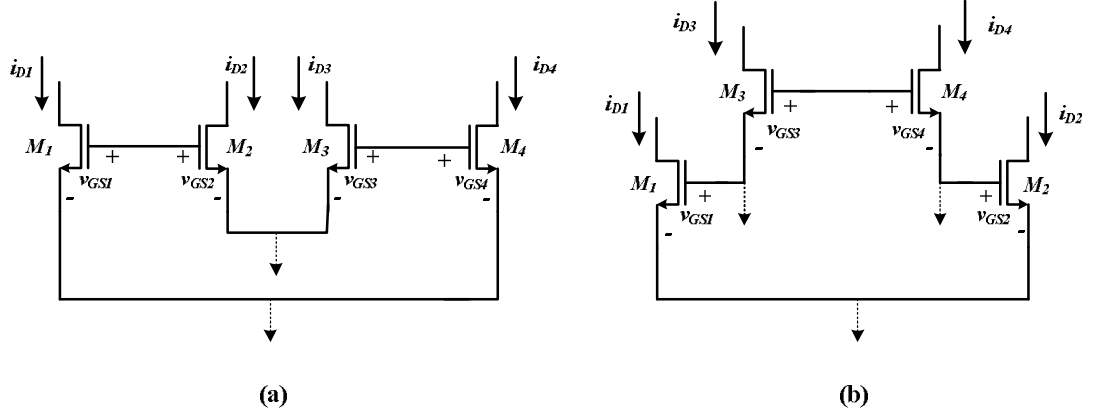
$$i_D = \frac{1}{2} \beta (v_{GS} - V_{TH})^2 \quad (2.11)$$

Bu denklemde β transistörün geçiş iletkenliği faktörünü ifade etmektedir.

MOS translineer teorisi, daha önce bipolar transistörlü devreler için ortaya konan translineer teorisi ile benzerdir. Bir devrenin MOS translineer devre sayılabilmesi için sağlaması gerekli olan koşullar şu şekilde sıralanabilir:

- Devrede mevcut tüm MOS transistörler doyum bölgesinde çalışmalı ve transistörler kapalı bir çevrim oluşturacak şekilde bağlanmış olmalıdır.
- Kapalı çevrim boyunca saat yönünde çalışan NMOS transistör sayısı saat yönünün tersine çalışan NMOS transistör sayısına eşit olmalıdır.
- Kapalı çevrim boyunca saat yönünde çalışan PMOS transistör sayısı saat yönünün tersine çalışan PMOS transistör sayısına eşit olmalıdır.

Belirtilen bu kurallara uygun olarak oluşturulmuş iki farklı MOS translineer devre yapısı Şekil 2.3'te verildiği gibidir. Bu devrelerden ilki yukarı-aşağı tip bağlantı modeli olarak isimlendirilen bir bağlantı yapısına sahip iken, ikincisi yığılanmış tip bağlantı modeli kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.3: Dört transistörlü a) yukarı-aşağı tip b) yığılanmış tip MOS translineer devre yapısı

Şekil 2.3'teki devrelere kapalı çevrim boyunca KGK uygulanırsa, devrelerdeki her bir elemana ait gerilim değerleri arasında Denklem (2.12)'de verilen eşitlik elde edilir.

$$v_{GS1} + v_{GS3} = v_{GS2} + v_{GS4} \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)'de verilen eşitlikte Denklem (2.11)'de verilen MOS transistörün uç bağlantıları uygun şekilde düzenlenip yerine yazılırsa Denklem (2.13) elde edilir.

$$\sqrt{\frac{i_{D1}}{\beta_1}} + V_{TH1} + \sqrt{\frac{i_{D3}}{\beta_3}} + V_{TH3} = \sqrt{\frac{i_{D2}}{\beta_2}} + V_{TH2} + \sqrt{\frac{i_{D4}}{\beta_4}} + V_{TH4} \quad (2.13)$$

Bu denklemlerde her bir transistörün aynı tip olduğu dolayısıyla hepsinin üretim parametreleri ve eşik gerilim değerlerinin eşit olduğu varsayılırsa eşitliğin son şekli Denklem (2.14)'de verildiği gibi olur.

$$\sqrt{\frac{i_{D1}}{W_1/L_1}} + \sqrt{\frac{i_{D3}}{W_3/L_3}} = \sqrt{\frac{i_{D2}}{W_2/L_2}} + \sqrt{\frac{i_{D4}}{W_4/L_4}} \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)'de görüldüğü gibi, translineer bir çevrim oluşturan MOS transistörlerin i_D akımları arasında; saat yönünde çalışan transistörlerin i_D akımlarının transistörlerin boyutlarına oranlarının karekökleri toplamının; saat yönünün tersine çalışan transistörlerin i_D akımlarının transistörlerin boyutlarına oranının karekökleri toplamına eşit olması şeklinde bir ilişki mevcuttur. Bu eşitlik dört transistörlü devre

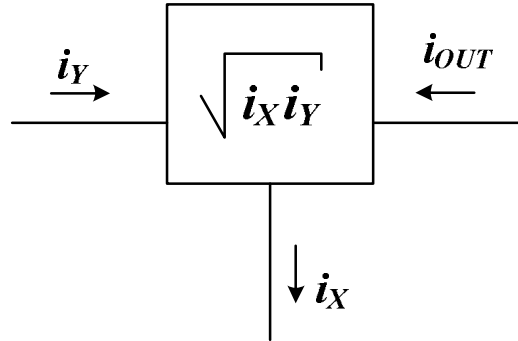
üzerinde elde edilmiştir. Bu durum N adet transistör içeren bir sistem için genelleştirilirse transistörlerin i_D akımları arasındaki bağıntı Denklem (2.15)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\sum_{k=1}^{N_1} \frac{i_{Dk}}{W_k/L_k} = \sum_{j=1}^{N_2} \frac{i_{Dj}}{W_j/L_j} \quad (2.15)$$

Bu eşitlikte saat yönünde çalışan transistör sayısı N_1 saat yönünün tersine çalışan transistör sayısı ise N_2 olarak kabul edildiğinde ve ($N_1=N_2$) olmak koşulu ile devredeki toplam MOS transistör sayısı $N=N_1+N_2$ olarak ifade edilmektedir.

2.3 Geometrik-Ortalama (Karekök) Alma Devresi

Karekök alma devresi karekök-ortam devrelerinin en temel yapı bloğudur. Bu blok yapı akım modludur ve isminden de anlaşılacağı gibi iki adet giriş akımının geometrik ortalamasını çıkış akımı olarak iletmektedir. Karekök alma devresi temel blok yapı olarak Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Akım modlu bir işleyişe sahip olan bu blok yapı i_X ve i_Y giriş işaretleri ve i_{OUT} çıkış işareti olacak şekilde Denklem (2.16)'da verilen uç denklemlerine sahiptir.

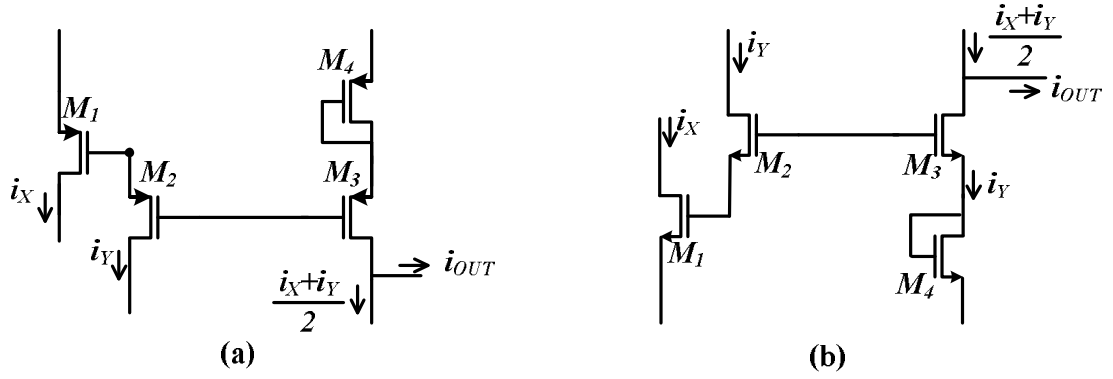


Şekil 2.4: Karekök alma bloğu

$$i_{OUT} = \sqrt{i_X \cdot i_Y} \quad (2.16)$$

Karekök alma bloğu, karekök ortam devrelerinin literatüre girmesi ile sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Bu blok yapıyı sağlayacak devre yapıları temel olarak MTL çevrim ilkesine dayanarak PMOS ve NMOS transistörler kullanılarak Şekil 2.5'de verildiği gibi tasarlanmıştır (Seevinck ve Wiegerink, 1991, Eskiyeerli ve Payne, 2000, Yu ve diğ., 2000).

Şekil 2.5’de verilen her bir devre yapısı için M_1 , M_2 , M_3 ve M_4 transistörleri üzerinden elde edilen MTL çevrim incelendiğinde Denklem (2.17)’de verilen bağıntı elde edilir.



Şekil 2.5: (a) PMOS (b) NMOS transistörler ile tasarlanmış temel karekök alma devrelerinin genel yapısı

$$v_{GS1} + v_{GS2} = v_{GS3} + v_{GS4} \quad (2.17)$$

Elde edilen bu bağıntıda transistörler üzerinden geçen akımlara göre her bir transistörün akım eşitliğini yerine yazarsak denklemler aşağıdaki gibi olur.

$$\sqrt{\frac{i_{D1}}{\beta_1}} + V_{TH1} + \sqrt{\frac{i_{D2}}{\beta_2}} + V_{TH2} = \sqrt{\frac{i_{D3}}{\beta_3}} + V_{TH3} + \sqrt{\frac{i_{D4}}{\beta_4}} + V_{TH4} \quad (2.18)$$

$$\sqrt{\frac{i_X}{\beta_1}} + V_{TH1} + \sqrt{\frac{i_Y}{\beta_2}} + V_{TH2} = \sqrt{\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{2\beta_3}} + V_{TH3} + \sqrt{\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{2\beta_4}} + V_{TH4} \quad (2.19)$$

Şekil 2.5’de verilen devre yapısında tüm transistörlerin V_{TH} gerilimlerinin eşit olduğunu varsayarsak Denklem (2.19)’da elde edilen eşitlik Denklem (2.20)’de verildiği gibi olur.

$$\sqrt{\frac{i_X}{\beta_1}} + \sqrt{\frac{i_Y}{\beta_2}} = \sqrt{\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{2\beta_3}} + \sqrt{\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{2\beta_4}} \quad (2.20)$$

Denklem (2.20)'de elde edilen denklemde öncelikle tüm transistörlerin aynı özelliklere sahip olduğunu yani μ_n ve C_{ox} değerlerinin aynı olduğunu düşündüğümüzde devreye ait eşitlikler her bir transistörün üzerinden geçen akım ve o transistörlerin boyutlarının oranlarına bağlı olarak Denklem (2.21)'de verildiği gibidir.

$$\sqrt{\frac{i_X}{W_1/L_1}} + \sqrt{\frac{i_Y}{W_2/L_2}} = \sqrt{\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{2(W_3/L_3)}} + \sqrt{\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{2(W_4/L_4)}} \quad (2.21)$$

Son olarak Şekil 2.5'de verilen devre yapısında, tüm transistörlerin kanal boyları (L) değeri eşit ve transistörlerin kanal genişliği değerleri $W_1=W_2=W$ ve $W_3=W_4=2W$ olarak seçilmiştir. Bu kabullenmeler Denklem (2.21)'e uygulanırsa ve denklemde verilmiş olan eşitliğin her iki tarafının karesi alınırsa devreye ait eşitlik Denklem (2.22)'deki gibi olur. Bu denklemde bazı düzenlemeler yapıldığında ise Denklem (2.23) elde edilir.

$$\frac{i_X}{W/L} + \frac{i_Y}{W/L} + 2\sqrt{\frac{i_X i_Y}{(W/L)^2}} = 2\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{4(W/L)} + 2\frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{4(W/L)} \quad (2.22)$$

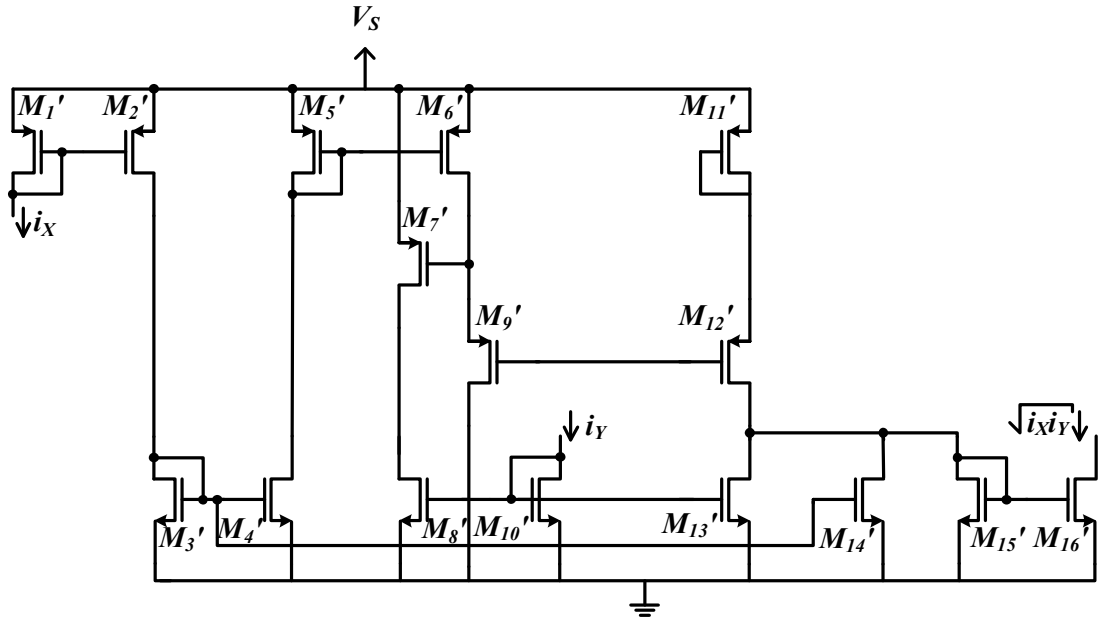
$$\frac{i_X}{(W/L)} + \frac{i_Y}{(W/L)} + \frac{2}{(W/L)}\sqrt{i_X i_Y} = \frac{i_X + i_Y + 2i_{OUT}}{(W/L)} \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)'de elde edilen denklem sadeleştirildiğinde Şekil 2.5'de verilen devre yapılarına ait eşitliğin son hali Denklem (2.24)'de verildiği gibi olur.

$$\sqrt{i_X i_Y} = i_{OUT} \quad (2.24)$$

Karekök alma bloklarının temelini oluşturan ve Şekil 2.5'de verilen devre yapıları günümüze kadar pek çok uygulamada kullanılmıştır. Bu devreler karekök alma devrelerinin çekirdek kısmını oluşturmaktadır. Bu çekirdek geometrik ortalama alma matematiksel işleminin gerçekleştirildiği asıl yapıdır. Bu devre yapılarının herhangi bir devrede doğrudan kullanılabilir olmaları için blok model eşdeğerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu aşamada yalnızca iki adet akım değerini giriş işareti olarak alıp ilave başka akım kaynağı veya blok yapıya ihtiyaç duymadan giriş akımlarının geometrik ortalamasını alan devre yapısı PMOS transistörlü çekirdek devre yapısının kullanılması ile Şekil 2.6'da verildiği gibi elde edilmiştir. Bu devre

yapısı tezin ilerleyen kısımlarında tasarlanacak olan tüm yeni devre modellerinde geometrik ortalama (karekök) alma blok yapısı yerine kullanılacaktır. Tezin sonraki bölümlerinde blok olarak kullanılan tüm karekök alma yapıları aksi belirtilmediği sürece Şekil 2.6’da verilen devreyi ifade etmektedir.



Şekil 2.6: Karekök alma bloğu iç yapısı (Yu ve diğ. 2005a)

2.4 Çıkış Katı Devreleri

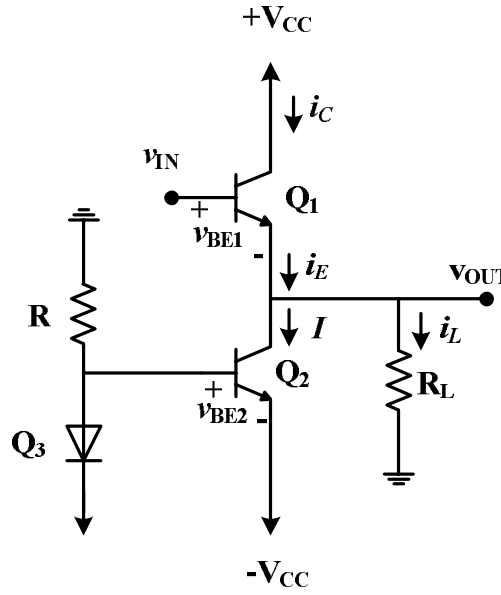
Elektronik devre tasarımında çok katlı devrelerin çıkış kısmında kullanılan devre yapıları çıkış katı devreleri olarak tanımlanmaktadır. Çıkış katı devrelerinin önemli bir fonksiyonu düşük çıkış direnci ile mümkün oldukça az kayıplı olarak çıkış işaretini yüke aktarmaktır (Sedra ve Smith, 2007). Çıkış katı yükselteç devreleri kullanılan çıkış transistörünün *kollektör* akımı dalga şekline göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre çıkış katı devreleri A sınıfı, B sınıfı ve AB sınıfı gibi farklı gruplandırmalara sahiptirler.

2.4.1 A Sınıfı çıkış katı yükselteci devre yapısı

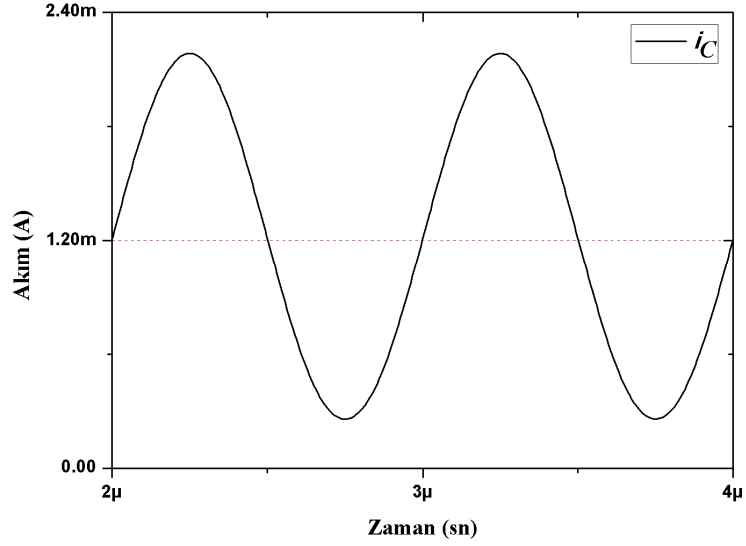
A sınıfı çıkış katı devreleri giriş işareti tepe değerinden daha büyük değerinde bir *DC* kutuplama akımına sahip olan devre yapılarıdır. A sınıfı devrelerde yer alan transistörler devredeki kutuplama akımından dolayı bir periyodun tümünde iletimdedirler, yani bu devre yapılarının iletim açısı 360° dir.

Bipolar transistörler kullanılarak elde edilen *emitör* izleyici yükselteç devresi A sınıfı çıkış katı devrelerine güzel bir örnektir. Bu devre yapısı ve devredeki çıkış transistörü üzerinden geçen akım bilgisi Şekil 2.7’de ve Şekil 2.8’de sırasıyla verilmiştir. Şekil 2.7’deki yükselteç devresinde Q_1 transistörü Q_2 transistörü tarafından oluşturulmuş I akımı ile kutuplanmaktadır ve bu I akımı değeri her koşulda Q_1 transistörü üzerinden akan akımın tepe değerinden daha büyüktür (Sedra ve Smith, 2007).

A sınıfı çıkış katı yükselteç devreleri tasarım ve çalıştırılmasının kolay olması ve iletim açısının 360° olması gibi üstünlüklere sahiptir. Bunun yanında bu tür devrelerde giriş işaretinin tepe değeri kutuplama akımı değeri ile sınırlanmaktadır. Bu durum, devrelerin dinamik giriş aralığı değerinin sınırlanmasına sebep olmaktadır.



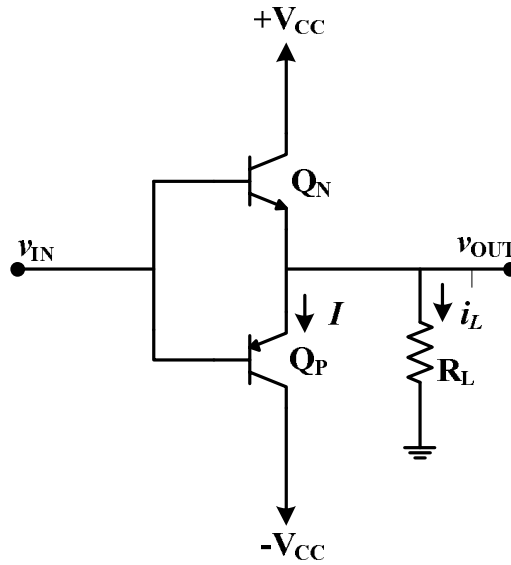
Şekil 2.7: BJT elemanları ile tasarlanmış A sınıfı çıkış katı yükselteç devresi



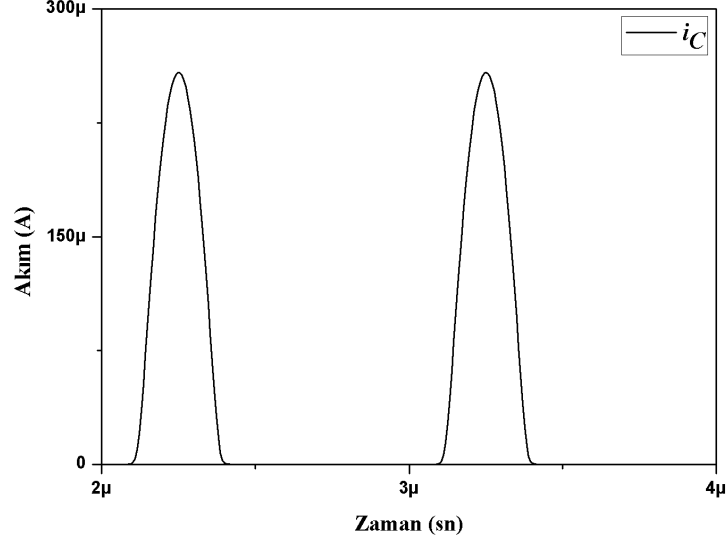
Şekil 2.8: A sınıfı çıkış katı yükselteç devresi çıkış işareti

2.4.2 B Sınıfı çıkış katı yükseltici devre yapısı

B sınıfı çıkış katı yükselteç devreleri A sınıfı devrelerden farklı olarak ilave bir kutuplama akımı içermezler. Bu yüzden B sınıfı çıkış katı devrelerinde transistörler uygulanan sinüs işaretinin yalnızca yarım periyodunda iletimde kalırlar (Sedra ve Smith, 2007). Bu durum devrenin iletim açısının 180° olması ile de ifade edilebilir. Birer adet PNP ve NPN transistör kullanılarak elde edilmiş B sınıfı çıkış katı devresi ve NPN transistörünün *kollektör* ucundan akan akım bilgisi Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da sırasıyla verilmiştir.



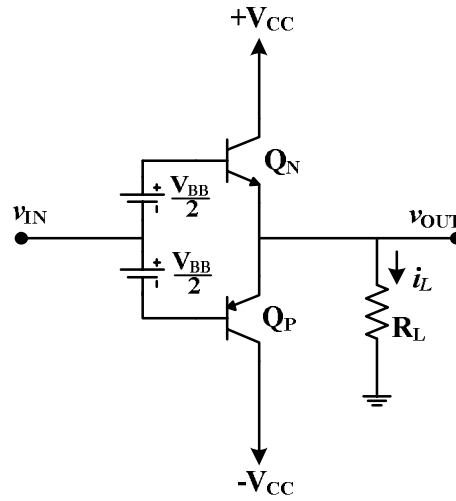
Şekil 2.9: BJT elemanları ile tasarlanmış B sınıfı çıkış katı yükselteç devresi



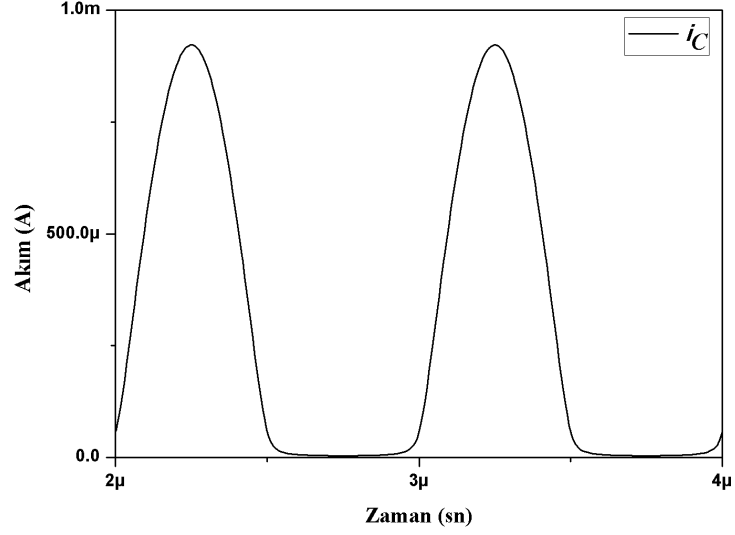
Şekil 2.10: B sınıfı çıkış katı yükselteç devresi çıkış işareti

2.4.3 AB Sınıfı çıkış katı yükselteci devre yapısı

AB sınıfı çıkış katı devresi A sınıfı ve B sınıfı çıkış katı devrelerinin ortasında bir çalışma performansı göstermektedir. AB sınıfı devre yapıları giriş işaretinin tepe değerinden daha küçük değerde ve değeri sıfır olmayan bir kutuplama akımı ile transistörlerin kutuplanması tekniğine dayanmaktadır. Böylece devredeki transistörler bir periyodun yarısından daha uzun süre iletimde kalırlarken diğer periyotta ise kısmi kesim denilen bir durumdadırlar. Yani AB sınıfı çıkış katı devrelerinin iletim açısı 180° ile 360° aralığındadır. BJT transistörler kullanılarak elde edilmiş AB sınıfı çıkış katı devresi Şekil 2.11’de verilmiştir. Bu devrede NPN transistörün üzerinden geçen i_C akımı dalga şekli ise Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.11: BJT elemanları ile tasarlanmış AB sınıfı çıkış katı yükselteç devresi



Şekil 2.12: AB sınıfı çıkış katı yükselteç devresi çıkış işareti

AB sınıfı devre yapısı filtre devrelerinin tasarımında ilk kez Seevinck (1990) tarafından kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda bu fikir yardımı ile analog elektronik teknolojisinde farklı devre sınıfları kullanılarak tasarımlar yapılmaya başlanmıştır. Bu konuda şimdiye kadar pek çok çalışma yapılmıştır (Tola ve diğ., 2009a, 2009b, Arslanalp ve Tola, 2009, Frey ve Tola, 1999, Tola ve Frey, 2000).

Tez kapsamında karekök ortam filtre devrelerinin sistematik tasarımı için ilk olarak A sınıfı yapı kullanılarak daha önceden ikinci dereceden bir uygulaması sunulmuş olan yöntem genelleştirilmiştir. AB sınıfı devre yapısının avantajlarından faydalanmak ve durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak tasarım yaparken sistem denklemlerinde karşılaşılan olası kısıtları aşarak genel bir sentez yöntemi ortaya koyabilmek için de AB sınıfı devre yapısı tercih edilmiştir.

2.5 Durum Uzayı Sentez Yöntemi

Elektronik sistemler birden fazla giriş ve/veya birden fazla çıkış bilgisine sahip olabilir. Böyle sistemlerde devrenin çözümlenmesi bazen çok zor ya da vakit alıcı olabilmektedir. Bunun gibi karmaşık sistemlerin analizinde çok kullanılan ve bu tür sistemlerin çözümlenmesi için uygun bir analiz yöntemi olarak durum uzayı yöntemi geliştirilmiştir (Ogata, 2002, Lathi, 2010). Durum uzayı yönteminin temel özelliği doğrusal ve doğrusal olmayan, zamanla değişmeyen ve zamanla değişen, tek ve çok değişkenli sistemlere uygulanabilir olmasıdır (Kuo, 1999). Yani bu yöntem yalnızca çok girişli ve/veya çok çıkışlı sistemlerin değil aynı zamanda doğrusal ya da doğrusal

olmayan sistemin analizi ve sentezinde de oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Durum uzayı yönteminde çözümlenme yapılırken sistem yalnızca harici büyüklükler olan giriş ve çıkış işaretleri ile tanımlanmak yerine dâhili büyüklükler olarak kabul edilen durum değişkenleri ile de ifade edilmektedir. Sistemin bu şekilde ifade edilebilir olmasının çeşitli avantajları vardır (Lathi, 2010):

- Durum uzayı yöntemi tek girişli-tek çıkışlı ve çok girişli-çok çıkışlı sistemlerin analiz, sentez ve optimizasyonu için uygundur.
- Durum denklemleri açıkça çözümlenmeseler de sistemin davranışına yönelik iç bilgileri sunmaktadırlar.
- Durum uzayı yöntemi yalnızca doğrusal sistemlere değil doğrusal olmayan sistemlere de uygulanabilmektedir.
- Yöntem zamanla değişen sistemlerde kullanılabilir.

Durum uzayı yöntemi ile herhangi bir sistemin analizi yapılırken ilk olarak n . dereceden bir sistem için n adet sistem denklemlerinin tanımlanması gerekmektedir. n . dereceden bir sistemin genel karakteristik verilerinden sisteme ait diferansiyel denklemler elde edilebiliyorsa bu diferansiyel denklemler bazı yöntemlerin yardımıyla sistem denklemlerine dönüştürülebilmektedir. n . dereceden tek girişli-tek çıkışlı bir sisteme ait diferansiyel denklem gösterimi Denklem (2.25)'de verildiği gibidir (Ogata, 2002).

$$y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y = b_n u^{(n)} + b_{n-1} u^{(n-1)} + \dots + b_1 \dot{u} + b_0 u \quad (2.25)$$

Denklem (2.25)'de verilen diferansiyel denklem yapısından sistem denklemlerine geçmek için denklemde kullanılan çıkış bilgisi (y) ve türevleri olan ifadeler için Denklem (2.26)'da verildiği gibi bir kabullenme yaparak durum değişkenlerini tanımlayabiliriz.

$$\begin{aligned}
x_1 &= y \\
x_2 &= \dot{y} \\
x_3 &= \ddot{y} \\
&\vdots \\
x_n &= y^{(n-1)} \\
\dot{x}_n &= y^{(n)}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Denklem (2.26)'da verildiği gibi tanımlanan durum değişkenlerinin her birinin türevini yine durum değişkeni cinsinden yerine yazarsak durum değişkenlerinin son hali Denklem (2.27)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= x_3 \\
\dot{x}_3 &= x_4 \\
&\vdots \\
\dot{x}_{n-1} &= x_n
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Bu aşamada Denklem (2.25)'de verilen diferansiyel denklemde durum değişkenlerini yerlerine yazarak denklemi düzenlersek n . satıra ait sistem denklemi ifadesi Denklem (2.28)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\dot{x}_n = -a_{n-1}x_n - a_{n-2}x_{n-1} - \cdots - a_1x_2 - a_0x_1 + b_n^{(n)} u + b_{n-1}^{(n-1)} u + \cdots + b_1\dot{u} + b_0u \tag{2.28}$$

Son olarak sisteme ait çıkış denklemi de Denklem (2.29)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$y = x_1 \tag{2.29}$$

n . dereceden tek girişli-tek çıkışlı sisteme ait sistem denklemleri tanımlamaları Denklem (2.25)-(2.29) arasında belirtildiği gibi ifade edilmektedir. Bu denklemlerden de görüldüğü gibi n . dereceden tek girişli-tek çıkışlı sisteme ait sistem denklemleri n adet birinci dereceden diferansiyel denklem ve n adet durum değişkeni (x_1, x_2, \dots, x_n) terimi ile ifade edilmektedir. Bununla birlikte giriş ve çıkış sayıları farklılaştığında sistem denklemlerindeki bazı katsayı ve tanımlamalardaki değişimler

de Denklem (2.30)'da verilmektedir. Burada n . dereceden m girişli- k çıkışlı doğrusal bir sisteme ait sistem denklemleri tanımı ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

$$\dot{x}_i = A_{i1}x_1 + A_{i2}x_2 + \cdots + A_{in}x_n + B_{i1}u_1 + B_{i2}u_2 + \cdots + B_{im}u_m \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.30)$$

$$y_j = P_{j1}x_1 + P_{j2}x_2 + \cdots + P_{jn}x_n + D_{j1}u_1 + D_{j2}u_2 + \cdots + D_{jm}u_m \quad j = 1, 2, \dots, k$$

Denklem (2.30)'da görüldüğü gibi n . dereceden bir sisteme ait sistem denklemleri n adet birinci dereceden diferansiyel denklem ve n adet durum değişkeni ile ifade edilmektedir. Denklem (2.30)'da genel ifadesi verilen n . dereceden m girişli- k çıkışlı sistem denklemlerinin matris olarak ifade edilişi Denklem (2.31)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1m} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{k1} & P_{k2} & \cdots & P_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1m} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{k1} & D_{k2} & \cdots & D_{km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}$$

Denklem (2.31)'de ayrıntılı olarak verilen n . dereceden m girişli- k çıkışlı bir sisteme ait sistem denklemleri en genel yapıda Denklem (2.32)'de görülmektedir.

$$\begin{aligned} \bar{\dot{x}} &= \bar{A}\bar{x} + \bar{B}\bar{u} \\ \bar{y} &= \bar{P}\bar{x} + \bar{D}\bar{u} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Burada \bar{u} giriş vektörü, \bar{y} çıkış vektörü, \bar{x} durum vektörü, \bar{A} $n \times n$ boyutlu katsayı matrisi, \bar{B} $n \times m$ boyutlu katsayı matrisi, \bar{P} $k \times n$ boyutlu katsayı matrisi ve \bar{D} $k \times m$ boyutlu katsayı matrisini ifade etmektedir.

Genel yapıda herhangi bir transfer fonksiyonundan sistem denklemlerinin elde edilmesi aşamaları Denklem (2.25)-(2.32) arasında belirtildiği gibi yapılabilmektedir. Bununla birlikte şimdiye kadar yapılan farklı çalışmalarda sistem denklemlerinin elde edilmesi için kullanılan farklı yöntemler de mevcuttur. *Companion-III* yöntemi de bu yöntemlerden biridir ve daha çok yüksek dereceden sistemlerin tasarımında

kullanılmaktadır (Arslanalp, 2003, Arslanalp ve Tola, 2009). Tez kapsamında yapılan tüm çalışmalarda sistem denklemlerinin elde edilmesi işlemi *Companion-III* yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntem ve işlem basamakları ayrıntılı olarak Kısım 2.5.1’de anlatılmıştır.

2.5.1 Companion-III tekniği kullanılarak sistem denklemlerinin elde edilmesi

Herhangi bir transfer fonksiyonundan sistem denklemleri elde etmek için kullanılan farklı yöntemler mevcuttur (Lathi, 2010, Frey, 1993, Frey, 1996, Arslanalp ve Tola, 2009). Bu yöntemler içerisinde özellikle logaritmik ortam filtre devrelerinin yüksek dereceden ve farklı türlerden tasarımı için ilk defa 2003 yılında ortaya konmuş olan *Companion-III* yöntemi oldukça kullanışlıdır (Arslanalp, 2003). Tez kapsamında yapılan tasarımlarda kullanılan bu yöntemin uygulaması ve işlem basamakları ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir.

Companion-III yöntemi kullanılarak sistem denklemleri elde edilebilmesi için ilk olarak en genel yapıda n . dereceden tek girişli-tek çıkışlı bir filtre devresine ait normalize transfer fonksiyonunun Denklem (2.33)’deki gibi olduğunu varsayalım.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}{s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0} \quad (2.33)$$

Burada filtre devresine ait a_0, a_1, \dots, a_n pay katsayıları ve b_0, b_1, \dots, b_n payda katsayıları olarak kabul edilmiştir. Eğer Denklem (2.33)’de verilen normalize transfer fonksiyonunda $s = \frac{s}{\omega_0}$ eşitliği uygulanırsa elde edilen n . dereceden yeni transfer fonksiyonu Denklem (2.34)’de verildiği gibi olmaktadır.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_n s^n + a_{n-1} \omega_0 s^{n-1} + \dots + a_1 \omega_0^{n-1} s + a_0 \omega_0^n}{s^n + b_{n-1} \omega_0 s^{n-1} + \dots + b_1 \omega_0^{n-1} s + b_0 \omega_0^n} \quad (2.34)$$

Burada ω_0 terimi tasarlanacak olan filtre devresinin kutup frekansını ifade etmektedir. Denklem (2.34)’de transfer fonksiyonu verilen n . dereceden transfer fonksiyonundan Denklem (2.35) elde edilir.

$$\begin{aligned} y^{(n)} + b_{(n-1)} \omega_0 y^{(n-1)} + \dots + b_1 \omega_0^{(n-1)} \dot{y} + b_0 \omega_0^{(n)} y = \\ a_n u^{(n)} + a_{n-1} \omega_0 u^{(n-1)} + \dots + a_1 \omega_0^{(n-1)} \dot{u} + a_0 \omega_0^{(n)} u \end{aligned} \quad (2.35)$$

Denklem (2.35)'de giriş ve çıkış işareti ile onların türevlerini içeren denklem sistemi için Denklem (2.36)'da verilen kabullenme yapılırsa Denklem (2.33)'deki transfer fonksiyonuna ait sistem denklemleri Denklem (2.37)'de verildiği gibi elde edilir (Arslanalp ve Tola, 2009).

$$\begin{aligned}
\alpha_1 x_1 &= \delta y + r_1 u \\
\alpha_2 x_2 &= \alpha_1 \dot{x}_1 + r_2 u = \delta \dot{y} + r_1 \dot{u} + r_2 u \\
\alpha_3 x_3 &= \alpha_2 \dot{x}_2 + r_3 u = \delta \ddot{y} + r_1 \ddot{u} + r_2 \dot{u} + r_3 u \\
&\vdots \\
\alpha_n x_n &= \delta y^{(n-1)} + \sum_{i=1}^n r_i u^{(n-i)}
\end{aligned} \tag{2.36}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_1 \dot{x}_1 &= \alpha_2 x_2 + (a_{n-1} \delta - a_n \delta b_{n-1}) \omega_0 u \\
\alpha_2 \dot{x}_2 &= \alpha_3 x_3 + (a_{n-2} \delta - a_n \delta b_{n-2} - a_{n-1} \delta b_{n-1} + a_n \delta b_{n-1}^2) \omega_0^2 u \\
&\vdots \\
\alpha_n \dot{x}_n &= -\sum_{i=1}^n \alpha_i b_{i-1} \omega_0^{n-i+1} x_i + (a_0 \delta \omega_0^n + \sum_{i=1}^n b_{i-1} \omega_0^{n-i+1} r_i) u \\
y &= \frac{\alpha_1}{\delta} x_1 + a_n u
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Burada u giriş işareti, y çıkış işareti ve x_1, x_2, \dots, x_n terimleri ise n adet durum değişkenini ifade etmektedir. Ayrıca Denklem (2.37)'te görülen $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \delta$ terimleri ise keyfi olarak seçilebilen katsayılardır. *Companion-III* tekniğine göre tasarımcı bu katsayıları istediği gibi seçerek aynı transfer fonksiyonunu sağlayan farklı sistem denklemleri elde edebilmektedir (Arslanalp ve Tola, 2009). Tezin genelinde *Companion-III* yöntemi kullanılarak sistem denklemleri elde edilirken bu katsayılar Denklem (2.38)'de verildiği gibi seçilmiştir.

$$\begin{aligned}
\delta &= 1 \\
\alpha_1 &= 1 \\
\alpha_2 &= \omega_0 \\
\alpha_3 &= \omega_0^2 \\
&\vdots \\
\alpha_n &= \omega_0^{n-1}
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Denklem (2.37)'de kullanılan r_i katsayısı ise transfer fonksiyonu parametrelerine bağlı olarak Denklem (2.39)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Arslanalp ve Tola, 2009).

$$\begin{aligned}
r_1 &= -a_n \delta \omega_0^{n-(n)} \\
r_2 &= -a_{n-1} \delta \omega_0^{n-(n-1)} - b_{1+n-2} \omega_0^{n-(1+n-2)} (-a_n \delta \omega_0^{n-(n)}) \\
r_3 &= -a_{n-2} \delta \omega_0^{n-(n-2)} - b_{1+n-3} \omega_0^{n-(1+n-3)} (-a_n \delta \omega_0^{n-(n)}) \\
&\quad - b_{2+n-3} \omega_0^{n-(2+n-3)} \left[-a_{n-1} \delta \omega_0^{n-(n-1)} - b_{1+n-2} \omega_0^{n-(1+n-2)} (-a_n \delta \omega_0^{n-(n)}) \right] \\
&\vdots
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Sonuç olarak *Companion-III* yöntemi kullanılarak herhangi bir transfer fonksiyonuna ait sistem denklemleri Denklem (2.37)'de verilen denklemlerde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \delta$ katsayılarının kullanıcı tarafından istenildiği gibi seçilmesi ve r_i katsayısının da Denklem (2.39)'da belirtildiği gibi hesaplanması ile sistematik bir şekilde elde edilebilmektedir.

3. A SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRELERİNİN DURUM UZAYI SENTEZ YÖNTEMİ KULLANILARAK SİSTEMATİK TASARIMI

Karekök ortam filtrelerinin tasarımına ilişkin ortaya konmuş pek çok çalışma mevcuttur (Eskiyerli ve diğ., 1996a, 1996b, Yu ve diğ., 2005a, 2005b, Psychalinos ve Vlassis, 2002a). Yapılan çalışmalarda farklı sentez yöntemleri kullanılmış ve bu şekilde sistematik bir tasarım ortaya konmaya çalışılmıştır. Devre tasarımında özellikle çok girişli-çok çıkışlı sistemlerin tasarımında önemli bir yeri olan durum uzayı yöntemi ilk olarak 1996 yılında karekök ortam filtrelerinin tasarımında kullanılmıştır (Eskiyerli ve diğ., 1996a). Karekök ortam devrelerinin tasarımında kolaylık sağlayan bu yöntem ile daha sonra pek çok yeni tasarım ve farklı sistematik sentez çalışması yapılmıştır (Eskiyerli ve Payne, 2000, Yu ve diğ., 2003, 2005b, Yu, 2010, Ölmez ve Çam, 2010, Arslanalp ve Tola, 2007, Surav Yılmaz ve Tola, 2011a).

Tezin bu bölümünde durum uzayı sentez yöntemi ile A sınıfı devre yapısında, yüksek dereceden filtrelerin doğrudan tasarlanabilmesine olanak sağlayan genel bir sentez yöntemi geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Tez kapsamında genelleştirilmiş A sınıfı karekök ortam filtresi tasarım yöntemi olarak isimlendirilen bu yöntem ilk kez 2007 tarihinde ikinci dereceden tek giriş bilgisi ile çift çıkış fonksiyonuna sahip bir filtre devresi tasarımında kullanılmıştır (Arslanalp ve Tola, 2007). 2007 yılında yapılan bu çalışma özel bir transfer fonksiyonunun gerçekleştirilmesi şeklinde sunulmuştur. Yani bu çalışmada genel bir çözüm yöntemi sunulmamıştır. Tez kapsamında, ilk olarak 2007 yılında ikinci dereceden özel bir uygulaması sunulan bu yöntemin daha genel yapıda ifade edilip genel ve sistematik bir çözüm sunup sunmadığının araştırılması amacıyla düşük ve yüksek dereceden farklı karakteristiklere sahip filtre devresi tasarımları yapılmıştır. Yapılan tasarımlar sonucunda yöntemin karekök ortam filtrelerinin sistematik bir şekilde tasarımı için uygun olduğu saptanmış ve tez kapsamında ilk kez n . dereceden bir sistem için genelleştirilmiş tasarım teorisi ortaya konmuştur. n . dereceden tek girişli-tek çıkışlı bir sistem için tez kapsamında genelleştirilen teori tezin bu kısmında ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1 Durum Uzayı Sentez Yöntemi Kullanılarak Genelleştirilmiş A Sınıfı Karekök Ortam Filtresi Tasarım Yöntemi

Karekök ortam filtrelerinin durum uzayı yöntemi ile sistematik tasarımı yapılırken bazı sınırlılık ve zorluklar ile karşılaşmaktadır. Tez kapsamında kullanılan sentez yönteminin durum uzayı yöntemi olarak seçilmesi sebebiyle öncelikle bu yöntem kullanılarak yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiş ve yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemlerin kısıtlılıkları belirlenmiştir.

Tezin bu kısmında ilk olarak karekök ortam filtrelerinin yalnızca karekök alma blokları kullanılarak tasarımında karşılaşılan sıkıntılar herhangi bir sisteme ait durum uzayı gösterimi verilerek denklemler üzerinde ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Daha sonra sistematik tasarım aşamasında karşılaşılan bu kısıtları aşmaya yönelik olarak geliştirilen genelleştirilmiş tasarım yöntemi ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tek girişli-tek çıkışlı n . dereceden bir sisteme ait durum uzayı tanımlaması Denklem (3.1)'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}\bar{\dot{x}} &= \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u \\ y &= \bar{P}^T \bar{x} + Du\end{aligned}\quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de verilen sistem denklemlerinde \bar{A} ($n \times n$) boyutlu katsayı matrisi, \bar{B} ($n \times 1$) boyutlu katsayı vektörü, \bar{P} ($n \times 1$) boyutlu katsayı vektörü ve D sabit bir katsayıdır. Yine aynı denklemde u giriş işaretini ve y çıkış işaretini, x ise durum değişkenlerini ifade etmektedir ve Denklem (3.2)'de verildiği gibidir.

$$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (3.2)$$

Denklem (3.1)'de verilen sistem denklemlerinin n . dereceden bir sistem için açık formu Denklem (3.3)'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} u \quad (3.3)$$

$$y = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + Du$$

Bu sistem denklemlerinin karekök ortamda gerçekleştirilebilmesi için sistem denklemlerinde yer alan her bir giriş işareti ve durum değişkeni ifadesinin yerine Denklem (3.4)'de görüldüğü gibi üretim parametreleri eş olarak seçilmiş ve doyum bölgesinde çalışan MOS transistörün uç bağlantılarından elde edilmiş olan fonksiyonların uygulanması gerekmektedir.

$$u = v_u = \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \quad (3.4)$$

$$x_i = v_i = \sqrt{\frac{i_i}{\beta}} + V_{TH}$$

Denklem (3.4)'deki gibi tanımlanan eşleştirme fonksiyonları Denklem (3.3)'de verilen sistem denklemlerine uygulandığında Denklem (3.5) elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \\ \vdots \\ \dot{v}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{i_1/\beta} \\ \sqrt{i_2/\beta} \\ \vdots \\ \sqrt{i_n/\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \sqrt{i_U/\beta} + \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n A_{1j} + B_1 \\ \sum_{j=1}^n A_{2j} + B_2 \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n A_{nj} + B_n \end{bmatrix} V_{TH} \quad (3.5)$$

$$y = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} + D v_u$$

Sistem denklemlerine eşleştirme fonksiyonları uygulandığında elde edilen denklemlerin her bir satırında kareköklü ifadelerin dışında bir de V_{TH} gerilimi

cinsinden bir sabit terim bulunmaktadır. Her satırda yer alan bu sabit terimlerin karekök ifadesi içermediği için karekök alma blokları kullanılarak gerçekleştirilebilmesi mümkün değildir. Bu aşamada ilk kez 2007 yılında ikinci derece bir uygulaması yapılan (Arslanalp ve Tola, 2007) ve bu tez kapsamında genelleştirilerek yüksek dereceden ve farklı yapılarda uygulamaları sunulan tekniğe göre; sistem denklemlerini yalnız karekök alma blokları ile tasarlamak mümkün olabilmektedir. Diğer bir ifade ile yüksek dereceden devrelerin durum uzayında tasarımlarını mümkün hale getiren bu yöntem kısaca sistem denklemlerine sabit terimlerin etkisini ortadan kaldıracak değerde başka bir terim eklenmesi şeklinde özetlenebilmektedir. Bu şekilde sistem denklemlerini ve dolayısı ile devre denklemlerini yalnızca karekök ifadeleri içerecek şekilde düzenlemek ve bu şekilde istenen tasarımları karekök alma blokları kullanarak gerçekleştirebilmek mümkün olacaktır.

Yapılacak düzenlemede sistem denklemlerindeki her bir satıra eklenecek terimin ne olduğu ve bunun sistematik olarak ifade edilebilir olup olmadığı önemlidir. Bu aşamada sistem denkleminin genel yapısı ve transfer fonksiyonunun karakteristiğinin değişmemesi gereklidir. Bunun için 2007 yılında ortaya konan çalışmada (Arslanalp ve Tola, 2007) olduğu gibi sabit bir harici DC giriş işareti ile beslenen bir karekök alma bloğunun sistem denklemlerine uygun şekilde eklenmesi yöntem olarak belirlenmiştir. Eklenen karekök alma bloğu tamamen DC bir işaret ile beslendiği için sistem denklemleri ve dolayısıyla tasarlanmak istenen filtre devresinin karakteristiğini hiçbir şekilde değiştirmemektedir. Ayrıca tüm devreye yalnızca bir adet eklenecek olan bu karekök alma bloğunun çıkışından elde edilen akım değeri sistem denklemlerindeki her bir düğüm noktasına sistem denklemindeki ilgili satırın katsayılarına uygun olacak şekilde akım aynaları ile iletilmektedir. Buna göre her bir sistem denklemi devre denklemine dönüştürüldüğünde elde edilecek sabit terimlerin katsayıları toplamına eşit olacak şekilde DC bir harici giriş işareti ile beslenecek yeni bir karekök bloğu ifadesini negatif işaretli olarak eklemek uygun olacaktır. Bu yöntem Denklem (3.5)'de verilen sistem denklemlerine uygulandığında düzenlenmiş yeni sistem denklemleri Denklem (3.6)'da görüldüğü gibi elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} u - \bar{\Psi} u_2 \quad (3.6)$$

$$y = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + Du$$

Burada u_2 harici bir giriş işareti olup yalnızca denklemleri uygun hale getirmek için kullanılmaktadır ve her zaman sabit bir DC değer almaktadır, $\bar{\Psi}$ ise her satır için farklı değerler alan ve bulunduğu satırdaki diğer terimlerin katsayıları ile orantılı olarak değişen bir katsayı vektörüdür. En genel yapıda $\bar{\Psi}$ vektörü Denklem (3.7) ve (3.8)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\bar{\Psi} = [\Psi_1 \quad \Psi_2 \quad \dots \quad \Psi_n]^T \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \sum_{j=1}^n A_{1j} + B_1 \\ \Psi_2 &= \sum_{j=1}^n A_{2j} + B_2 \\ &\vdots \\ \Psi_n &= \sum_{j=1}^n A_{nj} + B_n \end{aligned} \quad (3.8)$$

A sınıfı yapıda karekök ortam filtre devrelerine ait farklı bir sistematik tasarım yönteminin durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak en genel matris formunda genelleştirilmiş şekli Denklem (3.6)-(3.8)'de verilmiştir. Bu aşamada genel matris formunda verilen bu yöntemin matris ifadelerindeki her bir terimin elde edilebilmesi ve tanımlanabilmesi amacı ile ayrıntılı açılımları yapılacaktır. Bu amaçla öncelikle n . dereceden bir sisteme ait genel bir transfer fonksiyonundan, sistem denklemleri yalnızca transfer fonksiyonu katsayıları ve durum değişkenleri cinsinden *Companion-III* tekniği ile elde edilecektir. Yapılan çalışmalarda *Companion-III* tekniğinin seçilmesinin sebebi yüksek dereceden devreler için doğrudan tasarım kolaylığı sunmasıdır (Arslanalp, 2003).

Genel matris yapısında Denklem (3.6)'da verilen sistem denklemleri gösterimindeki her bir terim transfer fonksiyonundan yararlanılarak ve *Companion-III* metodu kullanılarak en genel yapıda elde edilebilmektedir (Arslanalp, 2003). Bölüm 2'de ayrıntılı olarak anlatılan bu yönteme göre n . dereceden bir sistem için elde edilen sistem denklemleri Denklem (2.37)'de verildiği gibidir.

Denklem (2.37)'deki gibi elde edilen sistem denklemlerinde kullanılan katsayılar transfer fonksiyonun pay ve payda katsayıları ve tasarlanacak olan filtrenin kesim frekansı ifadelerinden oluşmaktadır. Bu katsayılar dışında yer alan δ ve α_i katsayıları kullanıcı tarafından isteğe bağlı olarak farklı şekillerde belirlenebilmektedir. Tezin bu kısmında yapılan tüm çalışmalarda kullanılan δ ve α_i katsayıları Denklem (3.9)'da verildiği gibi seçilmiştir.

$$\begin{aligned} \delta &= 1 \\ \alpha_1 &= 1, \\ \alpha_2 &= \omega_0, \\ &\vdots \\ \alpha_n &= \omega_0^{n-1}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Denklem (3.3)'de genel matris formunda verilen n . dereceden bir sisteme ait sistem denklemleri tüm katsayılarının gerçek değerlerini içerecek şekilde Denklem (2.37)'de verildiği gibi elde edilebilmektedir. Ayrıntılı ifadesi elde edilen bu sistem denklemlerine karekök ortam devrelerinin tasarımı için uygun yapıda olan ve Denklem (3.4)'de verilen eşleştirme fonksiyonları uygulandığında Denklem (3.10)'daki denklem sistemi elde edilir. Denklemlerde görülen v_1, v_2, \dots, v_n düğüm gerilimlerini, i_1, i_2, \dots, i_n akımları ise *gate* uçları bu düğüm noktalarına bağlı olan MOS transistörün i_D akımlarını ifade etmektedir. Denklemlerde kullanılan her bir β katsayısının açılımı ise Denklem (2.10)'da verildiği gibidir.

Denklem (3.10)'da verilen sistem denklemlerinde V_{TH} çarpanının olduğu kısım sabit terimdir. Denklem sisteminin bu kısmı karekök alma blokları ile modellenemez. Bu kapsamda sistem denklemlerinin tamamen karekök ifadelerden elde edilmesi için sistem denklemlerine yaptığımız uygunlaştırma işlemi sonucu Denklem (3.6)'da verilen işlemler Denklem (3.10)'a uygulandığında Denklem (3.11) elde edilir.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_1 &= \frac{1}{\alpha_1} \left(\alpha_2 \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + (a_{n-1} - a_n b_{n-1}) \omega_0 \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) + \frac{1}{\alpha_1} (\alpha_2 + a_{n-1} \omega_0 - a_n b_{n-1} \omega_0) V_{TH} \\
\dot{v}_2 &= \frac{1}{\alpha_2} \left(\alpha_3 \sqrt{\frac{i_3}{\beta}} + (a_{n-2} - a_n b_{n-2} - a_{n-1} b_{n-1} + a_n b_{n-1}^2) \omega_0^2 \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad + \frac{1}{\alpha_2} (\alpha_3 + a_{n-2} \omega_0^2 - a_n b_{n-2} \omega_0^2 - a_{n-1} b_{n-1} \omega_0^2 + a_n b_{n-1}^2 \omega_0^2) V_{TH} \\
&\vdots \\
\dot{v}_n &= \frac{1}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} \sqrt{\frac{i_j}{\beta}} + \left(a_0 \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad + \frac{1}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} + a_0 \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_i \right) V_{TH} \\
y &= \alpha_1 v_1 + a_n v_u
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
\dot{v}_1 &= \frac{1}{\alpha_1} \left(\alpha_2 \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + (a_{n-1} - a_n b_{n-1}) \omega_0 \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad + \frac{1}{\alpha_1} (\alpha_2 + a_{n-1} \omega_0 - a_n b_{n-1} \omega_0) V_{TH} - \Psi_1 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_2 &= \frac{1}{\alpha_2} \left(\alpha_3 \sqrt{\frac{i_3}{\beta}} + (a_{n-2} - a_n b_{n-2} - a_{n-1} b_{n-1} + a_n b_{n-1}^2) \omega_0^2 \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad + \frac{1}{\alpha_2} (\alpha_3 + a_{n-2} \omega_0^2 - a_n b_{n-2} \omega_0^2 - a_{n-1} b_{n-1} \omega_0^2 + a_n b_{n-1}^2 \omega_0^2) V_{TH} \\
&\quad - \Psi_2 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\vdots \\
\dot{v}_n &= \frac{1}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} \sqrt{\frac{i_j}{\beta}} + \left(a_0 \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad + \frac{1}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} + a_0 \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{i-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right) V_{TH} - \Psi_n \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
y &= \alpha_1 v_1 + a_n v_u
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Denklem (3.11)'de uygunlaştırma işlemi için kullanılan Ψ katsayıları Denklem (3.12)'de açık olarak ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\Psi_1 &= \frac{1}{\alpha_1} (\alpha_2 + a_{n-1}\omega_0 - a_n b_{n-1}\omega_0) \\
\Psi_2 &= \frac{1}{\alpha_2} (\alpha_3 + a_{n-2}\omega_0^2 - a_n b_{n-2}\omega_0^2 - a_{n-1}b_{n-1}\omega_0^2 + a_n b_{n-1}^2\omega_0^2) \\
&\vdots \\
\Psi_n &= \frac{1}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} + a_0 \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right)
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Denklem (3.12)'de verilen Ψ katsayıları Denklem (3.11)'deki yerlerine konursa Denklem (3.13) elde edilir. Bu denklemlerde V_{TH} çarpanını içeren terimlerin etkisi harici bir DC giriş olan u_2 terimlerinin uygun yapıda eklenmesi yöntemi ile ortadan kaldırılmıştır. Bu şekilde denklemler yalnızca karekök alma blokları kullanılarak tasarım yapılabilir konuma gelirken ilave olarak eklenen terimin DC bir gerilim bilgisi olması sistemin transfer fonksiyonu ve karakteristiği üzerinde herhangi bir değişiklik meydana getirmemektedir.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_1 &= \frac{1}{\alpha_1} \left(\alpha_2 \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + (a_{n-1} - a_n b_{n-1}) \omega_0 \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad + \frac{1}{\alpha_1} (\alpha_2 + a_{n-1}\omega_0 - a_n b_{n-1}\omega_0) \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
\dot{v}_2 &= \frac{1}{\alpha_2} \left(\alpha_3 \sqrt{\frac{i_3}{\beta}} + (a_{n-2} - a_n b_{n-2} - a_{n-1} b_{n-1} + a_n b_{n-1}^2) \omega_0^2 \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad - \frac{1}{\alpha_2} (\alpha_3 + a_{n-2}\omega_0^2 - a_n b_{n-2}\omega_0^2 - a_{n-1}b_{n-1}\omega_0^2 + a_n b_{n-1}^2\omega_0^2) \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
&\vdots \\
\dot{v}_n &= \frac{1}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} \sqrt{\frac{i_j}{\beta}} + \left(a_0 \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\
&\quad - \frac{1}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} + a_0 \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
y &= \alpha_1 v_1 + a_n v_n
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Denklem (3.13)'de verilen sistemden görüldüğü gibi; tez kapsamında genelleştirmesi yapılan yöntem kullanılarak en genel yapıda n . dereceden bir transfer fonksiyonuna ait devre denklemleri yalnızca karekök alma blokları kullanılarak ifade edilebilir ve

gerçekleştirilebilir hale getirilmiştir. Bu aşamada Denklem (3.13)'de verilen denklem sisteminde katsayılar üzerinde bazı düzenlemeler yapıldığında n . satırdaki düğüm denklemi için elde edilen denklem yapısı Denklem (3.14)'de verildiği gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{v}_n = & \frac{\omega_0^n}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{-j+1} \sqrt{\frac{i_j}{\beta}} + \left(a_0 \delta + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} \right) \\ & - \frac{\omega_0^n}{\alpha_n} \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{-j+1} + a_0 \delta + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Bu denklemin her iki tarafı C katsayısı ile çarpılarak Denklem (3.15) elde edilir.

$$\begin{aligned} C\dot{v}_n = & -\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{-j+1} \sqrt{\frac{C^2 \omega_0^{2n} i_j}{\alpha_n^2 \beta}} + \left(a_0 \delta + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{C^2 \omega_0^{2n} i_U}{\alpha_n^2 \beta}} \\ & - \left(-\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{-j+1} + a_0 \delta + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{C^2 \omega_0^{2n} i_{U_2}}{\alpha_n^2 \beta}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Son denklemde her bir ifadeye ait katsayıların transfer fonksiyonu parametrelerine bağlı olarak ayrıntılı elde edişi verilmektedir. Bu aşamada denklemi görsel olarak daha basite indirgemek için Denklem (3.16)'da verilen kabullenmeler yapılırsa, sisteme ait devre denklemlerinin n numaralı satırının son şekli Denklem (3.17)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} I_f &= \frac{C^2 \omega_0^{2n}}{\alpha_n^2 \beta} \\ k_{xj} &= -\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{-j+1} \\ k_{uj} &= a_0 \delta + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{-j+1} r_j \\ k_{u_2j} &= -\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{-j+1} + a_0 \delta + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{-j+1} r_j \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$C\dot{v}_n = \sum_{j=1}^n \left(k_{xj} \sqrt{I_f I_j} \right) + \left(\sum_{j=1}^n k_{uj} \right) \sqrt{I_f i_U} - \left(\sum_{j=1}^n k_{u_2j} \right) \sqrt{I_f i_{U_2}} \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'de görüldüğü gibi istenilen düğüm noktasına ait devre denklemleri yalnızca iki akımın çarpımının karekökünü veren ifadeler kullanılarak elde edilebilmektedir. Buna göre istenen devrenin karekök alma blokları ve akım aynaları kullanılarak kolaylıkla tasarlanabilmesi mümkün olmaktadır. Bu aşamada istenilen herhangi bir filtre devresi derecesi kadar düğüm noktasına ait karekök bloğu ve iki adet giriş işaretlerinin işlendiği karekök alma bloğu kullanılarak kolaylıkla tasarlanabilmektedir.

4. A SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMALARI

Tezin bu bölümünde bir önceki bölümde genelleştirmesi yapılan sentez yöntemine ait bazı örnek uygulamalar sunulmuştur. İlk olarak birinci dereceden filtre devresi uygulaması olarak tüm geçiren filtre devresi sunulmuştur. Daha sonra genelleştirilen yöntemin ikinci dereceden tüm-geçiren bir filtre devresi uygulaması yapılmıştır. Her iki tüm geçiren filtre uygulaması da transfer fonksiyonundan yola çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tasarlanan devrelere ait benzetimler PSpice benzetim programı kullanılarak yapılmış ve ayrıntılı analiz sonuçları sunulmuştur.

Ayrıca, genelleştirilen yöntemin daha yüksek dereceden ve farklı bir uygulaması olarak beşinci dereceden alçak geçiren filtre karakteristiğine sahip bir Butterworth filtre devresi de bu bölümde sunulmuştur. Bu çalışmada ilk olarak beşinci dereceden alçak geçiren karakteristiğinde bir transfer fonksiyonu ele alınarak Bölüm 3'te genelleştirmesi yapılan yöntem yardımı ile doğrudan karekök ortam filtresi tasarımı yapılmıştır. Daha sonra aynı transfer fonksiyonu birinci ve ikinci dereceden alçak geçiren filtre devresi karakteristiklerine uygun yapıda üç farklı transfer fonksiyonu olarak ayrılmış ve her bir transfer fonksiyonu aynı yöntem ile ayrı ayrı karekök ortam filtre devresi olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devreler daha sonra kaskat bağlantı yöntemi kullanılarak birbirine bağlanmış ve beşinci dereceden aynı transfer fonksiyonu kaskat bağlantı yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu uygulamalar genelleştirilmesi yapılan yöntemin yüksek dereceli filtre devrelerinin tasarımlarında; hem doğrudan tasarım performansını sunmakta hem de önerilen yöntemin kaskat bağlantı yapılabilir bir özellikte olduğunu da göstermektedir.

4.1 Birinci Dereceden Tüm Geçiren Karekök Ortam Filtresi Tasarımı

A sınıfı karekök ortam filtrelerinin uygulamalarını içeren bu bölümde ilk olarak birinci dereceden filtre uygulaması olarak tüm geçiren karekök ortam filtresinin tasarımı sunulmuştur. Bu amaçla, ilk olarak birinci dereceden tüm geçiren filtre transfer fonksiyonuna genelleştirilen yöntem uygulanarak birinci dereceden karekök

ortam filtre devresi tasarımı yapılmıştır. Daha sonra tasarlanan devrenin PSpice benzetim programı ile analizleri yapılmıştır.

Birinci dereceden tüm geçiren filtre devresine ait genel transfer fonksiyonu Denklem (4.1)'de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = -a_1 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de verilen transfer fonksiyonundan *Companion-III* tekniği yardımı ile sistem denklemleri Denklem (4.2)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\omega_0 x_1 + 2a_1 \omega_0 u \\ y &= x_1 - a_1 u \end{aligned} \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de verilen sistem denklemlerine Bölüm 3'te genelleştirilmesi yapılan yöntem uygulanırsa elde edilen sistem denklemlerinin son hali Denklem (4.3)'deki gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\omega_0 x_1 + 2a_1 \omega_0 u - k \omega_0 u_2 \\ y &= x_1 - a_1 u \end{aligned} \quad (4.3)$$

Burada; k katsayısı Denklem (4.4)'te verildiği gibidir.

$$k = 2a_1 - 1 \quad (4.4)$$

Tasarlanmak istenen sisteme ait devre denklemlerinin elde edilebilmesi için Denklem (4.3)'de elde edilen sistem denklemlerinde her bir giriş, çıkış ve durum değişkeni ifadesi yerine yine karekök ortam filtre devresi tasarımına uygun olacak şekilde Denklem (4.5)'te verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanır.

$$\begin{aligned} x_1 &= v_1 = \sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} \\ u &= v_U = \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \\ u_2 &= v_{U2} = \sqrt{\frac{i_{U2}}{\beta}} + V_{TH} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Sistem denklemlerine Denklem (4.5)'de verilen fonksiyonlar uygulanırsa elde edilen denklemler Denklem (4.6)'da verildiği gibidir.

$$\dot{v}_1 = -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} \right) x_1 + 2a_1 \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \right) - k \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \quad (4.6)$$

$$y = v_1 - a_1 v_U$$

Denklem (4.6)'daki denklemlerin her iki tarafı C katsayısı ile çarpılır ve Denklem (4.15)'de belirtilen kabul yapılırsa elde edilen devre denklemleri Denklem (4.8)'de verildiği gibi olmaktadır.

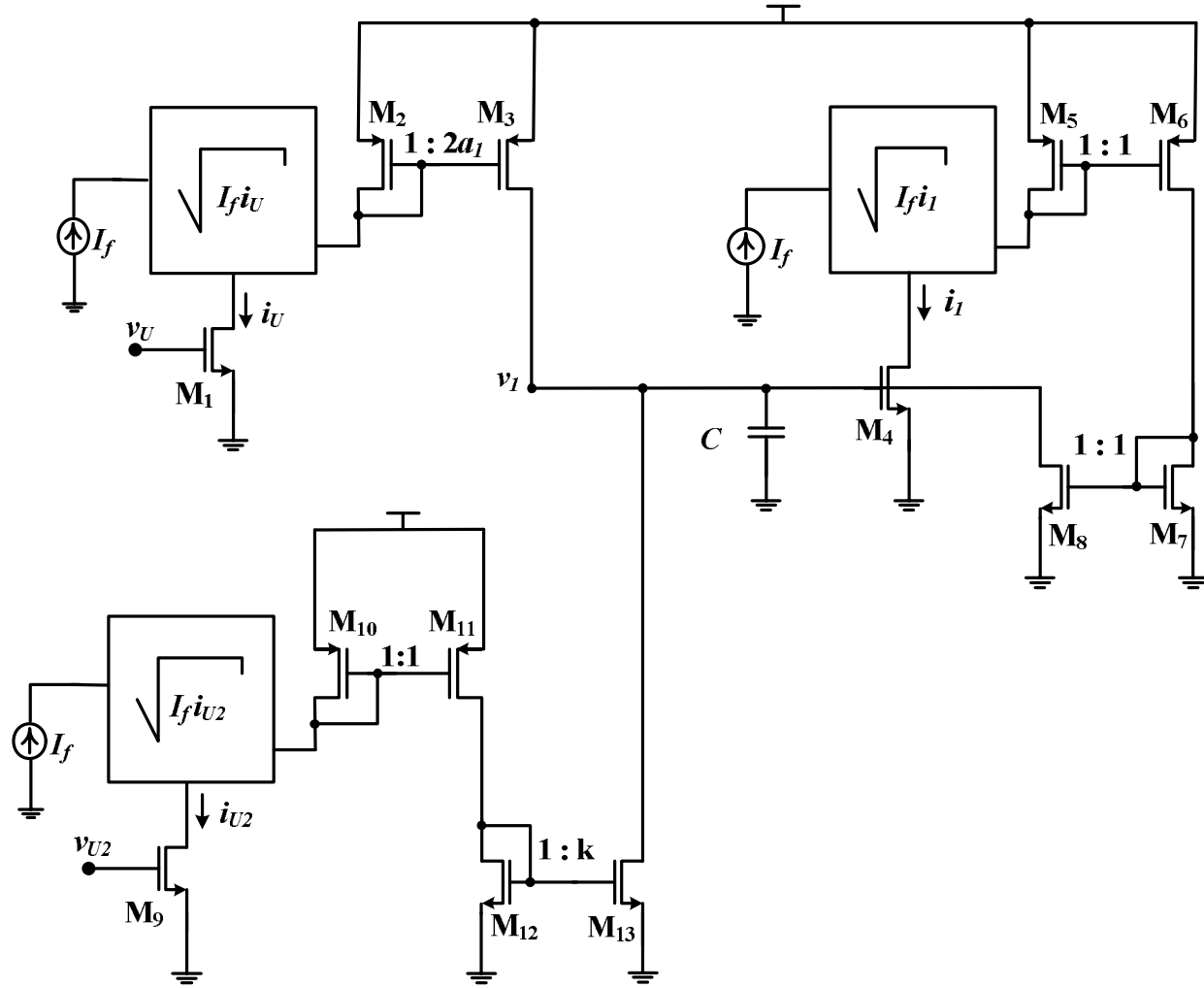
$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta} \quad (4.7)$$

$$C_1 \dot{v}_1 = -\sqrt{I_f i_1} + 2a_1 \sqrt{I_f i_U} - k \sqrt{I_f i_{U_2}}$$

$$y = v_1 - a_1 v_U \quad (4.8)$$

Devre denklemleri Denklem (4.8)'de görüldüğü gibi elde edilen birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresi kondansatör, akım aynası, akım modlu karekök alma blokları ve akım kaynağı elemanları kullanılarak Şekil 4.1'de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Tasarlanan devrede kullanılan I_f akım kaynaklarının değerleri birbirine eşit ve Denklem (4.15)'de verildiği gibidir. Bu durumda devrelerde kullanılan her bir kondansatör değeri de eşit olarak seçilmelidir.



Şekil 4.1: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi

4.1.1 Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresinin PSpice analizi

Birinci dereceden tüm geçiren filtre transfer fonksiyonundan yola çıkılarak ve Bölüm 3'te geliştirilmiş A sınıfı devre tasarım yöntemi kullanılarak elde edilen tüm geçiren karekök ortam filtre devresi giriş ve çıkış işaretleri gerilim olacak şekilde Şekil 4.1'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Tasarlanan birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresine ait performans değerlendirmesi yapılırken PSpice benzetim programı kullanılmıştır. Analizlerde devrede kullanılan her bir karekök alma bloğu yerine Şekil 2.6'da verilen akım modlu eşdeğeri kullanılmıştır.

Devrenin PSpice benzetiminde kullanılan tüm transistörler TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan NMOS ve PMOS transistörlerin model tanımları EK-1'de verilmiştir. Seçilen teknoloji parametreleri doğrultusunda karekök alma bloklarında kullanılan tüm transistörlerin boyutları Tablo 4.1'de verildiği gibi seçilmiştir. Devrede kullanılan akım aynaları ve karekök alma bloklarından akım çeken diğer NMOS ve PMOS transistörlerin boyutları devrenin kazanç değeri ($a_f=1$) için ayrıntılı olarak Tablo 4.2'de verildiği gibidir.

Tablo 4.1: Şekil 2.6'da devre şekli verilen karekök alma bloklarında kullanılan transistörlerin boyutları

Transistör No	W/L [μ m]	Transistör No	W/L [μ m]
M ₃ ', M ₄ ', M ₈ ', M ₁₀ ', M ₁₅ ', M ₁₆ '	7/.7	M ₁ ', M ₂ ', M ₅ ', M ₆ ', M ₇ ', M ₉ '	21/.7
M ₁₃ ', M ₁₄ '	3.5/.7	M ₁₁ ', M ₁₂ '	42/.7

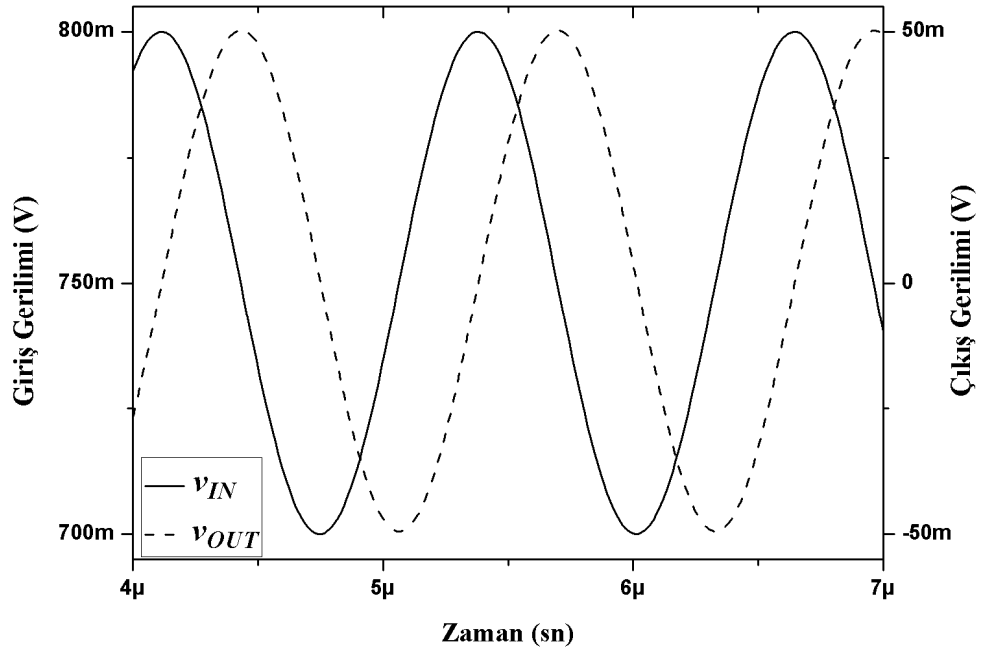
Tasarlanan filtre devresinin besleme gerilimi 2.35V olarak uygulanmıştır. Devrede kullanılan kondansatör 20pF değerinde seçilmiştir. Bunun yanında devrenin tümünde kullanılan I_f akım kaynakları 10 μ A değerinde olup giriş işareti 0.75V DC üzerine eklenmiş 50mV sinüsoidal AC gerilim değerinden oluşmaktadır. Devrenin analizi yapılırken kullanılan kondansatörün ve akım kaynağının değerine göre kesim frekansının değeri $f_0=790$ kHz olarak elde edilmektedir. Son olarak A sınıfı yapıda

tasarlanan devrede kullanılan harici DC giriş işaretinin (v_{U2}) değeri de 0.75V olarak seçilmiştir.

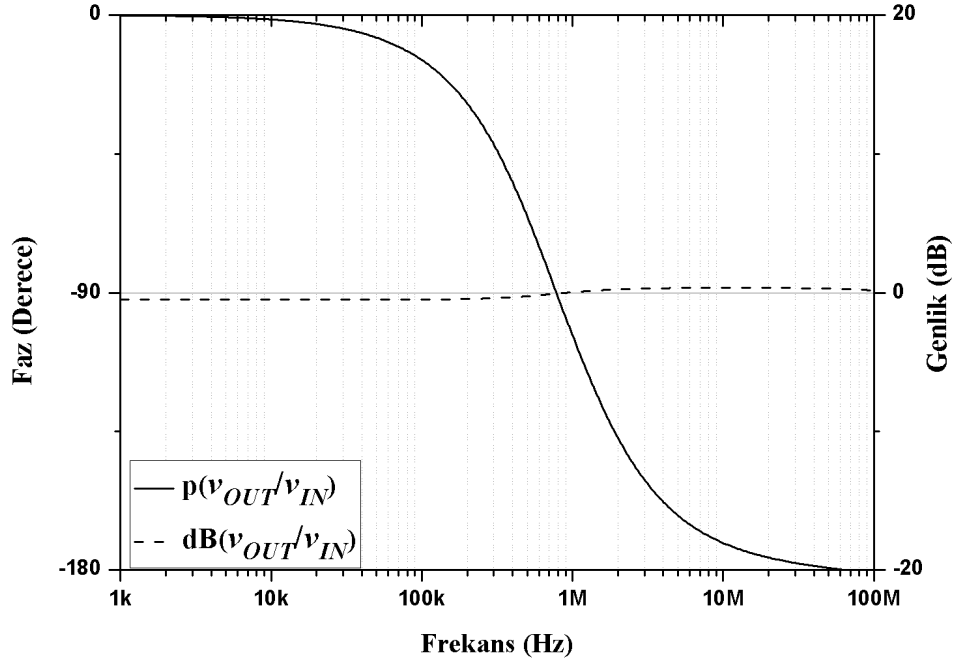
Tablo 4.2: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistörlerin boyutları

Transistör No	W/L [μm]	Transistör No	W/L [μm]
M_1, M_4, M_7, M_8, M_9	7/.7	$M_2, M_5, M_6, M_{10}, M_{11}$	21/.7
M_{12}, M_{13}	7/.7	M_3	42/.7

Karekök ortamda tasarlanan birinci dereceden tüm geçiren filtre devresi kesim frekansında çalıştırılarak zaman ortamında ve frekans ortamında davranışı incelenmiştir. Elde edilen PSpice benzetim sonuçlarına göre devrenin zaman ortamı cevabı Şekil 4.2’de görüldüğü gibidir. Yine aynı koşullarda ve 1kHz ile 100MHz frekans aralığında devrenin frekans ortamı cevabı ise genlik ve faz değişimi olarak Şekil 4.3’de verildiği gibidir.



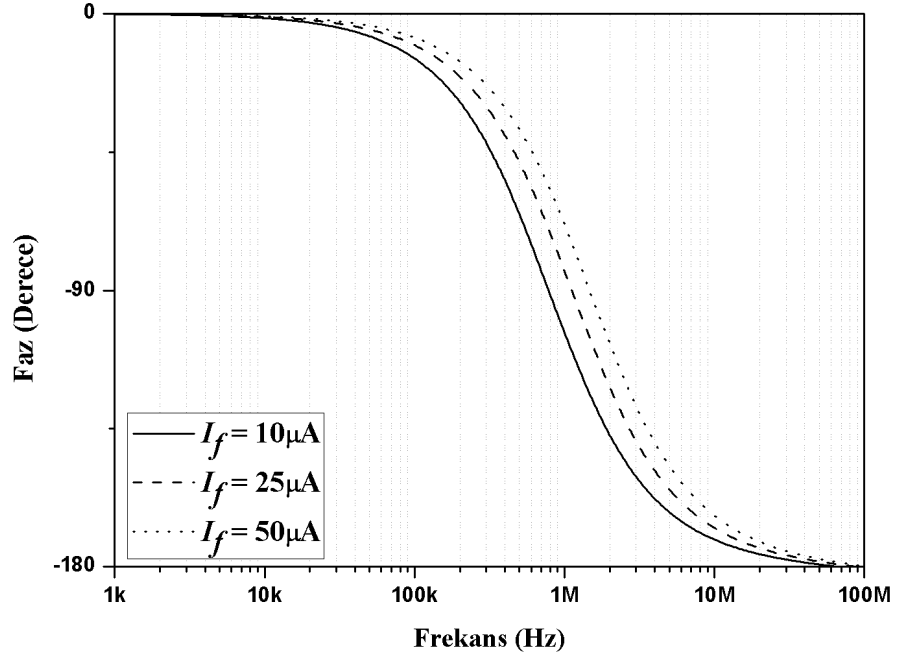
Şekil 4.2: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi zaman ortamı cevabı



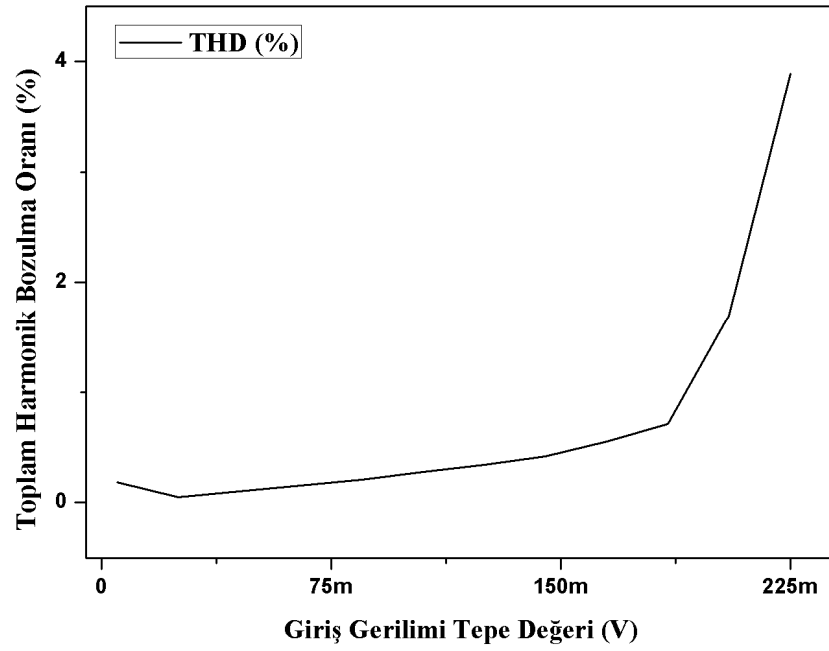
Şekil 4.3: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi frekans ortamı cevabı

Tasarlanan karekök ortam filtresinin kesim frekansı devredeki akım kaynağı değerleri ile ayarlanabilir özelliğindedir. Bu özelliğin gösterilebilmesi amacıyla devrede kullanılan akım kaynaklarının değerleri (I_f) $10\mu\text{A}$, $25\mu\text{A}$ ve $50\mu\text{A}$ olarak değiştirilmiştir. Akım kaynaklarının değerindeki değişime bağlı olarak devreden elde edilen faz cevabı Şekil 4.4’de görüldüğü gibidir.

Analog elektronik devre teknolojisinde tasarlanan devrelerin performans değerlendirmeleri yapılırken bakılması gereken diğer bir parametre ise çıkıştan elde edilen işaretin bozulma ve gürültü oranlarıdır. Bu kapsamda tasarlanan birinci dereceden karekök ortam filtresinin giriş işareti tepe değeri 5mV ile 225mV arasında değiştirilerek ve devredeki tüm DC akım kaynaklarının (I_f) değerleri $10\mu\text{A}$ alınarak PSpice programında bozulma analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen toplam harmonik bozulma oranı Şekil 4.5’te verilmiştir. Ayrıca, gürültü analizi sonucunda devrenin çıkışından elde edilen çıkış işareti gürültüsü alçak geçiren karakteristikte olup iletim bandında $164\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ değerindedir. Aynı devrenin PSpice benzetimi ile belirlenen toplam güç tüketimi değeri 2.52 mW ’tır.



Şekil 4.4: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi ayarlanabilir faz cevabı



Şekil 4.5: Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi çıkışından elde edilen toplam harmonik bozulma oranı

4.2 İkinci Dereceden Tüm Geçiren Karekök Ortam Filtresi Tasarımı

A sınıfı karekök ortam filtrelerinin uygulamalarını içeren bu bölümde ikinci bir örnek uygulama olarak ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi tasarımı yapılmıştır. İkinci dereceden tüm geçiren filtre transfer fonksiyonu kullanılarak ve Bölüm 3'te geliştirilen yöntem kullanılarak tasarlanan karekök ortam filtre devresi tasarımı ve ayrıntılı PSpice benzetim programı analizleri tezin bu kısmında sunulmuştur.

İkinci dereceden tüm geçiren filtre devresine ait genel transfer fonksiyonu Denklem (4.9)'da verilmiştir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{s^2 - s(\omega_0/Q) + \omega_0^2}{s^2 + s(\omega_0/Q) + \omega_0^2} \quad (4.9)$$

Verilen transfer fonksiyonuna *Companion-III* tekniği uygulanarak Denklem (4.10)'da verilen sistem denklemleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & -\frac{\omega_0}{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2\omega_0}{Q} \\ \frac{2\omega_0}{Q^2} \end{bmatrix} u$$
$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.10)$$

Tez kapsamında genelleştirmesi yapılan A sınıfı yapıda karekök ortam filtre tasarımına göre Bölüm 3'te Denklem (3.11) ve (3.12)'de belirtilen işlemler Denklem (4.10)'daki sistem denklemlerine uygulandığında elde edilen yeni sistem denklemleri Denklem (4.11)'deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & -\frac{\omega_0}{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2\omega_0}{Q} \\ \frac{2\omega_0}{Q^2} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{2-Q}{Q} \omega_0 \\ \frac{Q^2+Q-2}{Q^2} \omega_0 \end{bmatrix} u_2$$
$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'de elde edilen sistem denklemlerinde her bir giriş, çıkış ve durum değişkeni ifadesine yine karekök ortam filtre devresi tasarımına uygun olacak şekilde Denklem (4.12)'de verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanırsa elde edilen devre denklemleri Denklem (4.13)'deki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
 x_1 = v_1 &= \sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} \\
 x_2 = v_2 &= \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + V_{TH} \\
 v_U &= \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \\
 v_{U_2} &= \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_1 &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{2}{Q} \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{2-Q}{Q} \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
 \dot{v}_2 &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{1}{Q} \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
 &\quad + \frac{2}{Q^2} \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{Q^2 + Q - 2}{Q^2} \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
 y &= v_1 + v_U
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Denklem (4.13)'de verildiği gibi elde edilen devre denklemlerinin her iki tarafı C katsayısı ile çarpılır ve Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'de belirtilen kabullenmeler yapılırsa elde edilen devre denklemlerinin son şekli Denklem (4.16)'da verildiği gibidir.

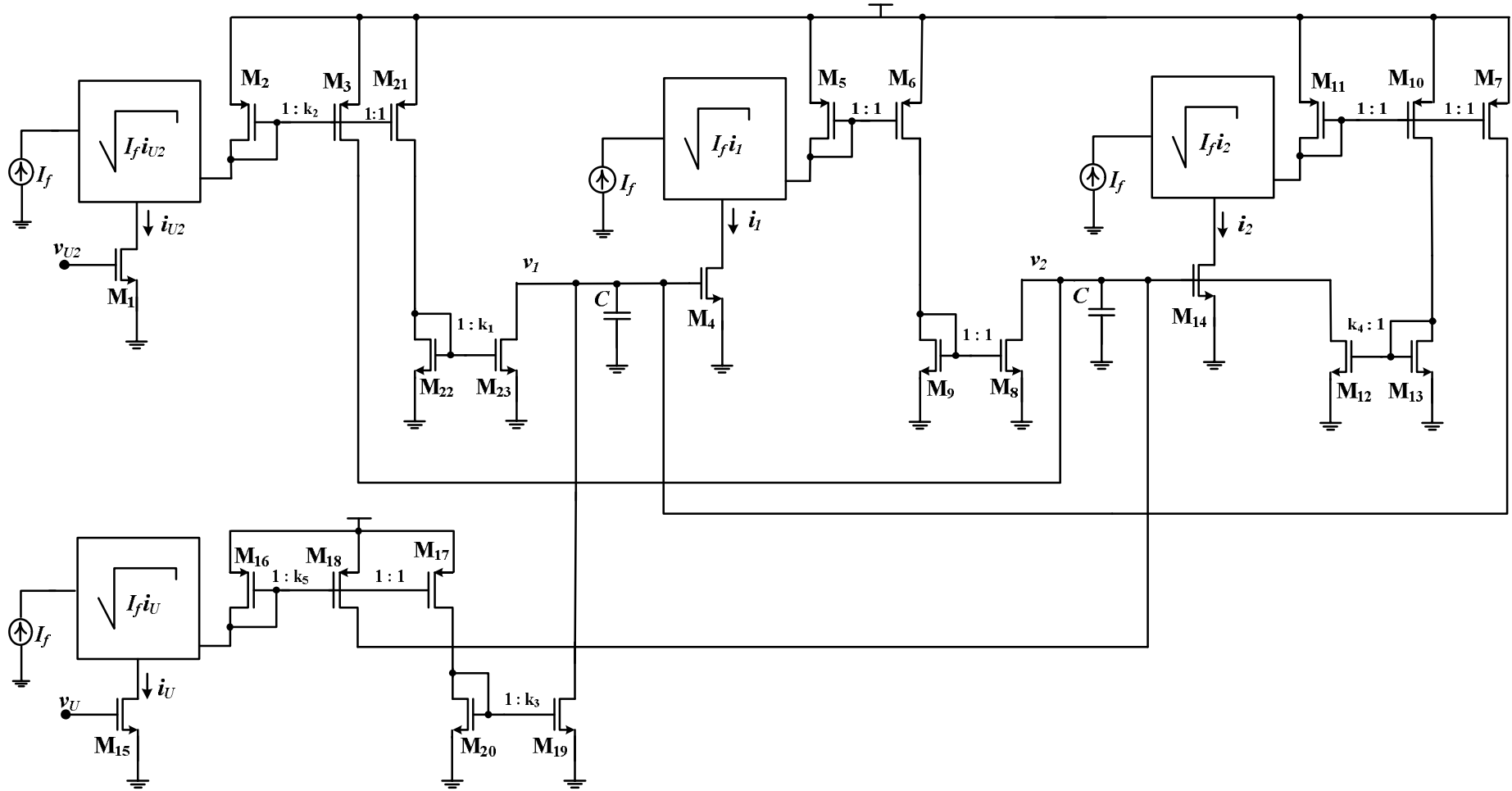
$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta} \tag{4.14}$$

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{2-Q}{Q} \\
k_2 &= \frac{Q^2+Q-2}{Q^2} \\
k_3 &= \frac{2}{Q} \\
k_4 &= \frac{1}{Q} \\
k_5 &= \frac{2}{Q^2}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

$$\begin{aligned}
C_1 \dot{v}_1 &= \sqrt{I_f i_2} - k_3 \sqrt{I_f i_U} + k_1 \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
C_2 \dot{v}_2 &= -\sqrt{I_f i_1} - k_4 \sqrt{I_f i_2} + k_5 \sqrt{I_f i_U} + k_2 \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
y &= v_1 + v_U
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Elde edilen devre denklemlerinde her bir akım aynasının akım kopyalama katsayıları ise ayrıntılı olarak Denklem (4.15)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

Devre denklemleri Denklem (4.16)'da görüldüğü gibi elde edildikten sonra tasarlanmak istenen karekök ortam filtre devresi kondansatör, akım aynası, akım modlu karekök alma blokları ve akım kaynağı elemanları kullanılarak Şekil 4.6'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Devrede kullanılan I_f akım kaynaklarının değerleri birbirine eşit ve Denklem (4.14)'de verildiği gibidir. Bu durumda devrelerde kullanılan her bir kondansatör değeri de eşit olarak seçilmelidir.



Şekil 4.6: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi

4.2.1 İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresinin PSpice analizi

İkinci dereceden tüm geçiren filtre transfer fonksiyonundan yola çıkılarak ve Bölüm 3'te genelleştirilmiş A sınıfı devre tasarım yöntemi kullanılarak elde edilen tüm geçiren karekök ortam filtre devresi giriş ve çıkış işaretleri gerilim olacak şekilde Şekil 4.6'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Bu aşamada tasarlanan bu devrenin performansını incelemek için diğer tasarlanan devre yapılarında olduğu gibi PSpice benzetim programı kullanılmıştır.

Şekil 4.6'da elde edilen devre yapısında görüldüğü gibi her bir akım aynasında kullanılan transistörlerin boyutları tasarlanan devrenin Q kalite faktörüne bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı devrenin benzetiminin yapılabilmesi için öncelikle ikinci dereceden tüm geçiren filtrenin Q kalite faktörünün belirlenmesi gerekmektedir. Tezin bu kısmında yapılan ikinci dereceden tüm geçiren filtre devresi ayrıntılı analizlerinin hepsinde kalite faktörü ($Q=5$) olarak seçilmiştir.

Devrenin PSpice benzetimi için kullanılan tüm transistörler TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Devrenin tasarımı yapılırken karekök alma bloklarında kullanılan tüm transistörlerin boyutları Tablo 4.3'de verildiği gibi seçilmiştir. Ayrıca devrede kullanılan akım aynaları ve karekök alma bloklarından akım çeken diğer NMOS ve PMOS transistörlerin boyutları $Q=5$ için ayrıntılı olarak Tablo 4.4'de verildiği gibidir.

Tasarlanan filtre devresinin besleme gerilimi 2.7V olarak uygulanmıştır. İkinci dereceden A sınıfı yapıda tasarlanan devrede ayrıca iki adet kondansatör elemanı kullanılmaktadır. Devrede kullanılan transistörler birbirine eş olarak ve 15pF değerinde seçilmiştir. Bunun yanında devrenin tümünde kullanılan I_f akım kaynakları 50 μ A değerinde olup giriş işareti 0.75V DC gerilim üzerinde eklenmiş 50mV AC gerilim değerinden oluşmaktadır. Devrenin analizi yapılırken kullanılan kondansatör ve akım kaynağı değerlerine göre elde edilen kesim frekansı değeri $f_{\theta}=1.69$ MHz olarak elde edilmektedir. Son olarak A sınıfı devre yapısında tasarlanan devrede kullanılan harici DC giriş işaretinin değeri de 1V DC olarak seçilmiştir.

Tablo 4.3: Şekil 2.6’da devre şekli verilen karekök alma blokları içerisinde kullanılan transistörlerin boyutları

Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₃ ’, M ₄ ’, M ₈ ’, M ₁₀ ’, M ₁₅ ’, M ₁₆ ’	6/.7	M ₁ ’, M ₂ ’, M ₅ ’, M ₆ ’, M ₇ ’, M ₉ ’	20/.7
M ₁₃ ’, M ₁₄ ’	3/.7	M ₁₁ ’, M ₁₂ ’	40/.7

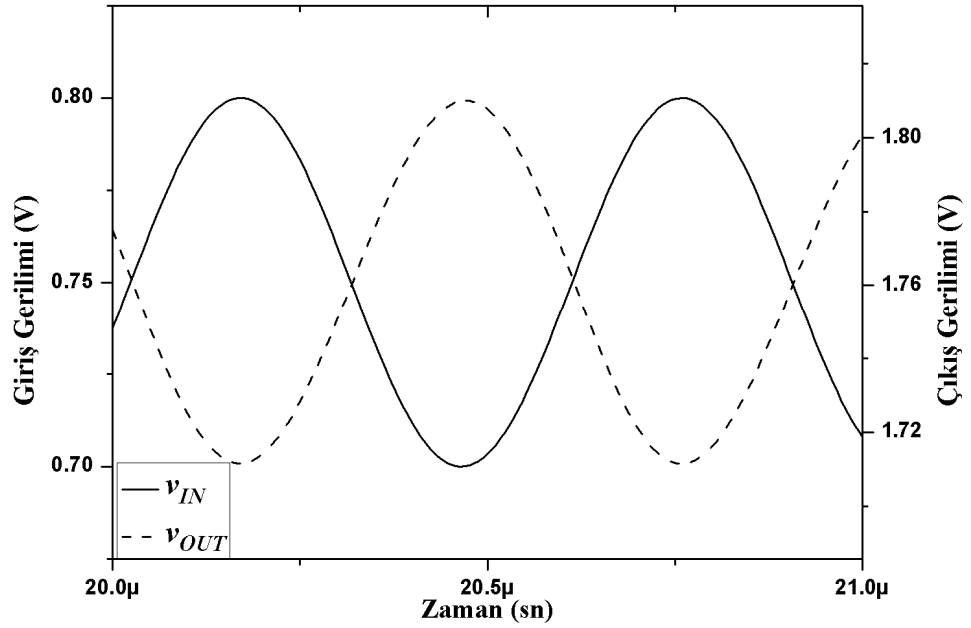
Tablo 4.4: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistörlerin boyutları

Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₁ , M ₄ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₂₀ , M ₂₂	6/.7	M ₂ , M ₅ , M ₆ , M ₇ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₂₁	20/.7
M ₁₂	1.2/.7	M ₃	22.4/.7
M ₁₈	2.8/.7	M ₁₆ , M ₁₇	36/.7
M ₁₉	2.4/.7	M ₂₃	3.6/.7

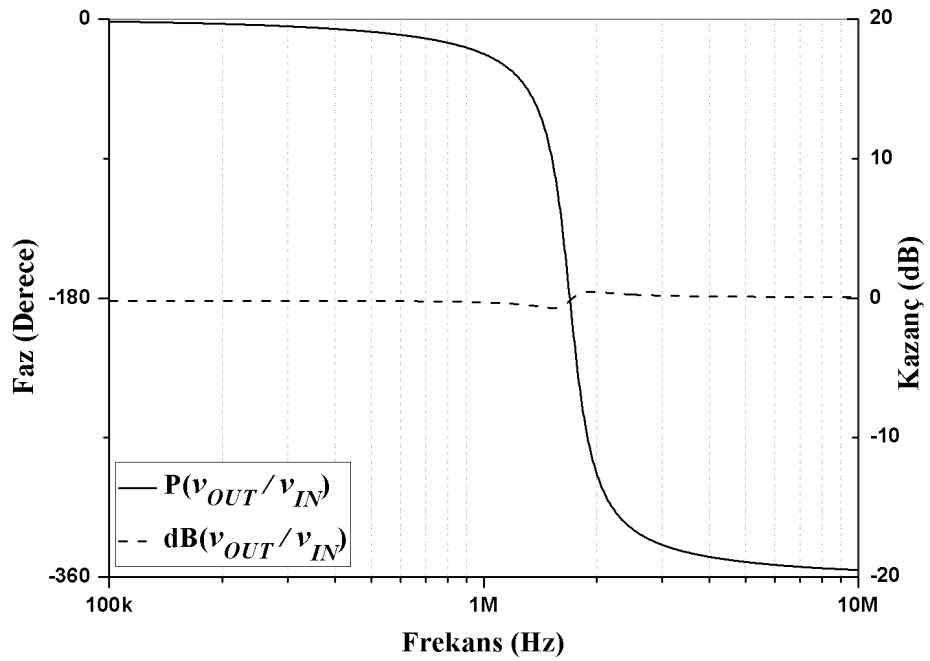
Tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi kesim frekansında çalıştırıldığında PSpice benzetim programından elde edilen zaman ortamı cevabına göre devrenin giriş ve çıkış bilgileri Şekil 4.7’de görülmektedir. Aynı koşullarda ve 100kHz ile 10MHz frekans aralığında devrenin genlik ve faz değişimi olarak elde edilen frekans ortamı cevabı ise Şekil 4.8’de verilmiştir.

Bölüm 3’te ayrıntılı olarak verilen devre sentez basamakları izlenerek bir filtre devresi tasarımı yapıldığında elde edilen devre Denklem (3.16)’daki kabullenmeden dolayı kesim frekansı devredeki DC akım kaynaklarının değeri ile ayarlanabilir özelliktedir. Bu kapsamda tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren filtre devresi de kesim frekansı ayarlanabilir özelliktedir. Bunun için devredeki mevcut DC akım kaynaklarının değerleri (I_f) değiştirildikçe devrenin kesim frekansının da değiştiği gözlenmektedir. Devrenin bu özelliğini göstermek için devredeki I_f akım kaynaklarının değerleri 15µA ile 150µA arasında değiştirilmiştir ve devrenin faz

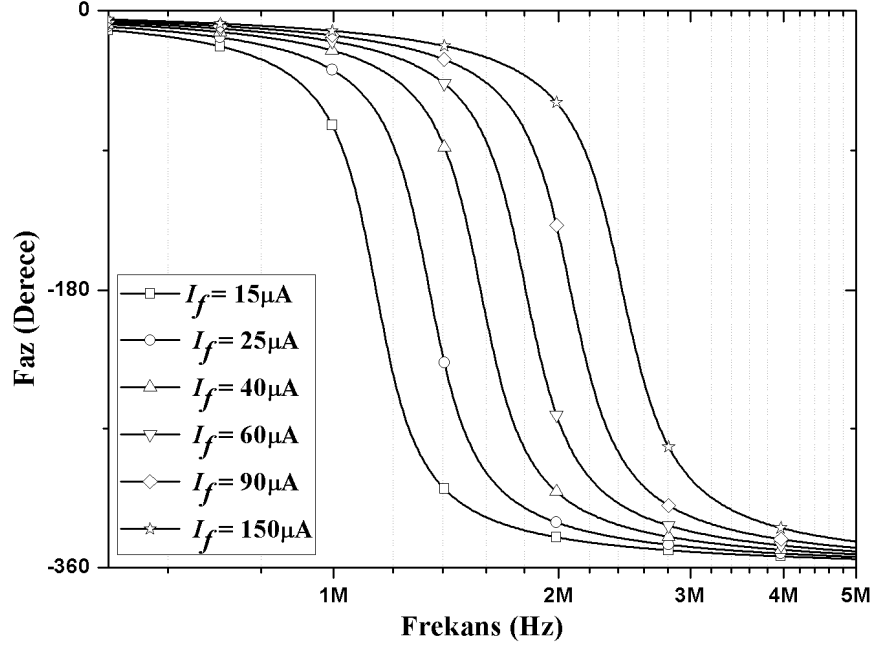
cevabı üzerinden kesim frekansındaki değişiklikler gözlenmiştir. Elde edilen frekans ortamı cevabı Şekil 4.9’da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.7: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi zaman ortamı cevabı

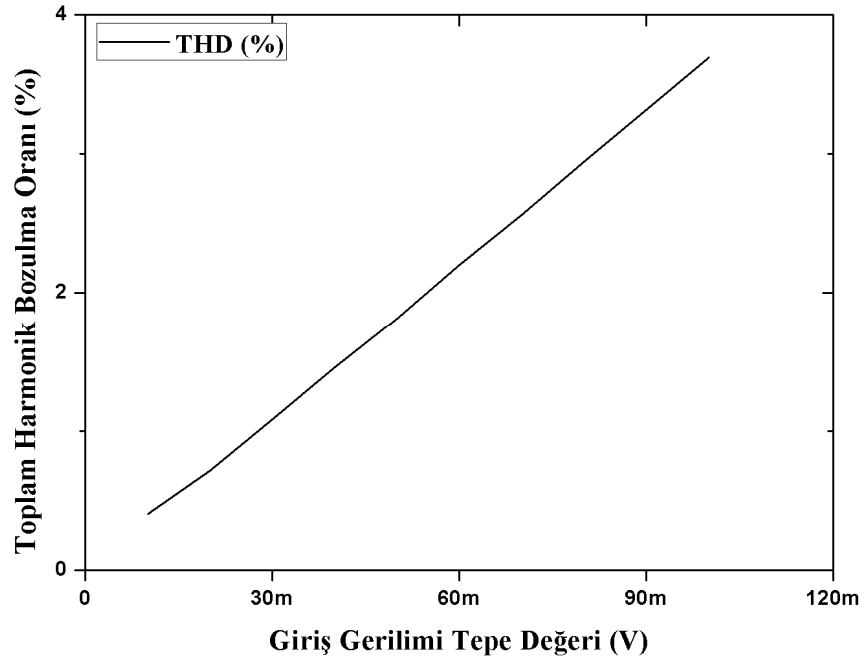


Şekil 4.8: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi frekans ortamı cevabı

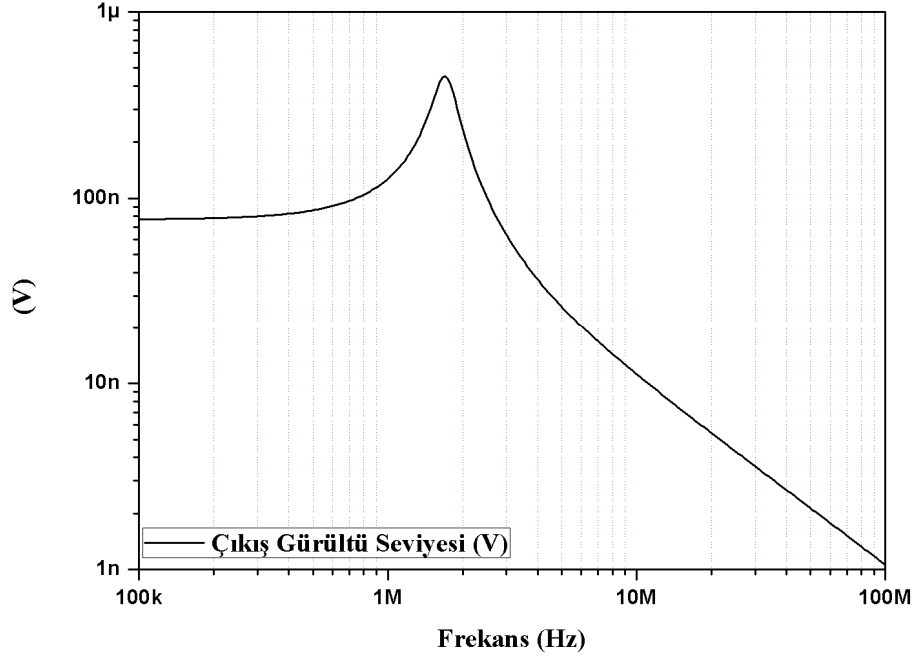


Şekil 4.9: Tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde farklı I_f değerleri için elde edilen faz cevabı

A sınıfı devre yapısında tasarlanan ikinci dereceden karekök ortam filtresinin PSpice programında benzetimleri yapılırken çıkış işaretindeki bozulma oranı ve gürültü seviyeleri ile ilgili analizler de yapılmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen toplam harmonik bozulma oranı ve çıkış işareti gürültü seviyesi sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verildiği gibidir.

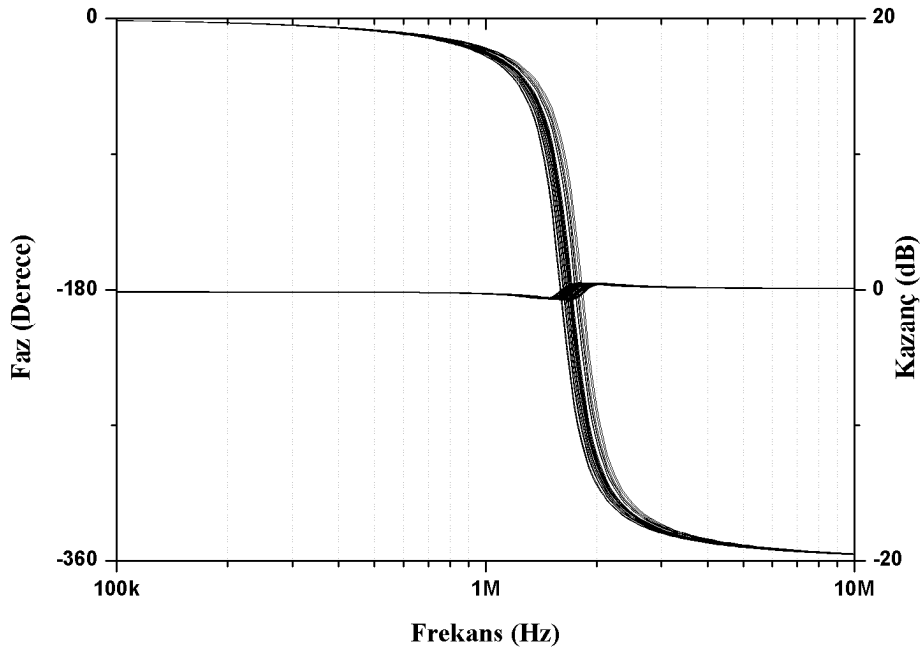


Şekil 4.10: Çıkış işaretindeki toplam harmonik bozulma oranı



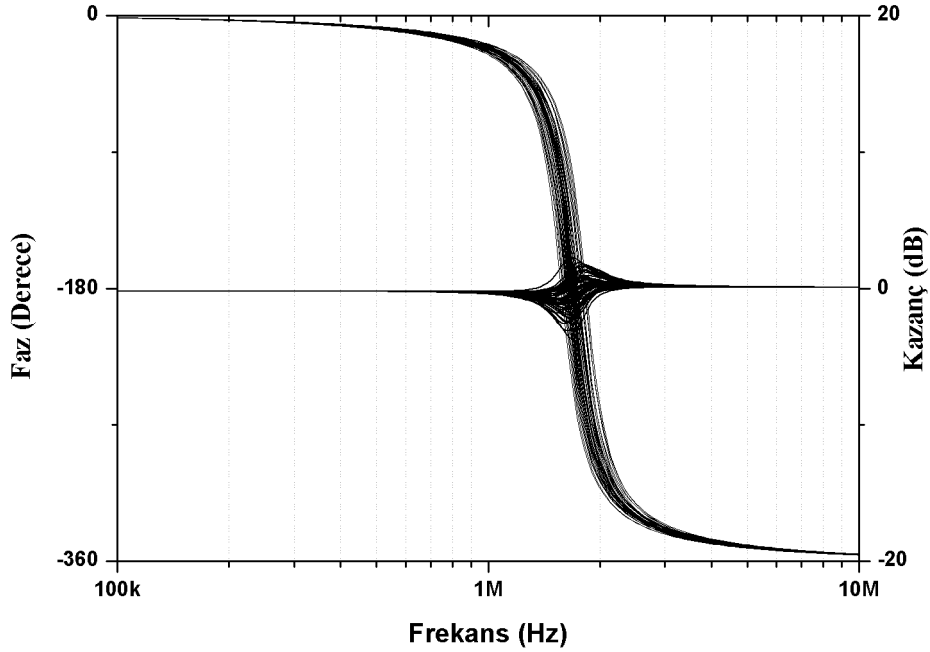
Şekil 4.11: Çıkış işareti gürültü seviyesi

Tasarlanan ikinci dereceden karekök ortam filtresine (Şekil 4.6) ait bazı parametreler üzerinde istatistiksel analiz yapılmıştır. İlk olarak devredeki tüm akım kaynaklarının değerleri %10 oranında değiştirilmiş, bu durumda 50 örnek alınarak devrenin Monte-Carlo analizi yapılmıştır. Elde edilen genlik ve faz cevabı grafikleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: I_f akımlarının %10 Gaussian değişimi sonucu elde edilen genlik ve faz cevabı

Aynı devrede daha sonra pasif elemanlar olan kondansatörlerinin değeri (C) %5 oranında değiştirilmiştir. Bu durumda PSpice benzetim programında 50 örnek alınarak yapılan Monte-Carlo analizi sonucunda devrenin çıkışından elde edilen genlik ve faz cevabı grafikleri Şekil 4.13'te verilmiştir.

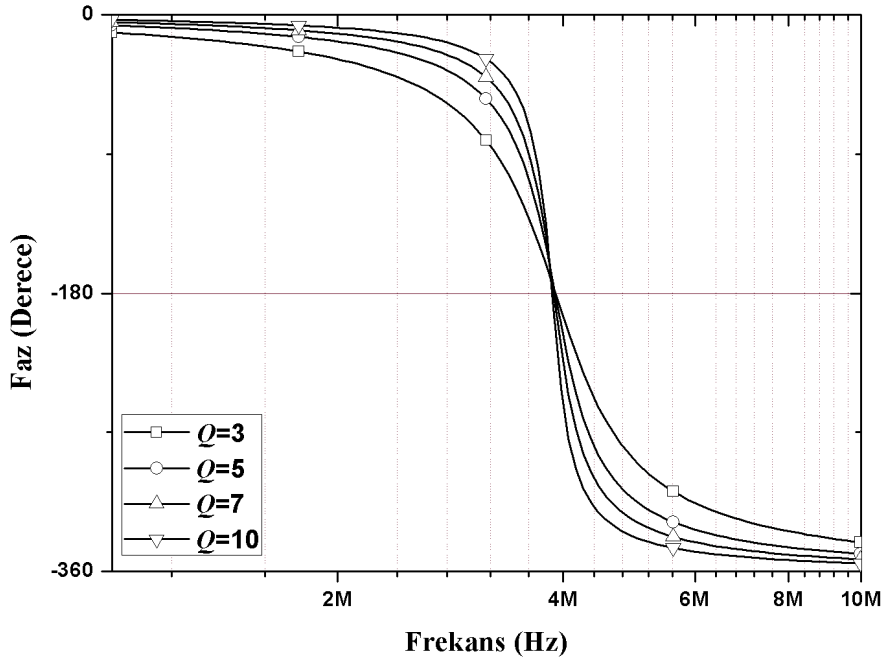


Şekil 4.13: Kondansatör değerlerinin %5 Gaussian değişimi sonucu elde edilen genlik ve faz cevabı

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi tasarlanan ikinci dereceden karekök ortam filtre devresinin farklı kalite faktörü değerlerinde çalıştırılması Denklem (4.15)'de görüldüğü gibi devredeki bazı akım aynalarının akım kopyalama katsayılarına bağlıdır. Yani tasarlanan devrenin farklı kalite faktörü değerlerinde çalıştırılabilmesi devredeki bazı transistörlerin boyutlarının uygun şekilde ayarlanması ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla yapılan PSpice benzetimlerinde devredeki bazı transistörlerin boyutları Tablo 4.5'de verildiği gibi değiştirilerek filtre devresinin kalite faktörü (Q) 3 ile 10 değerleri arasında değiştirilmiştir. Kesim frekansı 3.9MHz olarak ayarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresi üzerindeki bazı transistörlerin boyutları Tablo 4.5'de verildiği gibi değiştirilirse devrelerin çıkışından elde edilen faz cevabı grafiği Şekil 4.14'te verildiği gibi olmaktadır.

Tablo 4.5: Farklı kalite faktörü değerleri için Şekil 4.6’da verilen devredeki bazı MOS transistörlerin boyutları

Transistor No	Kalite Faktörü			
	$Q=3$	$Q=5$	$Q=7$	$Q=10$
	W/L [μm]	W/L [μm]	W/L [μm]	W/L [μm]
M_3	22.2/.7	22.4/.7	22/.7	21.6/.7
M_{12}	2/.7	1.2/.7	1.7/.7	1.2/.7
M_{13}	6/.7	6/.7	12/.7	12/.7
M_{16}	36/.7	36/.7	36/.7	70/.7
M_{17}	36/.7	36/.7	36/.7	70/.7
M_{18}	8/.7	2.9/.7	1.5/.7	1.4/.7
M_{19}	4/.7	2.4/.7	1.7/.7	1.2/.7
M_{23}	2/.7	3.6/.7	4.3/.7	4.8/.7



Şekil 4.14: İkinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi farklı kalite faktörü (Q) değerleri için frekans ortamı cevabı

4.3 Beşinci Dereceden Alçak Geçiren Butterworth Filtresinin Karekök Ortamda Tasarımı

Tez kapsamında geliştirilen karekök ortam filtresi sentez yönteminin yüksek dereceden bir uygulaması olarak beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi tasarımı sunulmuştur. Bu kısımda sunulan beşinci dereceden filtre devreleri Butterworth yaklaşımı kullanılarak elde edilen alçak geçiren transfer fonksiyonundan yola çıkılarak tasarlanmıştır. Geliştirilen sentez yönteminin doğrudan beşinci dereceden transfer fonksiyonuna uygulanması sonucu elde edilen filtre devresi ve analizleri ilerleyen sayfalarda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Aynı transfer fonksiyonu kaskat bağlantı yöntemi ile tasarım yapabilmek için uygun şekilde üç ayrı transfer fonksiyonuna ayrılarak, bir adet birinci dereceden ve iki adet ikinci dereceden alçak geçiren filtre karakteristiğinde transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen her bir transfer fonksiyonu için önerilen sentez yöntemi kullanılarak ayrı ayrı karekök ortam filtre devreleri tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devreler kullanılarak beşinci dereceden kaskat bağlı bir karekök ortam filtresi elde edilmiştir.

4.3.1 Beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinin doğrudan tasarımı

Beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinin tasarımını doğrudan yapmak için ilk olarak transfer fonksiyonunu kesim frekansı cinsinden elde etmek gerekmektedir. Bu şekilde elde edilen transfer fonksiyonundan *Companion-III* yöntemi ile sistem denklemleri elde edilebilmektedir. Elde edilen sistem denklemleri kullanılarak yalnızca karekök alma blokları ile devre tasarımı yapılırken karşılaşılan bazı güçlükler geliştirilen teoremin sistem denklemlerinde yapılmasını önerdiği uygunlaştırma işlemi ile aşılabilmektedir. Bu şekilde elde edilen yeni sistem denklemleri ve sonrasında devre denklemleri kullanılarak devre tasarımı kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

Butterworth yaklaşımı kullanılarak beşinci dereceden alçak geçiren bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu Denklem (4.17)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_0^5}{s^5 + 3.24\omega_0 s^4 + 5.24\omega_0^2 s^3 + 5.24\omega_0^3 s^2 + 3.24\omega_0^4 s + \omega_0^5} \quad (4.17)$$

Denklem (4.17)'de verilen transfer fonksiyonuna *Companion-III* tekniği uygulanırsa elde edilen sistem denklemleri Denklem (4.18)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 \\ \dot{x}_2 &= \omega_0 x_3 \\ \dot{x}_3 &= \omega_0 x_4 \\ \dot{x}_4 &= \omega_0 x_5 \\ \dot{x}_5 &= -3.24\omega_0 x_5 - 5.24\omega_0 x_4 - 5.24\omega_0 x_3 - 3.24\omega_0 x_2 - \omega_0 x_1 + \omega_0 u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (4.18)$$

Denklem (4.18) ayrıntılı olarak incelendiğinde x_1, x_2, x_3, x_4 durum değişkenlerinin türevlerini içeren eşitliklerine bakıldığında bu denklemlerde DC denge şartlarının sağlamadığı görülmektedir. Ayrıca tüm durum değişkeninin tanımlandığı ifadelerde karekök ortam filtre tasarımına uygun olacak şekilde eşleştirme fonksiyonu uygulandığında denklemlerde karekök ilişkisinin dışında ilave olarak V_{TH} gerilimi cinsinden bir sabit terimin de ortaya çıkacağı açıkça görülmektedir.

Bu aşamada hem bazı düğüm noktalarındaki DC denge koşullarının sağlanması hem de sistem denklemlerinden devre denklemlerine geçildiğinde tüm denklem sisteminin karekök ifadeler cinsinden elde edilebilmesi amacıyla Bölüm 3'te genelleştirilmiş olan yöntem Denklem (4.18)'de verilen denklemlere uygulanmalıdır. Bu şekilde sistem denklemlerinin son hali Denklem (4.19)'da verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 - \omega_0 u_2 \\ \dot{x}_2 &= \omega_0 x_3 - \omega_0 u_2 \\ \dot{x}_3 &= \omega_0 x_4 - \omega_0 u_2 \\ \dot{x}_4 &= \omega_0 x_5 - \omega_0 u_2 \\ \dot{x}_5 &= -3.24\omega_0 x_5 - 5.24\omega_0 x_4 - 5.24\omega_0 x_3 - 3.24\omega_0 x_2 - \omega_0 x_1 + \omega_0 u + 16.96\omega_0 u_2 \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (4.19)$$

İstenen filtre devresinin karekök ortam filtresi olarak elde edilebilmesi için tasarıma uygun hale getirilen sistem denklemlerine Denklem (4.20)'de verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanmalıdır.

$$\begin{aligned}
x_1 = v_1 &= \sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} ; x_2 = v_2 = \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + V_{TH} ; \dots ; x_5 = v_5 = \sqrt{\frac{i_5}{\beta}} + V_{TH} \\
u = v_U &= \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} ; u_2 = v_{U_2} = \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH}
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Denklem (4.20)'de verilen fonksiyonların Denklem (4.19)'daki denklem sistemine uygulanması ile elde edilen denklem sistemi Denklem (4.21)'de gösterilmiştir.

Tezin bu kısmında durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak karekök ortam filtre devresi tasarımı yapılırken sistem denklemlerinden devre denklemlerini elde etmeden önce denklemlere harici bir u_2 girişi ekleyerek denklemler üzerinde bazı uygun hale getirme işlemleri de gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler yapıldıktan sonra Denklem (4.19) ve (4.22)'de görüldüğü gibi sistem denklemleri ve devre denklemleri hem DC denge koşullarını sağlar duruma gelmiş; hem de devre denklemlerindeki tüm ifadeler karekök blokları kullanılarak gerçekleştirilebilir şekilde elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_1 &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + V_{TH} \right) - \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_2 &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_3}{\beta}} + V_{TH} \right) - \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_3 &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_4}{\beta}} + V_{TH} \right) - \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_4 &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_5}{\beta}} + V_{TH} \right) - \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_5 &= -3.24\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_5}{\beta}} + V_{TH} \right) - 5.24\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_4}{\beta}} + V_{TH} \right) - 5.24\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_3}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad - 3.24\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + V_{TH} \right) - \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} \right) + \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad + 16.96\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right)
\end{aligned} \tag{4.21}$$

$$y = v_1$$

Son olarak devre denklemlerinin istenen yapıda elde edilebilmesi için Denklem (4.22)'deki denklem sistemi üzerinde bazı düzenlemeler yapılması

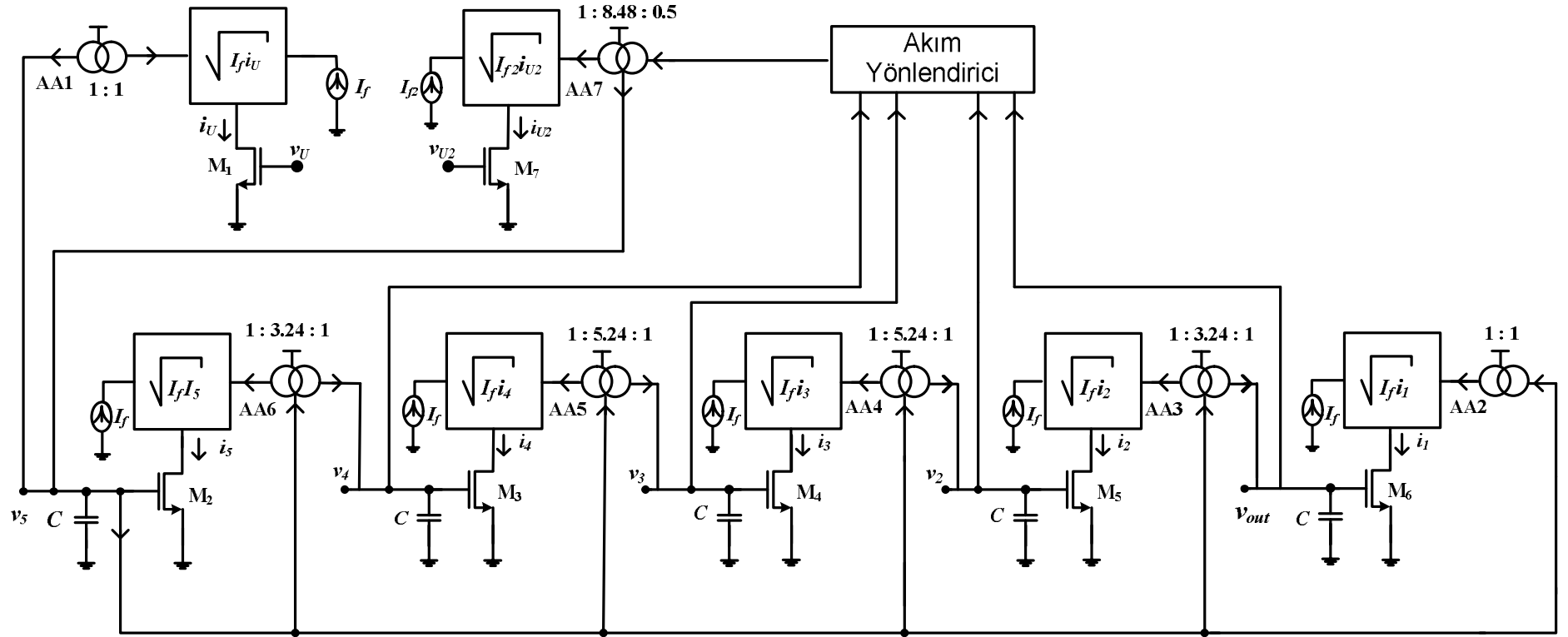
gerekmektedir. Bu aşamada denklem sisteminde eşitliklerin her iki tarafı C katsayısı ile çarpılır ve Denklem (4.23)'te verilen kabullenmeler yapılırsa; beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresine ait devre denklemlerinin son hali Denklem (4.24)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_1 &= \omega_0 \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} - \omega_0 \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
\dot{v}_2 &= \omega_0 \sqrt{\frac{i_3}{\beta}} - \omega_0 \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
\dot{v}_3 &= \omega_0 \sqrt{\frac{i_4}{\beta}} - \omega_0 \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
\dot{v}_4 &= \omega_0 \sqrt{\frac{i_5}{\beta}} - \omega_0 \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
\dot{v}_5 &= -3.24\omega_0 \sqrt{\frac{i_5}{\beta}} - 5.24\omega_0 \sqrt{\frac{i_4}{\beta}} - 5.24\omega_0 \sqrt{\frac{i_3}{\beta}} - 3.24\omega_0 \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} \\
&\quad - \omega_0 \sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + \omega_0 \sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + 16.96\omega_0 \sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} \\
y &= v_1
\end{aligned} \tag{4.22}$$

$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta}, \quad I_{f2} = \frac{4\omega_0^2 C^2}{\beta} \tag{4.23}$$

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_1 &= \sqrt{I_f i_2} - \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
C\dot{v}_2 &= \sqrt{I_f i_3} - \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
C\dot{v}_3 &= \sqrt{I_f i_4} - \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
C\dot{v}_4 &= \sqrt{I_f i_5} - \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
C\dot{v}_5 &= -3.24\sqrt{I_f i_5} - 5.24\sqrt{I_f i_4} - 5.24\sqrt{I_f i_3} - 3.24\sqrt{I_f i_2} \\
&\quad - \sqrt{I_f i_1} + \sqrt{I_f i_U} + 8.48\sqrt{I_{f2} i_{U_2}} \\
y &= v_1
\end{aligned} \tag{4.24}$$

Denklem (4.24)'de verilen devre denklemlerine göre karekök alma bloğu, karekök alma bloklarını besleyen DC akım kaynakları, akım aynası ve kondansatör elemanı kullanılarak tasarlanan beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi

4.3.2 Beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinin PSpice analizi

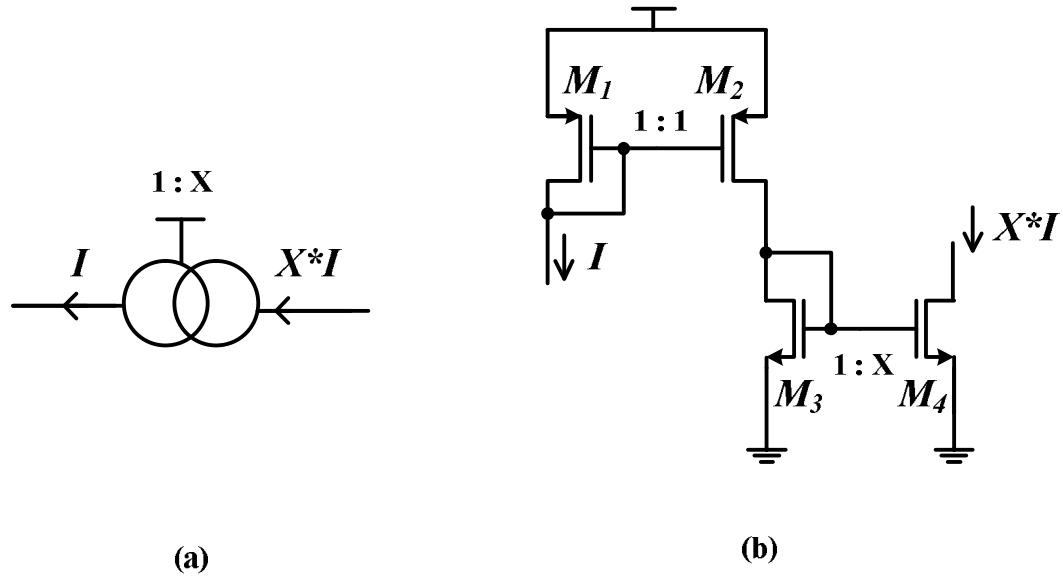
Tezin bu kısmında Şekil 4.15'deki gibi tasarlanan devrenin performansını incelemek için PSpice benzetim programı kullanılmıştır. Devrede kullanılan her bir karekök alma bloğu içyapısı Şekil 2.6'da verildiği gibidir. Devrenin karekök alma blokları çıkışında kullanılan akım aynaları ve akım yönlendirici yapılarına ait blok gösterimi ve MOS transistörler ile gerçekleştirilmiş eşdeğer devre şekilleri sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18' de ayrıntılı olarak verilmiştir.

PSpice programında gerçekleştirilen devrenin tasarımı yapılırken devredeki tüm MOS transistörler TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Devrede kullanılan NMOS ve PMOS transistörlerin boyutları Şekil 4.15'de görülen NMOS transistör numaraları ve her bir karekök alma bloğu için ise Şekil 2.6'da belirtilen transistör numaraları dikkate alınarak Tablo 4.6'da belirtilmiştir.

Tablo 4.6: Beşinci dereceden karekök ortam filtresi karekök alma blokları içerisinde ve çıkışlarında kullanılan transistör boyutları

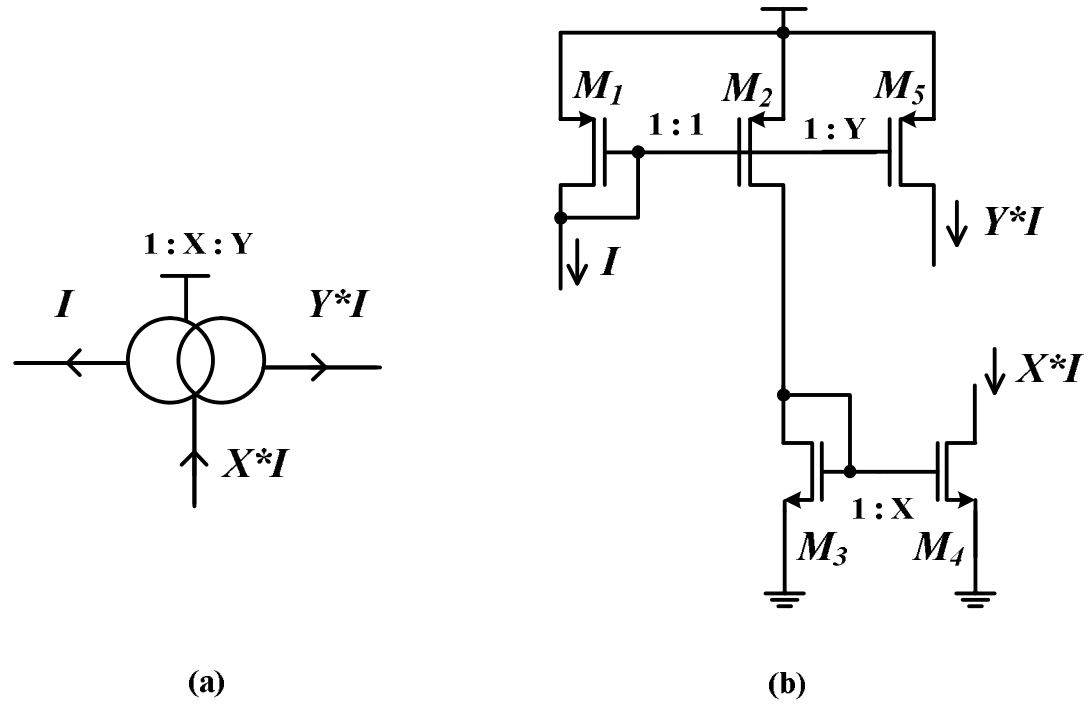
Transistör No	W/L [μ m]
M_1 - M_7 , M_1' - M_{10}' , M_{15}' , M_{16}'	6/.7
M_{11}' , M_{12}'	12/.7
M_{13}' , M_{14}'	3/.7

Tasarlanan beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresinde akım aynalarında kullanılan akım kopyalama katsayıları ile her bir akım aynasının Şekil 4.15'de belirtilen numaraları ve Şekil 4.17'de belirtilen transistör numaraları dikkate alınarak kullanılan transistörlerin boyutları Tablo 4.7'de belirlenmiştir. Devrenin besleme gerilimi 3V olarak belirlenmiştir. Devrenin akım yönlendirici bloğunda kullanılan transistör boyutları ise Tablo 4.8'de verildiği gibidir.



Şekil 4.16: Tasarlanan devrede kullanılan tek çıkışlı akım aynası modellerine ait

(a) Blok şeması (b) Devre şekli



Şekil 4.17: Tasarlanan devrede kullanılan çift çıkışlı akım aynası modellerine ait

(a) Blok şeması (b) Devre şekli

Tablo 4.7: Beşinci dereceden karekök ortam filtresinde akım aynalarında kullanılan transistör boyutları

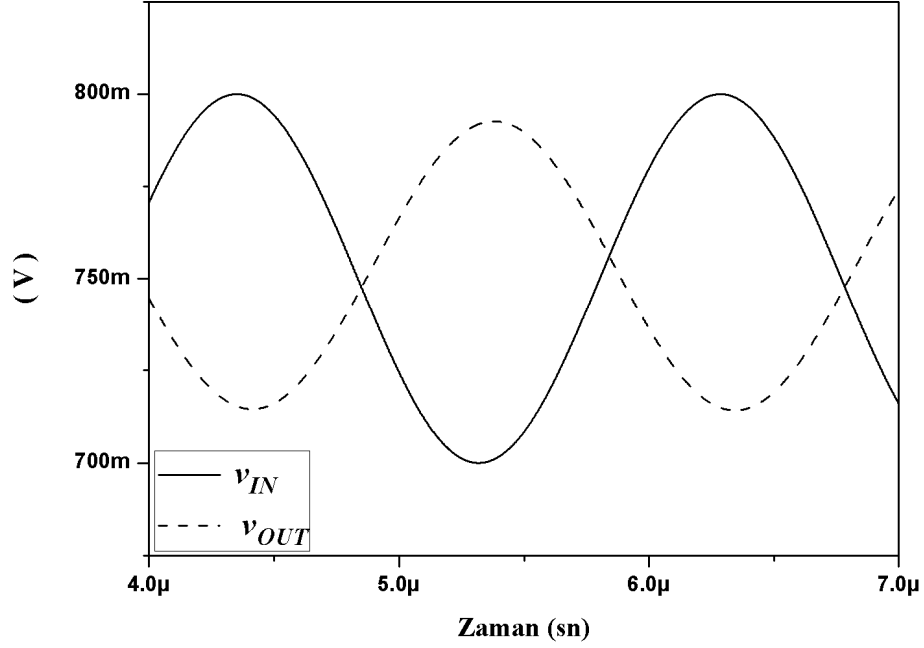
Akım Aynası	W/L				
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
1	6/.7	-	-	-	6/.7
2	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7	-
3	6/.7	6/.7	6/.7	19.44/.7	6/.7
4	6/.7	6/.7	6/.7	31.44/.7	6/.7
5	6/.7	6/.7	6/.7	31.44/.7	6/.7
6	6/.7	6/.7	6/.7	19/.7	6/.7
7	6/.7	-	-	-	50/.7

Tablo 4.8: Beşinci dereceden karekök ortam filtresi akım yönlendirici blok yapısında kullanılan transistör boyutları

Akım Yönlendirici						
Transistör	M ₂	M ₃	M ₄	M ₆	M ₇	M ₈
W/L						
[μm]	6/.7	6/.7	3/.7	3/.7	3/.7	3/.7

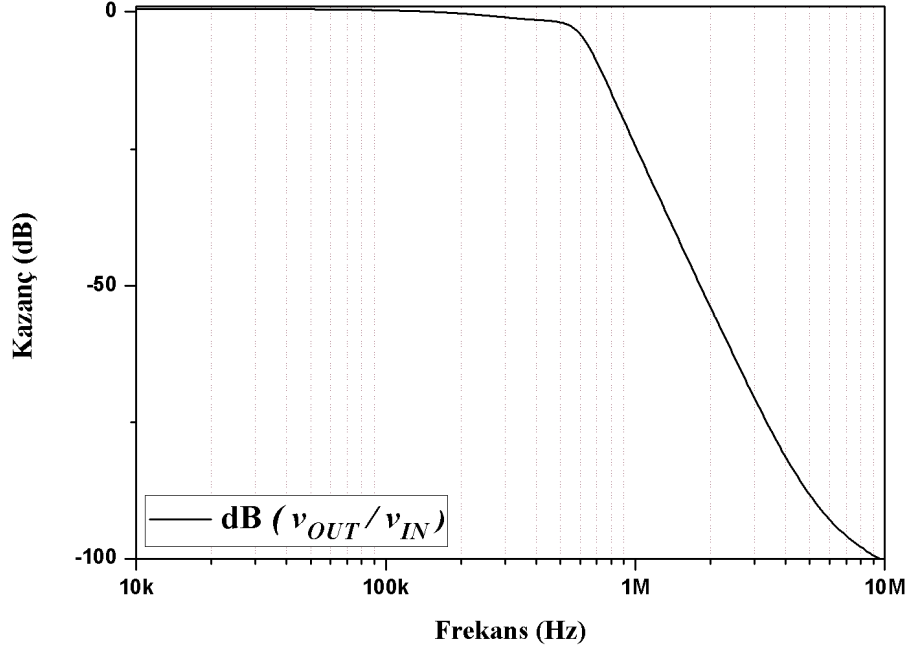
Tasarlanan devrede kullanılan her bir kondansatörün değeri birbirine eşit ve 50pF olarak seçilmiştir. I_f ve I_{f2} akım kaynaklarının değeri ise sırasıyla 30 μA ve 120 μA olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında tasarlanan beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresinin kesim frekansı 512kHz olarak elde edilmiştir. Devrede giriş işareti olarak 750mV DC üzerine eklenmiş 50mV tepe değeri olan bir sinüs işareti kullanılmıştır. A sınıfı yapıda tasarlanan devrede kullanılan harici DC giriş işaretinin (v_{U2}) değeri de 750mV olarak seçilmiştir

Tasarlanan beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi (Şekil 4.15) belirtilen koşullarda PSpice programı kullanılarak analiz edildiğinde giriş ve çıkış işaretlerine ait elde edilen zaman ortamı cevabı Şekil 4.19’da verildiği gibi elde edilmektedir. Devre kesim frekansında çalıştırıldığında elde edilen frekans ortamı genlik cevabı ve faz cevabı grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

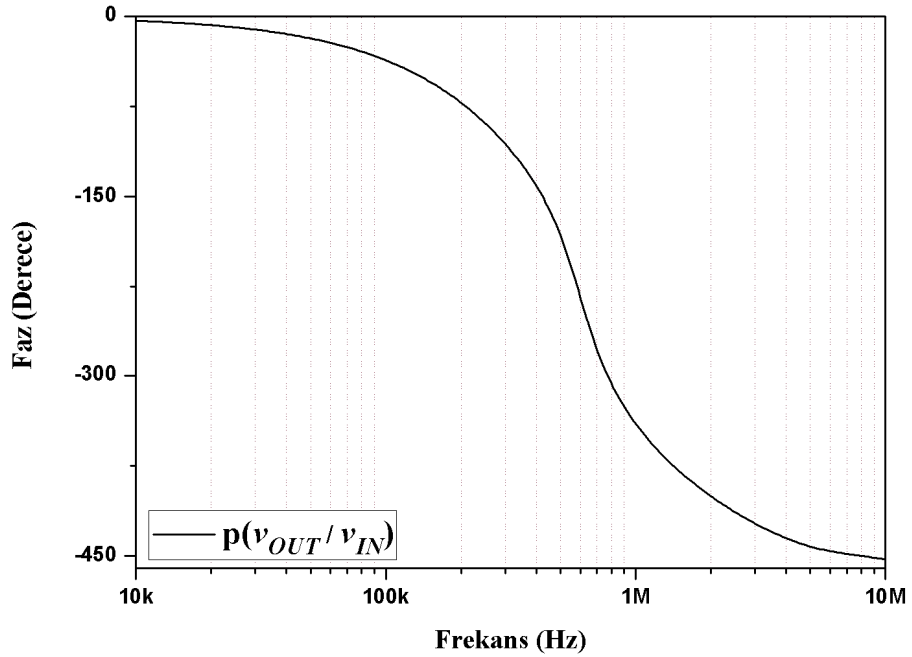


Şekil 4.19: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi zaman ortamı cevabı

Tasarlanan filtre devresinin kesim frekansı, devrede kullanılan I_f akım kaynağının değeri ile elektronik olarak ayarlanabilir özelliktedir. Devrenin bu özelliğini gösterebilmek için devredeki I_f akım kaynağı değeri $30\mu\text{A}$ ile $70\mu\text{A}$ arasında değiştirilerek faz cevabı incelenmiştir. Elde edilen elektronik ayarlanabilir faz cevabı Şekil 4.22’de verilmiştir.

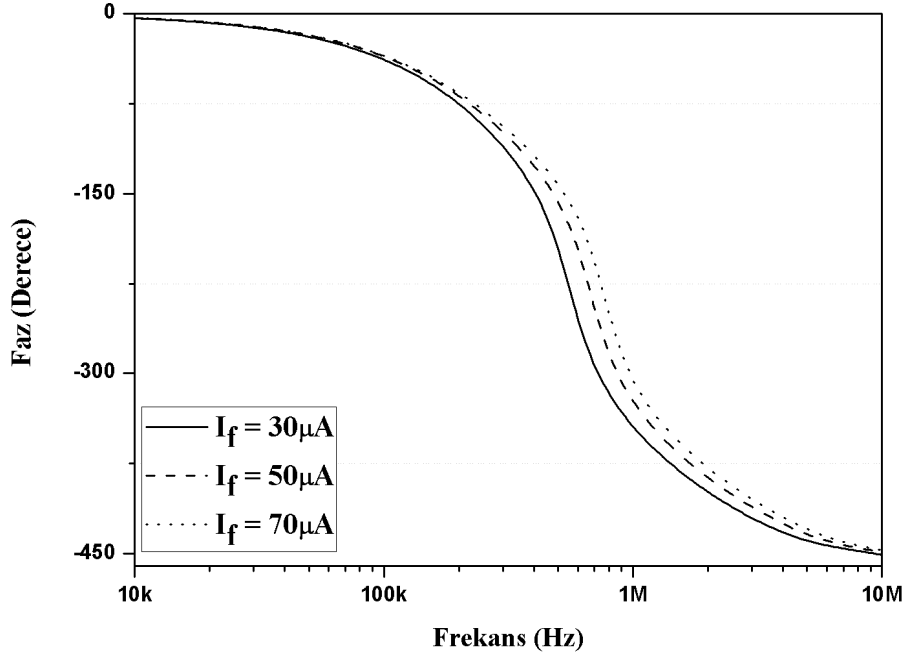


Şekil 4.20: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi genlik cevabı

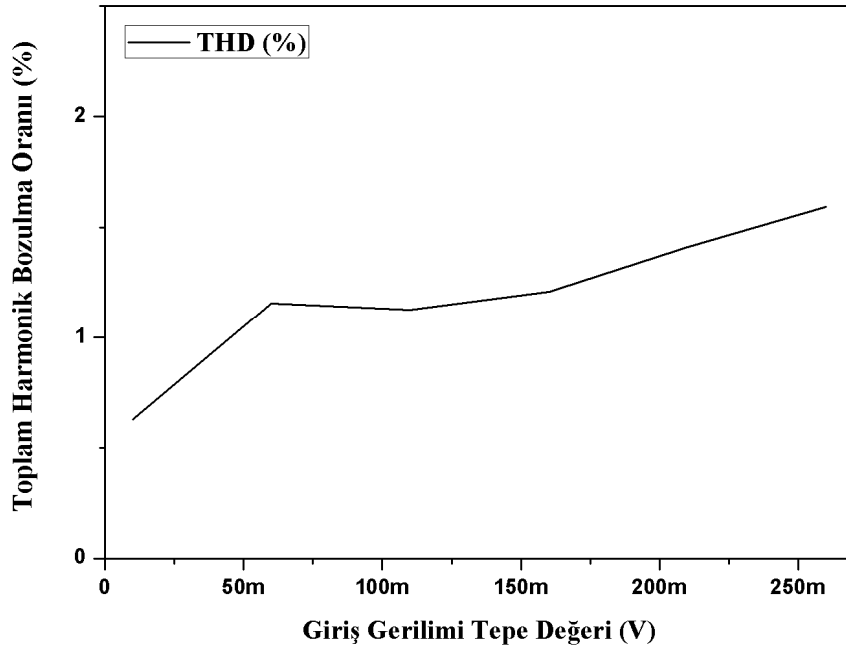


Şekil 4.21: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi faz cevabı

Söz konusu filtre devresine ait çıkış işaretinden elde edilen bozulma miktarının belirlenmesi amacıyla toplam harmonik bozulma analizi yine PSpice programının gerekli komutları kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonucunda giriş işaretinin tepe değeri 10mV ile 260mV arasında değiştirildiğinde devrenin çıkış işaretinde elde edilen toplam harmonik bozulma oranı Şekil 4.23’de görüldüğü gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 4.22: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir faz cevabı



Şekil 4.23: Beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi toplam harmonik bozulma oranı

4.3.3 Kaskat bağlantı yöntemi ile beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi kaskat bağlantı yöntemi ile tasarımı sunulmuştur. Bu kapsamda öncelikle Denklem (4.17)'de verilen transfer fonksiyonu Denklem (4.25)'de verildiği gibi birinci ve ikinci dereceden transfer fonksiyonlarının çarpımı şeklinde yazılmıştır.

$$H(s)=H_1(s) * H_2(s) * H_3(s) \quad (4.25)$$

Denklem (4.17)'deki transfer fonksiyonu uygun şekilde bileşenlerine ayrıldığında elde edilen birinci ve ikinci dereceden alçak geçiren karakteristikteki transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem (4.26), (4.27) ve (4.28)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$H_1(s)=\frac{\omega_0}{s+\omega_0} \quad (4.26)$$

$$H_2(s)=\frac{\omega_0^2}{s^2 + 0.618\omega_0s + \omega_0^2} \quad (4.27)$$

$$H_3(s)=\frac{\omega_0^2}{s^2 + 1.618\omega_0s + \omega_0^2} \quad (4.28)$$

Denklem (4.26), (4.27) ve (4.28)'deki transfer fonksiyonlarına Bölüm 3'te ayrıntılı olarak sunulan tasarım basamakları uygulandığında elde edilen sistem denklemleri sırası ile Denklem (4.29), (4.30) ve (4.31)'de görülmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\omega_0x_1 + \omega_0u \\ y_1 &= x_1 \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{21} &= \omega_0x_{22} \\ \dot{x}_{22} &= -\omega_0x_{21} - 0.618\omega_0x_{22} + \omega_0u_{in2} \\ y_2 &= x_{21} \end{aligned} \quad (4.30)$$

Denklem (4.30)'da u_{in2} terimi Denklem (4.29)'da sistem denklemleri görülen birinci dereceden alçak geçiren filtre devresinin çıkış işareti ve aynı zamanda $H_2(s)$ transfer fonksiyonunun da giriş işaretidir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_{31} &= \omega_0 x_{32} \\ \dot{x}_{32} &= -\omega_0 x_{31} - 1.618\omega_0 x_{32} + \omega_0 u_{in3} \\ y &= x_{31}\end{aligned}\quad (4.31)$$

Benzer şekilde, Denklem (4.31)'de kullanılan u_{in3} terimi de ikinci dereceden alçak geçiren filtre devresinin çıkış işareti ($H_2(s)$) ve aynı zamanda $H_3(s)$ transfer fonksiyonunun da giriş işaretidir. Tez kapsamında kullanılan genelleştirilmiş yöntem yukarıda verilen sistem denklemlerine uygulanırsa yeni sistem denklemleri Denklem (4.32), (4.33) ve (4.34)'de verildiği şekilde elde edilir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\omega_0 x_1 + \omega_0 u \\ y_1 &= x_1\end{aligned}\quad (4.32)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{21} &= \omega_0 x_{22} - \omega_0 u_2 \\ \dot{x}_{22} &= -\omega_0 x_{21} - 0.618\omega_0 x_{22} + \omega_0 u_{in2} + 0.618\omega_0 u_2 \\ y_2 &= x_{21}\end{aligned}\quad (4.33)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{31} &= \omega_0 x_{32} - \omega_0 u_2 \\ \dot{x}_{32} &= -\omega_0 x_{31} - 1.618\omega_0 x_{32} + \omega_0 u_{in3} + 1.618\omega_0 u_2 \\ y &= x_{31}\end{aligned}\quad (4.34)$$

Bu sistem denklemlerinde her bir giriş, çıkış ve durum değişkeni ifadesine Denklem (4.20)'de verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanırsa sırasıyla Denklem (4.35), (4.36) ve (4.37)'deki devre denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} \right) + \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_U}{\beta}} + V_{TH} \right) \\ y_1 &= v_1\end{aligned}\quad (4.35)$$

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{21} &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{22}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{22} &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{21}}{\beta}} + V_{TH} \right) - 0.618\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{22}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad + \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_1}{\beta}} + V_{TH} \right) + 0.618\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right)
\end{aligned} \tag{4.36}$$

$$y_2 = v_{21}$$

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{31} &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{32}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{32} &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{31}}{\beta}} + V_{TH} \right) - 1.618\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{32}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad + \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{21}}{\beta}} + V_{TH} \right) + 1.618\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_2}}{\beta}} + V_{TH} \right)
\end{aligned} \tag{4.37}$$

$$y = v_{31}$$

Bu sistem denklemlerinde önceki bölümlerde yapılan bazı düzenlemeler ve kabullenmeler yapıldığında devre denklemleri Denklem (4.38), (4.39) ve (4.40)'de verildiği gibi elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_1 &= -\sqrt{I_f i_1} + \sqrt{I_f i_U} \\
y_1 &= v_1
\end{aligned} \tag{4.38}$$

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{21} &= \sqrt{I_f i_{22}} - \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
C\dot{v}_{22} &= -\sqrt{I_f i_{21}} - 0.618\sqrt{I_f i_{22}} + \sqrt{I_f i_1} + 0.618\sqrt{I_f i_{U_2}} \\
y_2 &= v_{21}
\end{aligned} \tag{4.39}$$

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{31} &= \sqrt{I_f i_{32}} - \sqrt{I_f i_{U_2}} \\
C\dot{v}_{32} &= -\sqrt{I_f i_{31}} - 1.618\sqrt{I_f i_{32}} + \sqrt{I_f i_{21}} + 1.618\sqrt{I_f i_{U_2}} \\
v_{OUT} &= v_{31}
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Devre denklemlerine göre tasarlanan birinci ve ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da

gösterilmiştir. Bu devrelerin kaskat olarak birbirine bağlanması ile beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi elde edilir.

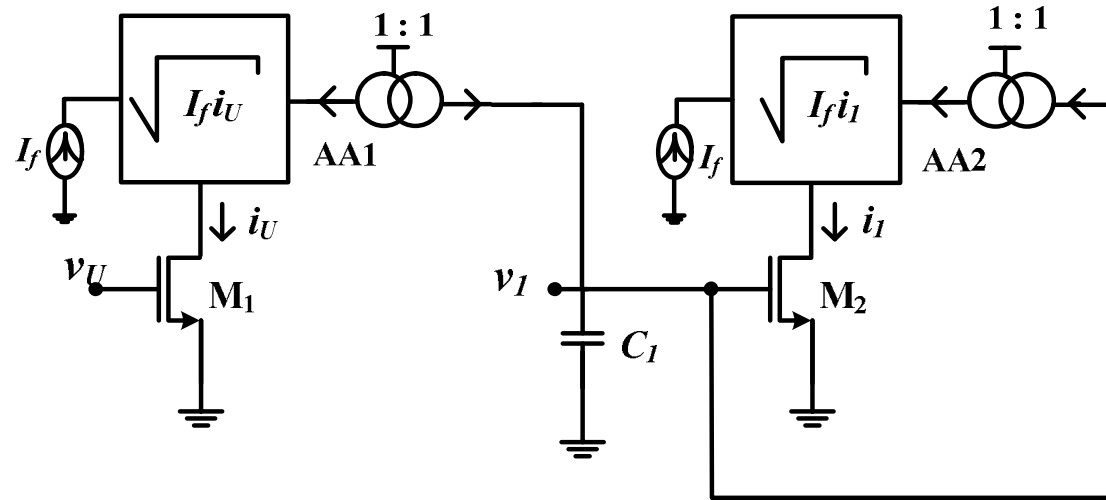
4.3.4 Kaskat bağlantı yöntemi ile tasarlanan beşinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresinin PSpice analizi

Beşinci dereceden kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen alçak geçiren karekök ortam filtre devresi tasarımı Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki devrelerin sırasıyla artarda bağlanması ile elde edilmektedir. Devrenin tasarımında daha önceki devre yapılarında olduğu gibi Şekil 2.6'da verilen karekök alma bloğu yapısı kullanılmıştır. Devrede karekök alma blokları çıkışında kullanılan akım aynalarının blok gösterimi ve MOS transistörler ile gerçekleştirilmiş eşdeğer devre şekilleri de ayrıntılı olarak sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.

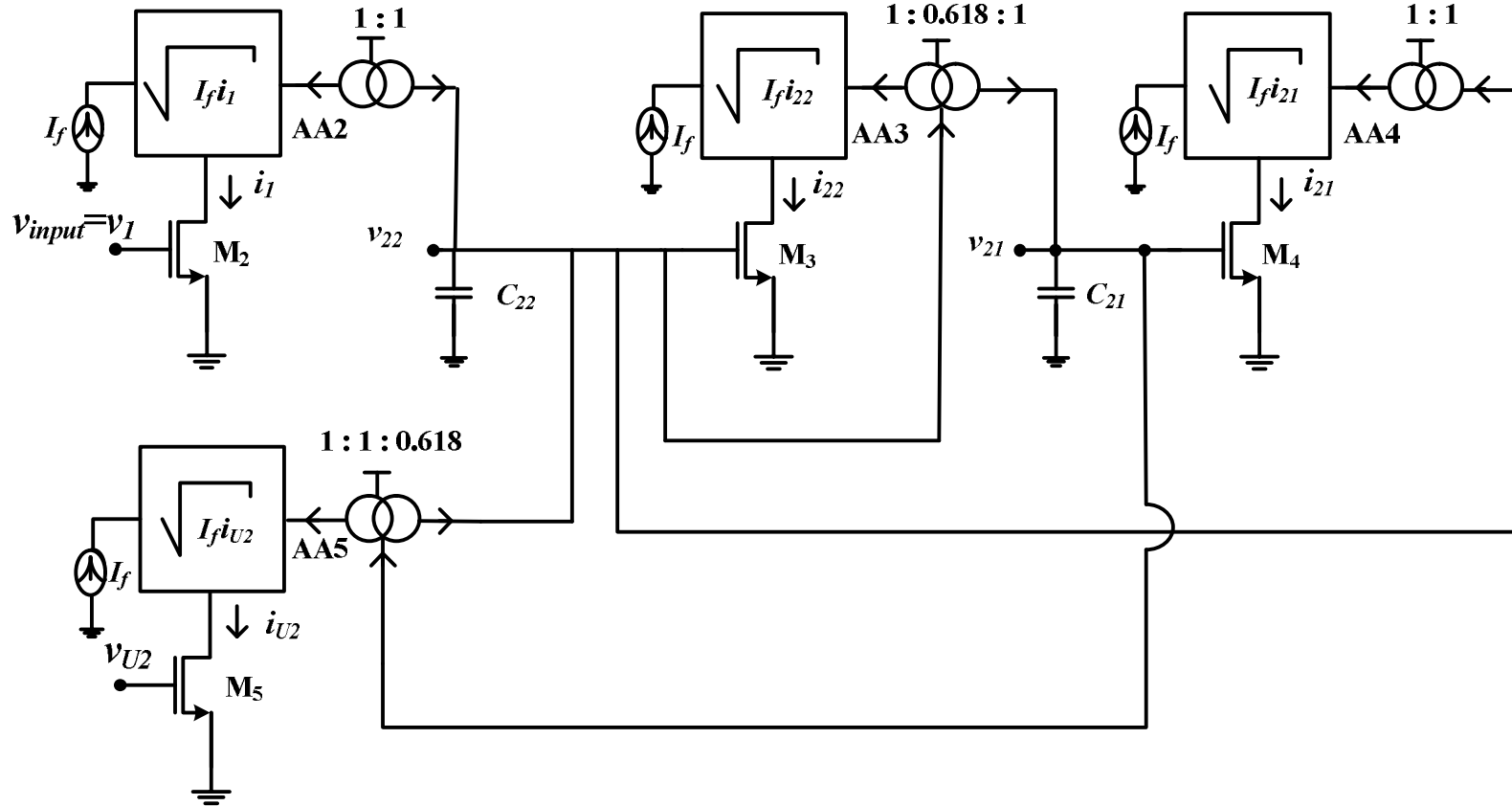
PSpice programında gerçekleştirilen devrenin tasarımı yapılırken devredeki tüm MOS transistörler TSMC 0.35µm CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Devrede kullanılan NMOS ve PMOS transistörlerin boyutları Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki şekillerde görülen NMOS transistör numaraları ve her bir karekök alma bloğu için ise Şekil 2.6'da belirtilen transistör numaraları dikkate alınarak Tablo 4.9'da sunulmuştur. Tablo 4.9'da boyutları verilen M_1 - M_7 transistörleri Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki NMOS transistörleri, M_1' - M_{16}' transistörleri ise Şekil 2.6'daki tüm transistörleri belirlemektedir. Ayrıca tasarlanan devrede akım aynalarında kullanılan akım kopyalama katsayıları ile her bir akım aynasının Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da belirtilen numaraları ve Şekil 4.17'de belirtilen transistör numaraları dikkate alınarak kullanılan transistörlerin boyutları Tablo 4.10'da belirlenmiştir.

Tablo 4.9: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden filtre devresi karekök alma blokları ve çıkışlarında kullanılan transistör boyutları

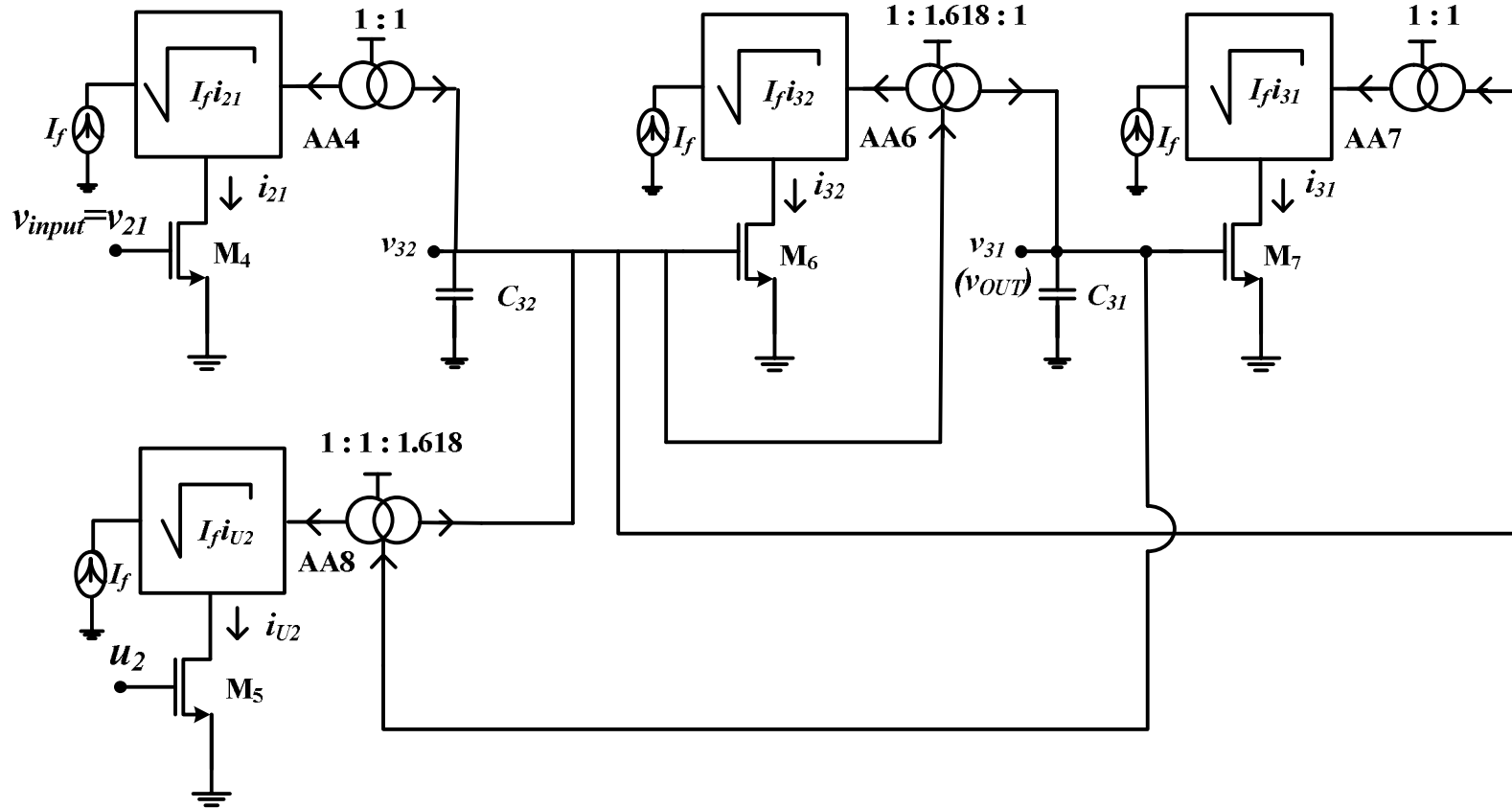
Transistör No	W/L [µm]
M_1 - M_7 M_1' - M_{10}' , M_{15}' , M_{16}'	6/.7
M_{11}' , M_{12}'	12/.7
M_{13}' , M_{14}'	3/.7



Şekil 4.24: Birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi



Şekil 4.25: İkinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi-1



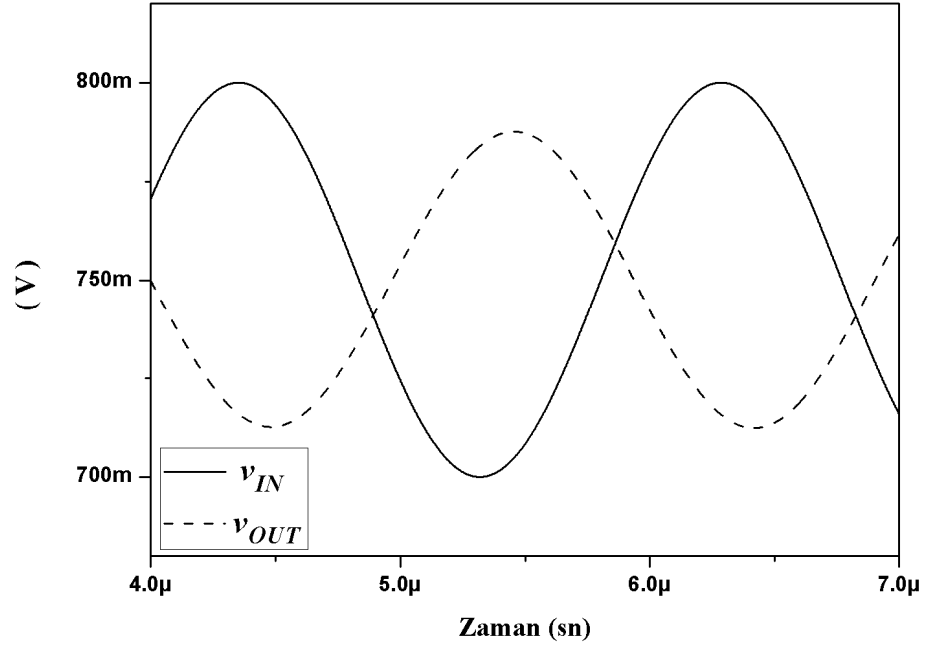
Şekil 4.26: İkinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi-2

Tablo 4.10: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden filtre devresi transistör boyutları

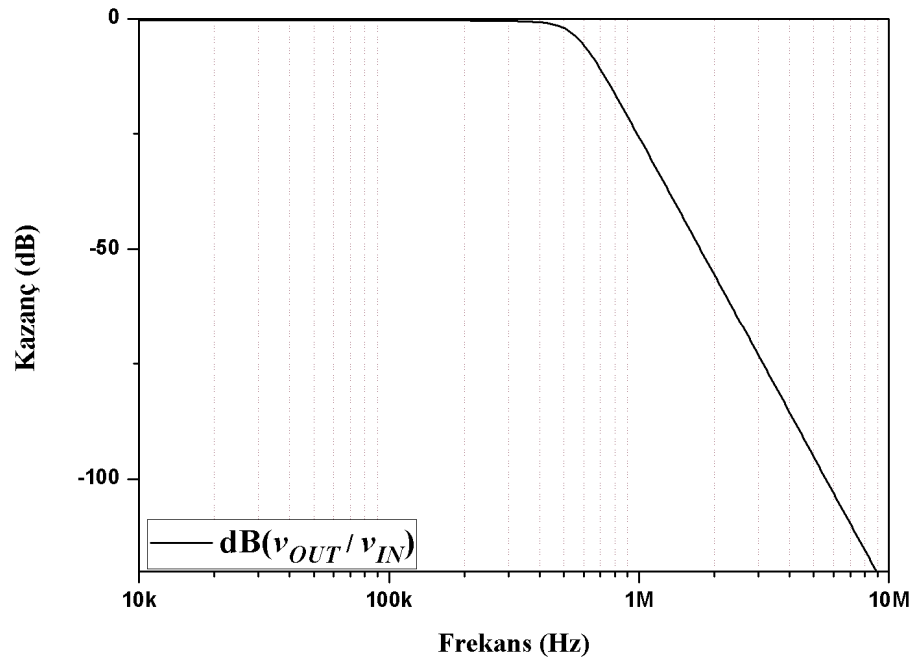
Akım Aynası	W/L				
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅
1	6/.7	-	-	-	6/.7
2	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7
3	6/.7	6/.7	6/.7	3.7/.7	6/.7
4	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7
5	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7	3.7/.7
6	6/.7	6/.7	6/.7	9.7/.7	6/.7
7	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7	-
8	6/.7	6/.7	6/.7	6/.7	9.7/.7

Tasarlanan devrede kullanılan her bir kondansatörün değeri birbirine eşit ve 50pF olarak seçilmiştir. Ayrıca I_f akım kaynaklarının değeri 30 μ A olarak ve devrenin besleme gerilimi 3V olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında analiz edilen filtre devresinin kesim frekansı 517kHz olarak belirlenmiştir. Devrede giriş işareti olarak 750mV DC üzerine eklenmiş 50mV tepe değeri olan bir sinüs işareti kullanılmıştır. A sınıfı yapıda tasarlanan devrede kullanılan harici DC giriş işaretinin (v_{U2}) değeri de 750mV olarak seçilmiştir.

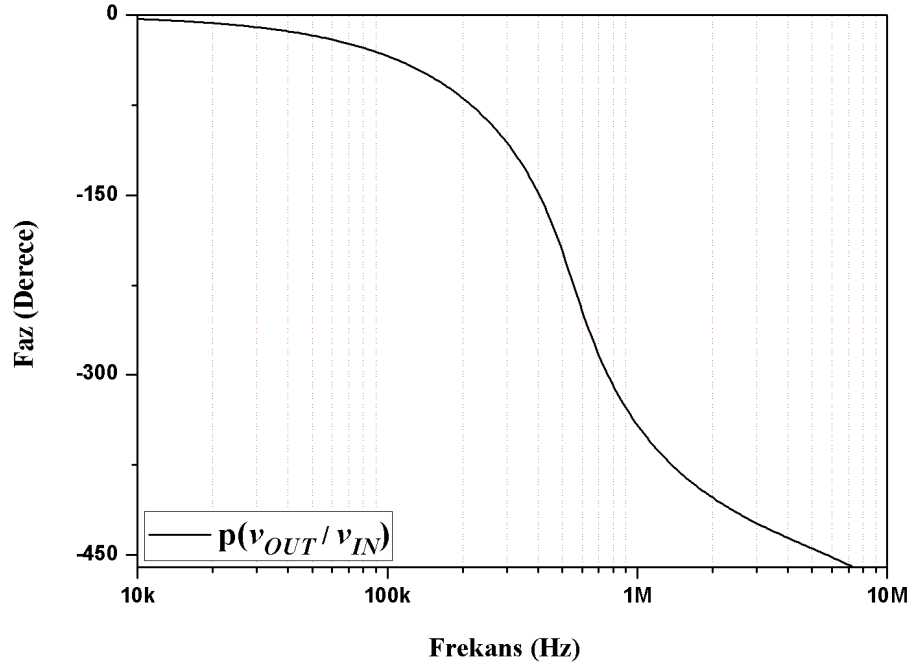
Kaskat bağlı filtre devresi kesim frekansında çalıştırıldığında ve belirtilen koşullarda PSpice programı kullanılarak analiz edildiğinde giriş ve çıkış işaretlerine ait zaman ortamı cevabı Şekil 4.27'deki gibi elde edilmiştir. Devrenin frekans ortamı analizleri sonucunda elde edilen genlik cevabı ve faz cevabı grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.27: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi zaman ortamı cevabı



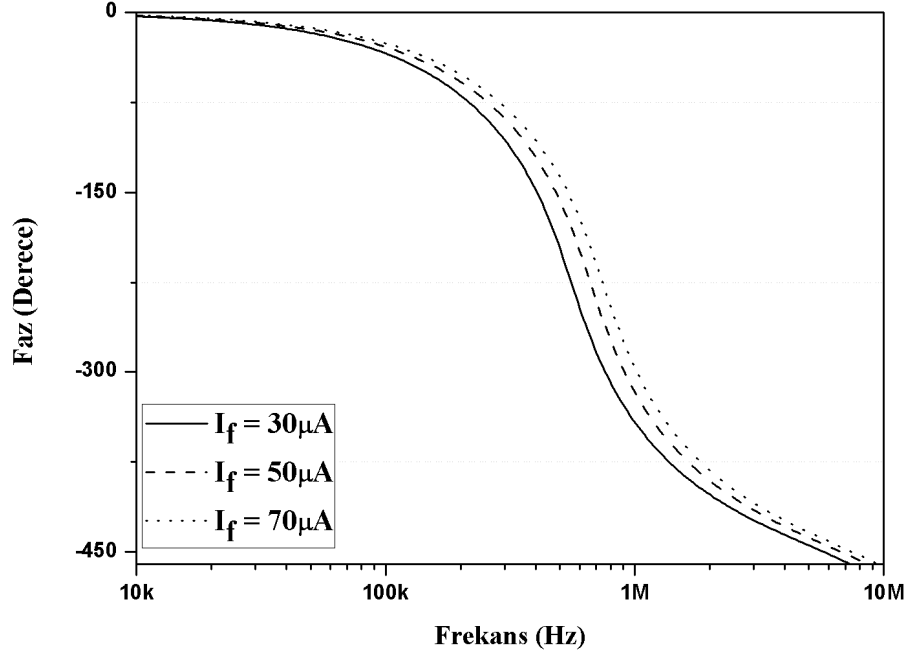
Şekil 4.28: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi genlik cevabı



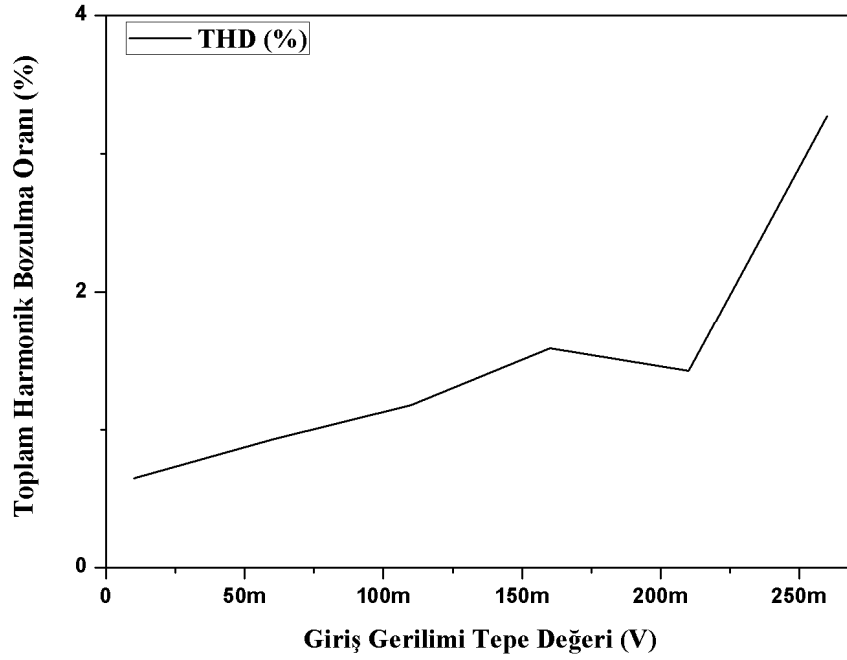
Şekil 4.29: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi faz cevabı

Karekök ortamda kaskat bağlı olarak tasarlanan bu devre ile doğrudan tasarım ile elde edilen devre benzer özelliklere sahiptir. Örneğin tasarlanan her iki devre yapısında da filtrenin kesim frekansı devrede kullanılan I_f akım kaynaklarının değeri ile elektronik olarak ayarlanabilir özelliğindedir. Tasarlanan filtre devresinin bu özelliğini gösterebilmek için devredeki I_f akım kaynağı değeri $30\mu\text{A}$ ile $70\mu\text{A}$ arasında değiştirilerek faz cevabı incelenmiştir. Elde edilen elektronik ayarlanabilir faz cevabı Şekil 4.30’da görülmektedir.

Kaskat bağlı karekök ortam filtre devresine ait çıkış işareti bozulma oranı PSpice programının uygun parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Bunun için giriş işaretinin tepe değeri 10mV ile 260mV arasında değiştirildiğinde devrenin çıkış işaretinden elde edilen toplam harmonik bozulma oranı Şekil 4.31’de görülmektedir.



Şekil 4.30: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir faz cevabı



Şekil 4.31: Kaskat bağlantı yöntemi ile elde edilen beşinci dereceden alçak geçiren filtre devresi toplam harmonik bozulma oranı

5. KAREKÖK ORTAM FİLTRELERİNİN AB SINIFI FARK ALAN YAPIDA SİSTEMATİK SENTEZİ

Tezin bu kısmında daha önceki bölümlerde karekök ortam filtre devrelerinin sistematik tasarımı konusunda karşılaşılan zorluklardan yola çıkılarak bu kısıtlamaların AB sınıfı fark alan yapı kullanılarak aşılabilirliği ve AB sınıfı yapıların birinci ve ikinci bölümlerde bahsedilen avantajlarından yararlanabilmek amacıyla sistematik bir sentez yöntemi belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Amaçlanan çalışmaların yapılabilmesi için ilk olarak n . dereceden bir sisteme ait transfer fonksiyonundan sistem denklemlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu aşamada kullanılan farklı yöntemler olmakla birlikte tezin genelinde kullanıldığı gibi bu kısımda da *Companion-III* tekniği tercih edilmiştir. Tercih edilen yöntem doğrultusunda ilk olarak n . dereceden bir sisteme ait denklemlerin elde edilmesi aşaması ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bu bölümde öncelikle n . dereceden genel bir transfer fonksiyonuna ait sistem denklemleri elde edildikten sonra karekök ortamda istenen fonksiyonun gerçekleştirilebilmesi için AB sınıfı fark alan devre yapısının bu denklemlere nasıl uygulanabileceği irdelenmiştir. Daha sonra sistem denklemleri uygun yapıda sağ ve sol devre parçalarını ifade edecek şekilde iki kısma ayrılarak fark alan yapıda elde edilmiştir. Sonraki aşamada denklemlerin karekök ortamda devre tasarımına uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için karekök ortamda filtre devresi tasarımını mümkün kılan ve tamamen AB sınıfı fark alan yapı kullanarak elde edilmiş bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem kullanıcının seçebileceği çok sayıda tasarım alternatifini içermektedir. Bununla birlikte tez kapsamında bu alternatifler içerisinde yalnızca ikisi genel bir çözüm ve tasarım yöntemi olarak ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Önerilen yöntem ilk defa tez kapsamında ortaya atılmış olup durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak AB sınıfı fark alan yapıda karekök ortam filtresi tasarımını mümkün hale getirmektedir. Yöntemin istenen tür ve derecede karekök ortam filtresinin doğrudan veya kaskat bağlantı yöntemi ile AB sınıfı yapıda tasarımına olanak sağlamasından dolayı literatürde önemli bir boşluğu doldurabileceği öngörülmektedir.

5.1 Durum Uzayı Sentez Yöntemi Kullanılarak Karekök Ortam Devresi Tasarımı ve Karşılaşılan Güçlükler

Durum uzayı sentez yöntemi ile devre tasarımı yapılırken tek girişli-tek çıkışlı bir sisteme ait elde edilen sistem denklemlerinin en genel matris formatında gösterimi Denklem (5.1)'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}\bar{\dot{x}} &= \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u \\ y &= \bar{P}^T \bar{x} + Du\end{aligned}\quad (5.1)$$

Burada u giriş işaretini ve y çıkış işaretini göstermektedir. Aynı zamanda Denklem (5.1)'de verilen ifade n . dereceden bir sisteme ait olduğu için; \bar{A} terimi $(n \times n)$ boyutunda bir katsayı matrisi, \bar{B} terimi $(n \times 1)$ boyutunda bir katsayı vektörü, \bar{P} terimi $(n \times 1)$ boyutunda bir katsayı vektörü ve D terimi ise sabit bir katsayıyı ifade etmektedir. Yine aynı denklemde verilen \bar{x} terimleri ise durum değişkenlerini ifade etmektedir ve Denklem (5.2)'de verildiği gibidir.

$$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (5.2)$$

Tezin genelinde Denklem (5.1)'de görüldüğü yapıda bir sistem denklemini elde edilebilmesi için *Companion-III* olarak tanımlanan ve Bölüm 2'de anlatılan yöntem kullanılmıştır. Bu kapsamda en genel yapıda Denklem (5.1)'de matris formunda verilen sistem denklemlerinin n . dereceden bir sistem için daha açık şekilde gösterilişi Denklem (5.3)'te görülmektedir.

$$\begin{aligned}\alpha_1 \dot{x}_1 &= \alpha_2 x_2 + (a_{n-1} - a_n b_{n-1}) \delta \omega_0 u \\ \alpha_2 \dot{x}_2 &= \alpha_3 x_3 + (a_{n-2} - a_n b_{n-2} - a_{n-1} b_{n-1} + a_n b_{n-1}^2) \delta \omega_0^2 u \\ &\vdots \\ \alpha_n \dot{x}_n &= -\sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} x_j + (a_0 \delta \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j) u \\ y &= \frac{\alpha_1}{\delta} x_1 + a_n u\end{aligned}\quad (5.3)$$

Durum uzayı sentez yöntemine göre elde edilen sistem denklemlerinin herhangi bir elektronik devre elemanı kullanılarak gerçekleştirilebilir yapıya dönüşmesi için bu denkleme devrenin gerçekleştirilmesinde kullanılacak elemana uygun yapıda bazı

fonksiyonlar uygulanması gerekmektedir. Bu aşamada karekök ortamda tasarlanacak olan sisteme ait denklemlerin elde edilebilmesi için daha önceki bölümlerde olduğu gibi doyum bölgesinde çalışan MOS transistörün uç bağıntıları eşleştirme fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Bu durumda sistem denklemlerindeki her bir giriş işareti ve durum değişkeni ifadesine Denklem (5.4)'de verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanırsa sistem denklemlerinin son şekli Denklem (5.5)'te verildiği gibi elde edilmektedir.

$$u = v_u = \sqrt{\frac{i_u}{\beta}} + V_{TH}$$

$$x_i = v_i = \sqrt{\frac{i_i}{\beta}} + V_{TH}$$
(5.4)

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{\alpha_1} \left(\alpha_2 \sqrt{\frac{i_2}{\beta}} + (a_{n-1} - a_n b_{n-1}) \delta \omega_0 \sqrt{\frac{i_u}{\beta}} \right) + \frac{(\alpha_2 + a_{n-1} \delta \omega_0 - a_n \delta b_{n-1} \omega_0)}{\alpha_1} V_{TH}$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{\alpha_2} \left(\alpha_3 \sqrt{\frac{i_3}{\beta}} + (a_{n-2} - a_n b_{n-2} - a_{n-1} b_{n-1} + a_n b_{n-1}^2) \delta \omega_0^2 \sqrt{\frac{i_u}{\beta}} \right)$$

$$+ \frac{(\alpha_3 + a_{n-2} \delta \omega_0^2 - a_n b_{n-2} \delta \omega_0^2 - a_{n-1} \delta b_{n-1} \omega_0^2 + a_n \delta b_{n-1}^2 \omega_0^2)}{\alpha_2} V_{TH}$$

$$\vdots$$

$$\dot{v}_m = \frac{1}{\alpha_n} \left(- \sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} \sqrt{\frac{i_j}{\beta}} + \left(a_0 \delta \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right) \sqrt{\frac{i_u}{\beta}} \right)$$

$$+ \frac{1}{\alpha_n} \left(- \sum_{j=1}^n \alpha_j b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} + a_0 \delta \omega_0^n + \sum_{j=1}^n b_{j-1} \omega_0^{n-j+1} r_j \right) V_{TH}$$

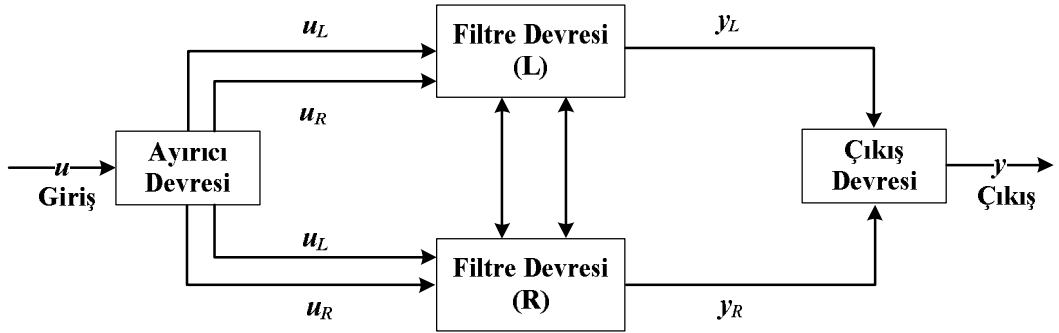
$$y = \frac{\alpha_1}{\delta} v_1 + a_n v_u$$
(5.5)

Elde edilen denklemlerde görüldüğü gibi öncelikle her bir denklemde yer alan V_{TH} 'lı terimler tasarlanmak istenen sistemin yalnız karekök alma blokları ile tasarımını engellemektedir. Ayrıca Denklem (5.5) ayrıntılı olarak incelendiğinde her bir düğüm noktasında elde edilen V_{TH} 'lı terimin katsayısının sistemin derecesi ile arttığı görülmektedir. Bu durum yüksek dereceden sistemlerin doğrudan tasarımını sıkıntılı hale getirmektedir. Bu aşamada tezin bu kısmında önerilen AB sınıfı fark alan devre yapısının karekök ortam devrelerine uygulanması gerek tasarlanacak olan sisteme ait denklemlerin ek bazı terimlerden arındırılarak yalnızca karekök alma blokları ile

gerçeklenebilir hale getirilmesi gerekse yüksek dereceden sistemlerin doğrudan tasarımının mümkün hale gelmesi anlamında çözüm sunduğu görülmektedir. Tez kapsamında önerilen AB sınıfı tasarım teorisi sonraki kısımda ayrıntılı olarak verildiği gibidir.

5.2 Karekök Ortam Devrelerinin AB Sınıfı Fark Alan Yapıda Tasarımı

AB sınıfı fark alan devre yapısının herhangi bir sisteme uygulanmasında ilk olarak yapılması gereken işlem sistem denklemlerindeki tüm tanımlamaların fark alan yapıya uygun hale getirilmesidir. En genel yapıda bir AB sınıfı fark alan devre yapısına ait blok gösterimi Şekil 5.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.1: Genel AB sınıfı yapısı

Durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak AB sınıfı fark alan devre yapısında tasarım yapılırken ilk olarak sistem denklemlerinin AB sınıfı fark alan yapıya göre düzenlenmesi gerekmektedir. Bu durum için en genel anlamda Denklem (5.1)’deki gibi ifade edilen sistem denklemlerinde her bir giriş, çıkış ve durum değişkeni teriminin ve A ve B katsayı matrislerinin Denklem (5.6)’daki gibi ikiye ayrılarak ifade edilmesi gerekmektedir.

$$\begin{aligned}
 u &= u_L - u_R \\
 x &= x_L - x_R \\
 \overline{A} &= \overline{A}_L - \overline{A}_R \\
 \overline{B} &= \overline{B}_L - \overline{B}_R \\
 y &= y_L - y_R
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Denklem (5.6)'da verilen eşitliklerin Denklem (5.1)'de verilen sistem denklemlerinde yerine konması ile sistem denklemleri Denklem (5.7)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

AB sınıfı fark alan yapıda devre tasarımı için gerekli olan değişkenlerin ve katsayıların ayrılma işlemi yapıldıktan sonra sistem denklemlerinin son hali Denklem (5.7)'de verildiği gibi olmaktadır. Bu aşamada elde edilen sistem denklemleri incelendiğinde yalnızca AB sınıfı yapıda sistem denklemlerinin elde edilmesinin karekök ortam devrelerinin tasarımında karşılaşılan güçlüklerin aşılması için yeterli olmadığı görülmektedir. Bunun için bu denklemlerde bazı düzenlemeler yapılması gerekmektedir. Tezin bu aşamasında istenen karekök ortam filtre devresinin tasarımı için Denklem (5.7)'de elde edilen denklem sistemleri ele alınarak ve kullanılacak karekök alma bloğu sayısı değiştirilmeden daha genel bir çözüm yöntemi sunmak amacıyla sistem denklemleri Denklem (5.8)'de verildiği gibi düzenlenmiştir.

$$\begin{aligned}
 \bar{x}_L &= \bar{A}_L \bar{x}_L + \bar{A}_R \bar{x}_R + \bar{B}_L u_L + \bar{B}_R u_R \\
 \bar{x}_R &= \bar{A}_L \bar{x}_R + \bar{A}_R \bar{x}_L + \bar{B}_L u_R + \bar{B}_R u_L \\
 y_L &= \bar{P}^T \bar{x}_L + Du_L \\
 y_R &= \bar{P}^T \bar{x}_R + Du_R
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Denklem (5.8) ayrıntılı olarak incelendiğinde sistem denklemlerinde yapılan düzenleme sayesinde tasarlanması istenen devre yalnızca karekök alma blokları ile elde edilebilir hale gelmiştir. Denklem sistemine eklenen $\bar{\Psi}$ ve $\bar{\Phi}$ ilave terimleri sayesinde uygunlaştırma işlemi sonrasında elde edilen devre denklemleri yalnızca karekök ifadelerinden oluşurken denklemlere ilave olarak eklenen bu terimler yalnızca devre üzerindeki akım aynası sayısını değiştirmektedir.

$$\begin{aligned}
 \bar{x}_L &= \bar{A}_L \bar{x}_L + \bar{A}_R \bar{x}_R + \bar{B}_L u_L + \bar{B}_R u_R - \bar{\Psi} \bar{x}_L - \bar{\Psi} \bar{x}_R - \bar{\Phi} u_L - \bar{\Phi} u_R \\
 \bar{x}_R &= \bar{A}_L \bar{x}_R + \bar{A}_R \bar{x}_L + \bar{B}_L u_R + \bar{B}_R u_L - \bar{\Psi} \bar{x}_R - \bar{\Psi} \bar{x}_L - \bar{\Phi} u_R - \bar{\Phi} u_L \\
 y_L &= \bar{P}^T \bar{x}_L + Du_L \\
 y_R &= \bar{P}^T \bar{x}_R + Du_R
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Burada $\bar{\Psi}$ ve $\bar{\Phi}$ katsayıları Denklem (5.9)'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \bar{\Psi} &= \begin{pmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} & \cdots & \Psi_{1n} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} & \cdots & \Psi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_{n1} & \Psi_{n2} & \cdots & \Psi_{nn} \end{pmatrix} \\ \bar{\Phi} &= \begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Denklem (5.8)'de en genel yapıda verilen sistem denklemleri kullanılarak karekök ortam filtresi tasarımı yapılırken kullanılacak olan $\bar{\Psi}$ ve $\bar{\Phi}$ katsayılarının seçimine bağlı olarak pek çok devre alternatifi karşımıza çıkmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli kısım seçilecek alternatif katsayıların AB sınıfı fark alan devre yapısına uygun olması ve elde edilen yeni sistem denklemlerinin Denklem (5.1)'deki genel yapıyı değiştirmemesidir. Yani ilave olarak eklenen $\bar{\Psi}$ ve $\bar{\Phi}$ katsayılarının; tasarımı yapılan transfer fonksiyonunu değiştirmiyor olması en önemli parametredir. Bu kapsamda genel yapı olarak Denklem (5.8)'deki gibi önerilmiş olan AB sınıfı karekök ortam filtre tasarım teorisi pek çok çözüm alternatifi içermektedir. Tezin ilerleyen kısımlarında bu alternatifler içerisinde iki farklı tasarım üzerinde detaylı olarak durulmuştur. Seçilen bu iki alternatif tasarım üzerinde ayrıntılı olarak çalışılmış, farklı tür ve derecelerde filtre devreleri tasarlanarak sonuçları sunulmuştur. Seçilen bu iki teoriye göre tasarlanan karekök ortam devrelerinin PSpice analizleri sonucunda iyi performans sergilediği gözlenmiştir.

5.2.1 AB sınıfı fark alan devre yapıda tasarım alternatif teori-I

Denklem (5.8)'de en genel anlamda AB sınıfı fark alan yapıda devre tasarımı için sistem denklemleri önerilmiştir. Bu denklem sisteminin pek çok alternatif sunmasından dolayı tezin bu kısmında karekök ortam filtrelerinde iyi sonuç verdiği ve geliştirilmeye uygun olduğu düşünülen iki farklı teori ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bunlardan ilki A ve B katsayıları iki kısma bölünmeden sistem denklemleri AB sınıfı yapıya ayrıldıktan sonra yalnızca Denklem (5.8)'de verilen $\bar{\Phi}$ katsayılarının kullanılması ile uygun denklemlerinin elde edilmesi şeklindedir. Sistem denklemleri üzerinde bu şekilde bir değişiklik ortaya koyan teori alternatif

tasarım yöntemi-I (AT-I) olarak isimlendirilmiştir. Önerilen bu teoriye göre düzenlenmiş yeni sistem denklemleri n . dereceden bir sistem için Denklem (5.10)'da verildiği gibi elde edilir.

Önerilen teori incelendiğinde *Companion-III* tekniği ile elde edilen sistem denklemlerinin doğrudan kullanıldığı görülmektedir. Bu sistem denklemlerindeki katsayılar herhangi bir şekilde değiştirilmeden kullanılırken ilave olarak denklem sistemindeki giriş işareti ile temsil edilen kısımlar (u_L ve u_R) farklı katsayı çarpanı ile tekrar kullanılmış ve istenen devrelerin tasarlanmasına olanak sağlanmıştır. Denklem (5.10) incelendiğinde AB sınıfı yapıda oluşturulan denklem sisteminde ilave terim olarak eklenen kısımların devrede eleman sayısında ciddi bir değişiklik oluşturmadığı yalnızca akım aynalarının akım kopyalama oranlarında değişikliğe sebep olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_{1L} \\ \dot{x}_{2L} \\ \vdots \\ \dot{x}_{nL} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1L} \\ x_{2L} \\ \vdots \\ x_{nL} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 + \Phi_1 \\ B_2 + \Phi_2 \\ \vdots \\ B_n + \Phi_n \end{bmatrix} u_L + \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_n \end{bmatrix} u_R \\
 \begin{bmatrix} \dot{x}_{1R} \\ \dot{x}_{2R} \\ \vdots \\ \dot{x}_{nR} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1R} \\ x_{2R} \\ \vdots \\ x_{nR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 + \Phi_1 \\ B_2 + \Phi_2 \\ \vdots \\ B_n + \Phi_n \end{bmatrix} u_R + \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_n \end{bmatrix} u_L \\
 y_L &= \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1L} \\ x_{2L} \\ \vdots \\ x_{nL} \end{bmatrix} + Du_L \\
 y_R &= \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1R} \\ x_{2R} \\ \vdots \\ x_{nR} \end{bmatrix} + Du_R
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

Burada denklem sisteminin her bir satırında yer alan ve karekök ortamda devre tasarımını kolaylaştırması ve sistematik hale getirmesi için eklenmiş olan her bir Φ terimi Denklem (5.11)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\Phi_n = -\frac{\sum_{j=1}^n A_{nj} + B_n}{2} \quad (5.11)$$

Denklem (5.10)'daki gibi önerilen sistem denklemlerine karekök ortam filtre devrelerinin tasarımında kullanılan ve Denklem (5.12)'de verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanarak devre denklemleri elde edilebilmektedir.

$$\begin{aligned} u_L = v_{uL} &= \sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} ; u_R = v_{uR} = \sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \\ x_{jL} = v_{jL} &= \sqrt{\frac{i_{jL}}{\beta}} + V_{TH} ; x_{jR} = v_{jR} = \sqrt{\frac{i_{jR}}{\beta}} + V_{TH} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Sistem denklemlerine eşleştirme fonksiyonları uygulandıktan sonra denklemlerin her bir satırı ayrı ayrı C katsayısı ile çarpılırsa ve Denklem (5.13)'te verilen kabullenme yapılırsa önerilen yöntem ile elde edilen devre denklemleri Denklem (5.15)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta} \quad (5.13)$$

Burada β katsayısı Denklem (5.14)'de verildiği gibidir.

$$\beta = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \quad (5.14)$$

Denklem (5.15)'de görüldüğü gibi genelleştirilmiş yöntem ile yapılacak tasarımlarda elde edilen devre denklemleri yalnızca karekök ifadeleri cinsinden terimler içermektedir. Bunlar dışında herhangi başka bir terim içermemektedir. Buna göre istenen tür ve derecede filtre devresinin durum uzayı sentez yöntemi ile blok yapı olarak yalnızca karekök alma blokları kullanılarak karekök ortam filtresi olarak tasarımı mümkün olmaktadır.

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= A_{11}\sqrt{I_f i_{1L}} + A_{12}\sqrt{I_f i_{2L}} + \dots + A_{1n}\sqrt{I_f i_{nL}} \\
&\quad + (B_1 + \Phi_1)\sqrt{I_f i_{U_L}} + \Phi_1\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{2L} &= A_{21}\sqrt{I_f i_{1L}} + A_{22}\sqrt{I_f i_{2L}} + \dots + A_{2n}\sqrt{I_f i_{nL}} \\
&\quad + (B_2 + \Phi_2)\sqrt{I_f i_{U_L}} + \Phi_2\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
&\vdots \\
C\dot{v}_{nL} &= A_{n1}\sqrt{I_f i_{1L}} + A_{n2}\sqrt{I_f i_{2L}} + \dots + A_{nn}\sqrt{I_f i_{nL}} \\
&\quad + (B_n + \Phi_n)\sqrt{I_f i_{U_L}} + \Phi_n\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
y_L &= P_1 v_{1L} + \dots + P_n v_{nL} + D v_{U_L}
\end{aligned} \tag{5.15}$$

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1R} &= A_{11}\sqrt{I_f i_{1R}} + A_{12}\sqrt{I_f i_{2R}} + \dots + A_{1n}\sqrt{I_f i_{nR}} \\
&\quad + (B_1 + \Phi_1)\sqrt{I_f i_{U_R}} + \Phi_1\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
C\dot{v}_{2R} &= A_{21}\sqrt{I_f i_{1R}} + A_{22}\sqrt{I_f i_{2R}} + \dots + A_{2n}\sqrt{I_f i_{nR}} \\
&\quad + (\Phi_2 + k_2)\sqrt{I_f i_{U_R}} + \Phi_2\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
&\vdots \\
C\dot{v}_{nR} &= A_{n1}\sqrt{I_f i_{1R}} + A_{n2}\sqrt{I_f i_{2R}} + \dots + A_{nn}\sqrt{I_f i_{nR}} \\
&\quad + (B_n + \Phi_n)\sqrt{I_f i_{U_R}} + \Phi_n\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_R &= P_1 v_{1R} + \dots + P_n v_{nR} + D v_{U_R}
\end{aligned}$$

5.2.2 AB sınıfı fark alan devre yapısında tasarım alternatif teori-II

Tezin bu kısmında önerilen alternatif teoriye göre Denklem (5.8)'de verilen denklem sistemindeki $\bar{\Psi}$ ve $\bar{\Phi}$ katsayıları kullanılmamış yalnızca A matrisi ve B vektörünün uygun şekilde L ve R kısımlarına ayrılarak farklı bir tasarım yapılması yoluna gidilmiştir. Bu şekilde sistem denklemlerindeki katsayıların AB sınıfı fark alan yapının avantajlarından faydalanarak uygun hale getirilmesi yoluyla elde edilen teoriye alternatif tasarım yöntemi-II(AT-II) ismi verilmiştir. Önerilen bu teoriye göre Denklem (5.8)'de en genel yapıda verilen sistem denklemleri Denklem (5.16)'daki gibi düzenlendiğinde istenilen tür ve dereceden karekök ortam filtre devresinin tasarımı mümkün hale gelmektedir.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x}_{1L} \\ \dot{x}_{2L} \\ \vdots \\ \dot{x}_{nL} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11L} & A_{12L} & \cdots & A_{1nL} \\ A_{21L} & A_{22L} & \cdots & A_{2nL} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1L} & A_{n2L} & \cdots & A_{nnL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1L} \\ x_{2L} \\ \vdots \\ x_{nL} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} A_{11R} & A_{12R} & \cdots & A_{1nR} \\ A_{21R} & A_{22R} & \cdots & A_{2nR} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1R} & A_{n2R} & \cdots & A_{nnR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1R} \\ x_{2R} \\ \vdots \\ x_{nR} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1L} \\ B_{2L} \\ \vdots \\ B_{nL} \end{bmatrix} u_L + \begin{bmatrix} B_{1R} \\ B_{2R} \\ \vdots \\ B_{nR} \end{bmatrix} u_R \\
\begin{bmatrix} \dot{x}_{1R} \\ \dot{x}_{2R} \\ \vdots \\ \dot{x}_{nR} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11L} & A_{12L} & \cdots & A_{1nL} \\ A_{21L} & A_{22L} & \cdots & A_{2nL} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1L} & A_{n2L} & \cdots & A_{nnL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1R} \\ x_{2R} \\ \vdots \\ x_{nR} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} A_{11R} & A_{12R} & \cdots & A_{1nR} \\ A_{21R} & A_{22R} & \cdots & A_{2nR} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1R} & A_{n2R} & \cdots & A_{nnR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1L} \\ x_{2L} \\ \vdots \\ x_{nL} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1L} \\ B_{2L} \\ \vdots \\ B_{nL} \end{bmatrix} u_R + \begin{bmatrix} B_{1R} \\ B_{2R} \\ \vdots \\ B_{nR} \end{bmatrix} u_L
\end{aligned} \tag{5.16}$$

$$y_L = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \cdots & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1L} \\ x_{2L} \\ \vdots \\ x_{nL} \end{bmatrix} + Du_L$$

$$y_R = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \cdots & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1R} \\ x_{2R} \\ \vdots \\ x_{nR} \end{bmatrix} + Du_R$$

Burada A ile ifade edilen katsayı matrisi A_L ve A_R olarak B vektörü olarak verilen katsayı vektörü de B_L ve B_R iki kısma ayrılmıştır. A_L ve A_R matrislerinin her bir terimi satır ve sütun numaraları dikkate alınarak Denklem (5.17)'de görüldüğü gibi, B_L ve B_R vektörleri de benzer şekilde her bir terimin satır numaraları dikkate alınarak Denklem (5.18)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$A_{pjL} = -A_{pjR} = \frac{A_{pj}}{2}; \quad p, j = 1, 2, \dots, n \tag{5.17}$$

$$B_{jL} = -B_{jR} = \frac{B_j}{2}; \quad j = 1, 2, \dots, n \tag{5.18}$$

Önerilen teori ışığında devre denklemlerinin elde edilebilmesi için öncelikle Denklem (5.16)'daki gibi elde edilen sistem denklemlerine yine Denklem (5.12)'de verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanmalıdır. Eşleştirme fonksiyonu uygulanan her bir denklem grubunda durum değişkenlerinin türevlerini içeren satırlar C katsayıları ile çarpılır ve Denklem (5.13)'de verilen kabullenme yapılırsa elde edilen devre denklemleri ayrıntılı olarak Denklem (5.19)'da verildiği gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= A_{11L}\sqrt{I_f i_{1L}} - A_{11R}\sqrt{I_f i_{1R}} + \dots \\
&+ A_{1nL}\sqrt{I_f i_{nL}} - A_{1nR}\sqrt{I_f i_{nR}} + B_{1L}\sqrt{I_f i_{U_L}} - B_{1R}\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{2L} &= A_{21L}\sqrt{I_f i_{1L}} - A_{21R}\sqrt{I_f i_{1R}} + \dots \\
&+ A_{2nL}\sqrt{I_f i_{nL}} - A_{2nR}\sqrt{I_f i_{nR}} + B_{2L}\sqrt{I_f i_{U_L}} - B_{2R}\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
&\vdots \\
C\dot{v}_{nL} &= A_{n1L}\sqrt{I_f i_{1L}} - A_{n1R}\sqrt{I_f i_{1R}} + \dots \\
&+ A_{nnL}\sqrt{I_f i_{nL}} - A_{nnR}\sqrt{I_f i_{nR}} + B_{nL}\sqrt{I_f i_{U_L}} - B_{nR}\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
y_L &= P_1 v_{1L} + \dots + P_n v_{nL} + D v_{U_L}
\end{aligned} \tag{5.19}$$

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1R} &= A_{11L}\sqrt{I_f i_{1R}} - A_{11R}\sqrt{I_f i_{1L}} + \dots \\
&+ A_{1nL}\sqrt{I_f i_{nR}} - A_{1nR}\sqrt{I_f i_{nL}} + B_{1L}\sqrt{I_f i_{U_R}} - B_{1R}\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
C\dot{v}_{2R} &= A_{21L}\sqrt{I_f i_{1R}} - A_{21R}\sqrt{I_f i_{1L}} + \dots \\
&+ A_{2nL}\sqrt{I_f i_{nR}} - A_{2nR}\sqrt{I_f i_{nL}} + B_{2L}\sqrt{I_f i_{U_R}} - B_{2R}\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
&\vdots \\
C\dot{v}_{nR} &= A_{n1L}\sqrt{I_f i_{1R}} - A_{n1R}\sqrt{I_f i_{1L}} + \dots \\
&+ A_{nnL}\sqrt{I_f i_{nR}} - A_{nnR}\sqrt{I_f i_{nL}} + B_{nL}\sqrt{I_f i_{U_R}} - B_{nR}\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_R &= P_1 v_{1R} + \dots + P_n v_{nR} + D v_{U_R}
\end{aligned}$$

Denklem (5.19)'da görüldüğü gibi genelleştirilmiş yöntem ile yapılacak tasarımlarda bir önceki alternatifte olduğu gibi elde edilen devre denklemleri yalnızca karekök ifadeleri cinsinden terimler içermektedir. Devre denklemleri iki akımın çarpımının karekökünü içeren ifadeler dışında herhangi başka bir terim içermediği için bu aşamada devrelerin tasarımlarını yapmak da oldukça kolay ve sistematik hale gelmektedir. Bu durumda istenen tür ve derecede filtre devresinin durum uzayı sentez yöntemi ile AB sınıfı devre yapısında karekök ortam filtre yapısına uygun olarak tasarımı mümkün olmaktadır.

6. BİRİNCİ DERECEDEDEN AB SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMALARI

6.1 Giriş

Tezin bu bölümünde Bölüm 5’te önerilmiş olan teorinin birinci dereceden filtre devreleri üzerinde yapılan uygulamaları sunulmuştur. Bu kapsamda birinci dereceden alçak geçiren, yüksek geçiren ve tüm geçiren filtre devrelerinin transfer fonksiyonundan başlayarak önerilen teori çerçevesinde devre denklemlerinin elde edilmesine kadar olan işlem basamakları ayrıntılı olarak verilmiştir. Daha sonra elde edilen devre denklemleri kullanılarak tasarlanan devreler sunulmuştur. Son olarak tasarlanan karekök ortam filtre devresi şekilleri ve PSpice programı ile yapılmış zaman ve frekans ortamı analizleri Bölüm 5’te verilen her iki alternatif tasarım için sunulmuştur.

6.2 Birinci Dereceden Alçak Geçiren Filtre Devresi Tasarımı

Birinci dereceden alçak geçiren bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu Denklem (6.1)’ de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = a_1 \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)’de verilen transfer fonksiyonuna *Companion-III* tekniği uygulanarak elde edilen sistem denklemleri Denklem (6.2)’de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\omega_0 x_1 + a_1 \omega_0 u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (6.2)$$

6.2.1 Birinci dereceden alçak geçiren filtre devresi tasarımı-I

Sistem denklemlerinde AB sınıfı teori çerçevesinde AT-I'de geliştirilmiş olarak önerilen düzenlemeler yapıldığında elde edilen yeni sistem denklemleri Denklem (6.3)'te verildiği gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1L} &= -\omega_0 x_{1L} + a_1 \omega_0 u_L + \left(\frac{1-a_1}{2}\right) \omega_0 u_L + \left(\frac{1-a_1}{2}\right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{1R} &= -\omega_0 x_{1R} + a_1 \omega_0 u_R + \left(\frac{1-a_1}{2}\right) \omega_0 u_L + \left(\frac{1-a_1}{2}\right) \omega_0 u_R \\ y_L &= x_{1L} \\ y_R &= x_{1R}\end{aligned}\quad (6.3)$$

Bu şekilde elde edilen AB sınıfı yapıda sistem denklemlerine Denklem (6.4)'te verilen eşleştirme fonksiyonları uygulanarak devre denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned}u_L = v_{U_L} &= \sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH}; \quad u_R = v_{U_R} = \sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \\ x_{1L} = v_{1L} &= \sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH}; \quad x_{1R} = v_{1R} = \sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH}\end{aligned}\quad (6.4)$$

Denklem (6.4)'te verilen eşleştirme fonksiyonlarının sistem denklemlerine uygulanması ile Denklem (6.5) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}\dot{v}_{1L} &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \left(\frac{a_1+1}{2} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\ &\quad - \left(\frac{a_1-1}{2} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\ \dot{v}_{1R} &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \left(\frac{a_1+1}{2} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\ &\quad - \left(\frac{a_1-1}{2} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\ y_L &= v_{1L} \\ y_R &= v_{1R}\end{aligned}\quad (6.5)$$

Denkleminde verilen β terimi Denklem (6.6)'da gösterildiği gibidir.

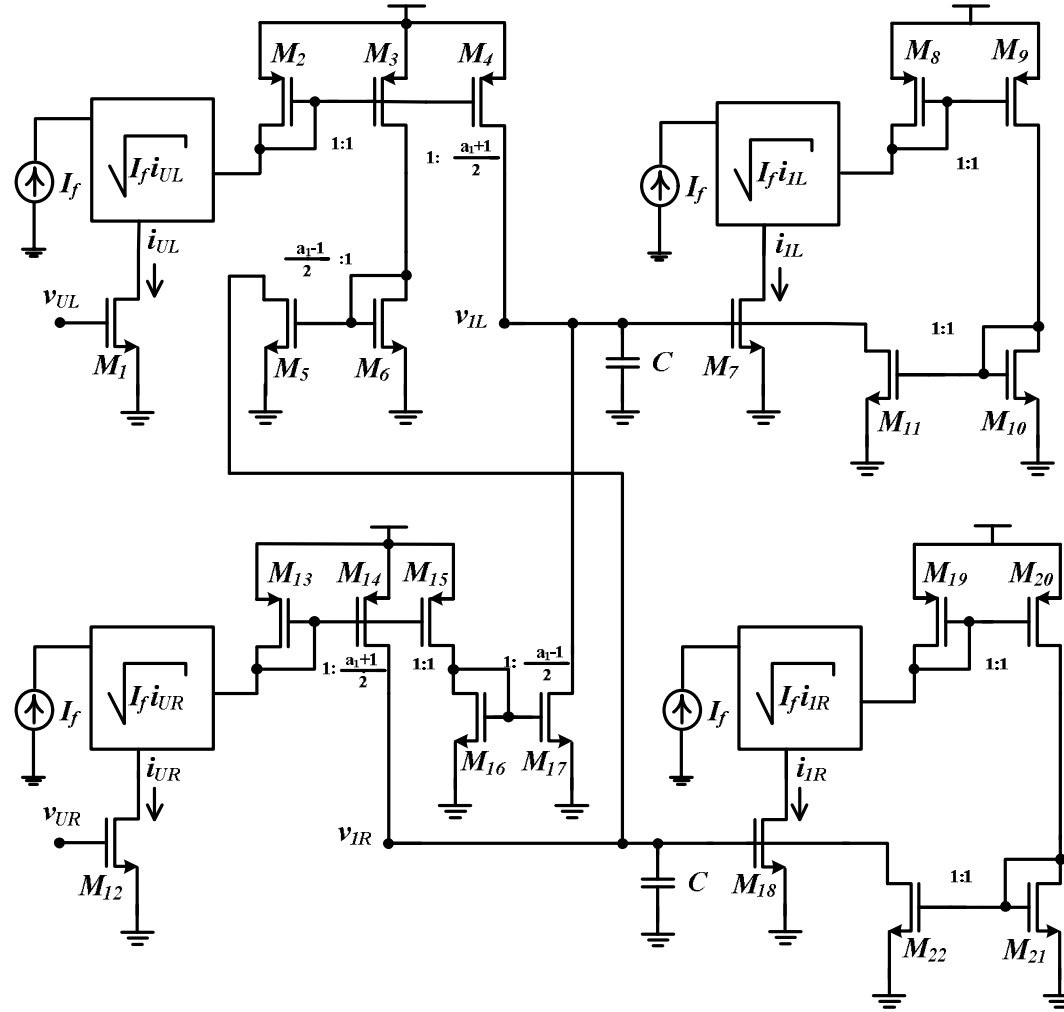
$$\beta = \frac{\mu_0 C_{ox} W}{2L} \quad (6.6)$$

Denklem (6.5)'te verilen ve düğüm gerilimlerinin türevini içeren eşitliklerin her iki tarafı C katsayısı ile çarpılır ve bu çarpma işleminden sonra Denklem (6.7)'de verilen kabullenme yapılırsa devre denklemlerinin son hali Denklem (6.8)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} C\dot{v}_{1L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} + \left(\frac{a_1+1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_L}} - \left(\frac{a_1-1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_R}} \\ C\dot{v}_{1R} &= -\sqrt{I_f i_{1R}} + \left(\frac{a_1+1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_R}} - \left(\frac{a_1-1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_L}} \\ y_L &= v_{1L} \\ y_R &= v_{1R} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Denklem (6.8)'de verildiği gibi elde edilen devre denklemleri yalnızca karekök alma bloklarının farklı katsayılar ile çarpılıp toplanması ile elde edilmiştir. Bu da elde edilen denklemlerin karekök alma bloğu, akım aynası, kondansatör ve tüm karekök alma bloklarının DC akım girişini sağlayan akım kaynakları ile kolayca gerçekleştirilebilir bir yapıya dönüşmesini sağlamıştır. Elde edilen devre denklemlerine KAK uygulanırsa AB sınıfı yapıda durum uzayı sentez yöntemi kullanılarak tasarlanan birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi, kazancının (a_1) 1'den büyük olduğu durumlar için Şekil 6.1'de verildiği gibidir. a_1 kazancı 1 ise aynı devre üzerinde M_5 ve M_{17} transistörlerinin akım kopyalama oranları sıfır olacağı için M_3 , M_5 ve M_6 ile M_{15} , M_{16} ve M_{17} transistörlerinin devreden çıkarılması gerekmektedir. Son olarak eğer a_1 kazancı 1 den küçük ise bu durumda $(a_1-1)/2$ terimi negatif olacağı için M_5 , M_6 , M_{16} ve M_{17} transistörleri devreden çıkarılarak akım kopyalama oranı $(1-a_1)/2$ değerinde olacak şekilde M_3 transistörünün *drain* ucu doğrudan v_{1R} düğümüne bağlanır. Yine akım kopyalama oranı $(1-a_1)/2$ olacak şekilde ayarlanan M_{15} transistörünün *drain* ucu da doğrudan v_{1L} düğümüne bağlanır.



Şekil 6.1: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinciden alçak geçiren karekök ortam filtresi

6.2.2 Birinci dereceden alçak geçiren filtre devresi tasarımı-II

Transfer fonksiyonu Denklem (6.1)'de ve sistem denklemleri Denklem (6.2)'de verilen birinci dereceden alçak geçiren filtre devresini AB sınıfı yapıda Bölüm 5'te önerilen AT-II yöntemi ile de tasarlamak mümkündür. Bunun için Denklem (6.2)'de verilen sistem denklemleri önerilen teori doğrultusunda Denklem (6.9)'da verildiği gibi yeniden düzenlenir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{1L} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1L} + \frac{\omega_0}{2} x_{1R} + \frac{a_1 \omega_0}{2} u_L - \frac{a_1 \omega_0}{2} u_R \\
 \dot{x}_{1R} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1R} + \frac{\omega_0}{2} x_{1L} + \frac{a_1 \omega_0}{2} u_R - \frac{a_1 \omega_0}{2} u_L \\
 y_L &= x_{1L} \\
 y_R &= x_{1R}
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Sistem denklemleri Denklem (6.9)'da verilen AB sınıfı filtre devresine ait devre denklemlerinin elde edilebilmesi için Denklem (6.10)'da verilen eşleştirme fonksiyonlarının sistem denklemlerindeki her bir durum değişkeni ve giriş işaretine uygulanması gerekmektedir. Denklem (6.10)'da verilen eşleştirme fonksiyonlarının sistem denklemlerine uygulanması ile Denklem (6.11) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 u_L = v_{uL} &= \sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH}; \quad u_R = v_{uR} = \sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \\
 x_{1L} = v_{1L} &= \sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH}; \quad x_{1R} = v_{1R} = \sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH}
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_{1L} &= -\frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
 &\quad + \left(\frac{a_1 \omega_0}{2} \right) \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \left(\frac{a_1 \omega_0}{2} \right) \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
 \dot{v}_{1R} &= -\frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
 &\quad + \left(\frac{a_1 \omega_0}{2} \right) \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \left(\frac{a_1 \omega_0}{2} \right) \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
 y_L &= v_{1L} \\
 y_R &= v_{1R}
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

Denklem (6.11)'de verilen ve düğüm gerilimlerinin türevini içeren eşitliklerin her iki tarafı C katsayısı ile çarpılır ve daha sonra Denklem (6.12)'de verilen kabullenme yapılırsa tasarlanacak olan birinci dereceden filtre devresine ait devre denklemleri Denklem (6.13)'te verildiği gibi olur.

$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} C\dot{v}_{1L} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_L}} - \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_R}} \\ C\dot{v}_{1R} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_R}} - \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_L}} \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$y_L = v_{1L}$$

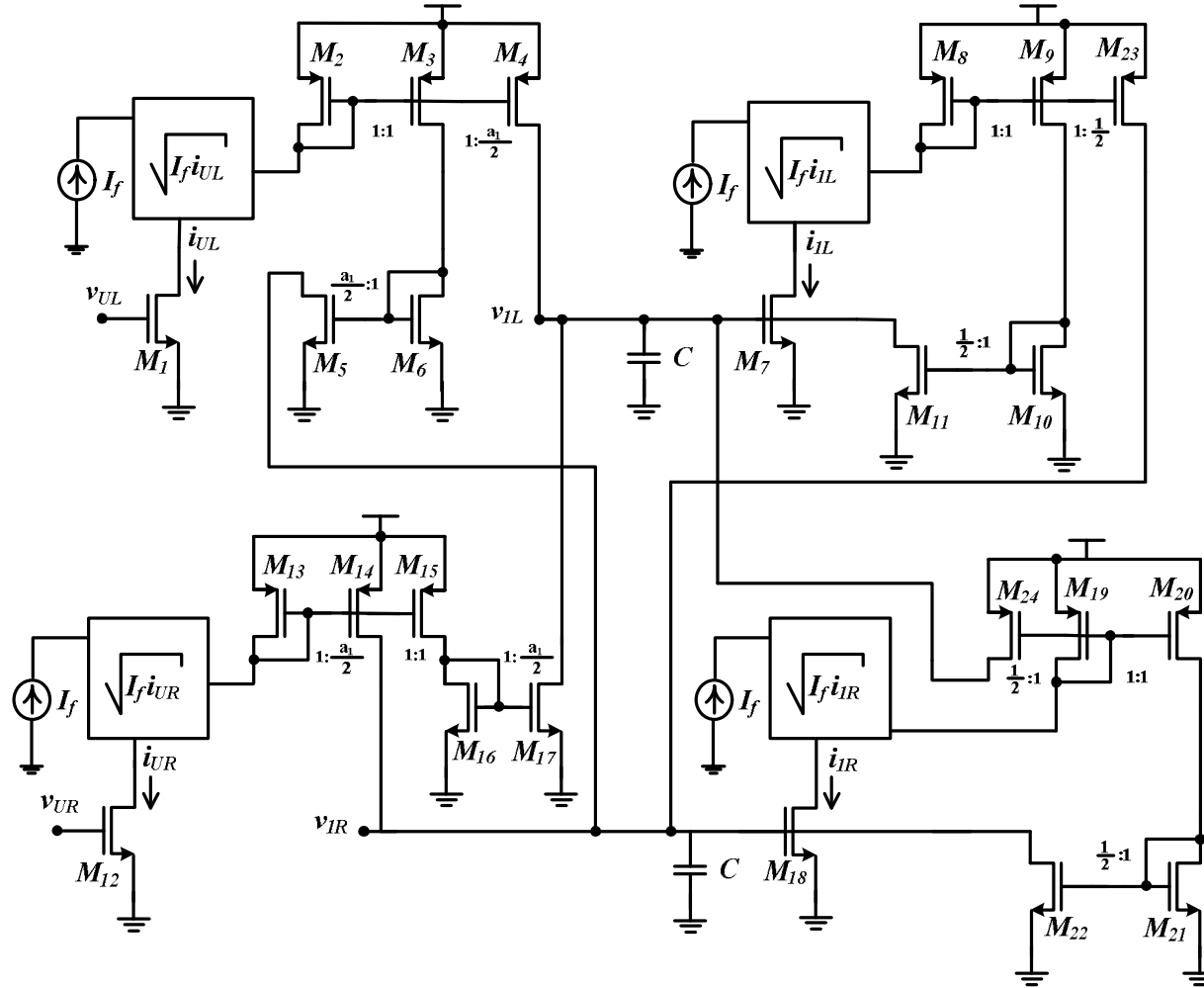
$$y_R = v_{1R}$$

Denklem (6.13)'deki gibi elde edilen birinci dereceden alçak geçiren filtre devresine ait devre denklemleri yalnızca karekök alma bloklarının farklı katsayılar ile çarpılıp toplanması ile elde edilmiştir. Bu durum devre denklemlerinin karekök alma bloğu, akım aynası, kondansatör ve karekök alma bloklarının DC akım girişini sağlayan birbirine eşit değerdeki (I_f) akım kaynaklarının kullanılması ile kolaylıkla gerçekleştirilebilir yapıya dönüşmesini sağlamıştır.

AT-II kullanılarak tasarlanmış olan birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi Şekil 6.2'de verildiği gibi elde edilmiştir. Devre şeklinden de görüldüğü gibi tasarlanan devre herhangi bir kazanç değerinde tüm birinci dereceden alçak geçiren filtre devreleri için geçerlidir. Devrede a_1 kazancına bağlı olarak yalnızca M_4 , M_5 , M_{14} ve M_{17} transistörlerinin akım kopyalama oranları değişmektedir.

6.2.3 Birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

Tez kapsamında önerilen AB sınıfı teori ışığında AT-I ve AT-II kullanılarak tasarlanmış olan birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devreleri sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verildiği gibidir. Tezin bu kısmında tasarlanan bu devrelerin PSpice programı kullanılarak gerçekleştirilmiş olan zaman ve frekans ortamı benzetimleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 6.2: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi

Devrelerin PSpice programında benzetimleri yapılırken karekök alma blokları, akım aynaları, akım kaynağı ve kondansatör elemanları kullanılmıştır. Devrelerin tümünde kullanılan transistörler TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak EK-I’de verilen model gösterimi ile PSpice programına aktarılmıştır. Kullanılan teknoloji doğrultusunda tüm devrelerde kullanılan karekök alma blokları daha önce Şekil 2.6’da verilmiş olan içyapıda tasarlanmıştır ve bu devredeki transistörlerin boyutları tüm tasarımlarda eşit ve Tablo 4.1’de verildiği gibidir.

Tasarlanan devrelerin PSpice benzetim programı yardımıyla performans analizleri yapılırken ilk olarak filtre devrelerinin kazanç değeri ($a_f=1$) olarak seçilmiştir. Bu durumda her bir devrede kullanılan tüm transistörlerin boyutları AT-I ve AT-II için sırasıyla Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1: Birinci dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-I için kullanılan transistör boyutları

Transistör No	W/L [μ m]	Transistör No	W/L [μ m]
M ₂ , M ₄ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₉ , M ₂₀	21/.7	M ₁ , M ₇ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₂ , M ₁₈ , M ₂₁ , M ₂₂	7/.7

Tablo 6.2: Birinci dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-II için kullanılan transistör boyutları

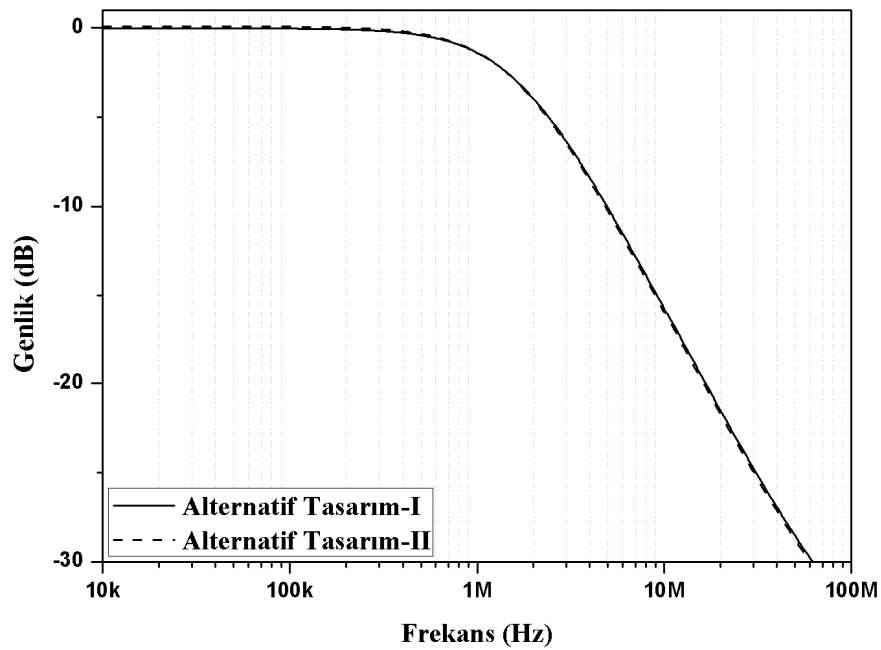
Transistör No	W/L [μ m]	Transistör No	W/L [μ m]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₅ , M ₁₉ , M ₂₀	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₇ , M ₁₀ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₈ , M ₂₁	7/.7
M ₄ , M ₁₄ , M ₂₃ , M ₂₄	10.5/.7	M ₅ , M ₁₁ , M ₁₇ , M ₂₂	3.5/.7

Tasarlanan her bir alçak geçiren karekök ortam filtre devresinde kullanılan tüm kondansatörlerin değerleri birbirine eşit ve 10pF olarak seçilmiştir, yine tüm tasarımlarda I_f akım kaynaklarının değeri de 10 μ A olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında tasarlanan filtre devrelerinin kesim frekansı da 1.45MHz olarak elde

edilmiştir. Devrede besleme gerilimi 1.5V DC iken giriş işareti 55mV tepe değerine sahip bir sinüs işaretidir.

Belirtilen koşullarda PSpice benzetimleri yapılan filtre devrelerinin frekans ortamı analizleri sonucunda genlik ve faz cevapları sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de verildiği gibi elde edilmiştir.

Aynı devre yapıları daha önce belirtilen koşullarda ve kesim frekansında çalıştırıldığında PSpice programı zaman ortamı analizleri sonucunda elde edilen giriş ve çıkış bilgileri ise Şekil 6.5’te verildiği gibidir.

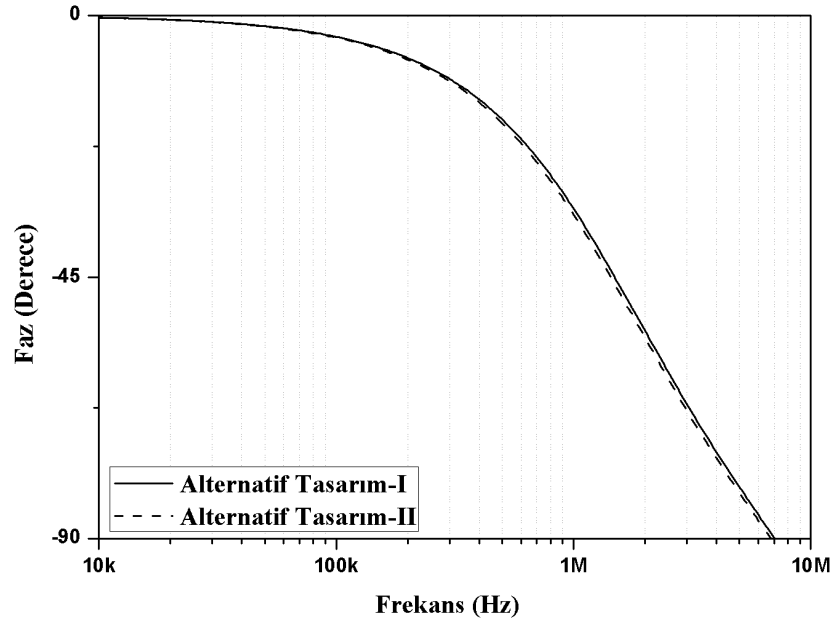


Şekil 6.3: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devrelerinin genlik cevabı
Tasarlanmış olan birinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devrelerinin kesim frekansı devrede kullanılan akım kaynaklarının değerinin değiştirilmesi ile ayarlanabilmektedir. Devrelere ait bu özellik devrelerdeki I_f akım kaynaklarının değerleri $10\mu A$ - $30\mu A$ arasında değiştirilerek frekans ortamı analizleri üzerinde gösterilmiştir. AT-I ve AT-II için elde edilen ayarlanabilir frekans cevabı grafikleri sırasıyla Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de gösterilmiştir.

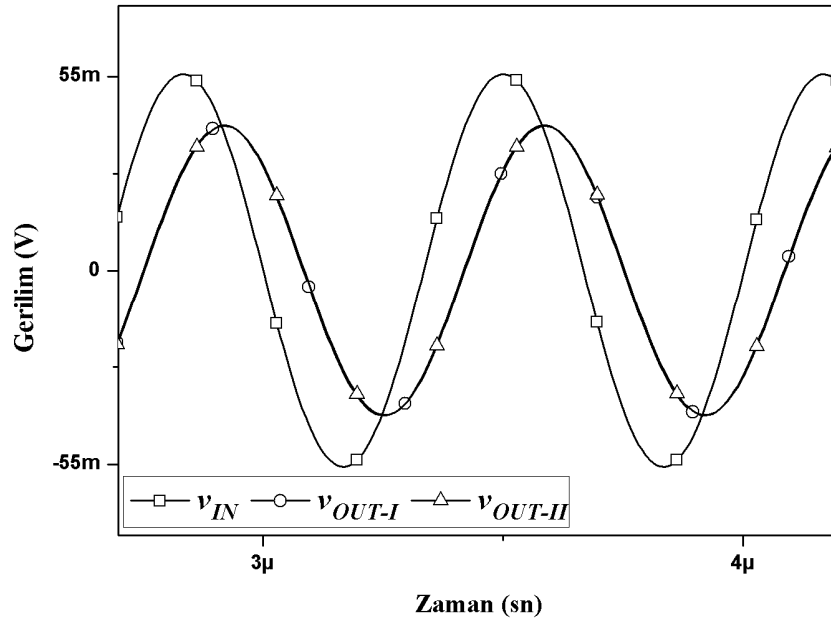
Birinci dereceden AB sınıfı yapıda tasarlanan alçak geçiren filtre devrelerine ait PSpice benzetimi sonucunda belirlenen güç tüketimi değerleri Tablo 6.3’te verilmiştir.

Tablo 6.3: PSpice programından elde edilen alçak geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

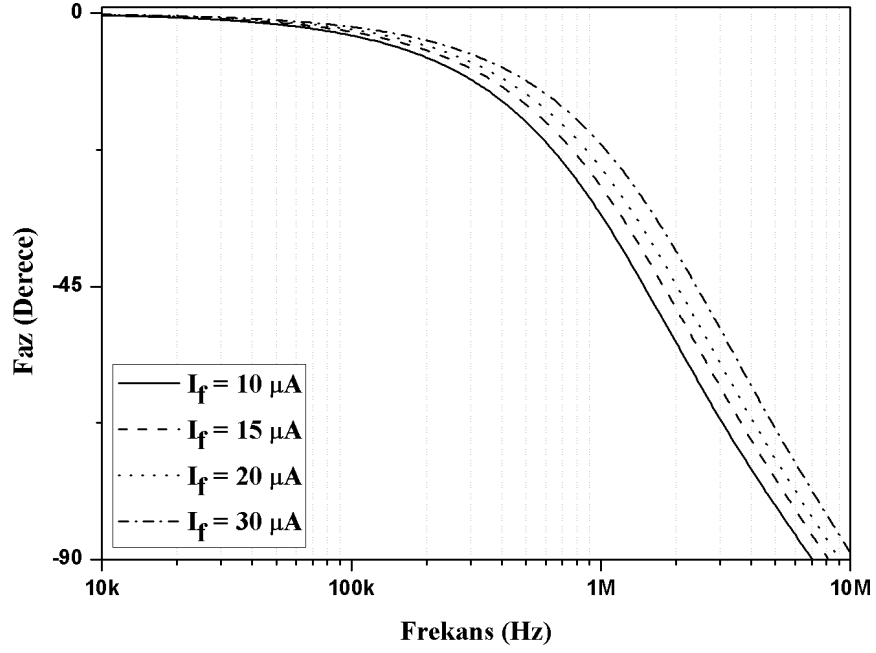
Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	0.969 mW
Alternatif Tasarım-II	2.79 mW



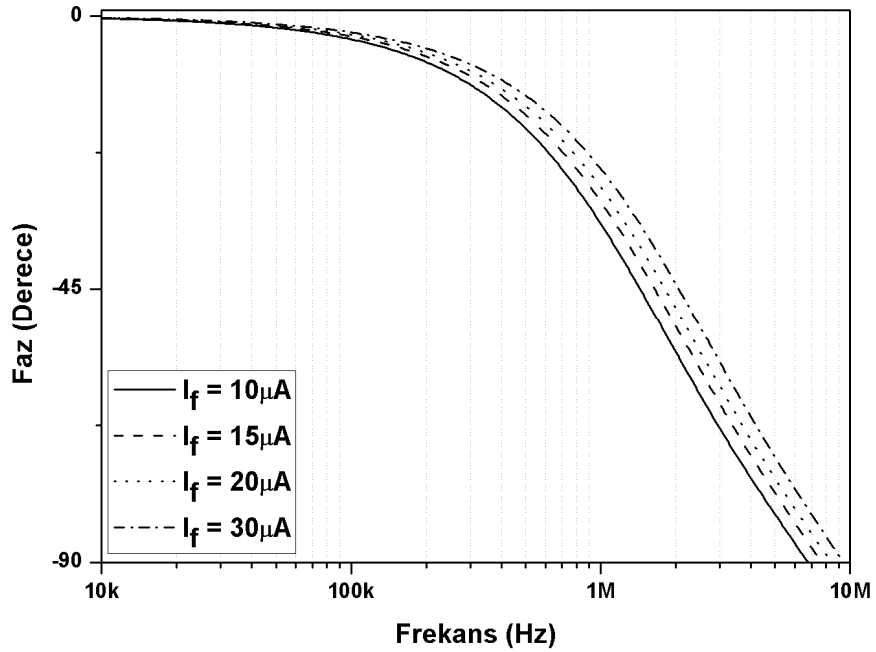
Şekil 6.4: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devrelerinin faz cevabı



Şekil 6.5: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri zaman ortamı cevabı



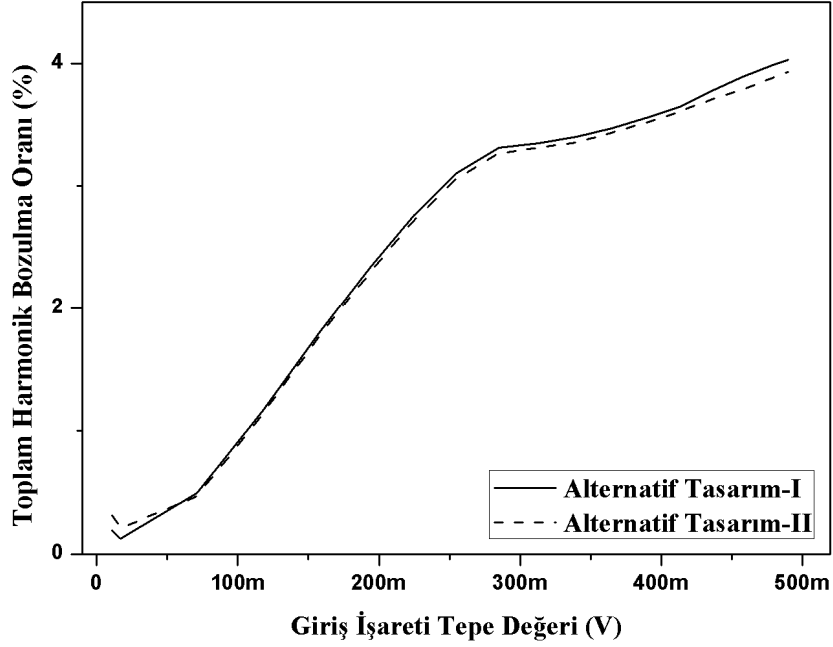
Şekil 6.6: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi (AT-I) ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



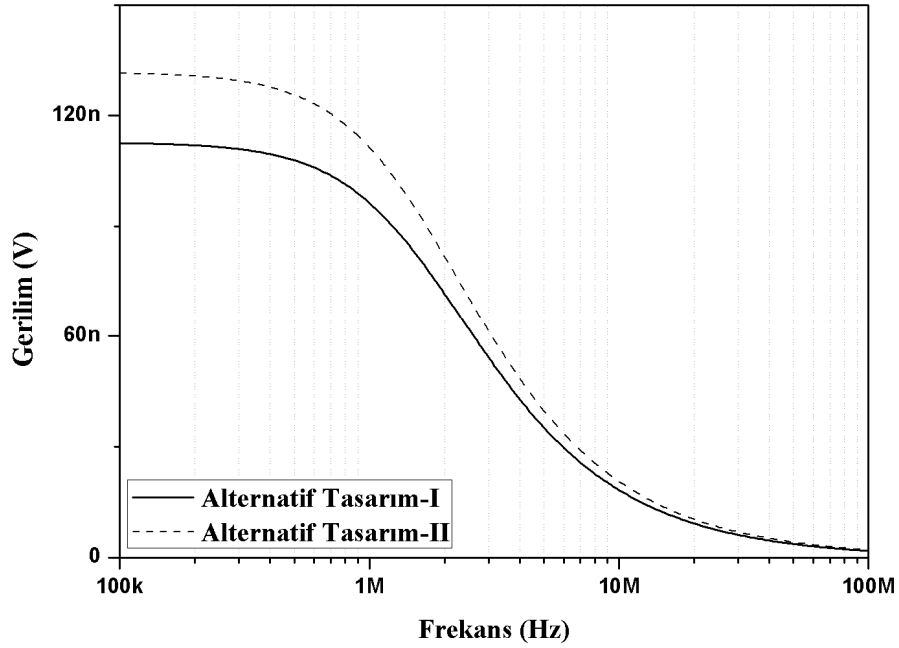
Şekil 6.7: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi (AT-II) ayarlanabilir frekans ortamı cevabı

Son olarak tasarlanan devrelerin PSpice programında bozulma ve gürültü analizleri yapılmıştır. Bunun için ilk olarak giriş işaretinin tepe değeri 10mV ile 490mV arasında parametrik olarak değiştirilmiştir. Giriş işaretinin tepe değerindeki değişime bağlı olarak her iki devrenin çıkış işaretlerinde görülen bozulma oranları % olarak

Şekil 6.8'deki gibi elde edilmiştir. Aynı devrelerde giriş işaretinin tepe değeri 55mV iken devrelerin çıkışlarından elde edilen gürültü seviyeleri ise Şekil 6.9'da verildiği gibidir.



Şekil 6.8: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları



Şekil 6.9: Birinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri çıkış işareti gürültü seviyeleri

6.3 Birinci Dereceden Yüksek Geçiren Filtre Devresi Tasarımı

Birinci dereceden a_1 kazancına sahip yüksek geçiren bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu Denklem (6.14)'de verilmiştir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = a_1 \frac{s}{s + \omega_0} \quad (6.14)$$

Aynı devrenin durum uzayında sentezi yapılırken elde edilen sistem denklemleri Denklem (6.15)'de verildiği gibidir

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\omega_0 x_1 - a_1 \omega_0 u \\ y &= x_1 + a_1 u \end{aligned} \quad (6.15)$$

6.3.1 Birinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi tasarımı-I

Companion-III yöntemi kullanılarak Denklem (6.15)'deki gibi elde edilen sistem denklemlerine AB sınıfı AT-I ile sunulan düzenlemeler uygulandığında elde edilen yeni sistem denklemleri Denklem (6.16)'daki gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1L} &= -\omega_0 x_{1L} - a_1 \omega_0 u_L + \left(\frac{1+a_1}{2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{1+a_1}{2} \right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{1R} &= -\omega_0 x_{1R} + a_1 \omega_0 u_R + \left(\frac{1+a_1}{2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{1+a_1}{2} \right) \omega_0 u_R \\ y_L &= x_{1L} + a_1 v_{uL} \\ y_R &= x_{1R} + a_1 v_{uR} \end{aligned} \quad (6.16)$$

Bu sistem denklemleri üzerinde daha önceki kısımda alçak geçiren filtre devresi tasarımı için kullanılan eşleştirme fonksiyonları kullanılır ve elde edilen denklemlerde aynı düzenlemeler yapılırsa birinci dereceden yüksek geçiren filtre devresine ait devre denklemleri Denklem (6.17)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} C\dot{v}_{1L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} - \left(\frac{a_1-1}{2} \right) \sqrt{I_f i_{U_L}} + \left(\frac{a_1+1}{2} \right) \sqrt{I_f i_{U_R}} \\ C\dot{v}_{1R} &= -\sqrt{I_f i_{1R}} - \left(\frac{a_1-1}{2} \right) \sqrt{I_f i_{U_R}} + \left(\frac{a_1+1}{2} \right) \sqrt{I_f i_{U_L}} \\ y_L &= v_{1L} + a_1 v_{U_L} \\ y_R &= v_{1R} + a_1 v_{U_R} \end{aligned} \quad (6.17)$$

AB sınıfı durum uzayı sentez yöntemi AT-I kullanılarak oluşturulan birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtre devresi; kazancı $a_I > 1$ olduğu durumlar için Şekil 6.10'da verildiği gibidir. Aynı devrede kazanç $a_I = 1$ ise M_6 ve M_{17} transistörlerinin akım kopyalama oranları sıfır olacağı için M_4 , M_5 , M_6 , M_{14} , M_{16} ve M_{17} transistörleri devreden çıkarılır. Devrenin kazancı $a_I < 1$ ise $(a_I - 1)/2$ terimi negatif olacağı için M_5 , M_6 , M_{16} ve M_{17} transistörleri devreden çıkarılarak aynı devrede M_3 transistörünün *drain* ucu akım kopyalama oranı $(1 - a_I)/2$ olarak doğrudan v_{1R} düğümüne, M_{15} transistörünün *drain* ucu akım kopyalama oranı $(1 - a_I)/2$ olacak şekilde doğrudan v_{1L} düğümüne bağlanır.

6.3.2 Birinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi tasarımı-II

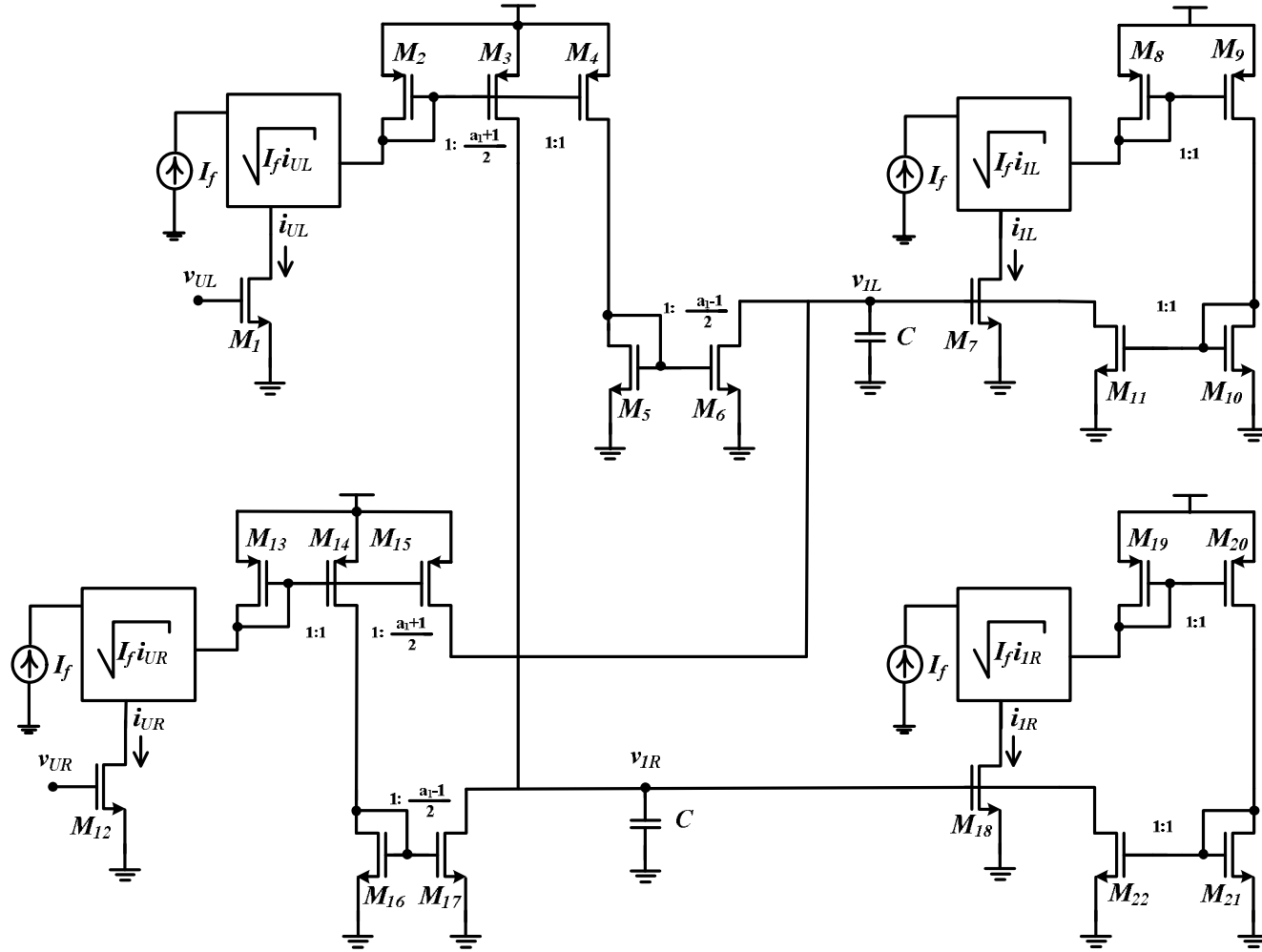
Transfer fonksiyonu Denklem (6.14)'de ve sistem denklemleri Denklem (6.15)'de verilen birinci dereceden yüksek geçiren filtresine Bölüm 5'de önerilmiş olan AT-II yöntemi uygulanırsa Denklem (6.18) elde edilir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1L} &= -\frac{\omega_0}{2}x_{1L} + \frac{\omega_0}{2}x_{1R} - \frac{a_1\omega_0}{2}u_L + \frac{a_1\omega_0}{2}u_R \\ \dot{x}_{1R} &= -\frac{\omega_0}{2}x_{1R} + \frac{\omega_0}{2}x_{1L} - \frac{a_1\omega_0}{2}u_R + \frac{a_1\omega_0}{2}u_L \\ y_L &= x_{1L} + a_1u_L \\ y_R &= x_{1R} + a_1u_R\end{aligned}\quad (6.18)$$

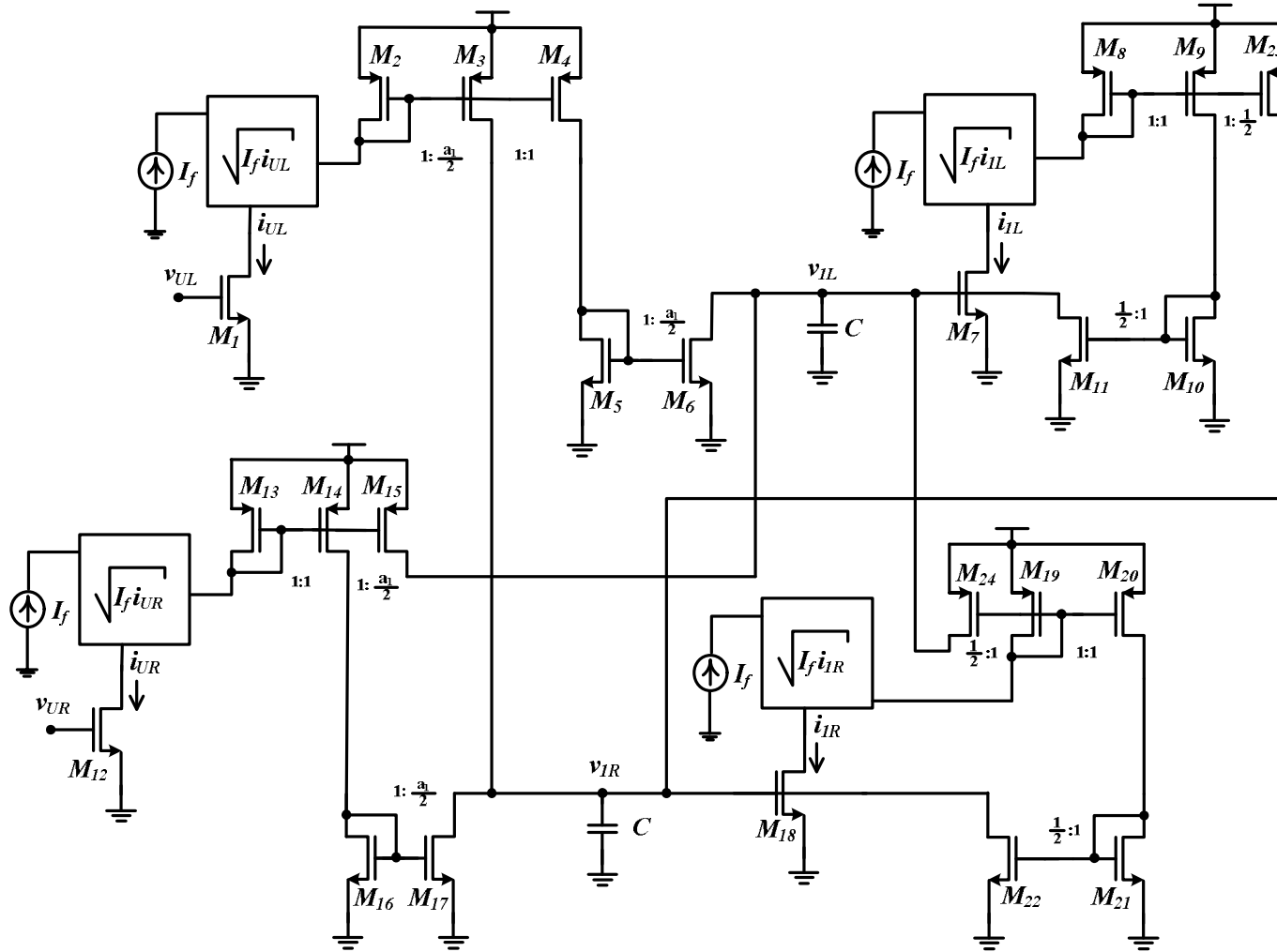
AT-II kullanılarak elde edilen sistem denklemleri üzerinde daha önceki tasarımlarda yapılan düzenlemeler ve kabullenmeler yapılırsa birinci dereceden yüksek geçiren filtre devresine ait devre denklemleri Denklem (6.19)'da verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}C\dot{v}_{1L} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} - \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_L}} + \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_R}} \\ C\dot{v}_{1R} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} - \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_R}} + \frac{a_1}{2}\sqrt{I_f i_{U_L}} \\ y_L &= v_{1L} + a_1v_{U_L} \\ y_R &= v_{1R} + a_1v_{U_R}\end{aligned}\quad (6.19)$$

Transfer fonksiyonu Denklem (6.14)'te verilen birinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi AT-II ile karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak ve KAK yardımıyla Şekil 6.11'de verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 6.10: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi



Şekil 6.11: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinciden yüksek geçiren karekök ortam filtresi

6.3.3 Birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

Tez kapsamında önerilen AB sınıfı teori ışığında AT-I ve AT-II kullanılarak tasarlanmış olan birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtre devreleri sırasıyla Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Tezin bu kısmında tasarlanan bu devrelerin PSpice programı kullanılarak gerçekleştirilmiş olan zaman ortamı ve frekans ortamı analizleri sunulmuştur.

Devrelerin PSpice programında benzetimleri yapılırken kullanılan tüm transistörler EK-I’de verilen TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri ile modellenmiştir. Kullanılan teknoloji doğrultusunda tüm devrelerde kullanılan karekök alma blokları daha önce Şekil 2.6’da verilmiş olan içyapıda ve tüm transistörlerin boyutları Tablo 4.1’de verildiği gibi tasarlanmıştır.

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de devre şekilleri verilen birinci dereceden yüksek geçiren filtrelerine ait PSpice benzetim programı yardımıyla performans analizleri yapılırken bu filtrenin kazanç değeri (a_1) 1 olarak seçilmiştir. Bu koşullar altında her bir devrede kullanılan tüm transistörlerin boyutları AT-I ve AT-II için sırasıyla Tablo 6.4 ve Tablo 6.5’de gösterilmiştir.

Tablo 6.4: Birinci dereceden yüksek geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-I için kullanılan transistör boyutları

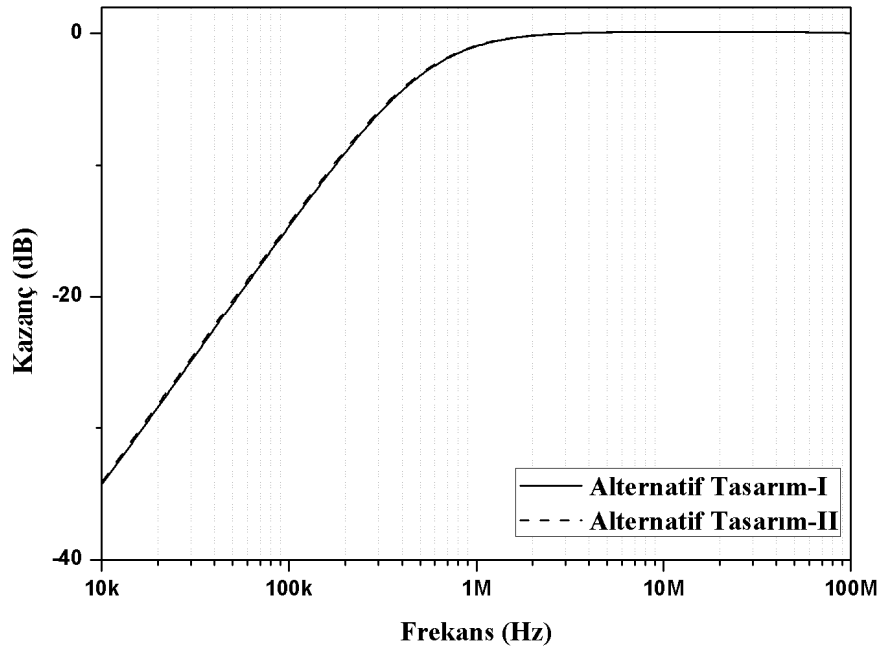
Transistör No	W/L [μ m]	Transistör No	W/L [μ m]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₅ , M ₁₉ , M ₂₀	21/.7	M ₁ , M ₇ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₂ , M ₁₈ , M ₂₁ , M ₂₂	7/.7

Tablo 6.5: Birinci dereceden yüksek geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi AT-II için kullanılan transistör boyutları

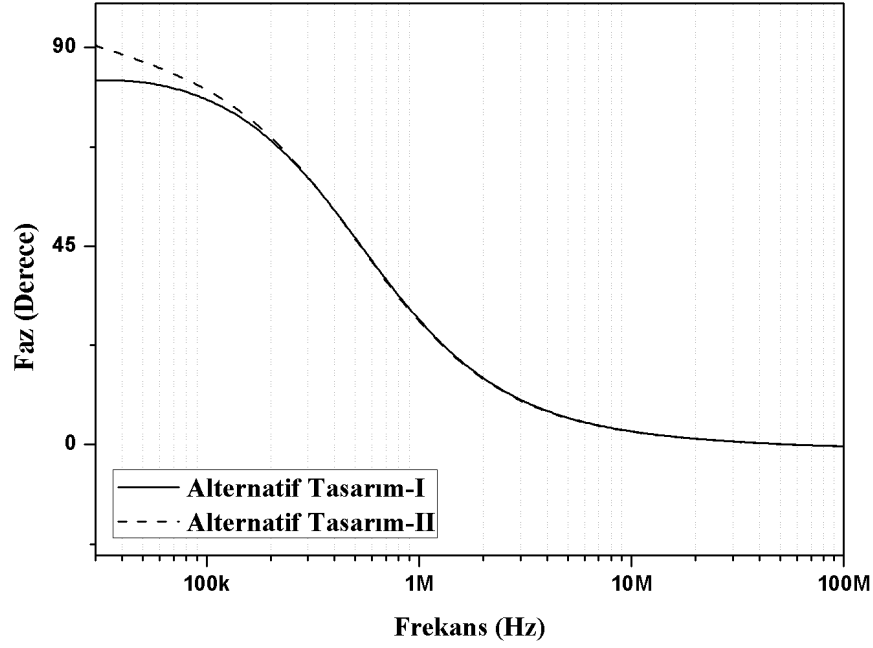
Transistör No	W/L [μ m]	Transistör No	W/L [μ m]
M ₂ , M ₄ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₉ , M ₂₀	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₇ , M ₁₀ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₈ , M ₂₁	7/.7
M ₃ , M ₁₅ , M ₂₃ , M ₂₄	10.5/.7	M ₆ , M ₁₁ , M ₁₇ , M ₂₂	3.5/.7

AB sınıfı yapıda tasarlanan birinci dereceden yüksek geçiren filtre devrelerinde kullanılan tüm kondansatörlerin değerleri birbirine eşit ve 30pF olarak seçilmiştir. Ayrıca, tüm tasarımlarda I_f akım kaynaklarının değeri de 10 μ A olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında tasarlanan filtre devrelerinin kesim frekansı 510 kHz olarak elde edilmiştir. Devrede besleme gerilimi 2.4V iken giriş işareti 47mV tepe değerine sahip bir sinüs işaretidir.

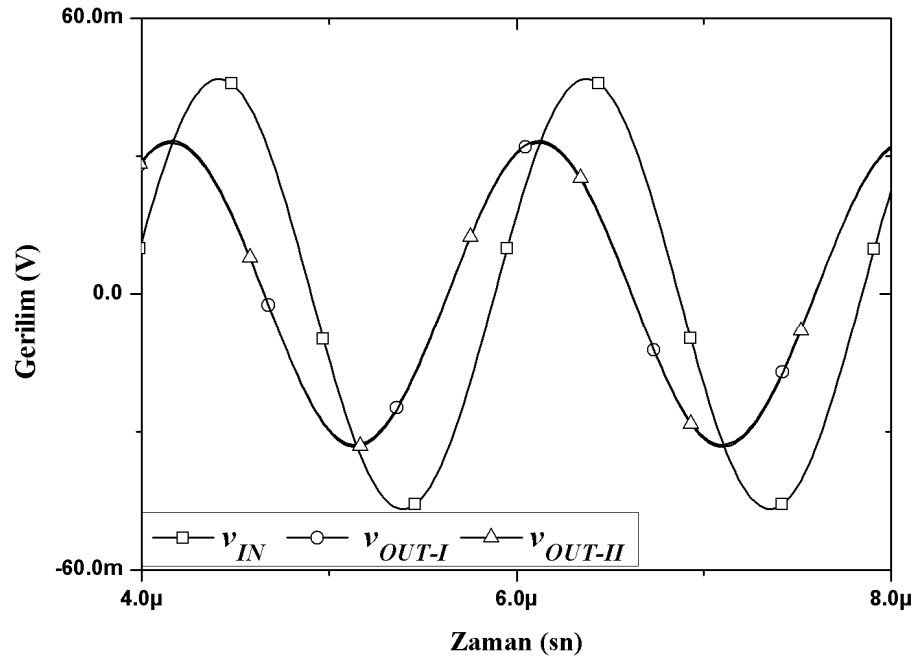
Belirtilen koşullarda PSpice benzetimleri yapılan filtre devrelerinin kesim frekansında çalıştırılması sonucunda frekans ortamı analizlerinden elde edilen genlik ve faz eğrileri sırasıyla Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’de verildiği şekilde elde edilmiştir. Ayrıca aynı devrelerin kesim frekansında çalıştırıldığı durumda PSpice programı zaman ortamı analizleri sonucunda elde edilen giriş ve çıkış bilgileri Şekil 6.14’de verilmiştir.



Şekil 6.12: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devrelerinin genlik cevabı



Şekil 6.13: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devrelerinin faz cevabı



Şekil 6.14: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri zaman ortamı cevabı

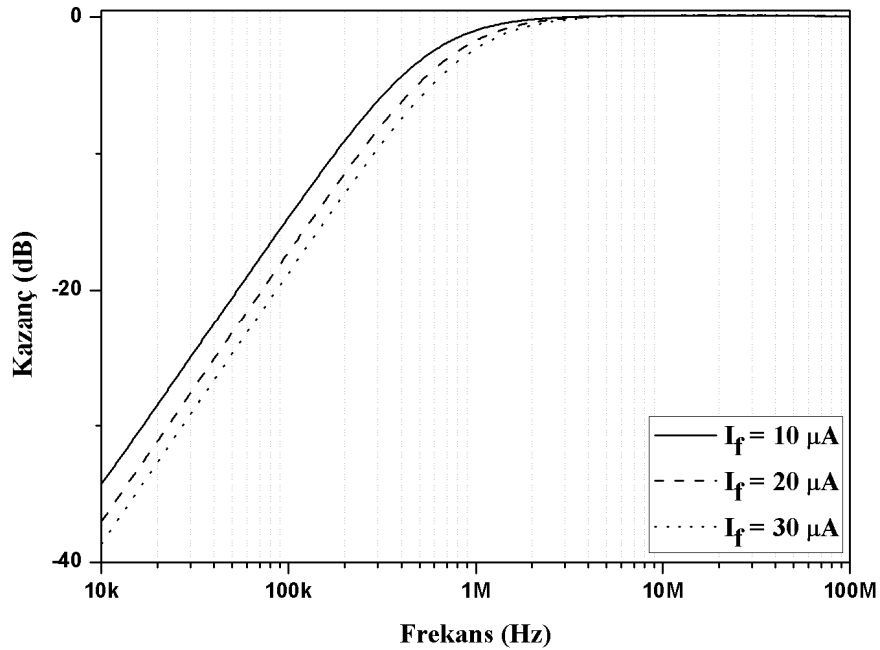
Tasarlanmış olan filtre devrelerinin kesim frekansı devrede kullanılan akım kaynaklarının değerinin değiştirilmesi ile ayarlanabilmektedir. Bu özelliğin gösterilebilmesi için her bir devrede eşit ve sabit $10\mu A$ değerinde olan I_f akım kaynaklarının değerleri sırasıyla $10\mu A$, $20\mu A$ ve $30\mu A$ olarak değiştirilmiş ve bu koşullarda devrelerin PSpice benzetimleri yapılmıştır. Benzetim sonuçlarında AB

sınıfı AT-I ve AT-II devrelerinden elde edilen ayarlanabilir faz cevabı grafikleri sırasıyla Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’da verildiği gibidir. Tasarlanan filtre devrelerine ait PSpice benzetimleri sonucunda elde edilen güç tüketimleri Tablo 6.6’da verilmiştir.

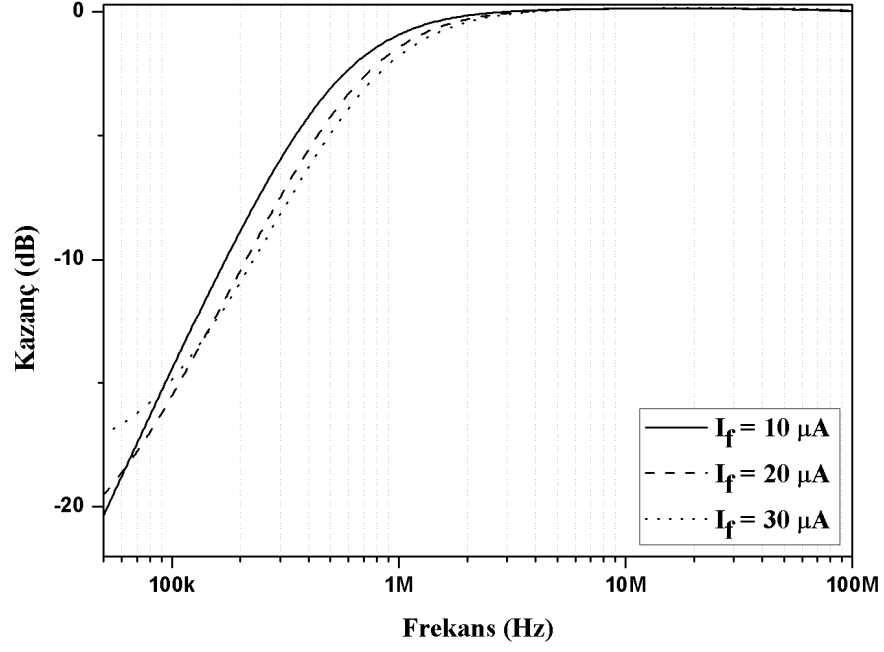
Tablo 6.6: PSpice programından elde edilen yüksek geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	2.42 mW
Alternatif Tasarım-II	3.81 mW

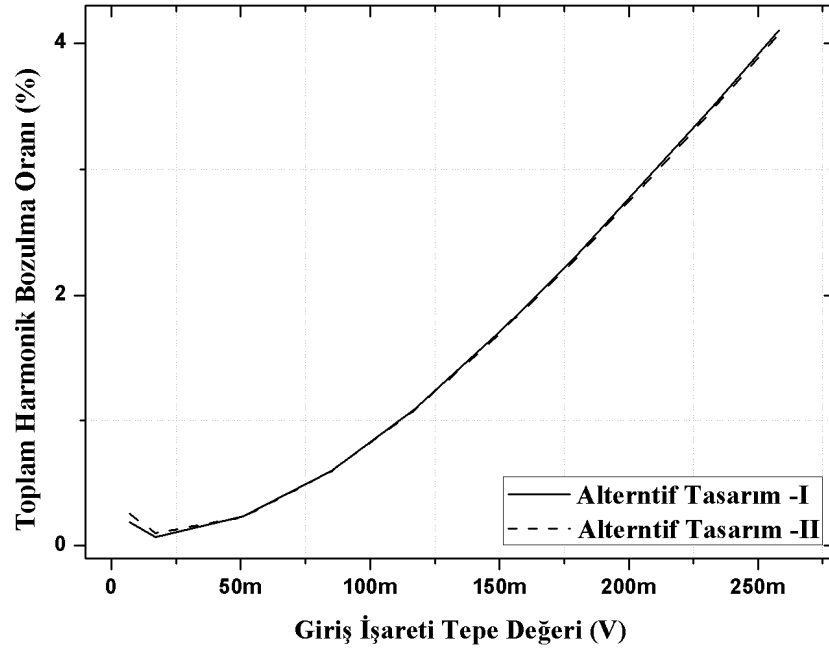
Son olarak tasarlanan devrelerin PSpice programında bozulma ve gürültü analizleri yapılmıştır. Bunun için ilk olarak giriş işaretinin tepe değeri 7mV ile 258mV arasında parametrik olarak değiştirilmiştir. Giriş işaretinin tepe değerindeki değişime bağlı olarak her iki devrenin çıkış işaretlerinde görülen bozulma oranları % olarak Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Aynı devrelerin çıkışlarından elde edilen gürültü seviyeleri de Şekil 6.18’de verilmiştir.



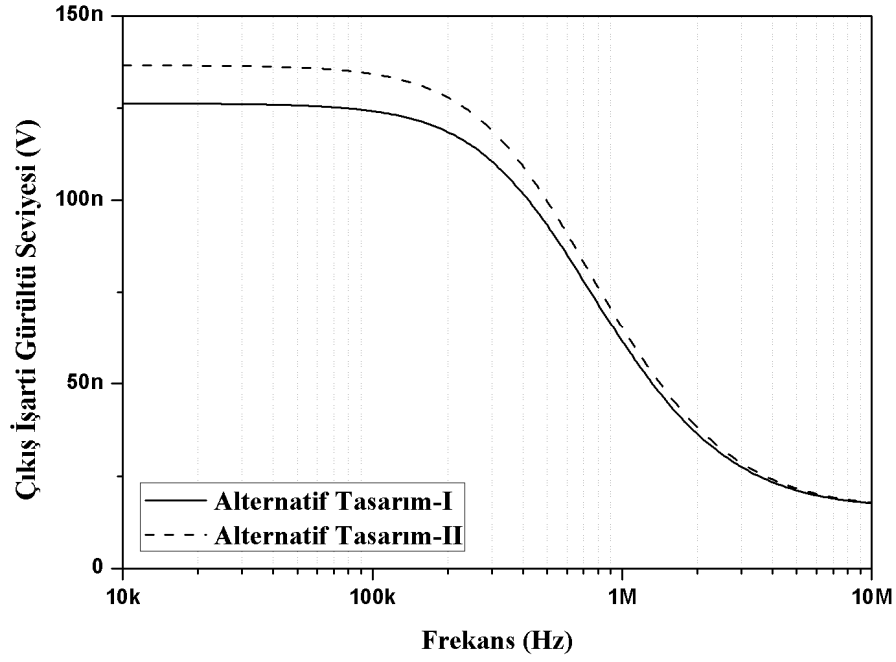
Şekil 6.15: AT-I kullanılarak tasarlanmış birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



Şekil 6.16: AT-II kullanılarak tasarlanmış birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



Şekil 6.17: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları



Şekil 6.18: Birinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri çıkış işareti gürültü seviyeleri

6.4 Birinci Dereceden Tüm Geçiren Filtre Devresi Tasarımı

Birinci dereceden kazanç değeri a_1 ve kesim frekansı ω_0 olan tüm geçiren bir filtre devresinin transfer fonksiyonu Denklem (6.20)'de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = -a_1 \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (6.20)$$

Burada transfer fonksiyonuna *Companion-III* tekniği uygulanırsa tüm geçiren filtre devresinin sistem denklemleri Denklem (6.21)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\omega_0 x_1 + 2a_1 \omega_0 u \\ y &= x_1 - a_1 u \end{aligned} \quad (6.21)$$

Sistem denklemleri Denklem (6.21)'de verildiği gibi elde edilen bir sistemin AB sınıfı yapıda karekök ortam filtresi olarak gerçekleştirilebilmesi için Bölüm 5'te genelleştirilmiş yapıda iki farklı alternatif teori sunulmuştu. Tezin bu kısmında Bölüm 5'te teorisi ortaya konan yöntemin birinci dereceden tüm geçiren filtrelere uygulaması ayrıntılı olarak sunulmuştur.

6.4.1 Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren karekök ortam filtresi tasarımı-I

AT-I kullanılarak Denklem (6.21)'de verilen sistem denklemleri AB sınıfı yapıya dönüştürülürse Denklem (6.22)'de verilen denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1L} &= -\omega_0 x_{1L} + \left(\frac{2a_1+1}{2}\right)\omega_0 u_L - \left(\frac{2a_1-1}{2}\right)\omega_0 u_R \\ \dot{x}_{1R} &= -\omega_0 x_{1R} + \left(\frac{2a_1+1}{2}\right)\omega_0 u_R - \left(\frac{2a_1-1}{2}\right)\omega_0 u_L \\ y_L &= x_{1L} - a_1 u_L \\ y_R &= x_{1R} - a_1 u_R\end{aligned}\tag{6.22}$$

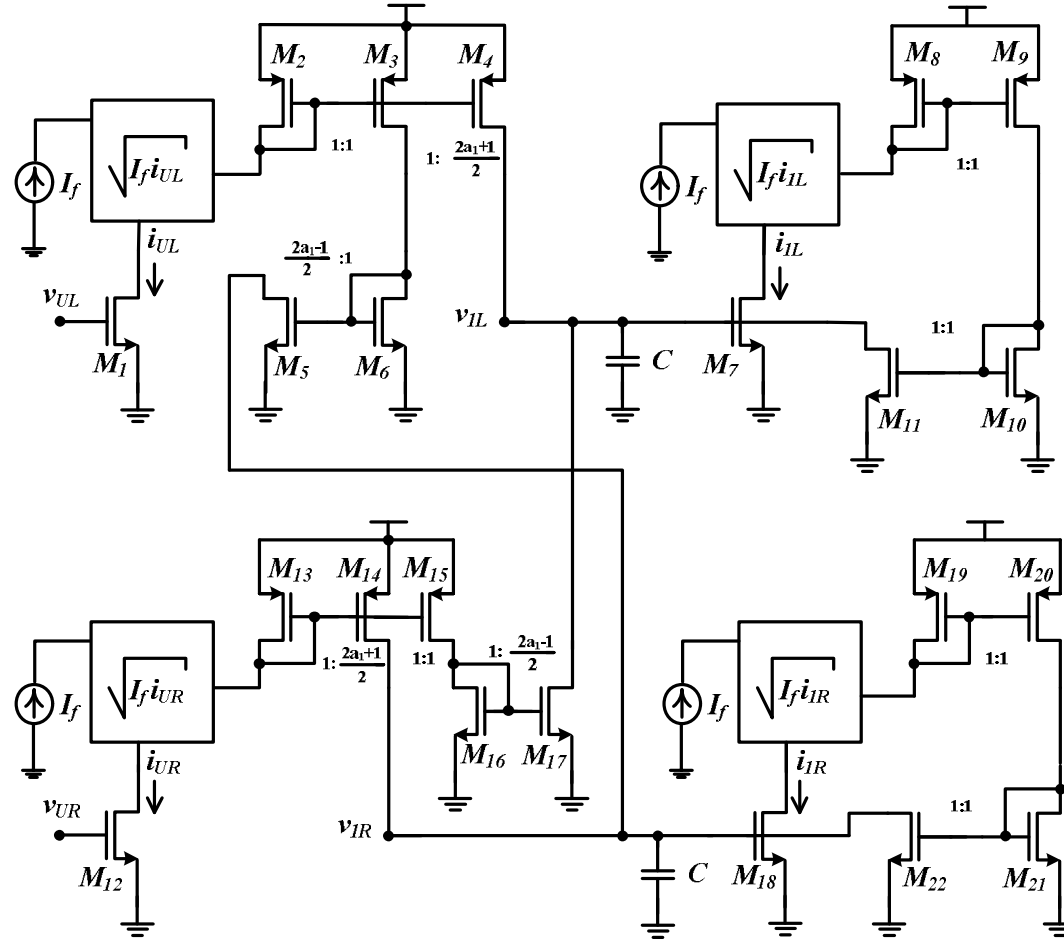
Bu sistem denklemleri üzerinde tezin daha önceki kısımlarında kullanılan eşleştirme fonksiyonları kullanılır ve elde edilen denklemlerde benzer düzenlemeler yapılırsa birinci dereceden tüm geçiren filtre devresine ait devre denklemleri Denklem (6.23)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}C_{1L}\dot{v}_{1L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} + \left(\frac{2a_1+1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_L}} - \left(\frac{2a_1-1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_R}} \\ C_{1R}\dot{v}_{1R} &= -\sqrt{I_f i_{1R}} + \left(\frac{2a_1+1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_R}} - \left(\frac{2a_1-1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_L}} \\ y_L &= v_{1L} - a_1 v_{U_L} \\ y_R &= v_{1R} - a_1 v_{U_R}\end{aligned}\tag{6.23}$$

Denklem (6.23)'deki gibi elde edilen devre denklemlerine göre karekök alma bloğu, akım aynası, akım kaynağı ve kondansatör elemanları kullanılarak tasarlanmış birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresi Şekil 6.19'da verildiği gibidir.

6.4.2 Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren karekök ortam filtresi tasarımı-II

Transfer fonksiyonu Denklem (6.20)'de verilen birinci dereceden tüm geçiren filtresine ait sistem denklemleri Denklem (6.21)'de verildiği gibidir. Bu sistem denklemlerine Bölüm 5'te önerilmiş olan AT-II uygulanırsa sistem denklemlerinin son hali Denklem (6.24)'de verildiği gibi olur.



Şekil 6.19: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1L} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1L} + \frac{\omega_0}{2} x_{1R} + a_1 \omega_0 u_L - a_1 \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{1R} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1R} + \frac{\omega_0}{2} x_{1L} + a_1 \omega_0 u_R - a_1 \omega_0 u_L \\
y_L &= x_{1L} - a_1 u_L \\
y_R &= x_{1R} - a_1 u_R
\end{aligned} \tag{6.24}$$

AT-II kullanılarak elde edilen sistem denklemleri üzerinde daha önceki tasarımlarda yapılan düzenlemeler ve kabullenmeler yapılırsa birinci dereceden tüm geçiren filtre devresine ait devre denklemleri Denklem (6.25)'de verildiği gibi elde edilir.

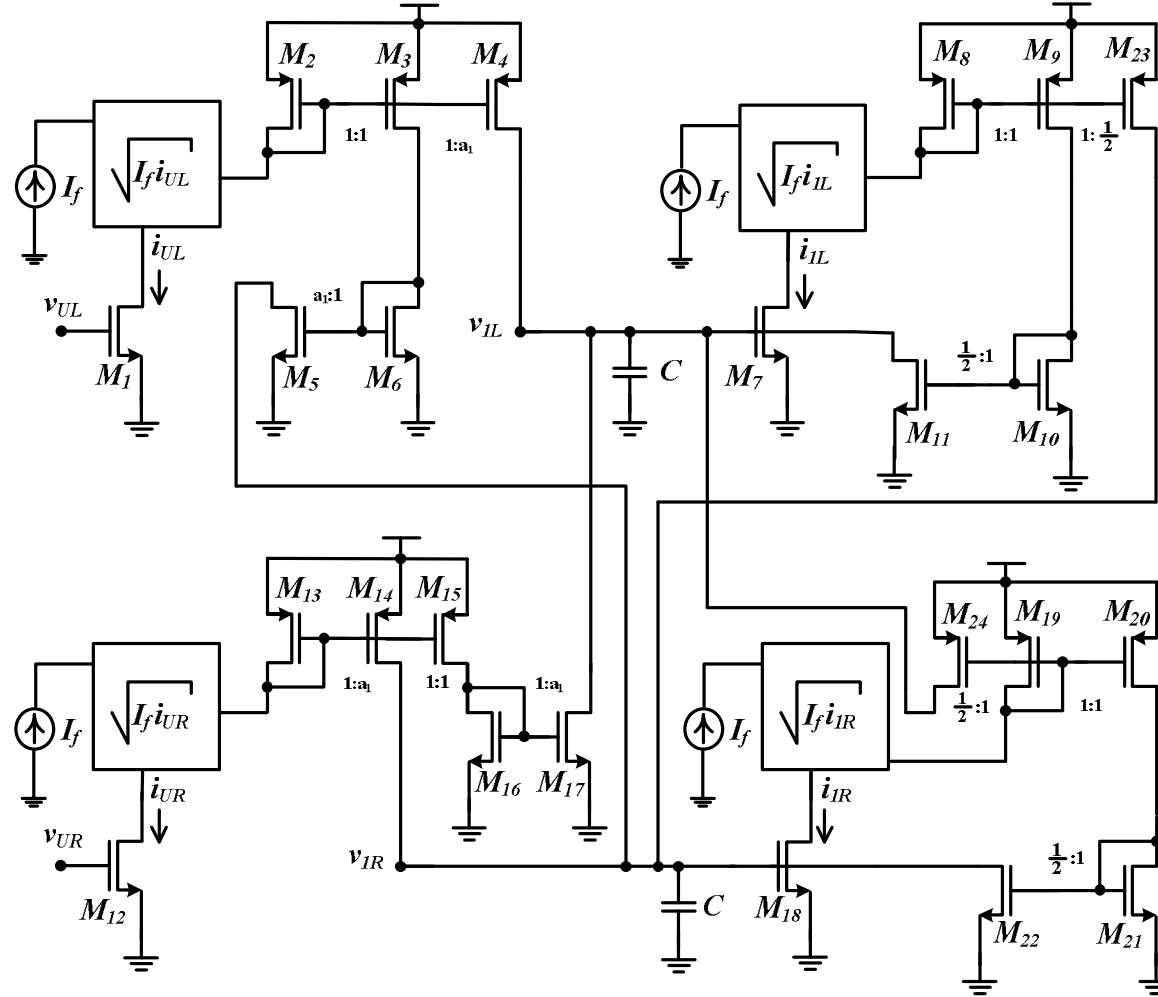
$$\begin{aligned}
C_{1L} \dot{v}_{1L} &= -\frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1R}} + a_1 \sqrt{I_f i_{U_L}} - a_1 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C_{1R} \dot{v}_{1R} &= -\frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1L}} + a_1 \sqrt{I_f i_{U_R}} - a_1 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_L &= v_{1L} - a_1 v_{U_L} \\
y_R &= v_{1R} - a_1 v_{U_R}
\end{aligned} \tag{6.25}$$

Devre denklemleri Denklem (6.25)'de görüldüğü gibi olan birinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtre devresine ait devre yapısı karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak ve KAK yardımıyla Şekil 6.20'de verildiği gibi elde edilmiştir.

6.4.3 Birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

AB sınıfı yapının karekök ortam filtrelerine uygulanması sonucu elde edilen iki farklı birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresi Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de gösterilmiştir.

Tasarlanan bu devrelerin performansları PSpice benzetim programı kullanılarak incelenmiştir. Bunun için ilk olarak devrelerin tümü sırasıyla PSpice programı Netlist editöründe tanımlanmış ve analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler tüm tasarımların kazanç değeri $a_I=1$ seçilerek yapılmıştır. Devrede kullanılan tüm MOS transistörler EK-I'de verilen TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan teknolojiye ve tasarlanan filtrenin kazanç değerine göre devre yapılarında kullanılan transistörlerin boyutları da değişmektedir. Tasarlanan tüm geçiren filtre devrelerinin benzetimleri yapılırken kullanılan transistör boyutları Tablo 6.7 ve Tablo 6.8'de verildiği gibidir.



Şekil 6.20: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi

Tablo 6.7: Şekil 6.19’da verilen birinci dereceden tüm geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi transistör boyutları

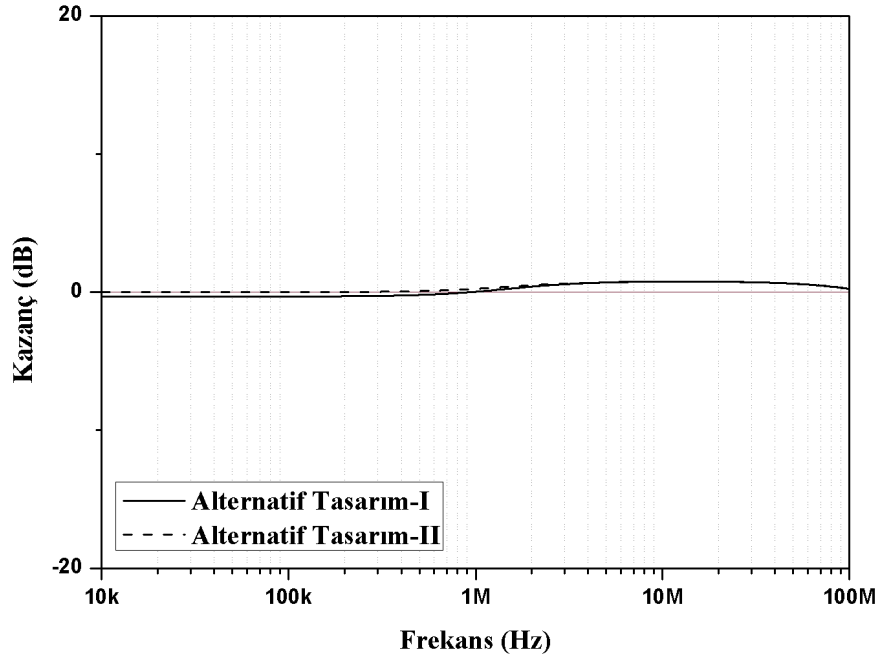
Transistör No	W/L [μm]	Transistör No	W/L [μm]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₅ , M ₁₉ , M ₂₀	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₇ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₈ , M ₂₁ , M ₂₂	7/.7
M ₄ , M ₁₄	31.5/.7	M ₅ , M ₁₇	3.5/.7

Tablo 6.8: Şekil 6.20’de verilen birinci dereceden tüm geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresi transistör boyutları

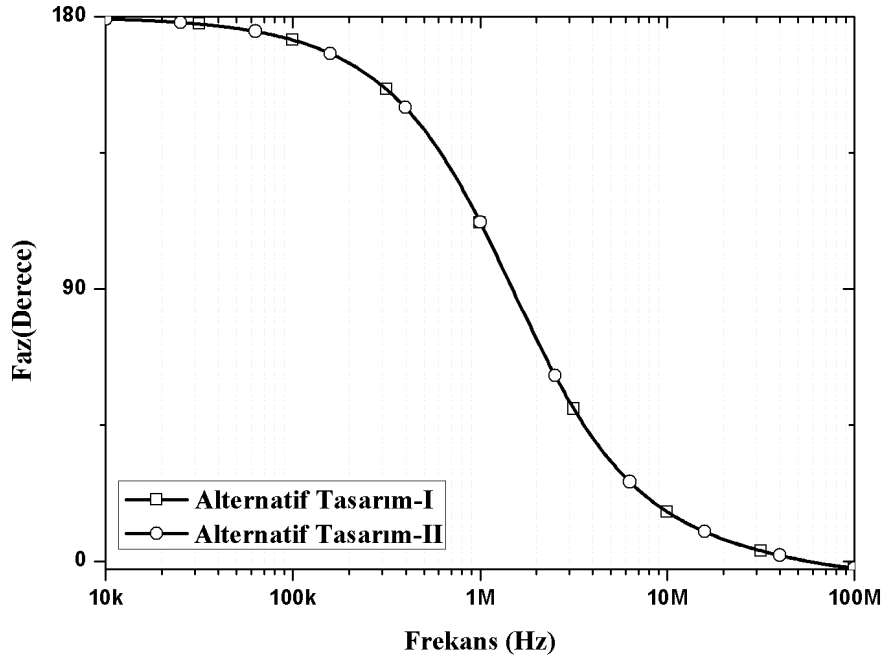
Transistör No	W/L [μm]	Transistör No	W/L [μm]
M ₂ , M ₃ , M ₄ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₁₉ , M ₂₀	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₆ , M ₇ , M ₁₀ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₇ , M ₁₈ , M ₂₁	7/.7
M ₂₃ , M ₂₄	10.5/.7	M ₁₁ , M ₂₂	3.5/.7

Tasarlanan birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtreleri besleme gerilimi 1.5V’tur. Devrelerdeki her bir kondansatör değeri 10pF ve kullanılan her bir bağımsız akım kaynağının değeri de 10 μ A olarak seçilmiştir. Giriş işareti olarak 50mV tepe değerine sahip sinüs işareti uygulanan devrelerin kesim frekansı 1.47 MHz’dir.

Tasarlanan filtre devreleri kesim frekansında çalıştırıldığında ve 10kHz ile 100MHz arasında frekans analizleri yapıldığında elde edilen genlik cevabı ve faz cevabı eğrileri Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de verildiği gibidir.

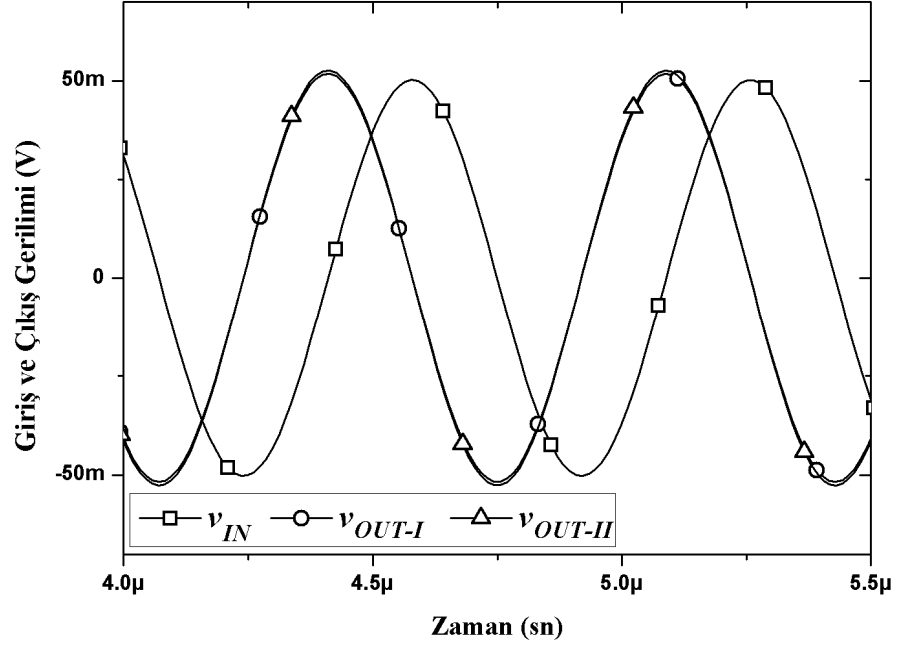


Şekil 6.21: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devrelerinin genlik cevabı



Şekil 6.22: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devrelerinin faz cevabı

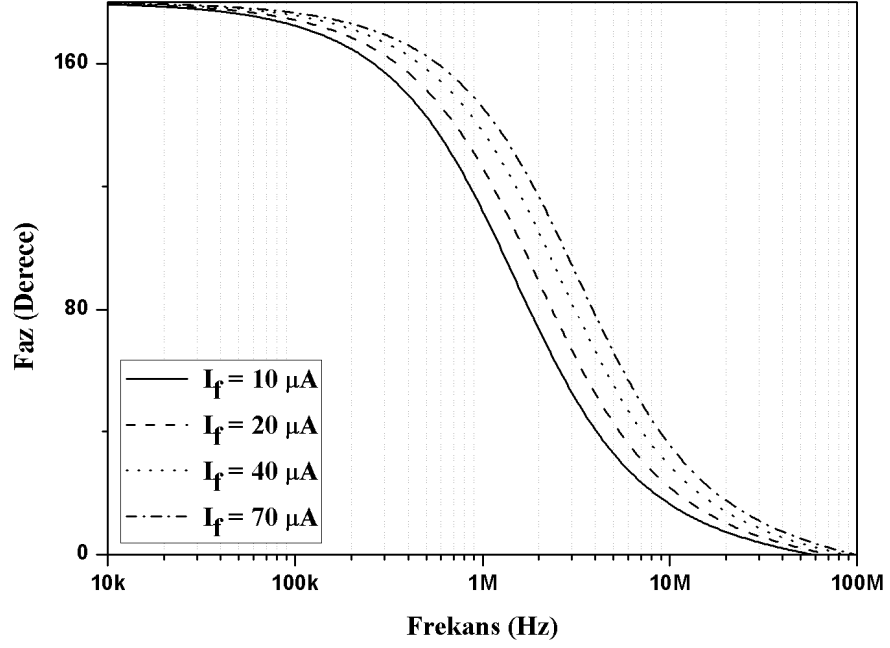
Aynı koşullarda çalıştırılan birinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devrelerine ait zaman ortamı analizi sonucunda elde edilen giriş ve çıkış gerilimi bilgileri Şekil 6.23'te verildiği gibidir.



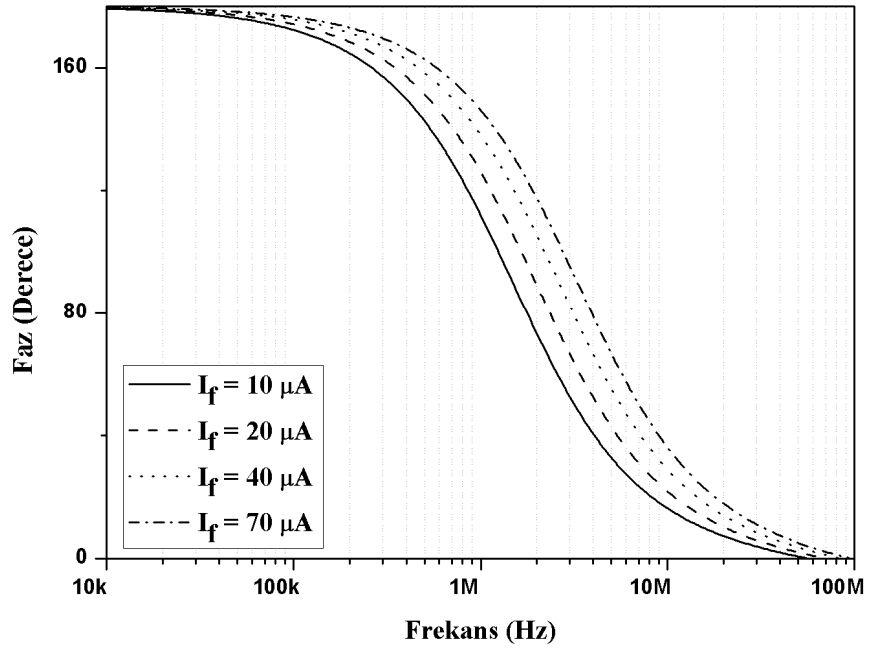
Şekil 6.23: Birinci dereceden tüm geçiren filtre devrelerine ait zaman ortamı cevabı
 Daha önceki tasarımlarda olduğu gibi tüm geçiren karakteristiğinde tasarlanan karekök ortam filtrelerinin kesim frekansı da devrede kullanılan akım kaynaklarının değeri ile ayarlanabilir özelliğindedir. Bu kapsamda tasarlanan tüm geçiren filtre devrelerinde kullanılan her bir akım kaynağının değeri $10\mu\text{A}$ ile $70\mu\text{A}$ arasında değiştirilmiş ve sırasıyla Şekil 6.24 ve Şekil 6.25'te verilen faz eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca bu devrelerin her birinin PSpice benzetimleri sonucunda elde edilen güç tüketimleri de Tablo 6.9'da verildiği gibi ölçülmüştür.

Tablo 6.9: PSpice programından elde edilen tüm geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	2.21 mW
Alternatif Tasarım-II	2.26 mW



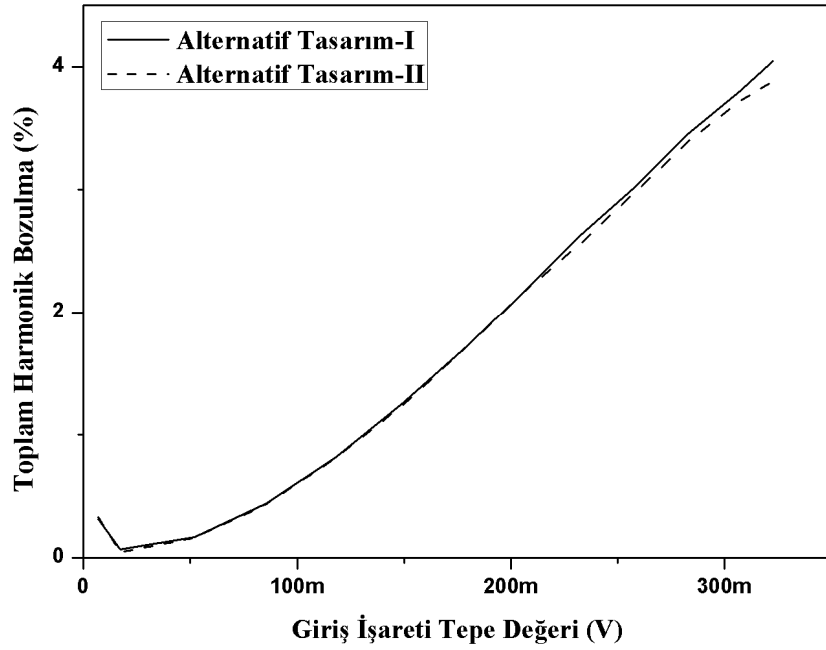
Şekil 6.24: Şekil 6.19'daki gibi tasarlanan birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



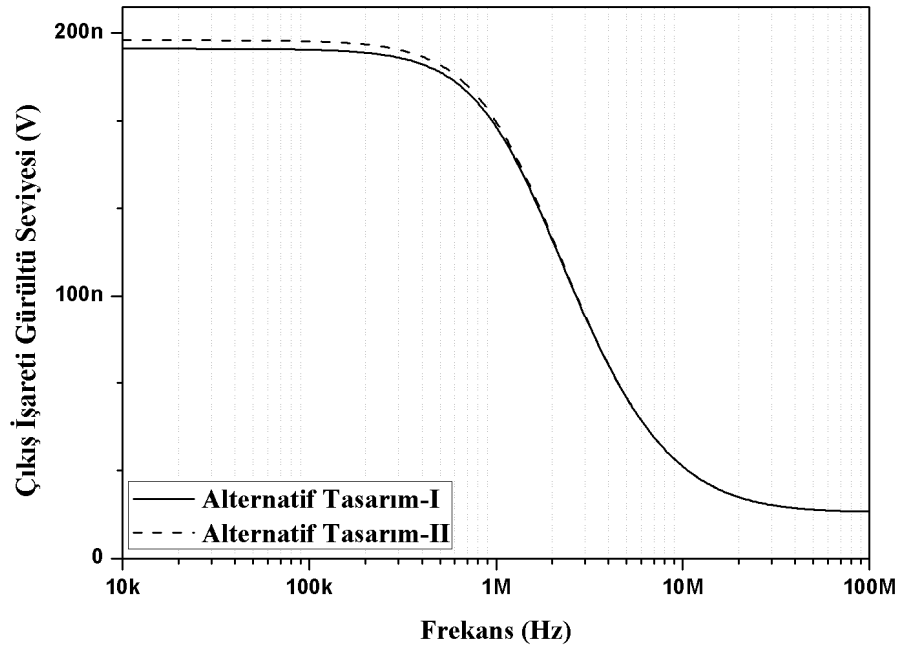
Şekil 6.25: Şekil 6.20'deki gibi tasarlanan birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı

Son olarak tasarlanan devrelerin PSpice programında bozulma ve gürültü analizleri yapılmıştır. Bunun için ilk olarak giriş işaretinin tepe değeri 7mV ile 320mV arasında değiştirilmiştir. Giriş işaretinin tepe değerindeki değişime bağlı olarak her iki devrenin çıkış işaretlerinde görülen bozulma oranları % olarak Şekil 6.26'da

görüldüğü gibi elde edilmiştir. Aynı devrelerin çıkış işaretinden ölçülen gürültü seviyesi ise Şekil 6.27’de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.26: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları



Şekil 6.27: Birinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devreleri çıkış işareti gürültü seviyeleri

7. İKİNCİ DERECEDEDEN AB SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMALARI

7.1 Giriş

Tezin bu bölümünde AB sınıfı yapıda karekök ortam filtre tasarımına yönelik önceki bölümlerde önerilmiş olan teoriye ait ikinci dereceden beş farklı tür filtre devresi uygulaması sunulacaktır. Uygulaması yapılacak olan devreler sırasıyla;

- Alçak geçiren filtre
- Yüksek geçiren filtre
- Band geçiren filtre
- Çentik filtre
- Tüm geçiren filtredir.

Yapılacak olan her bir uygulama Bölüm 5'te önerilmiş olan AT-I ve AT-II'ye göre tasarlanarak sunulacaktır. İlk uygulama olarak birinci dereceden alçak geçiren filtre transfer fonksiyonundan devre denklemine kadar olan işlem basamakları ayrıntılı olarak verilmiş ve daha sonra devre denklemleri kullanılarak istenen devre yapısı gösterilmiştir. Daha sonraki uygulamalar benzer işlemler içerdiği için yalnızca transfer fonksiyonu ve devre denklemleri ile tasarlanan devre yapıları sunulmuştur. Elde edilen her bir karekök ortam filtresine ait PSpice programı zaman ortamı ve frekans ortamı benzetimleri tasarımların son kısımlarında sunulmuştur.

7.2 İkinci Dereceden Alçak Geçiren Karekök Ortam Filtre Devresi Tasarımı

İkinci dereceden alçak geçiren bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu Denklem (7.1)'de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_1 \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (7.1)$$

Denklem (7.1)'de verilen transfer fonksiyonuna *Companion-III* tekniği uygulanırsa elde edilen sistem denklemleri Denklem (7.2)'de verildiği gibidir

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 - \frac{\omega_0}{Q} x_2 + a_1 \omega_0 u \\ y &= x_1\end{aligned}\tag{7.2}$$

7.2.1 İkinci dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I

Bölüm 5'te geliştirilen teori çerçevesinde AB sınıfı yapıda ve karekök ortamda herhangi bir filtre devresinin tasarlanabilmesi için AT-I ve AT-II kullanılabilir. Tezin bu kısmında tasarlanacak olan ikinci dereceden alçak geçiren filtre devresi ilk olarak AT-I kullanılarak tasarlanmıştır.

Denklem (7.2)'deki gibi elde edilen sistem denklemlerine AT-I ile önerilen işlemler uygulanırsa elde edilen yeni sistem denklemleri Denklem (7.3)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1L} &= \omega_0 x_{2L} - \left(\frac{\omega_0}{2}\right) u_L - \left(\frac{\omega_0}{2}\right) u_R \\ \dot{x}_{2L} &= -\omega_0 x_{1L} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2L} + a_1 \omega_0 u_L + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q}\right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q}\right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{1R} &= \omega_0 x_{2R} - \left(\frac{\omega_0}{2}\right) u_L - \left(\frac{\omega_0}{2}\right) u_R \\ \dot{x}_{2R} &= -\omega_0 x_{1R} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2R} + a_1 \omega_0 u_R + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q}\right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q}\right) \omega_0 u_R \\ y_L &= x_{1L} \\ y_R &= x_{1R}\end{aligned}\tag{7.3}$$

AB sınıfı yapıda Denklem (7.3)'de verildiği gibi elde edilen sistem denklemlerinden devre denklemlerinin elde edilebilmesi için Denklem (7.4)'de verilen fonksiyonlar kullanılır.

$$\begin{aligned}
u_L = v_{U_L} &= \sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH}; & u_R = v_{U_R} &= \sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \\
x_{1L} = v_{1L} &= \sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH}; & x_{1R} = v_{1R} &= \sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \\
x_{2L} = v_{2L} &= \sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH}; & x_{2R} = v_{2R} &= \sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH}
\end{aligned} \tag{7.4}$$

Denklem (7.3)'de verilen sistem denklemlerinde yer alan her bir giriş işareti ve durum değişkeni terimi için Denklem (7.4)'de verilen eşdeğerleri yerlerine konursa Denklem (7.5)'de verilen denklemler elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{1L} &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{2L} &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{Q} \left(\sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad + \left(\frac{Q+1+a_1Q}{2Q} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \left(\frac{Q+1-a_1Q}{2Q} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{1R} &= \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{2R} &= -\omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{Q} \left(\sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad + \left(\frac{Q+1+a_1Q}{2Q} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \left(\frac{Q+1-a_1Q}{2Q} \right) \omega_0 \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right)
\end{aligned} \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}
y_L &= v_{1L} \\
y_R &= v_{1R}
\end{aligned}$$

Burada kullanılan her bir β katsayısı Denklem (7.6)'da verildiği gibidir.

$$\beta = \frac{\mu_0 C_{ox} W}{2L} \tag{7.6}$$

Denklem (7.5)'de verilen ve düğüm gerilimlerinin türevini içeren eşitliklerin her iki tarafını C katsayısı ile çarpılırsa elde edilen yeni denklemler aşağıda verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{2L}}{\beta}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_L}}{\beta}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_R}}{\beta}} \\
C\dot{v}_{2L} &= -\sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{1L}}{\beta}} - \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{2L}}{\beta}} \\
&\quad + \left(\frac{Q+1+a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_L}}{\beta}} + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_R}}{\beta}} \\
C\dot{v}_{1R} &= \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{2R}}{\beta}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_L}}{\beta}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_R}}{\beta}} \\
C\dot{v}_{2R} &= -\sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{1R}}{\beta}} - \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{2R}}{\beta}} \\
&\quad + \left(\frac{Q+1+a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_R}}{\beta}} + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{\frac{\omega_0^2 C^2 i_{U_L}}{\beta}} \\
y_L &= v_{1L} \\
y_R &= v_{1R}
\end{aligned} \tag{7.7}$$

Elde edilen devre denklemlerinde Denklem (7.8)'de verilen kabullenme yapılırsa denklemlerinin son şekli Denklem (7.9)'da verildiği gibi olur.

$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta} \tag{7.8}$$

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= \sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{U_L}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{2L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} - \frac{1}{Q} \sqrt{I_f i_{2L}} + \left(\frac{Q+1+a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{I_f i_{U_L}} + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{1R} &= \sqrt{I_f i_{2R}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{U_L}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{2R} &= -\sqrt{I_f i_{1R}} - \frac{1}{Q} \sqrt{I_f i_{2R}} + \left(\frac{Q+1+a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{I_f i_{U_R}} + \left(\frac{Q+1-a_1 Q}{2Q} \right) \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_L &= v_{1L} \\
y_R &= v_{1R}
\end{aligned} \tag{7.9}$$

Denklem (7.9)'da verildiği gibi elde edilen devre denklemleri yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.1'de verildiği gibi tasarlanmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan devre

yapısında iki numaralı düğüm noktaları ile v_{uL} ve v_{uR} girişleri ile beslenen karekök alma blokları arasındaki bağlantıyı sağlayan akım aynalarının akım kopyalama oranları a_1 kazancı ile orantılı olarak değişmektedir. Bu sebepten Şekil 7.1’de kullanılan akım aynalarının, akım kopyalama oranlarına dikkat edilmesi gerekmektedir.

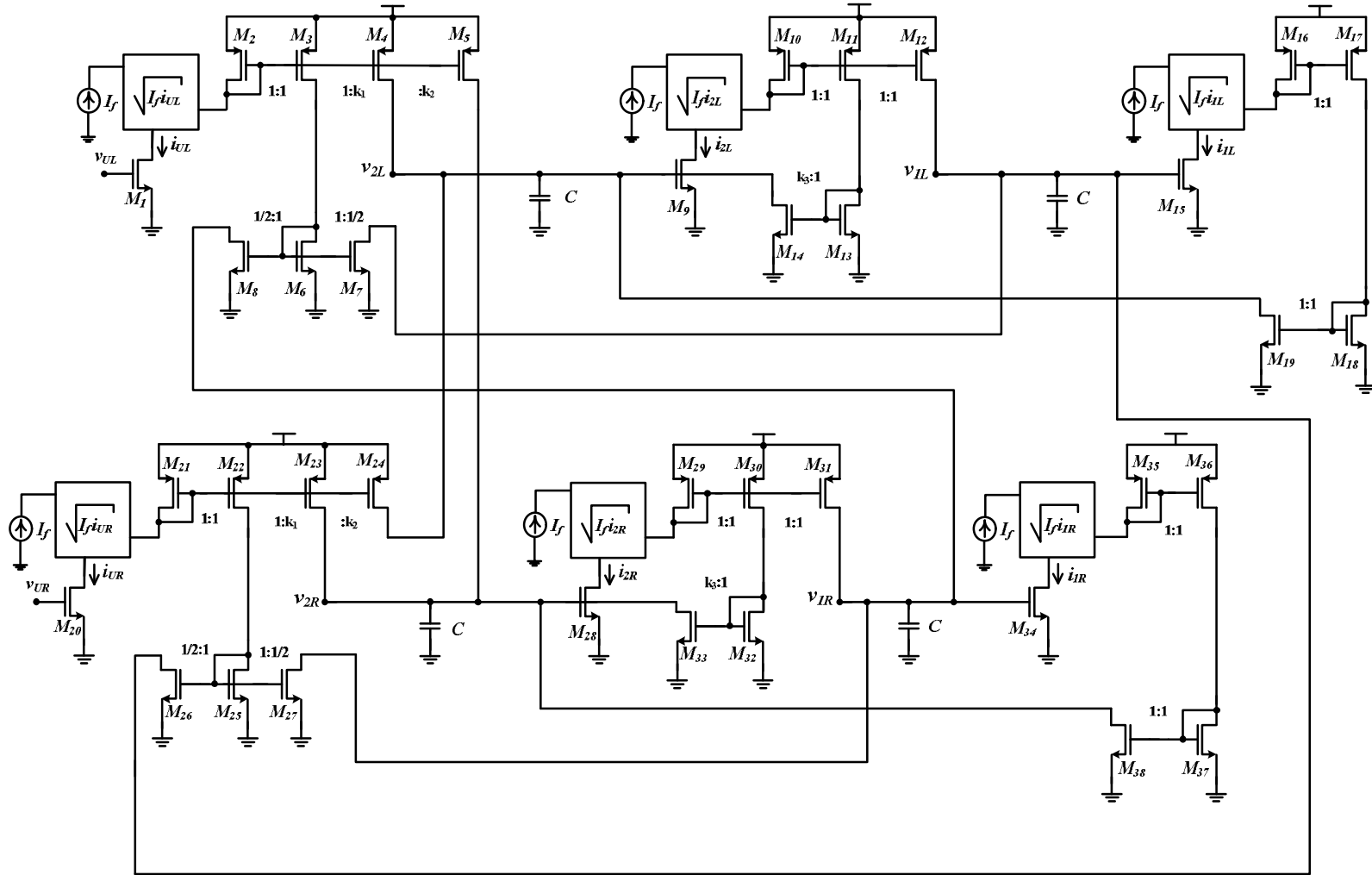
Şekil 7.1’de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazanç katsayısı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Tablo 7.1’de verildiği gibi elde edilmektedir.

Tablo 7.1: Şekil 7.1’de verilen devre yapısında kullanılan bazı akım aynalarına ait akım kopyalama oranları

Katsayı	Formül
k_1	$\frac{Q+1+a_1Q}{2Q}$
k_2	$\frac{Q+1-a_1Q}{2Q}$
k_3	$\frac{1}{Q}$

7.2.2 İkinci dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II

Genel transfer fonksiyonu gösterimi Denklem (7.1) ve sistem denklemleri gösterimi Denklem (7.2)’de verildiği gibi olan alçak geçiren filtre devresinin Bölüm 5’te teorisi verilen AB sınıfı AT-II kullanılarak da tasarımının yapılması mümkündür. Bunun için ilk olarak AT-II kullanılarak AB sınıfı yapıda sistem denklemleri Denklem (7.10)’da verildiği gibi düzenlenir.



Şekil 7.1: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1L} &= \frac{\omega_0}{2} x_{2L} - \frac{\omega_0}{2} x_{2R} \\
\dot{x}_{2L} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1L} + \frac{\omega_0}{2} x_{1R} - \frac{\omega_0}{2Q} x_{2L} + \frac{\omega_0}{2Q} x_{2R} + \frac{a_1 \omega_0}{2} u_L - \frac{a_1 \omega_0}{2} u_R \\
\dot{x}_{1R} &= \frac{\omega_0}{2} x_{2R} - \frac{\omega_0}{2} x_{2L} \\
\dot{x}_{2R} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1R} + \frac{\omega_0}{2} x_{1L} - \frac{\omega_0}{2Q} x_{2R} + \frac{\omega_0}{2Q} x_{2L} + \frac{a_1 \omega_0}{2} u_R - \frac{a_1 \omega_0}{2} u_L \\
y_L &= x_{1L} \\
y_R &= x_{1R}
\end{aligned} \tag{7.10}$$

Denklem (7.10)'da verildiği gibi elde edilen sistem denklemlerinden her bir giriş işareti ve durum değişkeni terimi yerine Denklem (7.11)'de verilen eşdeğer fonksiyonu konursa Denklem (7.12)'de verilen denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned}
u_L = v_{U_L} &= \sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH}; \quad u_R = v_{U_R} = \sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \\
x_{1L} = v_{1L} &= \sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH}; \quad x_{1R} = v_{1R} = \sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \\
x_{2L} = v_{2L} &= \sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH}; \quad x_{2R} = v_{2R} = \sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH}
\end{aligned} \tag{7.11}$$

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{1L} &= \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{2L} &= -\frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2Q} \left(\sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad + \frac{\omega_0}{2Q} \left(\sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{a_1}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{a_1}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{1R} &= \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
\dot{v}_{2R} &= -\frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1R}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{1L}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{\omega_0}{2Q} \left(\sqrt{\frac{i_{2R}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
&\quad + \frac{\omega_0}{2Q} \left(\sqrt{\frac{i_{2L}}{\beta}} + V_{TH} \right) + \frac{a_1}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_R}}{\beta}} + V_{TH} \right) - \frac{a_1}{2} \left(\sqrt{\frac{i_{U_L}}{\beta}} + V_{TH} \right) \\
y_L &= v_{1L} \\
y_R &= v_{1R}
\end{aligned} \tag{7.12}$$

Denklem (7.12)'deki denklemlerde Denklem (7.13)'de verilen kabullenme yapılırsa elde edilen devre denklemlerinin son şekli Denklem (7.14)'de verildiği gibi olur.

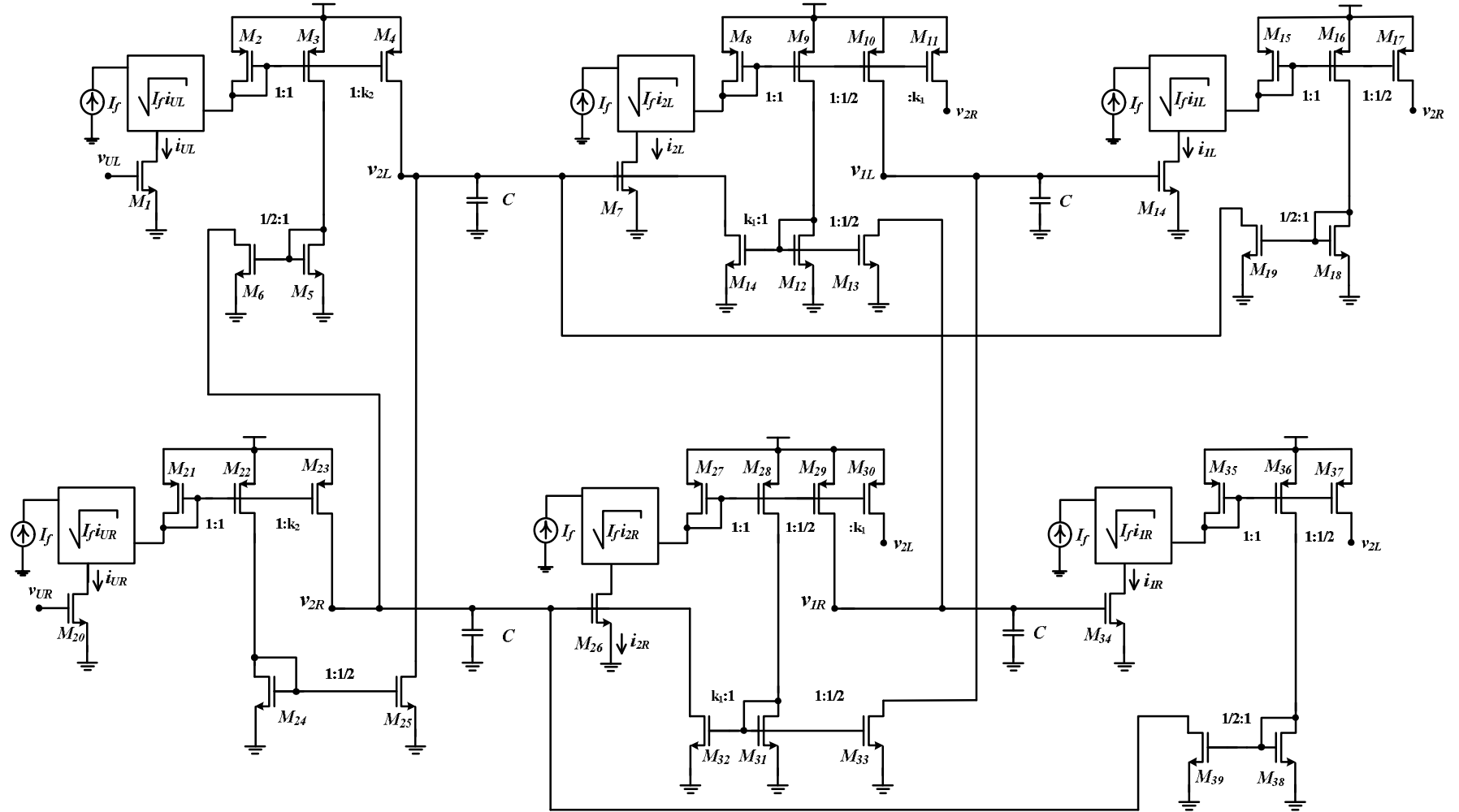
$$I_f = \frac{\omega_0^2 C^2}{\beta} \quad (7.13)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_{1L} &= \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2R}} \\ \dot{v}_{2L} &= -\frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1R}} - \frac{1}{2Q} \sqrt{I_f i_{2L}} + \frac{1}{2Q} \sqrt{I_f i_{2R}} \\ &\quad + \frac{a_1}{2} \sqrt{I_f i_{U_L}} - \frac{a_1}{2} \sqrt{I_f i_{U_R}} \\ \dot{v}_{1R} &= \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2R}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2L}} \\ \dot{v}_{2R} &= -\frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1L}} - \frac{1}{2Q} \sqrt{I_f i_{2R}} + \frac{1}{2Q} \sqrt{I_f i_{2L}} \\ &\quad + \frac{a_1}{2} \sqrt{I_f i_{U_R}} - \frac{a_1}{2} \sqrt{I_f i_{U_L}} \\ y_L &= v_{1L} \\ y_R &= v_{1R} \end{aligned} \quad (7.14)$$

Denklem (7.14)'de verildiği gibi elde edilen devre denklemleri yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.2'de verildiği gibi tasarlanabilir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan bu devre yapısında kullanılan bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazancı (a_1) ve kalite faktörü (Q) katsayıları ile orantılı olarak ifade edilmektedir. Bu akım aynalarının akım kopyalama oranları devrenin kazanç değeri ve kalite faktörüne bağlı olarak Tablo 7.2'de verildiği gibidir.

Tablo 7.2: Şekil 7.2'de verilen karekök ortam filtresinde kullanılan bazı akım aynalarına ait akım kopyalama oranları

Katsayı	Formül
k_1	$\frac{1}{2Q}$
k_2	$\frac{a_1}{2}$



Şekil 7.2: AT-II kullanılarak tasarlanmış ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi

7.2.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

Tez kapsamında önerilen AB sınıfı karekök ortam filtresi tasarım yönteminin ikinci dereceden alçak geçiren bir filtre transfer fonksiyonuna uygulanması sonucu elde edilen devre yapıları Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de verildiği gibidir.

Tasarlanan bu devrelerin performansları PSpice benzetim programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bunun için ilk olarak tasarlanan devreler sırasıyla PSpice programı Netlist editöründe tasarlanmıştır. PSpice programında oluşturulan devrelerin kazanç değeri $a_1=1$ olarak belirlenmiştir. Bunun yanında devrede kullanılan tüm MOS transistörler TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak EK-1’de belirtildiği gibi tanımlanmıştır. Kullanılan teknolojiye ve tasarlanan filtrenin kazanç değerine göre devrelerde kullanılan transistörlerin boyutları da değişmektedir. Tasarlanan devre yapısında kullanılan tüm karekök alma blokları Şekil 2.6’da verilen içyapıya sahiptirler ve bu blokların tümünde kullanılan transistör boyutları Tablo 4.1’de verildiği gibidir. Tasarlanan ikinci dereceden alçak geçiren filtre devrelerinin diğer kısımlarında kullanılan transistör boyutları Tablo 7.3 ve Tablo 7.4’te verildiği gibidir.

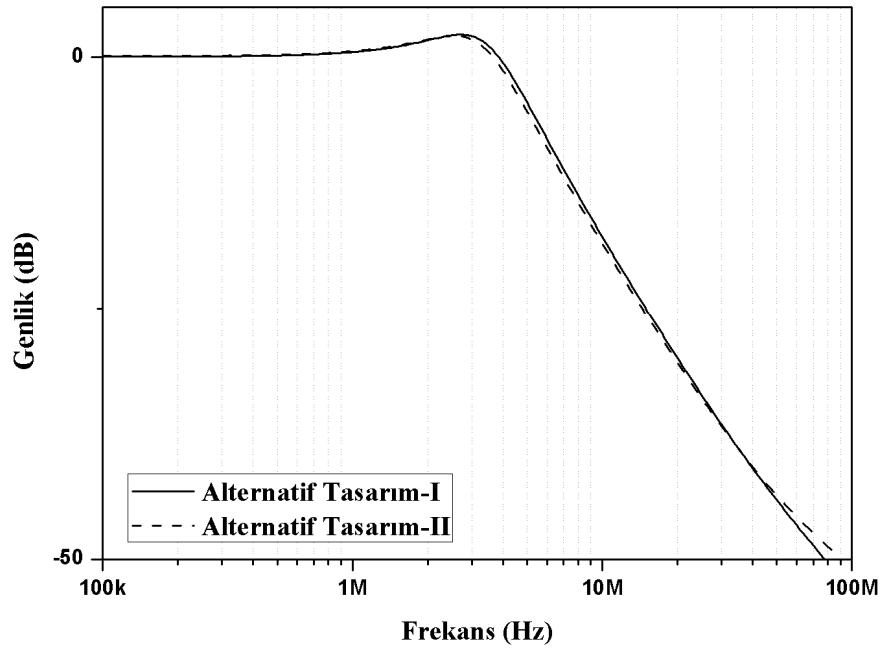
Tablo 7.3: Şekil 7.1’deki ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

Transistör No	W/L [μ m]	Transistör No	W/L [μ m]
M ₂ , M ₃ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₃ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₇ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₁ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₁₈ , M ₁₉ , M ₂₀ , M ₂₅ , M ₂₈ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₄ , M ₃₇ , M ₃₈	7/.7
M ₄ , M ₂₃	31.5/.7	M ₇ , M ₈ , M ₂₆ , M ₂₇	3.5/.7
M ₅ , M ₂₄	10.5/.7		

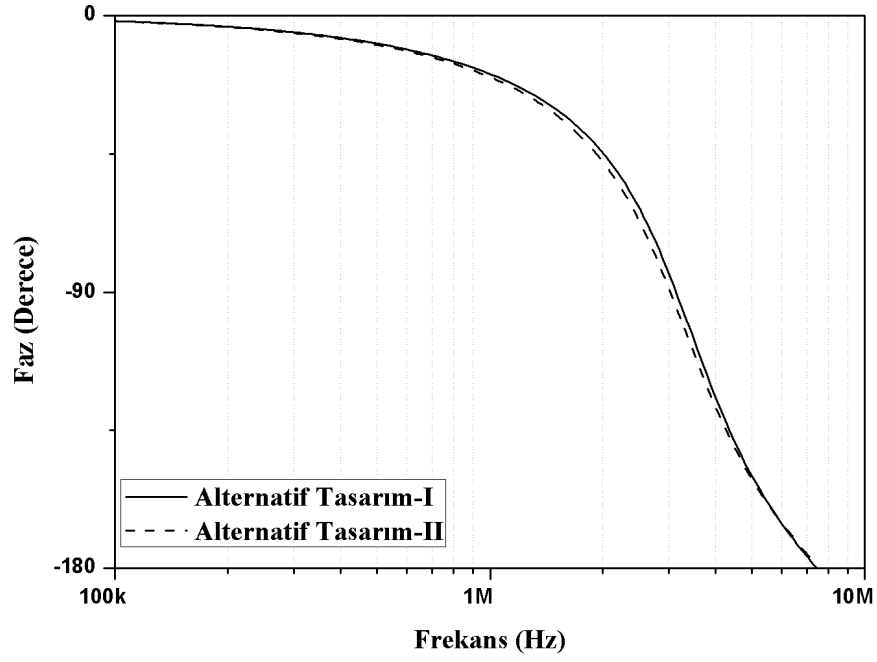
Tablo 7.4: Şekil 7.2'deki ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam
filtresinde kullanılan transistör boyutları

Transistör No	W/L [μm]	Transistör No	W/L [μm]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₅ , M ₁₆ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₇ , M ₂₈ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₇ , M ₁₂ , M ₁₄ , M ₁₈ , M ₂₀ , M ₂₄ , M ₂₆ , M ₃₁ , M ₃₄ , M ₃₈	7/.7
M ₄ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₇ , M ₂₃ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₇	10.5/.7	M ₆ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₉ , M ₂₅ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₉	3.5/.7

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'deki gibi tasarlanan ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devrelerinin besleme gerilimi 2.3V, devrelerdeki her bir kondansatör değeri 5pF ve kullanılan her bir bağımsız akım kaynağının değeri de 11 μ A olarak seçilmiştir. Giriş işareti olarak 80mV tepe değerine sahip sinüs işareti uygulanan devrelerin kesim frekansı 3.15MHz olarak elde edilmiştir. Alçak geçiren karekök ortam filtre devreleri PSpice programında kesim frekansında çalıştırıldığında; frekans ortamı genlik ve faz cevabı eğrileri sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'de verildiği gibi elde edilmiştir.

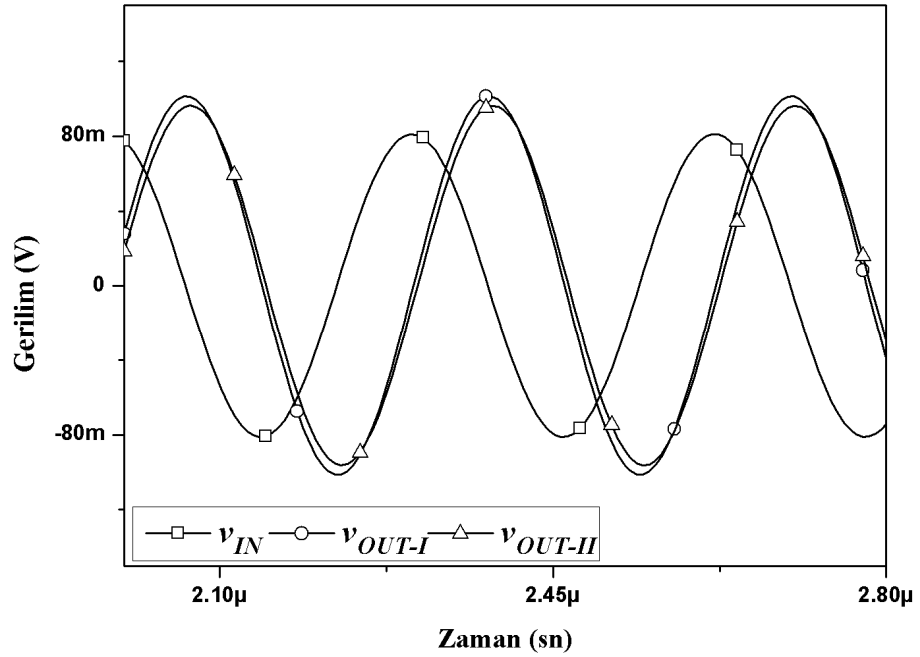


Şekil 7.3: İkinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi genlik cevabı



Şekil 7.4: İkinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi faz cevabı

Aynı koşullarda devrelerin zaman ortamı analizi sonucunda elde edilen giriş ve çıkış gerilimleri ise Şekil 7.5’de verildiği gibidir.



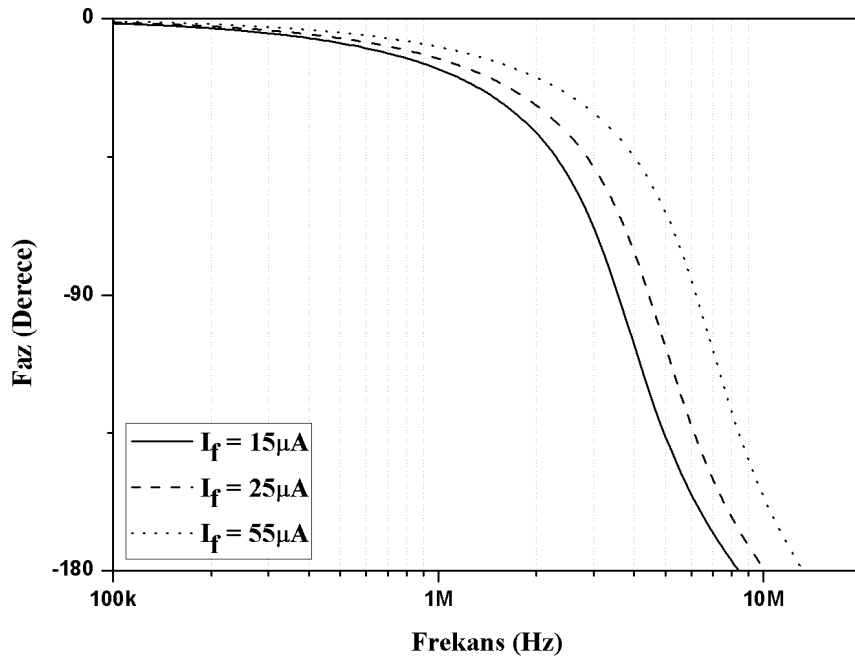
Şekil 7.5: Tasarlanan ikinci dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri zaman ortamı cevabı

Tasarlanan alçak geçiren karekök ortam filtre devrelerinin kesim frekansı devredeki akım kaynaklarının değerleri ile ayarlanabilir yapıdadır. Bu özellik tasarlanan iki farklı filtre devresi için akım kaynaklarının değeri $15\mu\text{A}$ ile $55\mu\text{A}$ arasında değiştirilerek Şekil 7.6 ve Şekil 7.7’de verilen faz eğrileri üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca bu devrelerin her birinin PSpice benzetimleri sonucunda elde edilen güç tüketimleri de Tablo 7.5’de verildiği gibi ölçülmüştür.

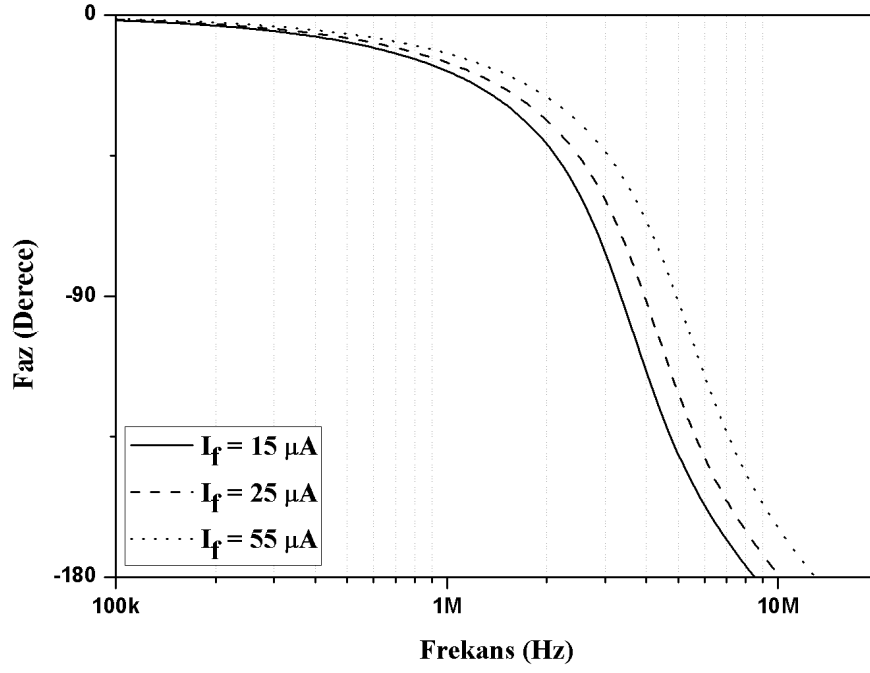
Tablo 7.5: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden alçak geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	2.72 mW
Alternatif Tasarım-II	6.17 mW

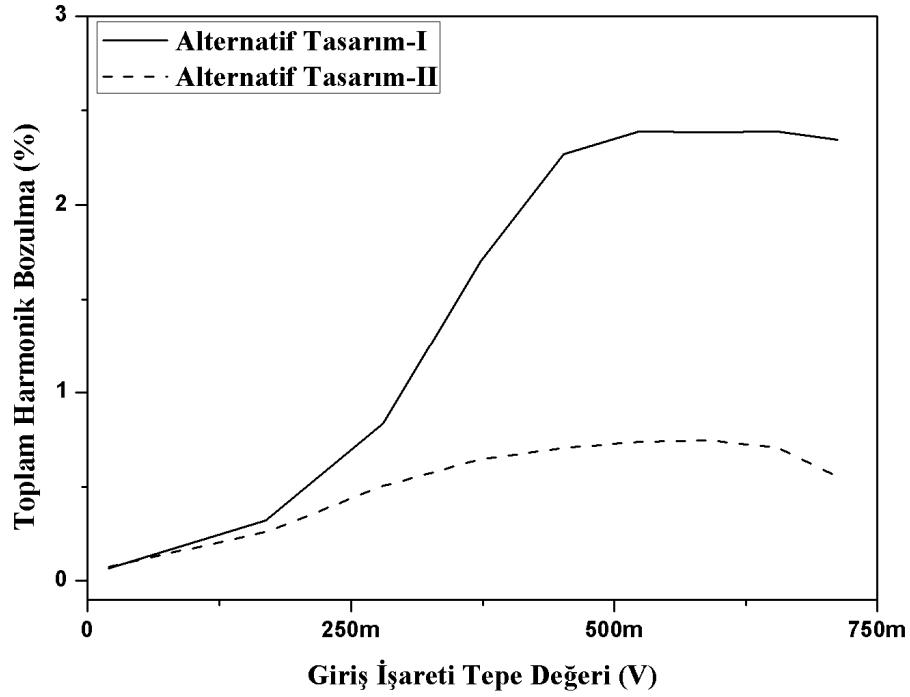
Son olarak tasarlanan devrelerin PSpice programında bozulma ve gürültü analizleri yapılmıştır. Bunun için her iki devrede bütün koşullar sabit iken giriş işaretinin tepe değeri 20mV ile 770mV arasında değiştirilmiştir. Giriş işaretinin tepe değerindeki değişime bağlı olarak her iki devrenin çıkış işaretlerinde görülen bozulma oranları % olarak Şekil 7.7’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 7.6: Şekil 7.1’de verilen ikinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



Şekil 7.7: Şekil 7.2’de verilen ikinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



Şekil 7.8: İkinci dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları

Aynı devrelerin gürültü analizleri yapıldığında çıkış işaretinde meydana gelen gürültü seviyesi iletim bandında sırasıyla $129 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ve $138 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ değerindedir.

7.3 İkinci Dereceden Yüksek Geçiren Karekök Ortam Filtre Devresi Tasarımı

İkinci dereceden yüksek geçiren bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu Denklem (7.15)'de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_1 s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (7.15)$$

Denklem (7.15)'de verilen transfer fonksiyonuna *Companion-III* tekniği uygulanırsa elde edilen sistem denklemleri Denklem (7.16)'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 - \frac{a_1 \omega_0}{Q} u \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 - \frac{\omega_0}{Q} x_2 + a_1 \left(\frac{1-Q^2}{Q^2} \right) \omega_0 u \\ y &= x_1 + a_1 u \end{aligned} \quad (7.16)$$

7.3.1 İkinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I

Bölüm 5 te geliştirilen teori çerçevesinde AB sınıfı AT-I yöntemi kullanılarak Denklem (7.16)'da verilen denklemler düzenlenirse Denklem (7.17) elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1L} &= \omega_0 x_{2L} - \frac{a_1 \omega_0}{Q} u_L + \left(\frac{a_1 - Q}{2Q} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{a_1 - Q}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{2L} &= -\omega_0 x_{1L} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2L} + a_1 \left(\frac{1-Q^2}{Q^2} \right) \omega_0 u_L \\ &\quad + \left(\frac{(a_1 + 1)Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{(a_1 + 1)Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{1R} &= \omega_0 x_{2R} - \frac{a_1 \omega_0}{Q} u_R + \left(\frac{a_1 - Q}{2Q} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{a_1 - Q}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{2R} &= -\omega_0 x_{1R} - \frac{\omega_0}{Q} x_{2R} + a_1 \left(\frac{1-Q^2}{Q^2} \right) \omega_0 u_R \\ &\quad + \left(\frac{(a_1 + 1)Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{(a_1 + 1)Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\ y_L &= x_{1L} + a_1 v_{U_L} \\ y_R &= x_{1R} + a_1 v_{U_R} \end{aligned} \quad (7.17)$$

Denklem (7.17)'deki gibi elde edilen sistem denklemleri üzerinde tezin daha önceki kısımlarında kullandığımız eşleştirme fonksiyonları ve düzenlemeler yapılırsa Denklem (7.18)'de verilen devre denklemleri elde edilir.

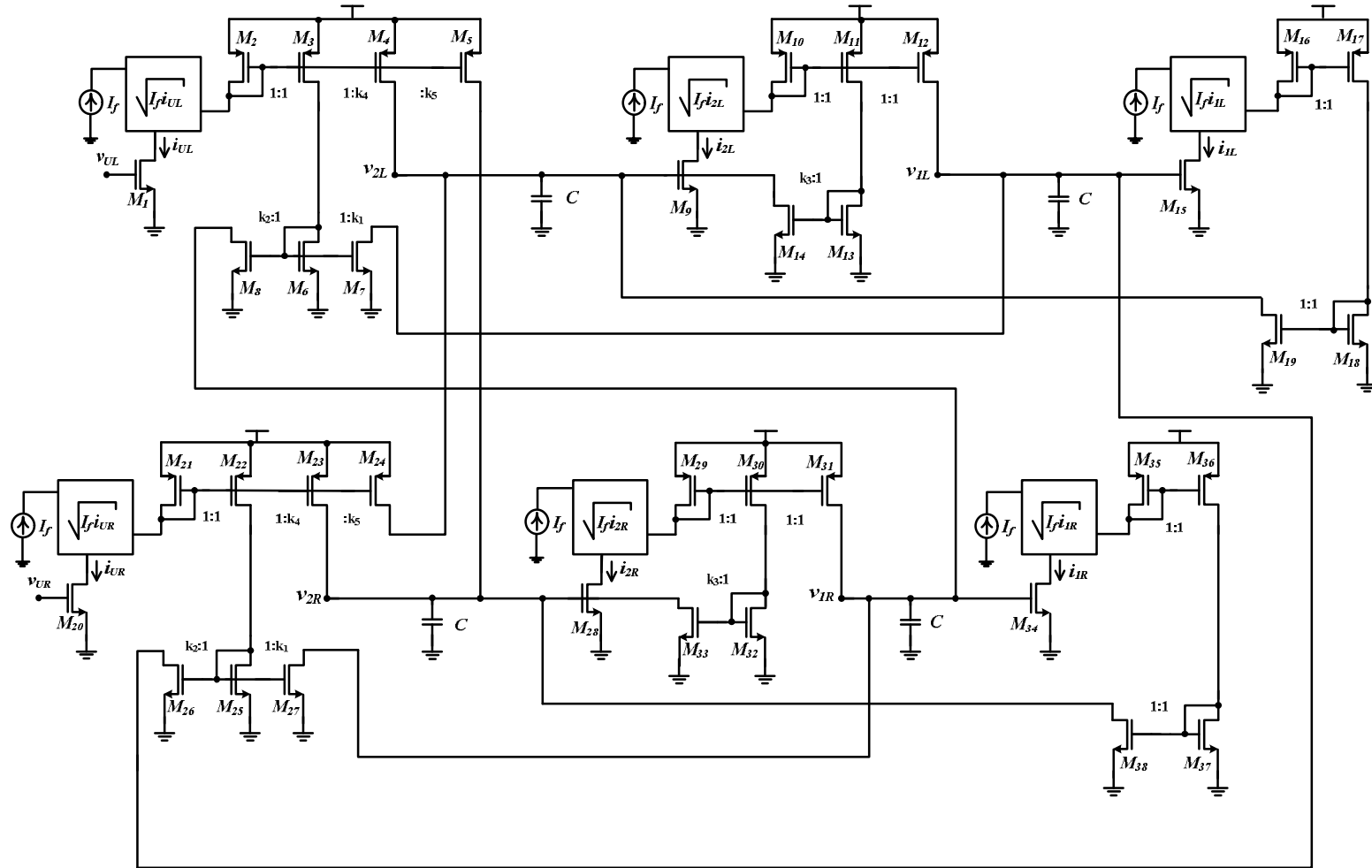
$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= \sqrt{I_f i_{2L}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_L}} - k_2 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{2L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} - k_3 \sqrt{I_f i_{2L}} + k_4 \sqrt{I_f i_{U_L}} + k_5 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{1R} &= \sqrt{I_f i_{2R}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_R}} - k_2 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
C\dot{v}_{2R} &= -\sqrt{I_f i_{1R}} - k_3 \sqrt{I_f i_{2R}} + k_4 \sqrt{I_f i_{U_R}} + k_5 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_L &= v_{1L} + a_1 v_{U_L} \\
y_R &= v_{1R} + a_1 v_{U_R}
\end{aligned} \tag{7.18}$$

Bu denklemlerde karekök ifadelerinin önünde yer alan ve devre şeklinde akım aynalarının akım kopyalama oranı ile temsil edilen her bir k katsayısı devrenin kazanç ve kalite faktörü değerlerine bağlı olarak Denklem (7.19)'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{a_1 + Q}{2Q} \\
k_2 &= \frac{Q - a_1}{2Q} \\
k_3 &= \frac{1}{Q} \\
k_4 &= \frac{(1 - a_1)Q^2 + Q + a_1}{2Q^2} \\
k_5 &= \frac{(a_1 + 1)Q^2 + Q - a_1}{2Q^2}
\end{aligned} \tag{7.19}$$

Devre denklemlerinin son hali Denklem (7.18)'de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.9'da verildiği gibi tasarlanmıştır.

Şekil 7.9'daki gibi elde edilen ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazanç katsayısı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.19)'da verildiği gibi değişmektedir.



Şekil 7.9: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi

7.3.2 İkinci dereceden yüksek geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II

Bölüm 5'te geliştirilen teori çerçevesinde AB sınıfı AT-II kullanılarak Denklem (7.16)'da verilen denklemler düzenlenirse Denklem (7.20) elde edilir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{1L} &= \frac{\omega_0}{2} x_{2L} - \frac{\omega_0}{2} x_{2R} - \frac{a_1 \omega_0}{2Q} u_L + \frac{a_1 \omega_0}{2Q} u_R \\
 \dot{x}_{2L} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1L} + \frac{\omega_0}{2} x_{1R} - \frac{\omega_0}{2Q} x_{2L} + \frac{\omega_0}{2Q} x_{2R} \\
 &\quad + \left(\frac{a_1 - a_1 Q^2}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L - \left(\frac{a_1 - a_1 Q^2}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\
 \dot{x}_{1R} &= \frac{\omega_0}{2} x_{2R} - \frac{\omega_0}{2} x_{2L} - \frac{a_1 \omega_0}{2Q} u_R + \frac{a_1 \omega_0}{2Q} u_L \\
 \dot{x}_{2R} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1R} + \frac{\omega_0}{2} x_{1L} - \frac{\omega_0}{2Q} x_{2R} + \frac{\omega_0}{2Q} x_{2L} \\
 &\quad + \left(\frac{a_1 - a_1 Q^2}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R - \left(\frac{a_1 - a_1 Q^2}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L \\
 y_L &= x_{1L} + a_1 u_L \\
 y_R &= x_{1R} + a_1 u_R
 \end{aligned} \tag{7.20}$$

Denklem (7.20)'deki gibi elde edilen sistem denklemleri üzerinde tezin daha önceki kısımlarında kullandığımız eşleştirme fonksiyonları kullanılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa Denklem (7.21)'de verilen devre denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_{1L} &= \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2R}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_L}} + k_1 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
 \dot{v}_{2L} &= -\frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1R}} - k_2 \sqrt{I_f i_{2L}} + k_2 \sqrt{I_f i_{2R}} \\
 &\quad + k_3 \sqrt{I_f i_{U_L}} - k_3 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
 \dot{v}_{1R} &= \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2R}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2L}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_R}} + k_1 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
 \dot{v}_{2R} &= -\frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1L}} - k_2 \sqrt{I_f i_{2R}} + k_2 \sqrt{I_f i_{2L}} \\
 &\quad + k_3 \sqrt{I_f i_{U_R}} - k_3 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
 y_L &= v_{1L} + a_1 v_{U_L} \\
 y_R &= v_{1R} + a_1 v_{U_R}
 \end{aligned} \tag{7.21}$$

Bu devre denklemlerinde karekök ifadelerinin önünde yer alan ve devre şeklinde akım aynalarının akım kopyalama oranı ile temsil edilen her bir k katsayısı devrenin kazanç ve kalite faktörü değerlerine bağlı olarak Denklem (7.22)'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{a_1}{2Q} \\ k_2 &= \frac{1}{2Q} \\ k_3 &= \frac{a_1}{2} \left(\frac{1-Q^2}{Q^2} \right) \end{aligned} \quad (7.22)$$

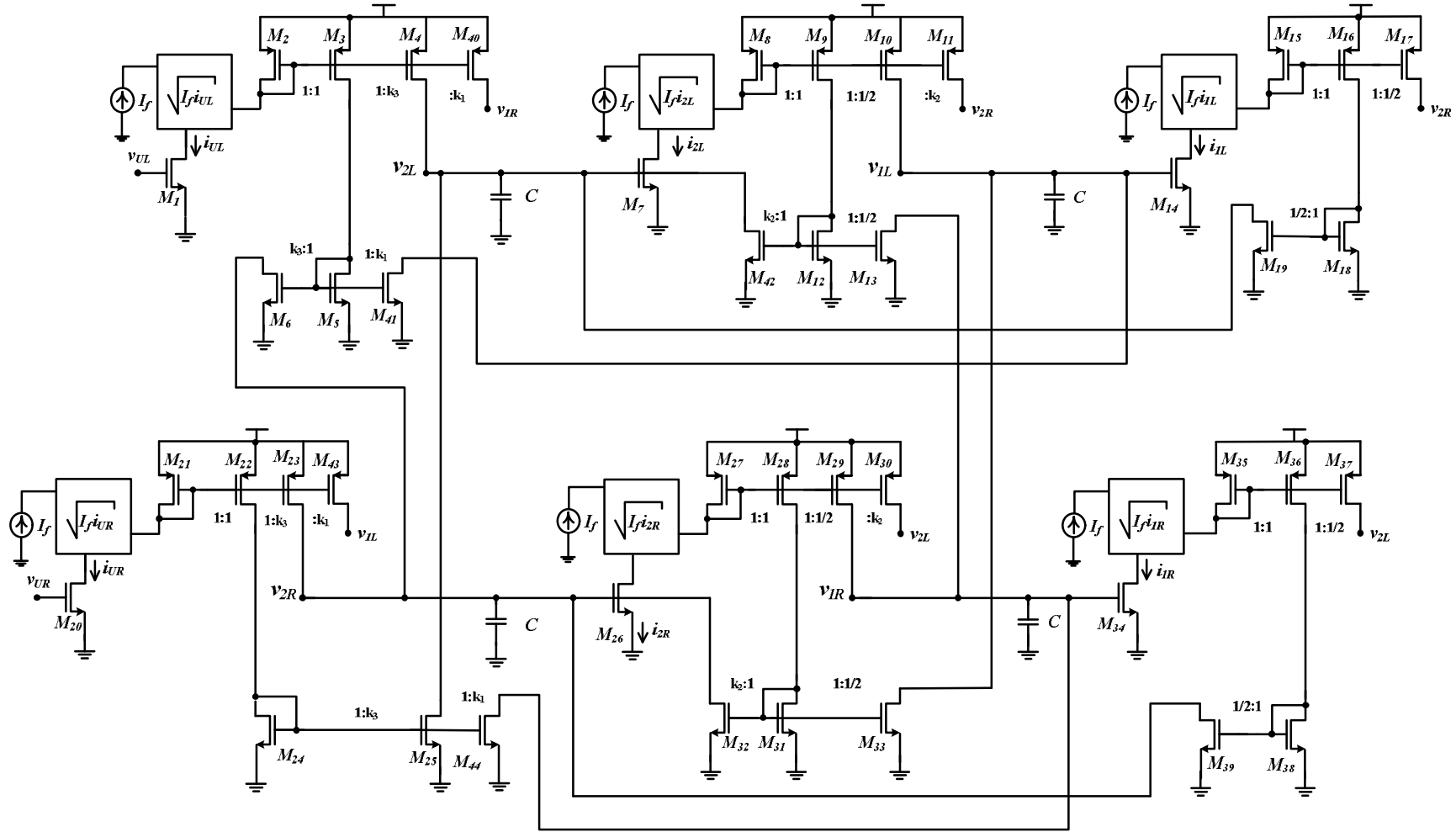
Denklem (7.21)'deki gibi elde edilen devre denklemleri yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.10'da verildiği gibi tasarlanmıştır.

Şekil 7.10'da görüldüğü gibi tasarlanan ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazanç katsayısı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.22)'de verildiği gibidir.

7.3.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

AB sınıfı yapının karekök ortam filtrelerine uygulanması sonucu elde edilen iki farklı ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtre devresi Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da verildiği gibidir.

Tasarlanan bu devrelerin performansları PSpice benzetim programı kullanılarak incelenmiştir. Bunun için öncelikle tüm tasarımların kazanç değeri $a_1=1$ ve kalite faktörü $Q=1$ olarak seçilmiştir. Devrede kullanılan tüm MOS transistörler daha önceki tasarımlarda olduğu gibi TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak EK-I'de verildiği gibi tanımlanmıştır. Kullanılan teknolojiye ve tasarlanan filtrenin kazanç değerine göre devre yapılarında kullanılan tüm karekök alma blokları Şekil 2.6'da verilen devre yapısında ve Tablo 4.1'de verilen transistör boyutlarında tasarlanmıştır. Tasarlanan yüksek geçiren filtre devrelerinde kullanılan MOS transistörlerin PSpice benzetimleri yapılırken kullanılan boyutları Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'daki devreler için sırasıyla Tablo 7.6 ve Tablo 7.7'de verildiği gibidir.



Şekil 7.10: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresi

Tablo 7.6: Şekil 7.9'daki ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₄ , M ₅ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₇ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₃ , M ₂₄ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₁ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₇ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₁₈ , M ₁₉ , M ₂₀ , M ₂₅ , M ₂₇ , M ₂₈ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₄ , M ₃₇ , M ₃₈	7/.7

Tablo 7.7: Şekil 7.10'daki ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

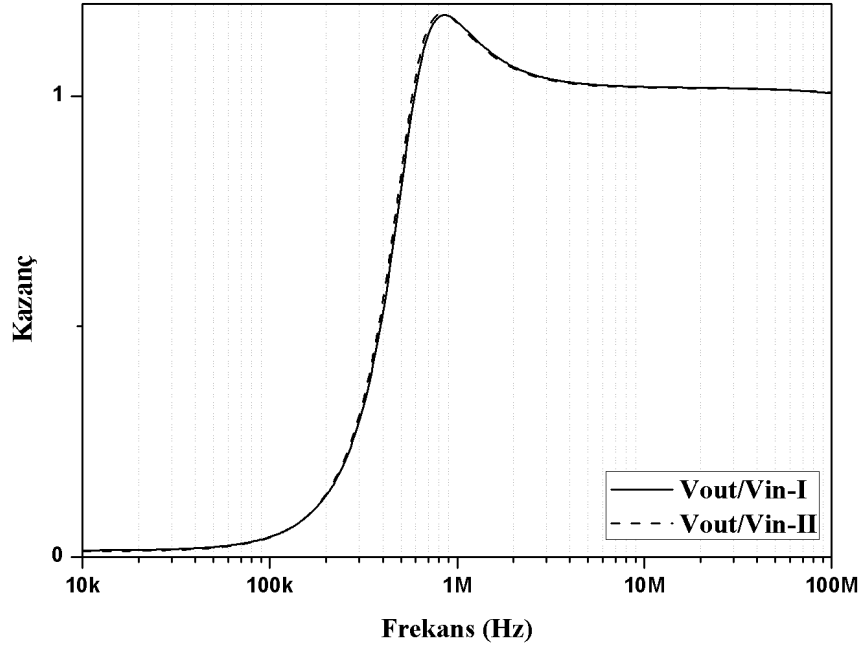
Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₅ , M ₁₆ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₇ , M ₂₈	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₇ , M ₁₂ , M ₁₄ , M ₁₈ , M ₂₀ , M ₂₄ , M ₂₆ , M ₃₁ , M ₃₄ , M ₃₈	7/.7
M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₇ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₇ , M ₄₀ , M ₄₃	10.5/.7	M ₁₃ , M ₁₉ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₉ , M ₄₁ , M ₄₂ , M ₄₄	3.5/.7

Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'daki gibi tasarlanan ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtre devrelerinin PSpice benzetimlerinde besleme gerilimi 1.5V'tur. Devrelerdeki her bir kondansatör değeri 25pF ve kullanılan bağımsız akım kaynağının değerleri de 10µA olarak belirlenmiştir. Giriş işareti olarak 55mV tepe değerine sahip sinüs işareti uygulanan devrelerin kesim frekansı 585kHz'dir.

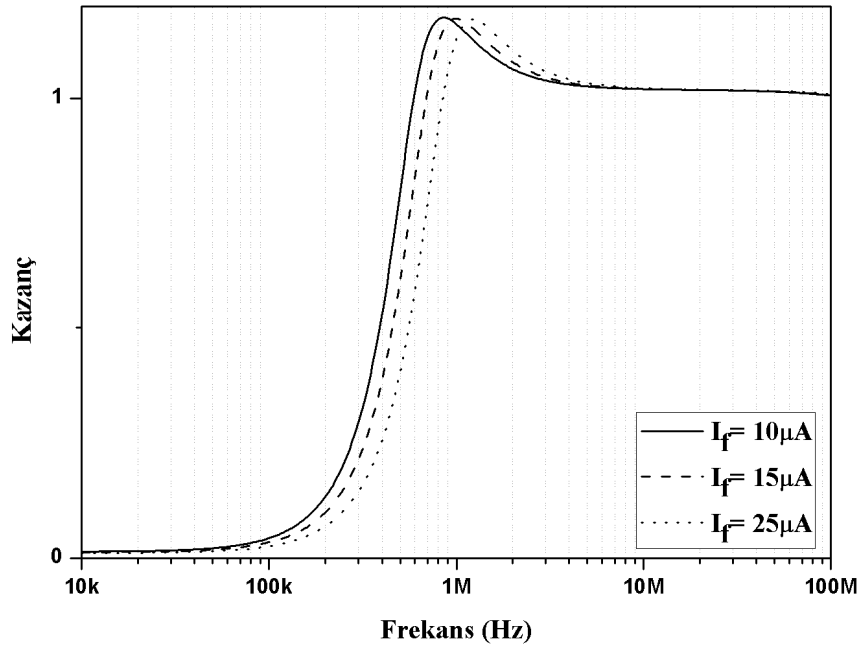
Tasarlanan yüksek geçiren karekök ortam filtre devreleri kesim frekansında çalıştırıldığında frekans ortamı analizleri sonucunda elde edilen genlik cevabı Şekil 7.11'de verildiği gibidir.

Tasarlanan her bir karekök ortam filtresi kesim frekansı ayarlanabilir özelliktedir. Bu özelliğin gösterilebilmesi için Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'daki devre yapılarında kullanılan I_f akım kaynaklarının değeri 10µA ile 25µA arasında değiştirilmiştir. Her

bir devre yapısı için elde edilen genlik cevabı eğrileri sırasıyla Şekil 7.12 ve Şekil 7.13’de verildiği gibidir.



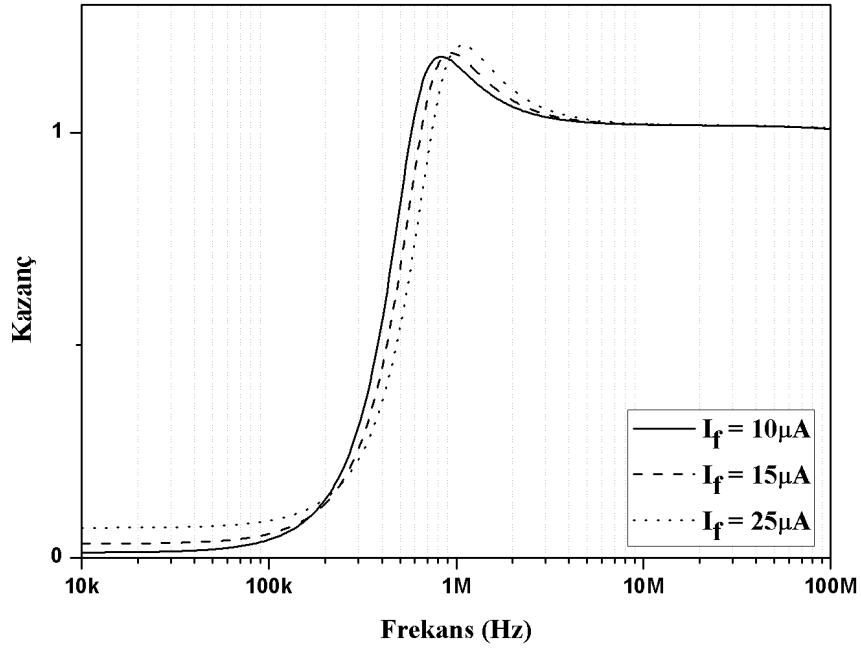
Şekil 7.11: İkinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri genlik cevabı



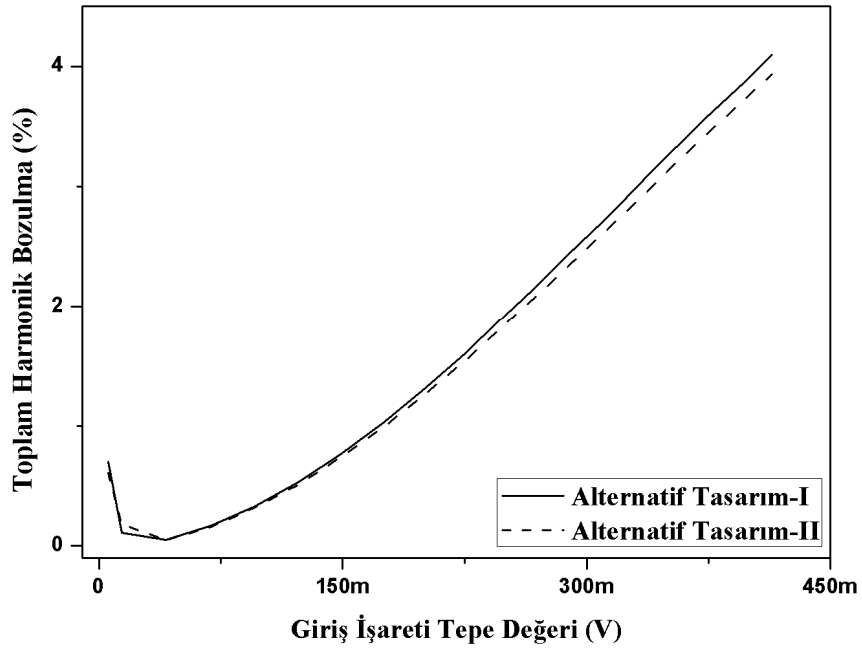
Şekil 7.12: Şekil 7.9’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı

Son olarak tasarlanan devrelerin PSpice programında bozulma ve gürültü analizleri yapılmıştır. Bunun için ilk olarak giriş işaretinin tepe değeri 6mV ile 415mV arasında değiştirilmiştir. Giriş işaretinin tepe değerindeki değişime bağlı olarak her

bir devrenin çıkış işaretlerinde görülen bozulma oranları % olarak Şekil 7.14’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 7.13: Şekil 7.10’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



Şekil 7.14: İkinci dereceden AB sınıfı yüksek geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları

Tasarlanan yüksek geçiren filtre devrelerinin aynı koşullarda yapılan PSpice benzetimleri sonucunda elde edilen toplam güç tüketimi değerleri AT-I ve AT-II için Tablo 7.8’de verildiği gibidir.

Tablo 7.8: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden yüksek geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	4.86 mW
Alternatif Tasarım-II	6.42 mW

Tasarlanan ikinci dereceden yüksek geçiren karekök ortam filtre devrelerine ait çıkış işaretinden elde edilen çıkış işareti gürültüsüne ait PSpice programından elde edilen iletim bandı gürültü değerleri sırasıyla $157 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ve $149 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ dir.

7.4 İkinci Dereceden Band Geçiren Filtre Devresi Tasarımı

İkinci dereceden band geçiren bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu genel gösterimi Denklem (7.23)’de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = a_1 \frac{\frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (7.23)$$

Denklem (7.23)’de verilen transfer fonksiyonuna sahip bir band geçiren filtre devresi için sistem denklemleri Denklem (7.24)’de verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 + \frac{a_1}{Q} \omega_0 u \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 - \frac{1}{Q} \omega_0 x_2 - \left(\frac{a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (7.24)$$

7.4.1 İkinci dereceden band geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I

Tez kapsamında geliştirilen AB sınıfı AT-I yöntemi kullanılarak Denklem (7.24)’de verilen denklemler düzenlenirse Denklem (7.25) elde edilir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1L} &= \omega_0 x_{2L} + \frac{a_1}{Q} \omega_0 u_L - \left(\frac{Q+a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_L - \left(\frac{Q+a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{2L} &= -\omega_0 x_{1L} - \frac{1}{Q} \omega_0 x_{2L} - \left(\frac{a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u_L \\
&\quad + \left(\frac{Q^2+Q+a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q^2+Q+a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{1R} &= \omega_0 x_{2R} + \frac{a_1}{Q} \omega_0 u_R - \left(\frac{Q+a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_L - \left(\frac{Q+a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{2R} &= -\omega_0 x_{1R} - \frac{1}{Q} \omega_0 x_{2R} - \left(\frac{a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u_R \\
&\quad + \left(\frac{Q^2+Q+a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q^2+Q+a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\
y_L &= x_{1L} \\
y_R &= x_{1R}
\end{aligned} \tag{7.25}$$

Denklem (7.25)'deki gibi elde edilen sistem denklemleri üzerinde tezin daha önceki kısımlarında kullandığımız eşleştirme fonksiyonları kullanılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa Denklem (7.26)'da verilen devre denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= \sqrt{I_f i_{2L}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_L}} - k_2 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{2L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} - k_3 \sqrt{I_f i_{2L}} + k_4 \sqrt{I_f i_{U_L}} + k_5 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{1R} &= \sqrt{I_f i_{2R}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_R}} - k_2 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
C\dot{v}_{2R} &= -\sqrt{I_f i_{1R}} - k_3 \sqrt{I_f i_{2R}} + k_4 \sqrt{I_f i_{U_R}} + k_5 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_L &= v_{1L} \\
y_R &= v_{1R}
\end{aligned} \tag{7.26}$$

Denklem (7.26)'da kullanılan her bir k katsayısının devrenin kazancı a_I ve kalite faktörü Q cinsinden ifadesi Denklem (7.27)'de verildiği gibidir.

Devre denklemlerinin son hali Denklem (7.26)'da verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtre devresi yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.15'de verildiği gibi tasarlanabilmektedir.

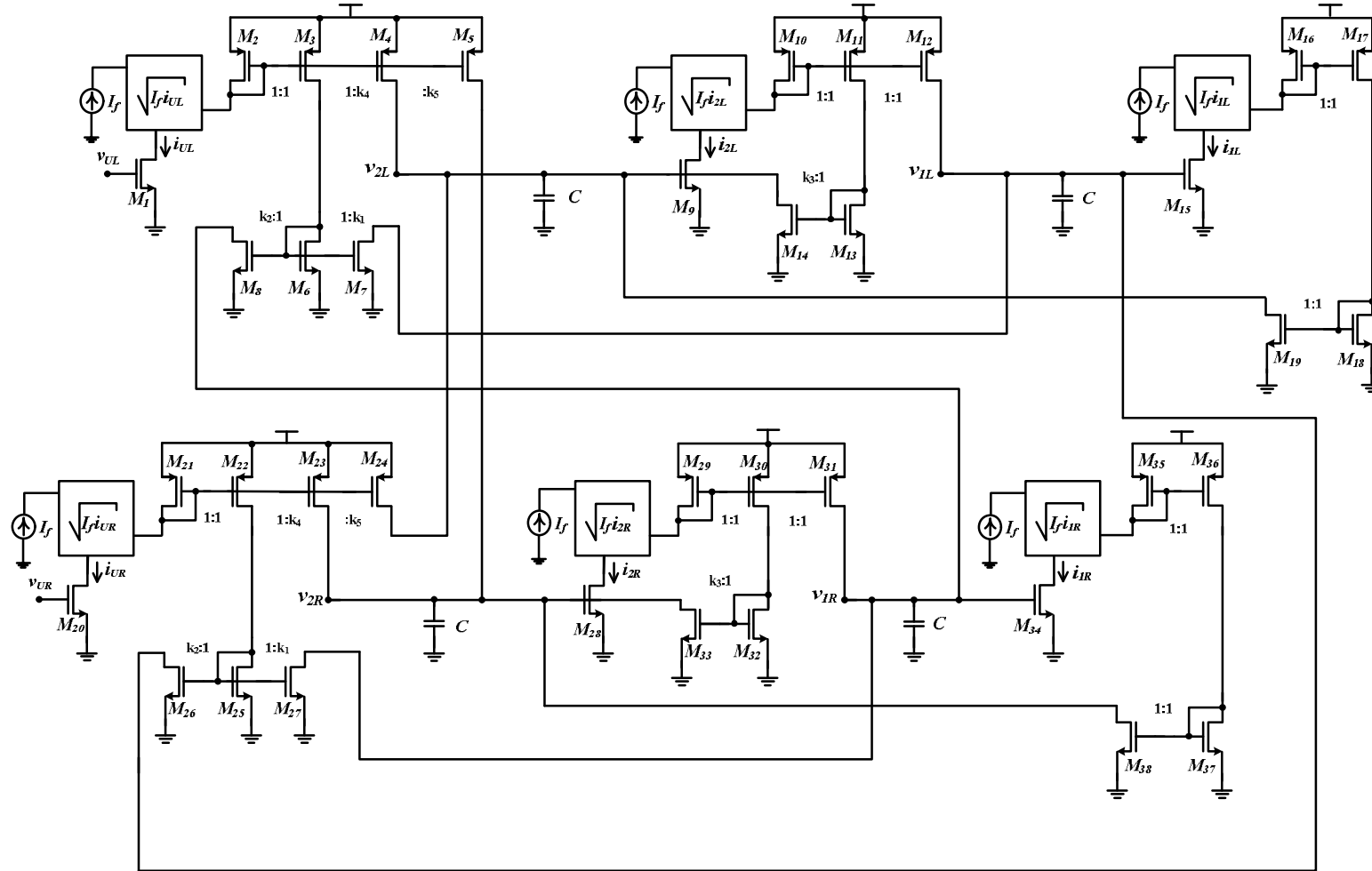
$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{Q - a_1}{2Q} \\
k_2 &= \frac{Q + a_1}{2Q} \\
k_3 &= \frac{1}{Q} \\
k_4 &= \frac{Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \\
k_5 &= \frac{Q^2 + Q + a_1}{2Q^2}
\end{aligned} \tag{7.27}$$

Şekil 7.15’de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazancı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.27)’da verildiği gibidir.

7.4.2 İkinci dereceden band geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II

Denklem (7.24)’de verilen sistem denklemleri tez kapsamında geliştirilen AB sınıfı AT-II yöntemi kullanılarak düzenlenirse sistem denklemleri Denklem (7.28)’deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1L} &= \frac{1}{2} \omega_0 x_{2L} - \frac{1}{2} \omega_0 x_{2R} - \frac{a_1}{2Q} \omega_0 u_L + \frac{a_1}{2Q} \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{2L} &= -\frac{1}{2} \omega_0 x_{1L} + \frac{1}{2} \omega_0 x_{1R} - \frac{1}{2Q} \omega_0 x_{2L} + \frac{1}{2Q} \omega_0 x_{2R} \\
&\quad + \frac{a_1}{2Q^2} \omega_0 u_L - \frac{a_1}{2Q^2} \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{1R} &= \frac{1}{2} \omega_0 x_{2R} - \frac{1}{2} \omega_0 x_{2L} - \frac{a_1}{2Q} \omega_0 u_R + \frac{a_1}{2Q} \omega_0 u_L \\
\dot{x}_{2R} &= -\frac{1}{2} \omega_0 x_{1R} + \frac{1}{2} \omega_0 x_{1L} - \frac{1}{2Q} \omega_0 x_{2R} + \frac{1}{2Q} \omega_0 x_{2L} \\
&\quad + \frac{a_1}{2Q^2} \omega_0 u_R - \frac{a_1}{2Q^2} \omega_0 u_L \\
y_L &= x_{1L} \\
y_R &= x_{1R}
\end{aligned} \tag{7.28}$$



Şekil 7.15: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresi

Sistem denklemleri Denklem (7.28)'de verildiği gibi olan band geçiren filtre devresinin karekök ortamda tasarımı için daha önceki tasarımlarda yapılan düzenlemeler ve kabullenmeler yapılırsa filtreye ait devre denklemleri Denklem (7.29)'da verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{1L} &= \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2R}} - k_1\sqrt{I_f i_{U_L}} + k_1\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
\dot{v}_{2L} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} - k_2\sqrt{I_f i_{2L}} + k_2\sqrt{I_f i_{2R}} \\
&\quad + k_3\sqrt{I_f i_{U_L}} - k_3\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
\dot{v}_{1R} &= \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2R}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2L}} - k_1\sqrt{I_f i_{U_R}} + k_1\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
\dot{v}_{2R} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} - k_2\sqrt{I_f i_{2R}} + k_2\sqrt{I_f i_{2L}} \\
&\quad + k_3\sqrt{I_f i_{U_R}} - k_3\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_L &= v_{1L} \\
y_R &= v_{1R}
\end{aligned} \tag{7.29}$$

Denklem (7.29)'da kullanılan herbir k katsayısının devrenin kazancı (a_i) ve kalite faktörü (Q) cinsinden ifadesi Denklem (7.30)'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{a_1}{2Q} \\
k_2 &= \frac{1}{2Q} \\
k_3 &= \frac{a_1}{2Q^2}
\end{aligned} \tag{7.30}$$

Devre denklemlerinin son hali Denklem (7.29)'da verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtre devresi yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.16'de verildiği gibi tasarlanabilmektedir.

Şekil 7.16'de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazancı (a_i) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.30)'da verildiği gibidir.

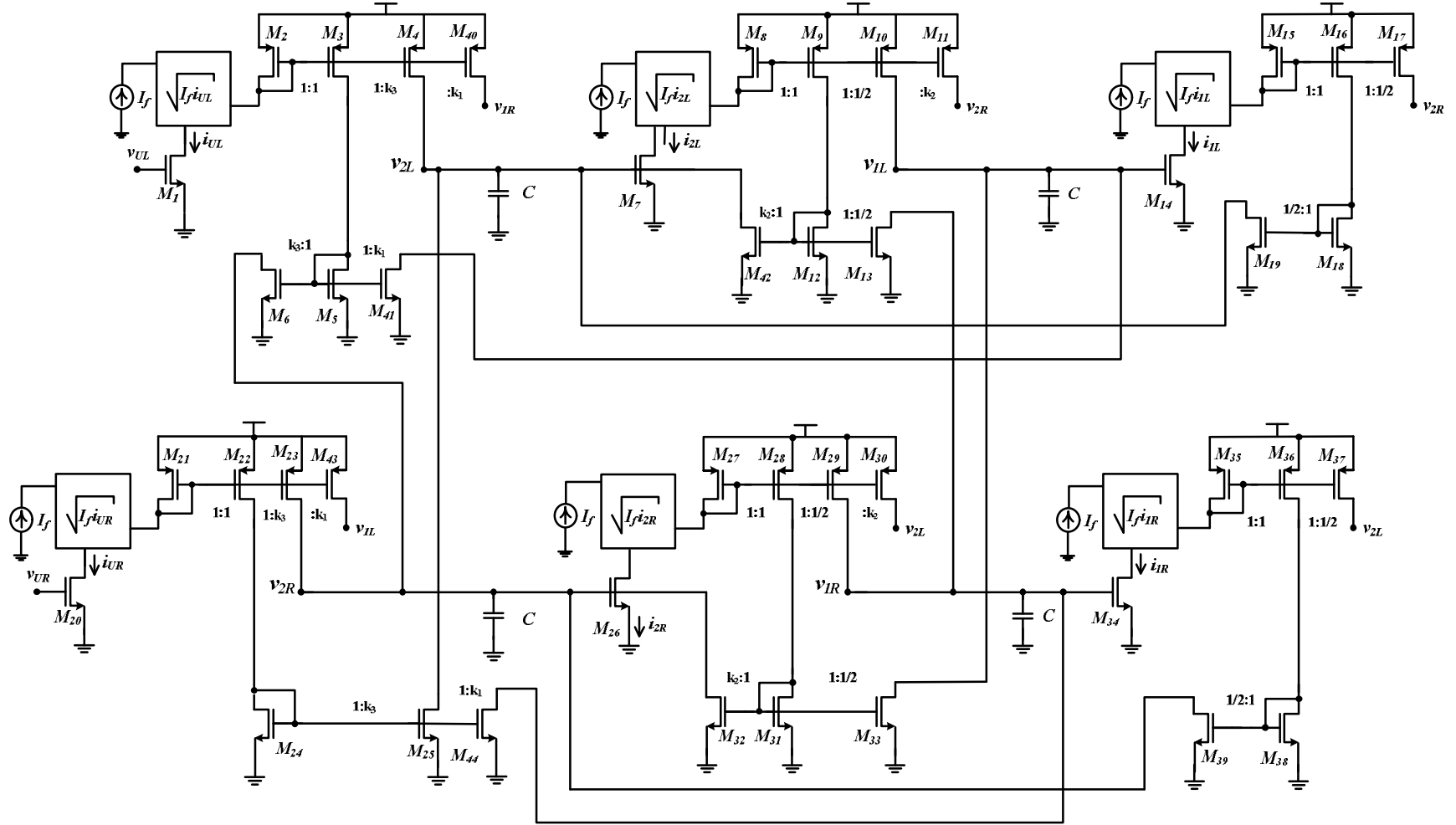
7.4.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'de verildiği gibi iki farklı yapıda tasarımı yapılan ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtrelerinin benzetimleri PSpice programında yapılmıştır.

Bunun için öncelikle her iki band geçiren filtre devresinin kazanç değeri $a_f=1$ ve kalite faktörü $Q=1$ olarak seçilmiştir. Ayrıca devrede kullanılan tüm MOS transistörler daha önceki tasarımlarda olduğu gibi TSMC 0.35 μm CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak EK-I'de verildiği gibidir. Kullanılan teknolojiye ve tasarlanan filtrenin kazanç ve kalite faktörü değerlerine göre devre yapılarında kullanılan transistörlerin boyutları da değişmektedir. Tasarlanan band geçiren filtre devrelerinin tümünde kullanılan karekök alma blokları Şekil 2.6'da verilen devre yapısında ve Tablo 4.1'de verilen transistör boyutları kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca devrelerin diğer kısımlarında kullanılan tüm transistörler Tablo 7.9 ve Tablo 7.10'da verilen boyutlarda seçilerek modellenmiştir.

Tablo 7.9: Şekil 7.15'deki ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

Transistör No	W/L [μm]	Transistör No	W/L [μm]
M ₂ , M ₃ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₇ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₁ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₈ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₁₈ , M ₁₉ , M ₂₀ , M ₂₅ , M ₂₆ , M ₂₈ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₄ , M ₃₇ , M ₃₈	7/.7
M ₄ , M ₂₃	10.5/.7	M ₅ , M ₂₄	31.5/.7



Şekil 7.16: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresi

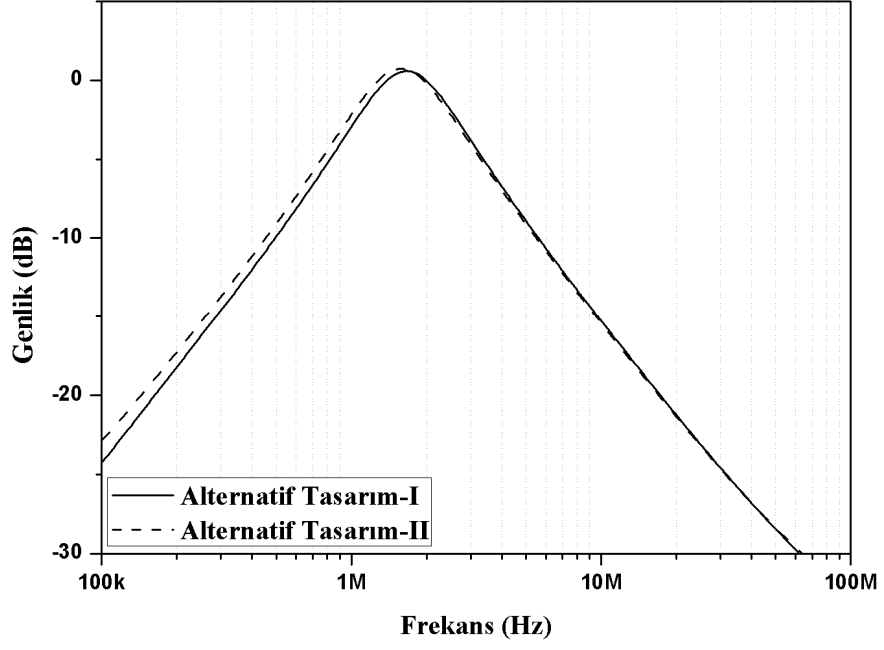
Tablo 7.10: Şekil 7.16'deki ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₅ , M ₁₆ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₇ , M ₂₈ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₇ , M ₁₂ , M ₁₄ , M ₁₈ , M ₂₀ , M ₂₄ , M ₂₆ , M ₃₁ , M ₃₄ , M ₃₈	7/.7
M ₄ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₇ , M ₂₃ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₇ M ₄₀ , M ₄₃	10.5/.7	M ₆ , M ₁₃ , M ₁₉ , M ₂₅ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₉ , M ₄₁ , M ₄₂ , M ₄₄	3.5/.7

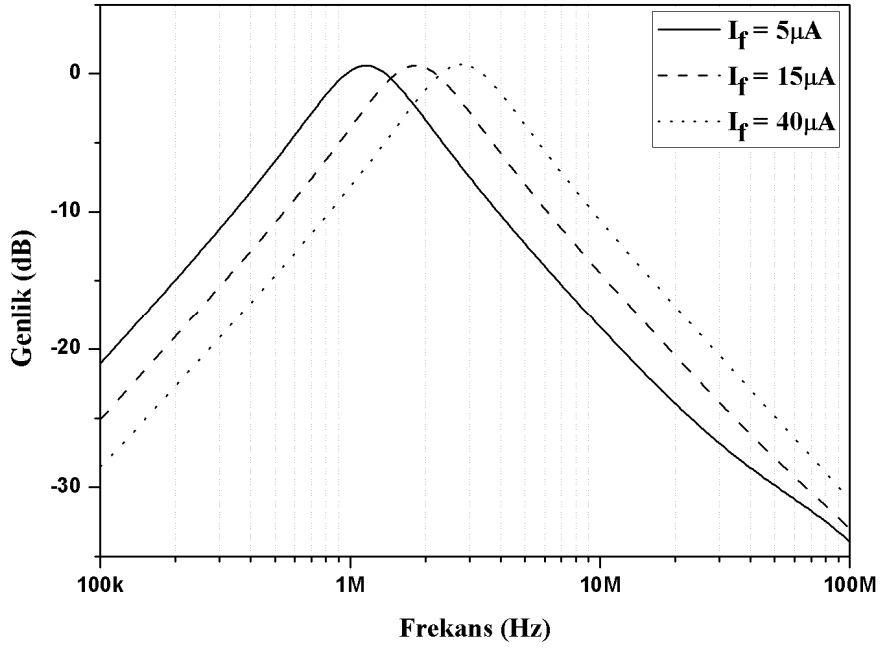
Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'de verildiği gibi tasarlanan ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtre devrelerinin besleme gerilimi 1.5V'tur. Devrelerdeki her bir kondansatör değeri 10pF ve bağımsız akım kaynağı değerleri de 12µA olarak belirlenmiştir. Giriş işareti olarak 80mV tepe değerine sahip sinüs işareti uygulanan devrelerin kesim frekansı 1.6MHz dir.

Tasarlanan band geçiren karekök ortam filtre devreleri kesim frekansında çalıştırıldığında frekans ortamı analizleri sonucunda elde edilen genlik cevabı Şekil 7.17'de verildiği gibidir.

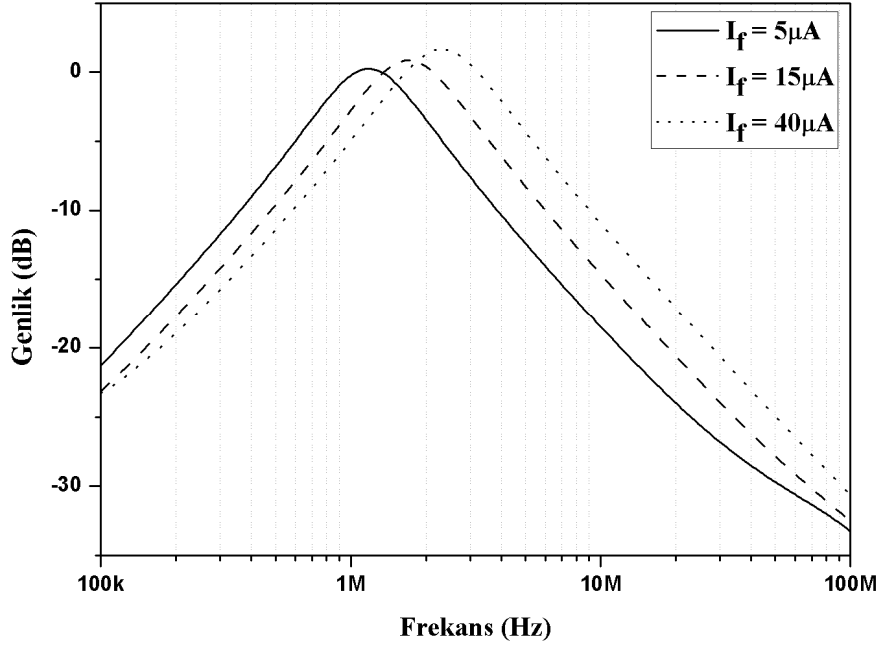
Tasarlanan ikinci dereceden band geçiren karekök ortam filtrelerinde kullanılan I_f akım kaynaklarının değeri 5µA ile 40µA arasında değiştirilerek devrelerin ayarlanabilir kesim frekansı özellikleri irdelenmiştir. Her bir devre yapısı için elde edilen genlik cevabı eğrileri sırasıyla Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da verildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 7.17: İkinci dereceden AB sınıfı band geçiren filtre devresi genlik cevabı



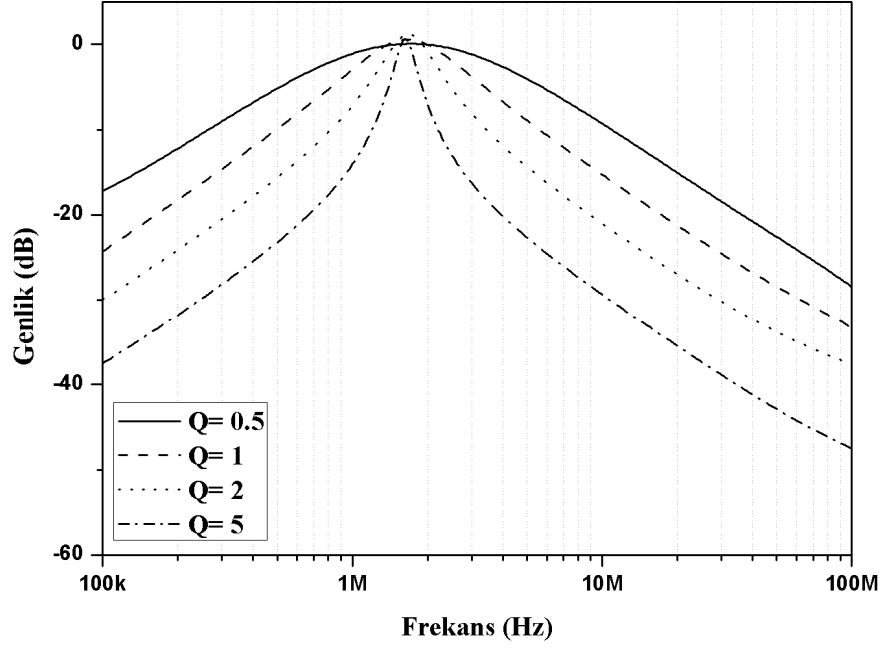
Şekil 7.18: Şekil 7.15’da verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



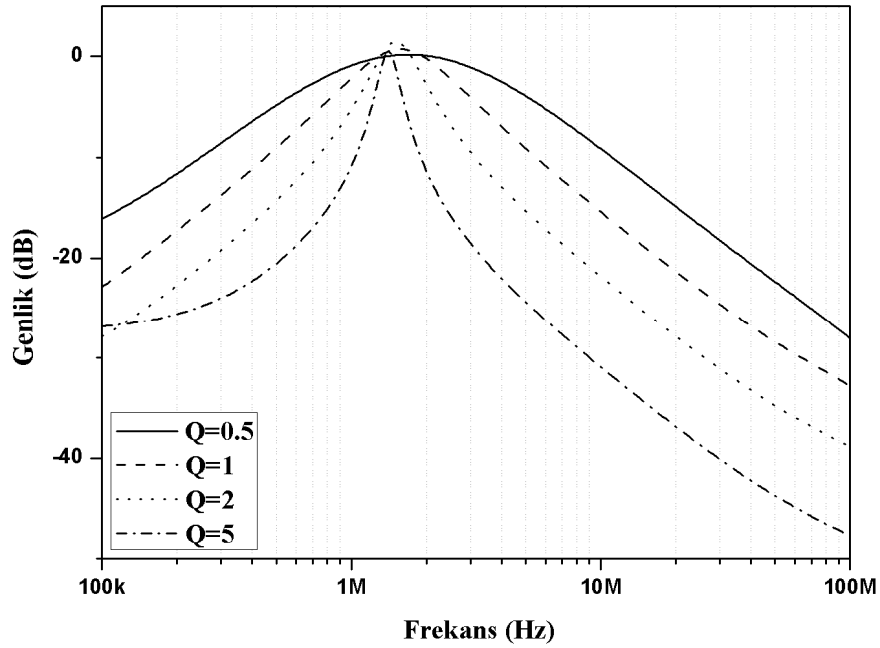
Şekil 7.19: Şekil 7.16’de verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı

Band geçiren karakteristikte AT-I yöntemi ile Şekil 7.15’de verildiği gibi tasarlanan karekök ortam filtresi devredeki bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları değiştirilerek farklı kalite faktörü değerlerinde çalıştırılabilir. Bunun için devredeki akım aynalarında kullanılan M_4 , M_5 , M_7 , M_8 , M_{14} , M_{23} , M_{24} , M_{26} , M_{27} , M_{33} transistörlerinin akım kopyalama oranlarının yani boyutlarının Denklem (7.27)’deki katsayılara bağlı olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Bu şekilde Şekil 7.15’de belirtilen transistörlerin boyutları değiştirilerek devrenin kalite faktörü değeri 0.5, 1, 2 ve 5 olarak ayarlanmıştır. Elde edilen genlik cevabı Şekil 7.20’de verildiği gibidir.

Benzer şekilde AT-II kullanılarak Şekil 7.16’daki gibi tasarlanan band geçiren karekök ortam filtresi de farklı kalite faktörü değerlerinde çalıştırılmıştır. Bunun için devredeki akım aynalarında kullanılan M_4 , M_6 , M_{11} , M_{23} , M_{25} , M_{30} , M_{32} , M_{40} , M_{41} , M_{42} , M_{43} ve M_{44} transistörlerinin akım kopyalama oranlarının yani boyutlarının Denklem (7.30)’da verilen bağıntılara göre değiştirilmesi gereklidir. Devrenin kazanç değeri sabit tutularak kalite faktörü değeri 0.5, 1, 2 ve 5 olacak şekilde transistör boyutları ayarlandığında elde edilen genlik cevabı Şekil 7.21’de verildiği gibidir.



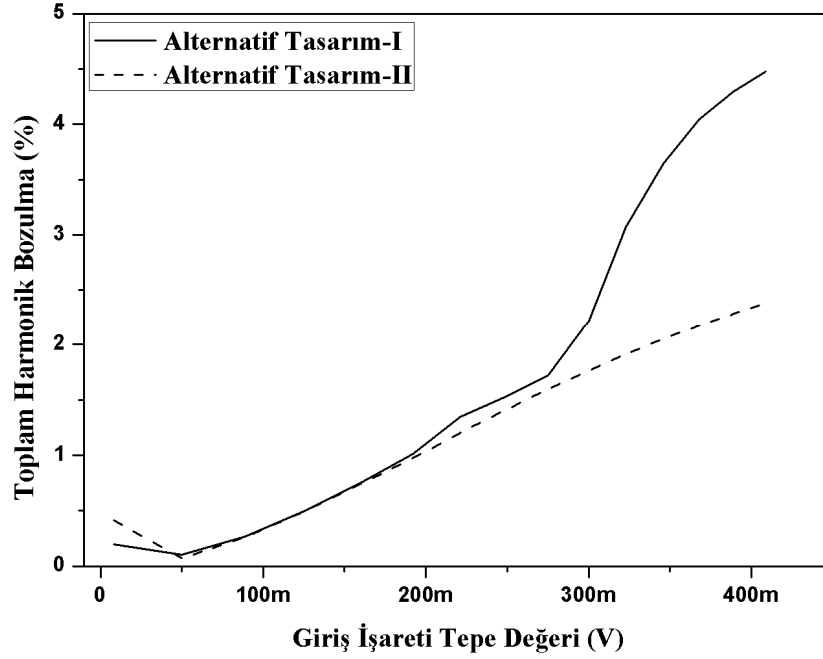
Şekil 7.20: Şekil 7.15’de verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi farklı kalite faktörü değerleri için genlik cevabı



Şekil 7.21: Şekil 7.16’de verilen ikinci dereceden band geçiren filtre devresi farklı kalite faktörü değeri için genlik cevabı

Son olarak tasarlanan devrelerin PSpice programında bozulma ve gürültü analizleri yapılmıştır. Bunun için ilk olarak her bir devrede giriş işaretinin tepe değeri 8mV ile 410mV arasında değiştirilmiştir. Bu değişime bağlı olarak devrelerin çıkış işaretlerinde görülen bozulma oranları % olarak Şekil 7.22’de görüldüğü gibi elde

edilmiştir. Ayrıca tasarlanan band geçiren filtre devrelerinin PSpice benzetim programından elde edilen toplam güç tüketimi değerleri AT-I ve AT-II için sırasıyla 2.41mW ve 5.53mW olarak ölçülmüştür. Devrelerin PSpice programı gürültü analizi sonucu elde edilen iletim bandı gürültü değerleri sırasıyla $106 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ve $111 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ dir.



Şekil 7.22: İkinci dereceden AB sınıfı band geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları

7.5 İkinci Dereceden Çentik Geçiren Filtre Devresi Tasarımı

İkinci dereceden çentik karakteristiğe sahip bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu genel gösterimi Denklem (7.31)'de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = a_1 \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (7.31)$$

Transfer fonksiyonu verilen çentik filtre devresi için *Companion-III* tekniği kullanılarak sistem denklemleri Denklem (7.32)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 - \frac{a_1}{Q} \omega_0 u \\
\dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 - \frac{1}{Q} \omega_0 x_2 + \left(\frac{a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u \\
y &= x_1 + a_1 u
\end{aligned} \tag{7.32}$$

7.5.1 İkinci dereceden çentik filtre devresi alternatif tasarımı-I

Tez kapsamında geliştirilen AB sınıfı alternatif tasarım-I yöntemi kullanılarak Denklem (7.32)'de verilen denklemler düzenlenirse Denklem (7.33) elde edilir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1L} &= \omega_0 x_{2L} - \frac{a_1}{Q} \omega_0 u_L - \left(\frac{Q - a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_L - \left(\frac{Q - a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{2L} &= -\omega_0 x_{1L} - \frac{1}{Q} \omega_0 x_{2L} + \left(\frac{a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u_L \\
&\quad + \left(\frac{Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{1R} &= \omega_0 x_{2R} - \frac{a_1}{Q} \omega_0 u_R - \left(\frac{Q - a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_L - \left(\frac{Q - a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\
\dot{x}_{2R} &= -\omega_0 x_{1R} - \frac{1}{Q} \omega_0 x_{2R} + \left(\frac{a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u_R \\
&\quad + \left(\frac{Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q^2 + Q - a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\
y_L &= x_{1L} + a_1 u_L \\
y_R &= x_{1R} + a_1 u_R
\end{aligned} \tag{7.33}$$

Denklem (7.33)'deki gibi elde edilen sistem denklemleri üzerinde tezin daha önceki kısımlarında kullandığımız eşleştirme fonksiyonları kullanılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa Denklem (7.34)'de verilen devre denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= \sqrt{I_f i_{2L}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_L}} - k_2 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{2L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} - k_3 \sqrt{I_f i_{2L}} + k_4 \sqrt{I_f i_{U_L}} + k_5 \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
C\dot{v}_{1R} &= \sqrt{I_f i_{2R}} - k_1 \sqrt{I_f i_{U_R}} - k_2 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
C\dot{v}_{2R} &= -\sqrt{I_f i_{1R}} - k_3 \sqrt{I_f i_{2R}} + k_4 \sqrt{I_f i_{U_R}} + k_5 \sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_L &= v_{1L} + a_1 v_{U_L} \\
y_R &= v_{1R} + a_1 v_{U_R}
\end{aligned} \tag{7.34}$$

Denklem (7.34)'de kullanılan herbir k katsayısının devrenin kazancı a_1 ve kalite faktörü Q cinsinden ifadesi Denklem (7.35)'de verildiği gibidir.

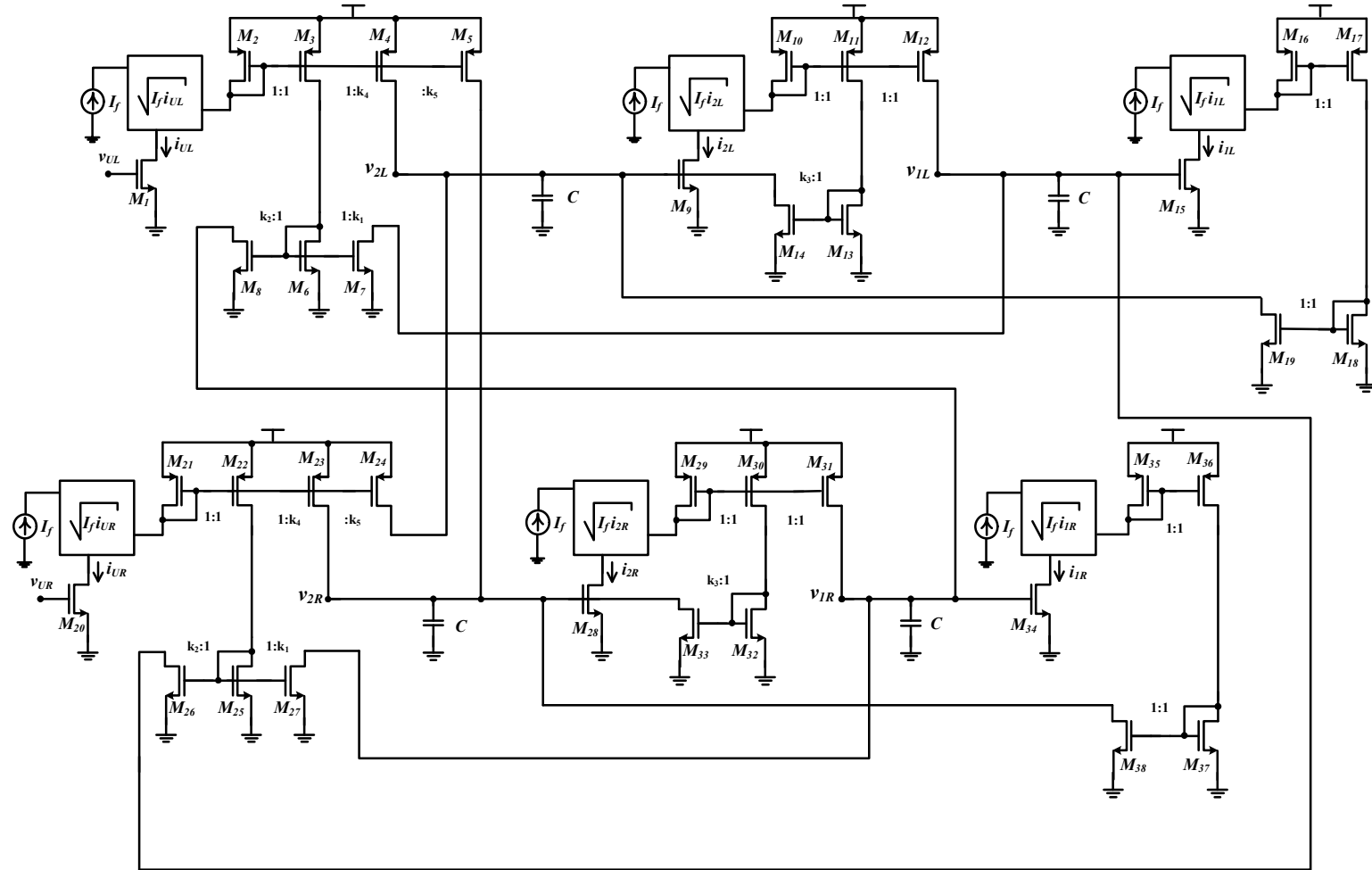
$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{Q + a_1}{2Q} \\
 k_2 &= \frac{Q - a_1}{2Q} \\
 k_3 &= \frac{1}{Q} \\
 k_4 &= \frac{Q^2 + Q + a_1}{2Q^2} \\
 k_5 &= \frac{Q^2 + Q - a_1}{2Q^2}
 \end{aligned} \tag{7.35}$$

Devre denklemlerinin son hali Denklem (7.34)'de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden çentik karekök ortam filtre devresi yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.23'de verildiği gibi tasarlanabilmektedir.

Karekök ortamda tasarlanan bu ikinci dereceden çentik filtre devresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazancı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.35)'de verildiği gibidir.

7.5.2 İkinci dereceden çentik filtre devresi alternatif tasarımı-II

Denklem (7.32)'de verilen sistem denklemleri tez kapsamında geliştirilen AB sınıfı AT-II yöntemi kullanılarak düzenlenirse yeni sistem denklemleri Denklem (7.36)'daki gibi elde edilir.



Şekil 7.23: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresi

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1L} &= \frac{1}{2}\omega_0 x_{2L} - \frac{1}{2}\omega_0 x_{2R} - \frac{a_1}{2Q}\omega_0 u_L + \frac{a_1}{2Q}\omega_0 u_R \\
\dot{x}_{2L} &= -\frac{1}{2}\omega_0 x_{1L} + \frac{1}{2}\omega_0 x_{1R} - \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2L} + \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2R} \\
&\quad + \frac{a_1}{2Q^2}\omega_0 u_L - \frac{a_1}{2Q^2}\omega_0 u_R \\
\dot{x}_{1R} &= \frac{1}{2}\omega_0 x_{2R} - \frac{1}{2}\omega_0 x_{2L} - \frac{a_1}{2Q}\omega_0 u_R + \frac{a_1}{2Q}\omega_0 u_L \\
\dot{x}_{2R} &= -\frac{1}{2}\omega_0 x_{1R} + \frac{1}{2}\omega_0 x_{1L} - \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2R} + \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2L} \\
&\quad + \frac{a_1}{2Q^2}\omega_0 u_R - \frac{a_1}{2Q^2}\omega_0 u_L \\
y_L &= x_{1L} + a_1 u_L \\
y_R &= x_{1R} + a_1 u_R
\end{aligned} \tag{7.36}$$

Denklem (7.36)'daki sistem denklemlerine sahip olan çentik karakteristikli filtre devresinin karekök ortamda tasarımı için daha önceki tasarımlarda yapılan düzenlemeler ve kabullenmeler yapılırsa devre denklemleri Denklem (7.37)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{1L} &= \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2R}} - k_1\sqrt{I_f i_{U_L}} + k_1\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
\dot{v}_{2L} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} - k_2\sqrt{I_f i_{2L}} + k_2\sqrt{I_f i_{2R}} \\
&\quad + k_3\sqrt{I_f i_{U_L}} - k_3\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
\dot{v}_{1R} &= \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2R}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2L}} - k_1\sqrt{I_f i_{U_R}} + k_1\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
\dot{v}_{2R} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} - k_2\sqrt{I_f i_{2R}} + k_2\sqrt{I_f i_{2L}} \\
&\quad + k_3\sqrt{I_f i_{U_R}} - k_3\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
y_L &= v_{1L} + a_1 v_{U_L} \\
y_R &= v_{1R} + a_1 v_{U_R}
\end{aligned} \tag{7.37}$$

Denklem (7.37)'de kullanılan her bir k katsayısının devrenin kazancı a_I ve kalite faktörü Q cinsinden ifadesi Denklem (7.38)'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{a_1}{2Q} \\
k_2 &= \frac{1}{2Q} \\
k_3 &= \frac{a_1}{2Q^2}
\end{aligned} \tag{7.38}$$

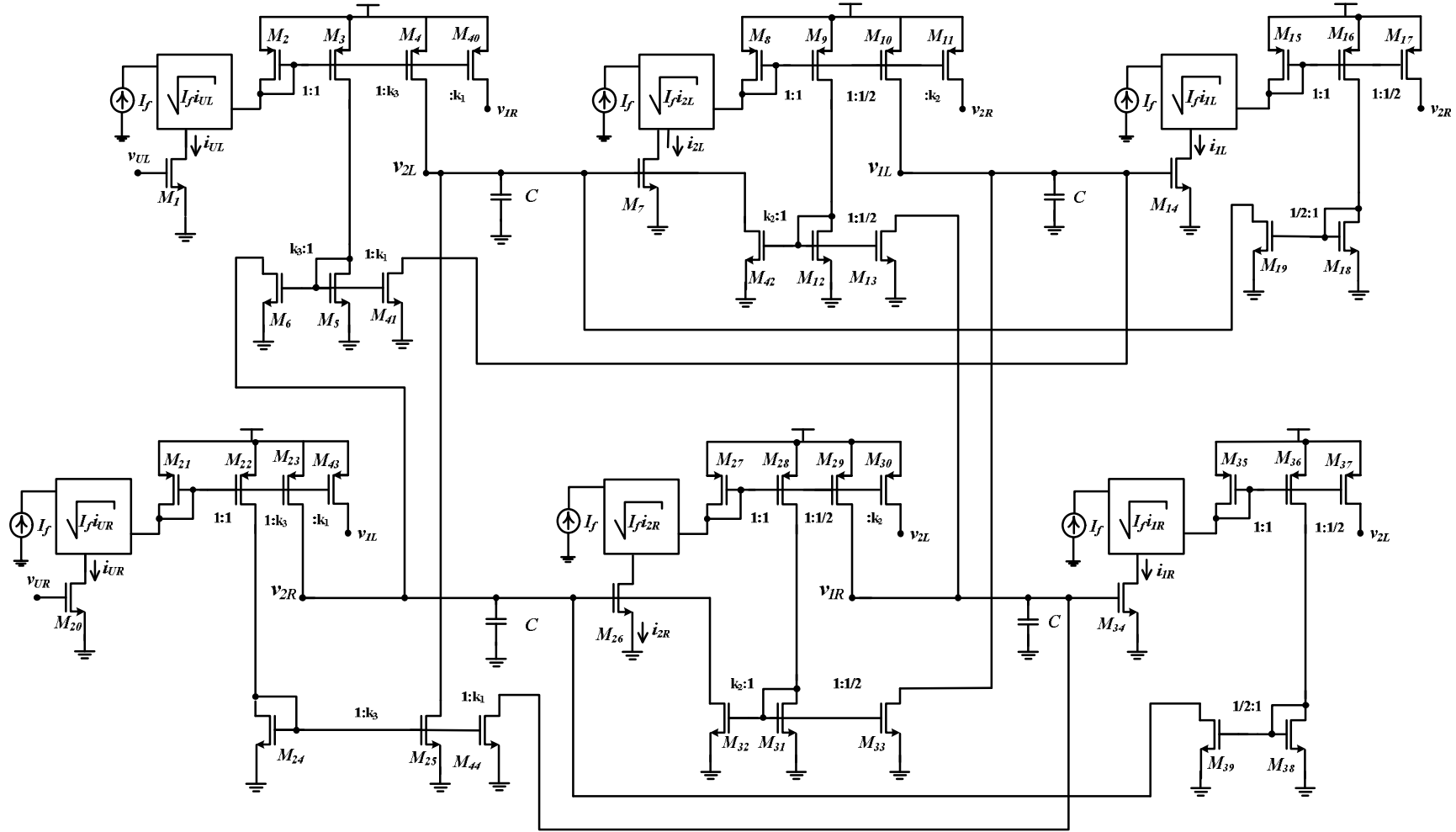
Devre denklemlerinin son hali Denklem (7.37)'de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden çentik karekök ortam filtre devresi yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.22'de verildiği gibi tasarlanabilmektedir.

Şekil 7.22'de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden çentik karekök ortam filtresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazancı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.38)'de verildiği gibidir.

7.5.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden karekök ortam çentik filtreleri analiz sonuçları

Şekil 7.23 ve Şekil 7.22'de verildiği gibi iki farklı yapıda karekök ortam filtresi olarak tasarlanan ikinci dereceden çentik filtrelerinin benzetimleri PSpice programında yapılmıştır.

Bunun için öncelikle her iki çentik filtre devresinin kazanç değeri $a_1=1$ ve kalite faktörü $Q=1$ olarak seçilmiştir. Ayrıca devrede kullanılan tüm MOS transistörler daha önceki tasarımlarda olduğu gibi TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak EK-I'de verildiği gibidir. Kullanılan teknolojiye ve tasarlanan filtrenin kazanç ve kalite faktörü değerlerine göre devre yapılarında kullanılan transistörlerin boyutları da değişmektedir. Tasarlanan çentik filtrelerin tümünde kullanılan karekök alma blokları Şekil 2.6'da verilen devre yapısı kullanılarak ve Tablo 4.1'de verilen transistör boyutları ile elde edilmiştir. Ayrıca devrelerin diğer kısımlarında kullanılan tüm transistörler Tablo 7.11 ve Tablo 7.12'te verilen boyutlarda seçilerek modellenmiştir.



Şekil 7.24: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresi

Tablo 7.11: Şekil 7.23’de verilen ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresinde kullanılan transistör boyutları

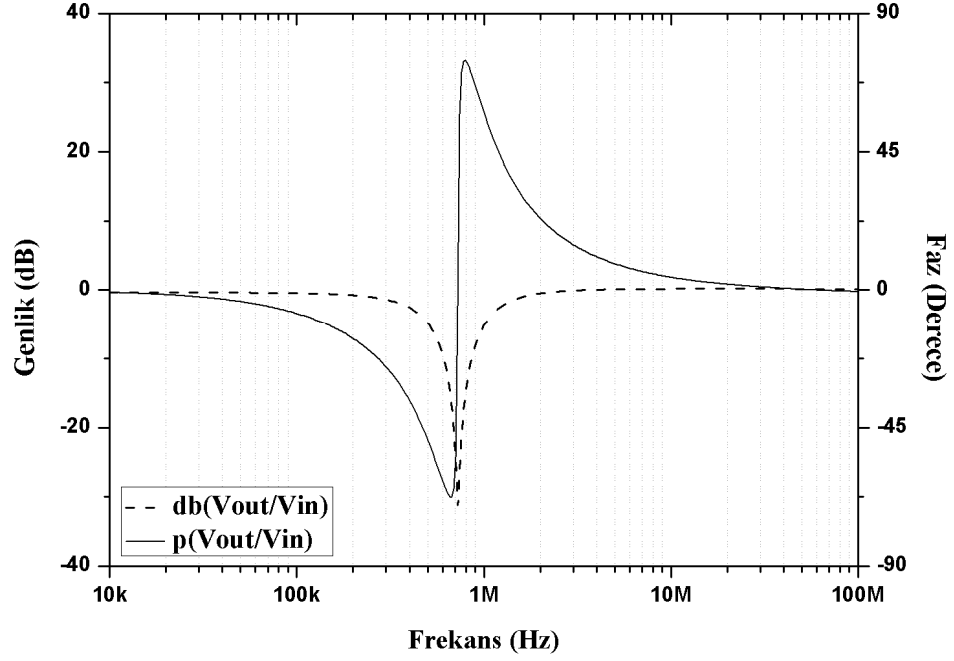
Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₇ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₁ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₇ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₁₈ , M ₁₉ , M ₂₀ , M ₂₅ , M ₂₇ , M ₂₈ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₄ , M ₃₇ , M ₃₈	7/.7
M ₄ , M ₂₃	31.5/.7	M ₅ , M ₂₄ ,	10.5/.7

Tablo 7.12: Şekil 7.24’da verilen ikinci dereceden karekök ortam çentik filtresinde kullanılan transistör boyutları

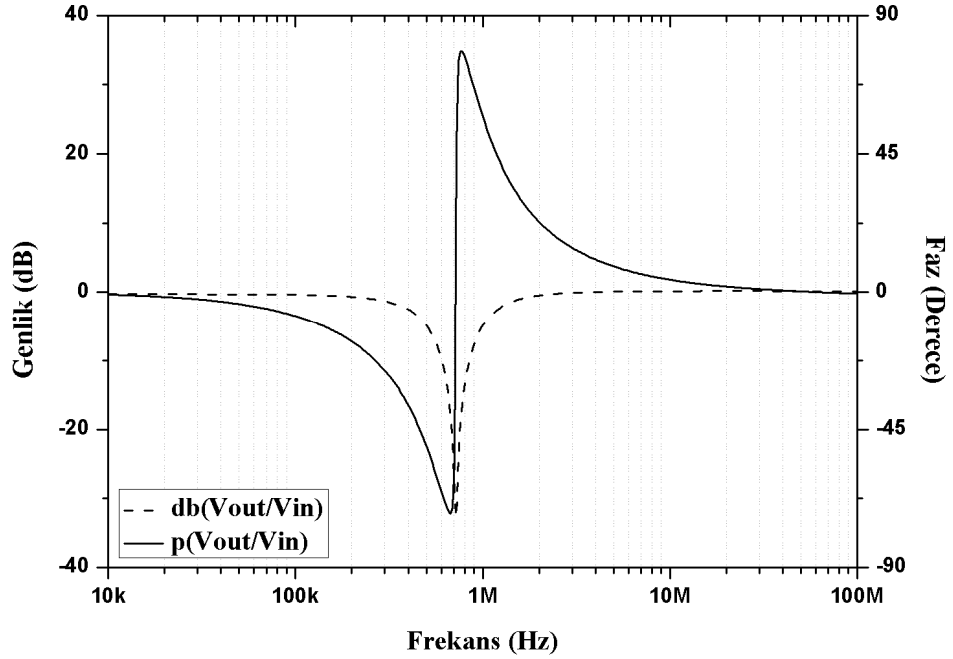
Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₅ , M ₁₆ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₇ , M ₂₈ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₇ , M ₁₂ , M ₁₄ , M ₁₈ , M ₂₀ , M ₂₄ , M ₂₆ , M ₃₁ , M ₃₄ , M ₃₈	7/.7
M ₄ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₇ , M ₂₃ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₇ , M ₄₀ , M ₄₃	10.5/.7	M ₆ , M ₁₃ , M ₁₉ , M ₂₅ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₉ , M ₄₁ , M ₄₂ , M ₄₄	3.5/.7

Şekil 7.23 ve Şekil 7.24’da verildiği gibi tasarlanan ikinci dereceden karekök ortam çentik filtrelerinin besleme gerilimi 1.5V’tur. Devrelerdeki her bir kondansatör değeri 20pF ve devrelerde kullanılan her bir bağımsız akım kaynağının değeri de 10µA olarak belirlenmiştir. Giriş işareti olarak 50mV tepe değerine sahip sinüs işareti uygulanan devrelerin kesim frekansı 725kHz olarak elde edilmiştir.

Bölüm 5’te sunulan teori çerçevesinde AT-I ve AT-II kullanılarak tasarlanan karekök ortam çentik filtre devreleri kesim frekansında çalıştırıldığında frekans ortamı analizleri sonucunda elde edilen genlik cevabı ve faz cevabı eğrileri sırasıyla Şekil 7.25 ve Şekil 7.26’da verildiği gibidir.



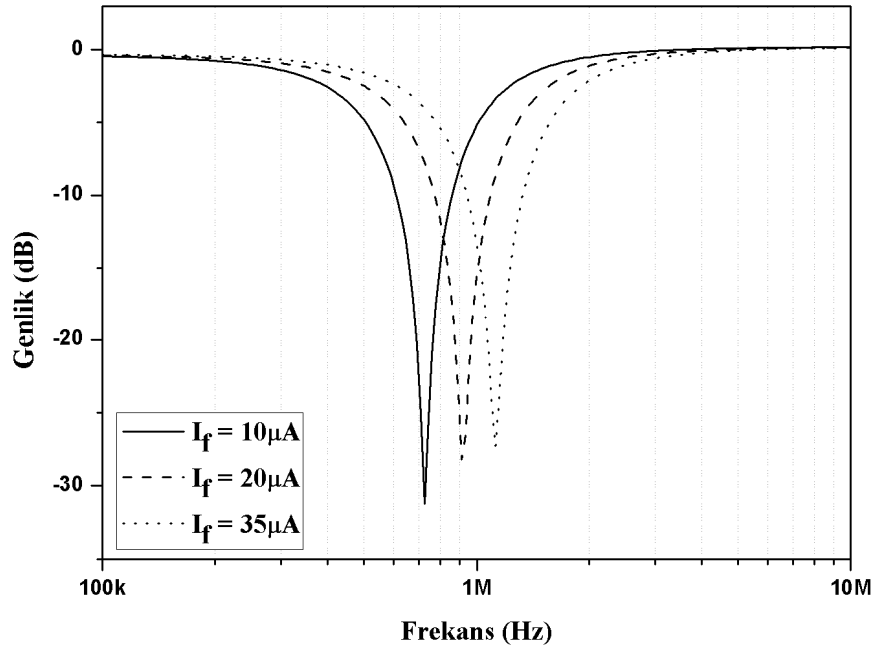
Şekil 7.25: Şekil 7.23'deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi genlik ve faz cevabı



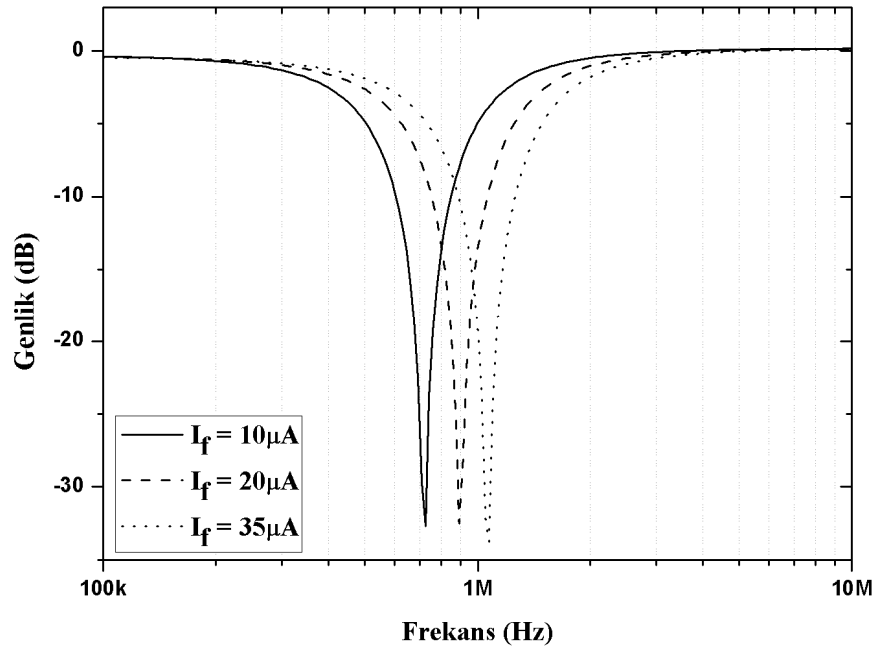
Şekil 7.26: Şekil 7.24'deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi genlik ve faz cevabı

İki farklı alternatif teori kullanılarak tasarlanan ikinci dereceden çentik filtre devrelerinde; devre yapılarında yer alan I_f akım kaynaklarının değeri $10\mu\text{A}$ ile $35\mu\text{A}$ arasında değiştirilerek devrelerin ayarlanabilir kesim frekansı özellikleri PSpice

programı üzerinde irdelenmiştir. Her bir devre yapısı için elde edilen genlik cevabı eğrileri sırasıyla Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’de verildiği gibidir.

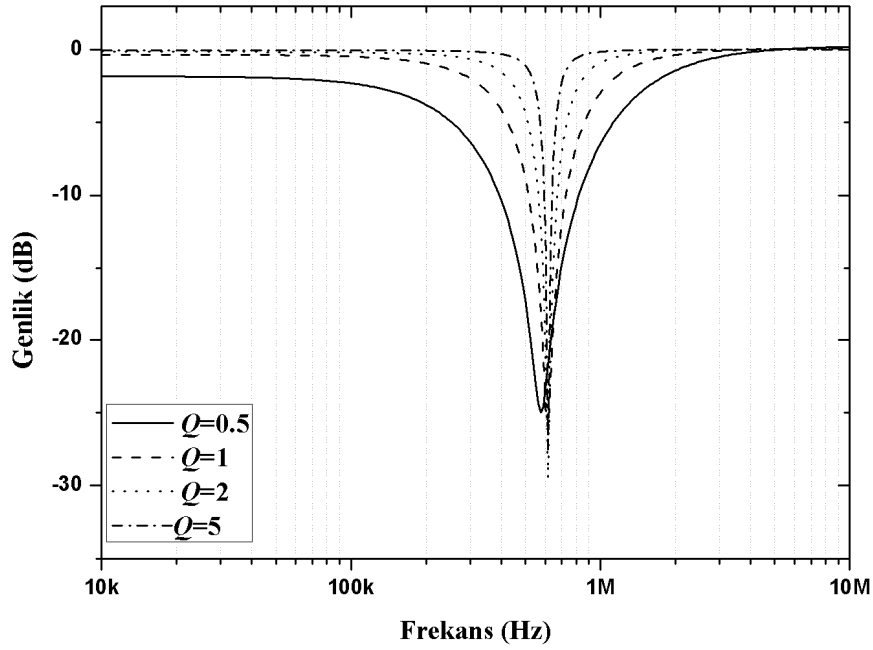


Şekil 7.27: Şekil 7.23’deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi ayarlanabilir genlik cevabı



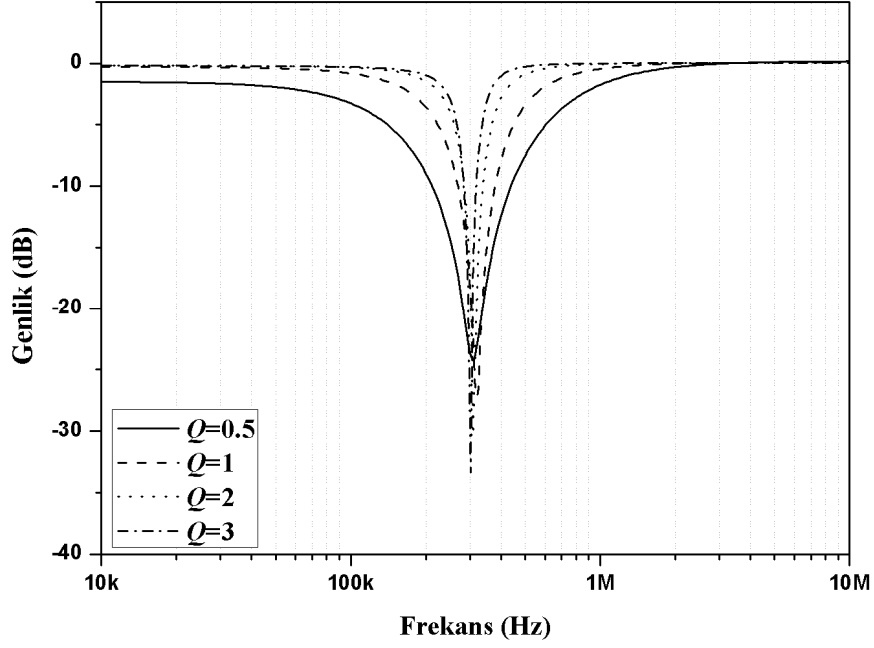
Şekil 7.28: Şekil 7.24’deki ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresi ayarlanabilir genlik cevabı

Şekil 7.23'deki karekök ortam çentik filtresinin farklı kalite faktörü değerlerinde çalıştırılabilmesi için devre üzerindeki akım aynalarında kullanılan M_4 , M_5 , M_7 , M_8 , M_{14} , M_{23} , M_{24} , M_{26} , M_{27} ve M_{33} transistörlerinin akım kopyalama oranlarının Denklem (7.35)'te verilen katsayılarla bağlı olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Belirtilen transistörlerin boyutları Denklem (7.35)'deki katsayılarla bağlı olarak değiştirilmiş ve devrenin kalite faktörü değeri 0.5, 1, 2 ve 5 olarak ayarlanmıştır. Bu durumda elde edilen genlik cevabı Şekil 7.29'da verildiği gibidir.



Şekil 7.29: Şekil 7.23'de verilen ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresinin farklı Q değeri için genlik cevabı

Benzer şekilde Şekil 7.24'deki gibi tasarlanan karekök ortam filtre devresinin farklı kalite faktörü değerlerinde çalıştırılabilmesi için devre üzerindeki akım aynalarında kullanılan M_4 , M_6 , M_{11} , M_{23} , M_{25} , M_{30} , M_{32} , M_{40} , M_{41} , M_{42} , M_{43} ve M_{44} transistörlerinin akım kopyalama oranlarının Denklem (7.38)'de verilen katsayılarla bağlı olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Belirtilen transistörlerin boyutları değiştirilerek devrenin kalite faktörü 0.5, 1, 2 ve 3 değerine ayarlanmıştır. Devrenin PSpice benzetimi sonucunda elde edilen genlik cevabı Şekil 7.30'de verildiği gibidir.



Şekil 7.30: Şekil 7.24’da verilen ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devresinin farklı Q değeri için genlik cevabı

Tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı çentik filtre devrelerine ait PSpice benzetimi sonucunda elde edilen toplam güç tüketimi değerleri Tablo 7.13’de verilmiştir.

Tablo 7.13: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden çentik filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	8.7mW
Alternatif Tasarım-II	8.24mW

Son olarak AT-I ve AT-II kullanılarak tasarlanmış olan çentik filtrelerin çıkış işaretinden elde edilen gürültü seviyesi ölçümleri yapılmıştır. Her iki tasarımın da çıkış işareti gürültüleri alçak geçiren karakteristikte olup iletim bandından ölçülen gürültü değerleri sırasıyla $145 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ve $125 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ değerindedir.

7.6 İkinci Dereceden Tüm Geçiren Filtre Devresi Tasarımı

İkinci dereceden tüm geçiren karakteristiğe sahip bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu genel gösterimi Denklem (7.39)'da verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = a_1 \frac{s^2 - \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (7.39)$$

Denklem (7.39)'da transfer fonksiyonu verilen a_1 kazanç değerine sahip tüm geçiren filtre devresine ait sistem denklemleri Denklem (7.40)'ta verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 - \frac{2a_1}{Q} \omega_0 u \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0 x_1 - \frac{1}{Q} \omega_0 x_2 + \left(\frac{2a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u \\ y &= x_1 + a_1 u \end{aligned} \quad (7.40)$$

7.6.1 İkinci dereceden tüm geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I

Tez kapsamında geliştirilen AB sınıfı alternatif tasarım-I yöntemi kullanılarak Denklem (7.40)'ta verilen denklemler düzenlenirse Denklem (7.41) elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1L} &= \omega_0 x_{2L} - \frac{2a_1}{Q} \omega_0 u_L - \left(\frac{Q-2a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_L - \left(\frac{Q-2a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{2L} &= -\omega_0 x_{1L} - \frac{1}{Q} \omega_0 x_{2L} + \left(\frac{2a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u_L \\ &\quad + \left(\frac{Q^2 + Q - 2a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q^2 + Q - 2a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{1R} &= \omega_0 x_{2R} - \frac{2a_1}{Q} \omega_0 u_R - \left(\frac{Q-2a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_L - \left(\frac{Q-2a_1}{2Q} \right) \omega_0 u_R \\ \dot{x}_{2R} &= -\omega_0 x_{1R} - \frac{1}{Q} \omega_0 x_{2R} + \left(\frac{2a_1}{Q^2} \right) \omega_0 u_R \\ &\quad + \left(\frac{Q^2 + Q - 2a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_L + \left(\frac{Q^2 + Q - 2a_1}{2Q^2} \right) \omega_0 u_R \\ y_L &= x_{1L} + a_1 u_L \\ y_R &= x_{1R} + a_1 u_R \end{aligned} \quad (7.41)$$

Denklem (7.41)'deki sistem denklemleri üzerinde tezin daha önceki kısımlarında kullandığımız eşleştirme fonksiyonları kullanılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa Denklem (7.42)'de verilen devre denklemleri elde edilir.

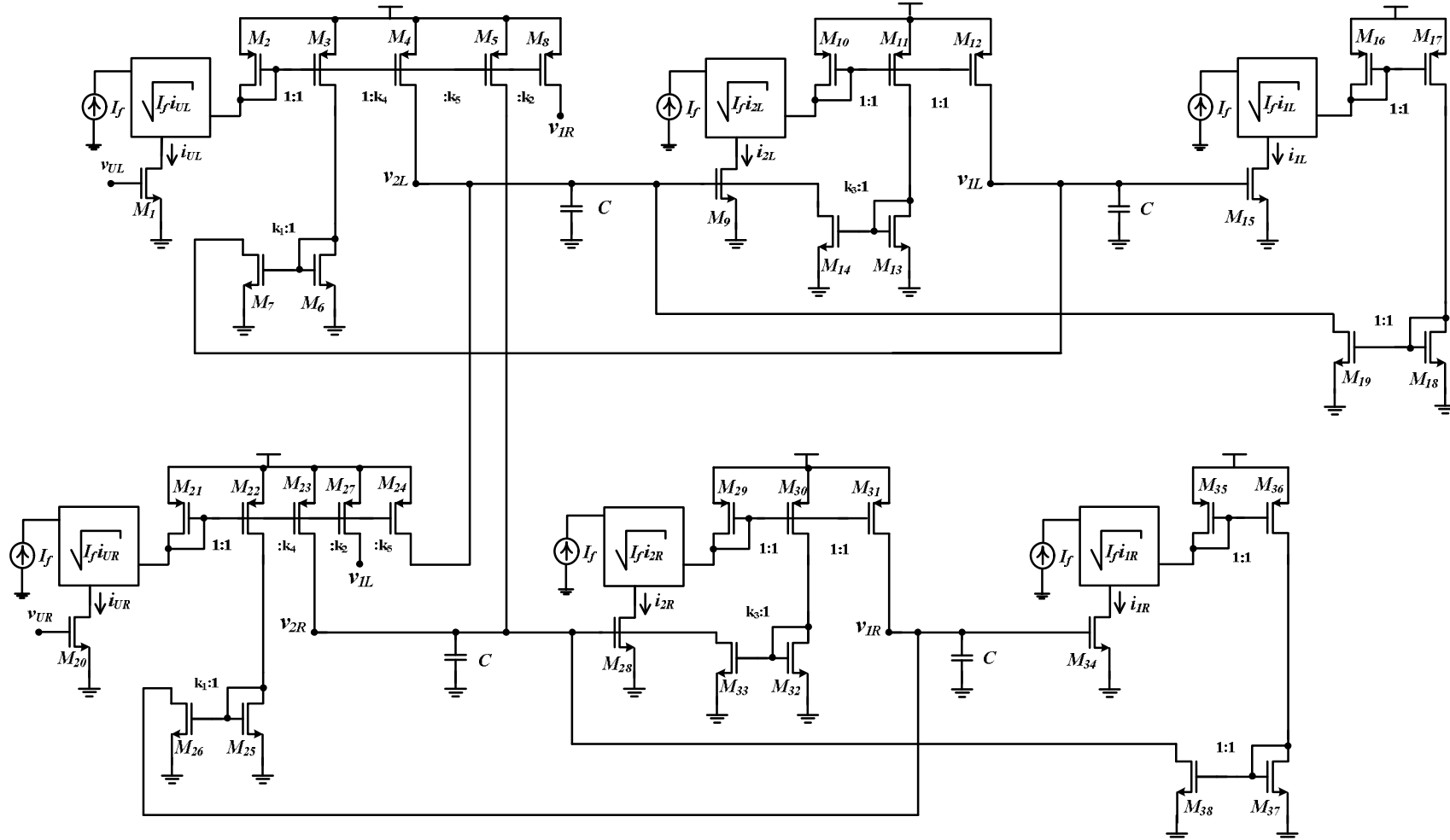
$$\begin{aligned}
C\dot{v}_{1L} &= \sqrt{I_f I_{2L}} - k_1 \sqrt{I_f I_{uL}} + k_2 \sqrt{I_f I_{uR}} \\
C\dot{v}_{2L} &= -\sqrt{I_f I_{1L}} - k_3 \sqrt{I_f I_{2L}} + k_4 \sqrt{I_f I_{uL}} + k_5 \sqrt{I_f I_{uR}} \\
C\dot{v}_{1R} &= \sqrt{I_f I_{2R}} - k_1 \sqrt{I_f I_{uR}} + k_2 \sqrt{I_f I_{uL}} \\
C\dot{v}_{2R} &= -\sqrt{I_f I_{1R}} - k_3 \sqrt{I_f I_{2R}} + k_4 \sqrt{I_f I_{uR}} + k_5 \sqrt{I_f I_{uL}} \\
y_L &= v_{1L} + a_1 v_{uL} \\
y_R &= v_{1R} + a_1 v_{uR}
\end{aligned} \tag{7.42}$$

Denklem (7.42)'de kullanılan herbir k katsayısının devrenin kazancı a_1 ve kalite faktörü Q cinsinden ifadesi Denklem (7.43)'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{Q + 2a_1}{2Q} \\
k_2 &= \frac{2a_1 - Q}{2Q} \\
k_3 &= \frac{1}{Q} \\
k_4 &= \frac{Q^2 + Q + 2a_1}{2Q^2} \\
k_5 &= \frac{Q^2 + Q - 2a_1}{2Q^2}
\end{aligned} \tag{7.43}$$

Devre denklemlerinin son hali Denklem (7.42)'de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresi yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.31'deki gibi tasarlanabilmektedir.

Karekök ortamda tasarlanan bu ikinci dereceden tüm geçiren filtre devresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazancı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.43)'de verildiği gibidir.



Şekil 7.31: AT-I kullanılarak elde edilmiş AB sınıfı ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi

7.6.2 İkinci dereceden tüm geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II

Denklem (7.40)'da verilen sistem denklemleri tez kapsamında geliştirilen AB sınıfı AT-II yöntemi kullanılarak düzenlenirse yeni sistem denklemleri Denklem (7.44)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{1L} &= \frac{1}{2}\omega_0 x_{2L} - \frac{1}{2}\omega_0 x_{2R} - \frac{a_1}{Q}\omega_0 u_L + \frac{a_1}{Q}\omega_0 u_R \\
 \dot{x}_{2L} &= -\frac{1}{2}\omega_0 x_{1L} + \frac{1}{2}\omega_0 x_{1R} - \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2L} + \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2R} \\
 &\quad + \frac{a_1}{Q^2}\omega_0 u_L - \frac{a_1}{Q^2}\omega_0 u_R \\
 \dot{x}_{1R} &= \frac{1}{2}\omega_0 x_{2R} - \frac{1}{2}\omega_0 x_{2L} - \frac{a_1}{Q}\omega_0 u_R + \frac{a_1}{Q}\omega_0 u_L \\
 \dot{x}_{2R} &= -\frac{1}{2}\omega_0 x_{1R} + \frac{1}{2}\omega_0 x_{1L} - \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2R} + \frac{1}{2Q}\omega_0 x_{2L} \\
 &\quad + \frac{a_1}{Q^2}\omega_0 u_R - \frac{a_1}{Q^2}\omega_0 u_L \\
 y_L &= x_{1L} + a_1 u_L \\
 y_R &= x_{1R} + a_1 u_R
 \end{aligned} \tag{7.44}$$

Denklem (7.44)'deki sistem denklemlerine sahip olan tüm geçiren filtre devresinin karekök ortamda tasarımı için daha önceki tasarımlarda yapılan düzenlemeler ve kabullenmeler yapılırsa devre denklemleri Denklem (7.45)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_{1L} &= \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2R}} - k_1\sqrt{I_f i_{U_L}} + k_1\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
 \dot{v}_{2L} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} - k_2\sqrt{I_f i_{2L}} + k_2\sqrt{I_f i_{2R}} \\
 &\quad + k_3\sqrt{I_f i_{U_L}} - k_3\sqrt{I_f i_{U_R}} \\
 \dot{v}_{1R} &= \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2R}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{2L}} - k_1\sqrt{I_f i_{U_R}} + k_1\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
 \dot{v}_{2R} &= -\frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1R}} + \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{1L}} - k_2\sqrt{I_f i_{2R}} + k_2\sqrt{I_f i_{2L}} \\
 &\quad + k_3\sqrt{I_f i_{U_R}} - k_3\sqrt{I_f i_{U_L}} \\
 y_L &= v_{1L} + a_1 v_{U_L} \\
 y_R &= v_{1R} + a_1 v_{U_R}
 \end{aligned} \tag{7.45}$$

Denklem (7.45)'de kullanılan her bir k katsayısının devrenin kazancı a_1 ve kalite faktörü Q cinsinden ifadesi Denklem (7.46)'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{a_1}{Q} \\
k_2 &= \frac{1}{2Q} \\
k_3 &= \frac{a_1}{Q^2}
\end{aligned}
\tag{7.46}$$

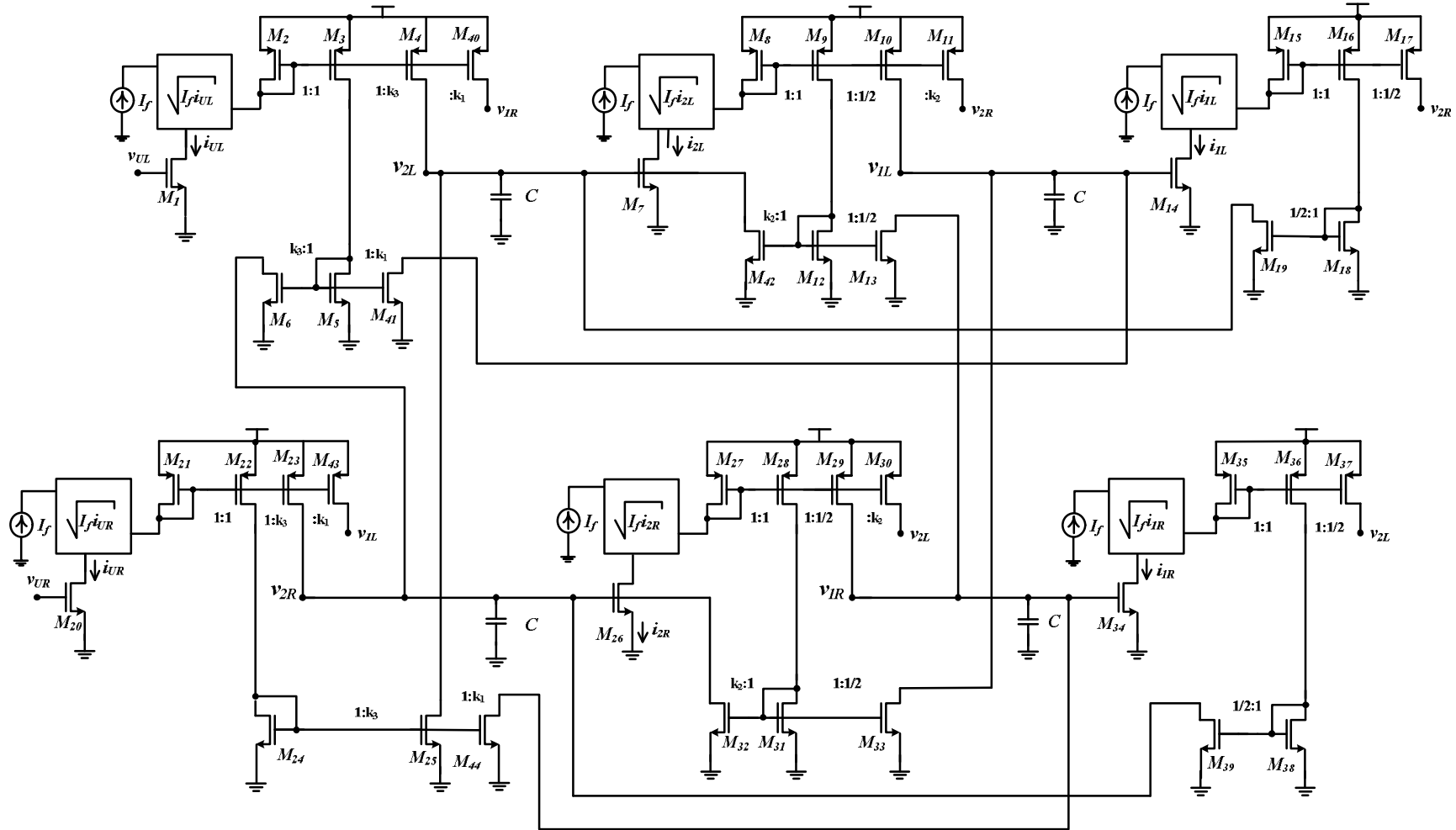
Devre denklemlerinin son hali Denklem (7.45)'de verildiği gibi elde edilen ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devresi yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 7.32'de verildiği gibi tasarlanabilmektedir.

Tasarlanan bu ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde bazı akım aynalarının akım kopyalama oranları filtre devresinin kazancı (a_1) ve kalite faktörü (Q) değerlerine bağlı olarak Denklem (7.46)'da verildiği gibidir.

7.6.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de verildiği gibi iki farklı yapıda tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtrelerinin PSpice programında benzetimleri yapılmıştır.

Bunun için öncelikle her iki filtre devresinin kazanç değeri $a_1=1$ ve kalite faktörü $Q=1$ olarak seçilmiştir. Ayrıca devrede kullanılan tüm MOS transistörler daha önceki tasarımlarda olduğu gibi TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak EK-I'de verildiği gibidir. Kullanılan teknolojiye ve tasarlanan filtrenin kazanç ve kalite faktörü değerlerine bağlı olarak devrelerde kullanılan transistörlerin boyutları da değişmektedir. Tasarlanan çentik filtrelerin tümünde kullanılan karekök alma blokları Şekil 2.6'da verilen devre yapısında ve Tablo 4.1'de verilen transistör boyutlarında kullanılmıştır. AT-I ve AT-II kullanılarak tasarlanan tüm geçiren filtre devrelerinin karekök alma bloğu dışındaki diğer tüm kısımlarında kullanılan MOS transistörler Tablo 7.14 ve Tablo 7.15'de verildiği gibidir.



Şekil 7.32: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresi

Tablo 7.14: Şekil 7.31'deki ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

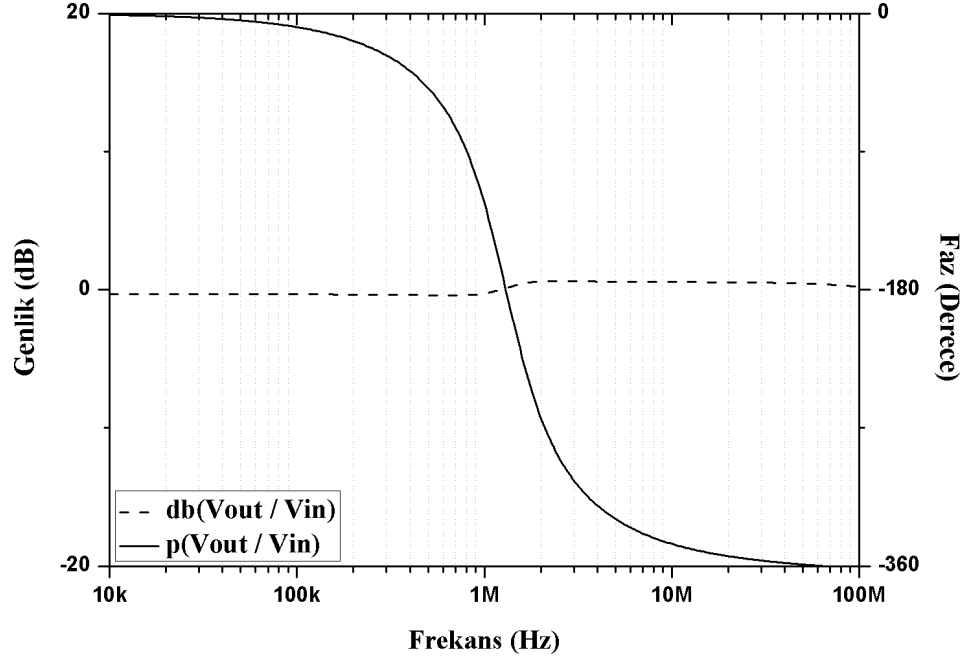
Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₂ , M ₁₆ , M ₁₇ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₁ , M ₃₅ , M ₃₆	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₇ , M ₉ , M ₁₃ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₁₈ , M ₁₉ , M ₂₀ , M ₂₅ , M ₂₆ , M ₂₈ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₄ , M ₃₇ , M ₃₈	7/.7
M ₄ , M ₂₃	42/.7	M ₈ , M ₂₇	10.5/.7

Tablo 7.15: Şekil 7.32'deki ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

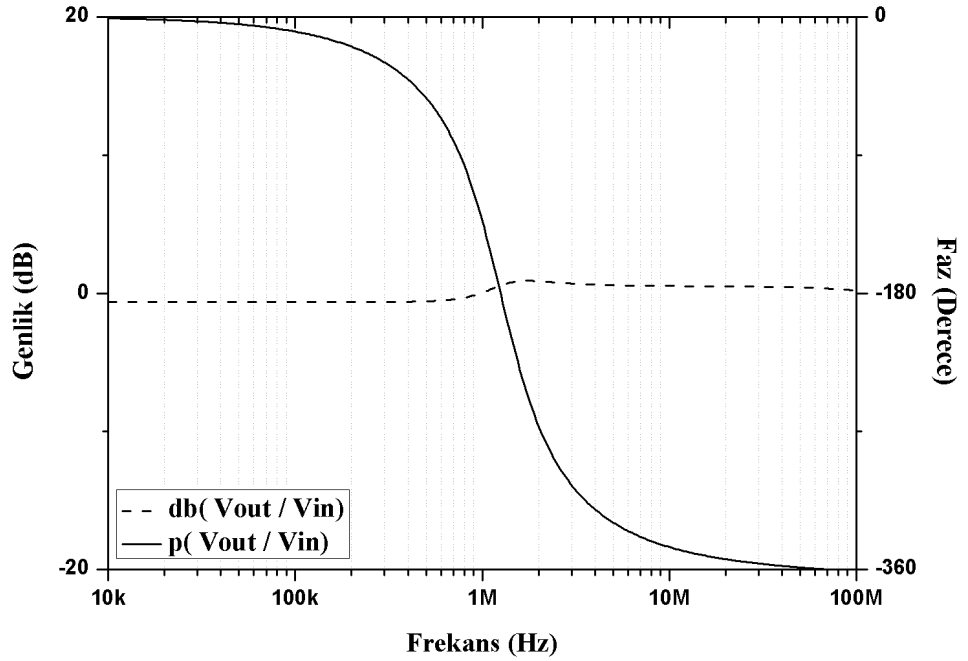
Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₄ , M ₈ , M ₉ , M ₁₅ , M ₁₆ , M ₂₁ , M ₂₂ , M ₂₃ , M ₂₇ , M ₂₈ , M ₃₅ , M ₃₆ , M ₄₀ , M ₄₃	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₆ , M ₇ , M ₁₂ , M ₁₄ , M ₁₈ , M ₂₀ , M ₂₄ , M ₂₅ , M ₂₆ , M ₃₁ , M ₃₄ , M ₃₈ , M ₄₁ , M ₄₄	7/.7
M ₁₀ , M ₁₁ , M ₁₇ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₇	10.5/.7	M ₁₃ , M ₁₉ , M ₃₂ , M ₃₃ , M ₃₉ , M ₄₂	3.5/.7

Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de verildiği gibi tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devrelerinin besleme gerilimi 1.5V'tur. Devrelerdeki her bir kondansatör değeri 15pF ve kullanılan bağımsız akım kaynaklarının değeri de 20µA olarak belirlenmiştir. Giriş işareti olarak 60mV tepe değerine sahip sinüs işareti uygulanan devrelerin kesim frekansı 1.3MHz olarak elde edilmiştir.

AT-I ve AT-II kullanılarak tasarlanan tüm geçiren karekök ortam filtre devreleri kesim frekansında çalıştırıldığında frekans ortamı analizleri sonucunda elde edilen genlik cevabı ve faz cevabı eğrileri sırasıyla Şekil 7.33 ve Şekil 7.34'de verildiği gibidir.



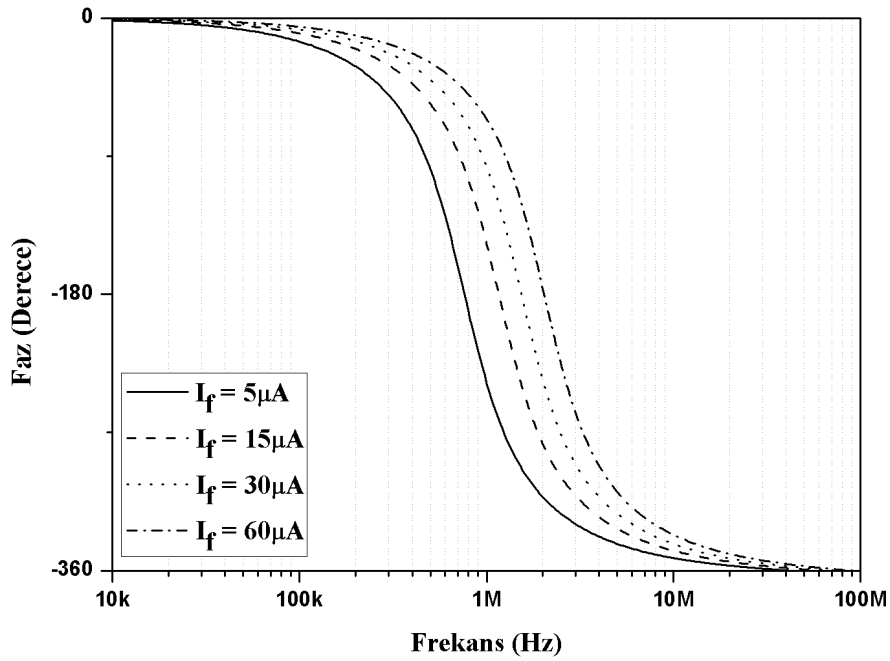
Şekil 7.33: Şekil 7.31’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren filtresi frekans ortamı cevabı



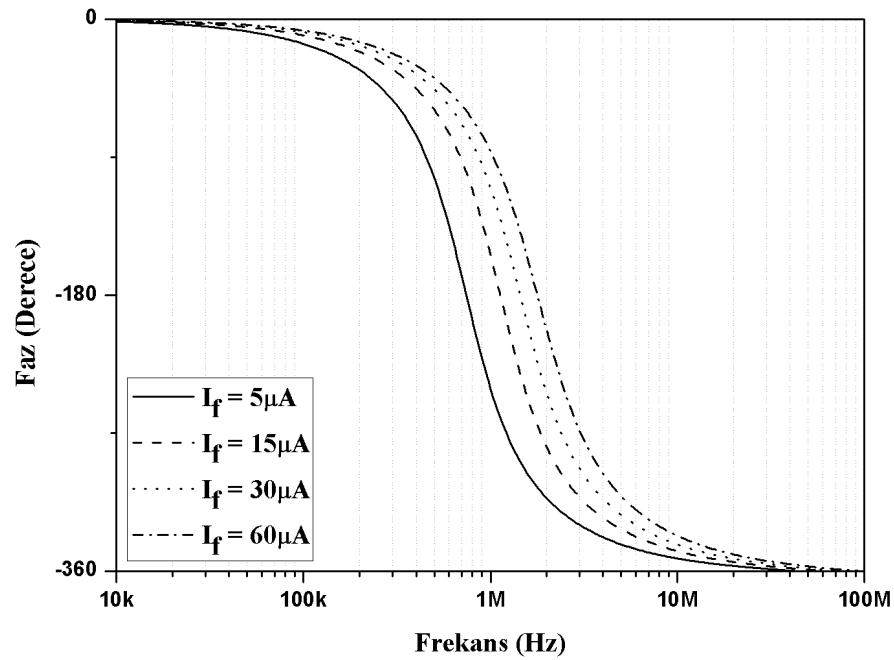
Şekil 7.34: Şekil 7.32’deki gibi tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren filtresi frekans ortamı cevabı

Tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devreleri kesim frekansı ayarlanabilir özelliktedir. Bu özelliğin gösterilebilmesi için Şekil 7.31 ve Şekil 7.32’deki gibi tasarlanan devre yapılarında kullanılan I_f akım kaynaklarının

değerleri $5\mu\text{A}$ ile $60\mu\text{A}$ arasında değiştirilmiştir. Her bir devre yapısı için elde edilen faz cevabı eğrileri sırasıyla Şekil 7.35 ve Şekil 7.36'da verildiği gibidir.



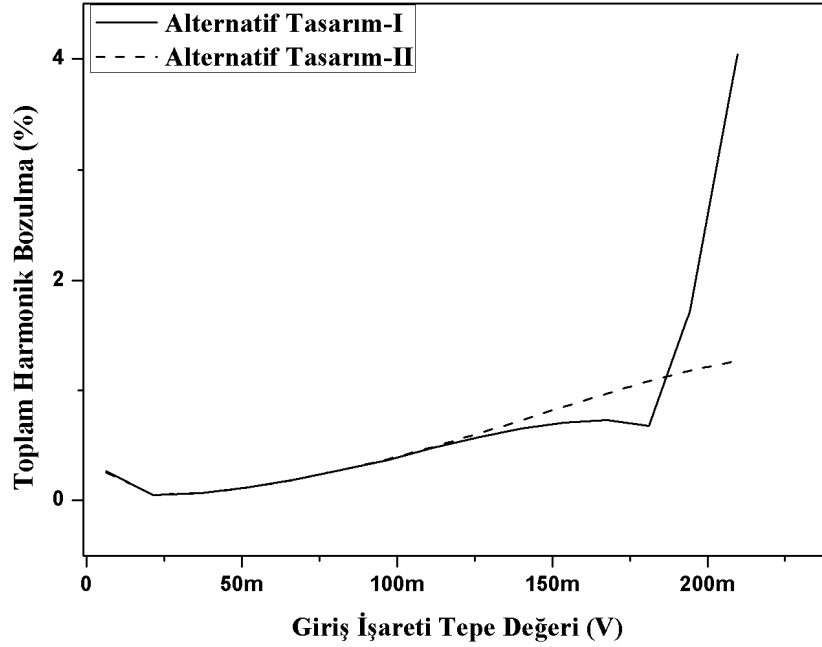
Şekil 7.35: Şekil 7.31'deki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtresi ayarlanabilir frekans cevabı



Şekil 7.36: Şekil 7.32'deki gibi tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtresi ayarlanabilir frekans cevabı

Tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtre devreleri giriş işaretinin tepe değerleri 6mV ile 210mV değerleri arasında değiştirilerek çıkış

işaretlerinde meydana gelen harmonik bozulma oranları ölçülmüştür. Her iki alternatif devre yapısı için elde edilen harmonik bozulma oranları Şekil 7.37’de verildiği gibidir.



Şekil 7.37: İkinci dereceden tüm geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları

Tasarlanan ikinci dereceden AB sınıfı tüm geçiren filtre devrelerine ait PSpice benzetimi sonucunda elde edilen toplam güç tüketimi değerleri Tablo 7.16’da verildiği gibidir.

Tablo 7.16: PSpice programından elde edilen ikinci dereceden tüm geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	4.65mW
Alternatif Tasarım-II	5.35mW

Son olarak AT-I ve AT-II kullanılarak tasarlanan ikinci dereceden tüm geçiren karekök ortam filtrelerinin çıkış işaretinden elde edilen çıkış işareti gürültüleri PSpice programı kullanılarak ölçülmüştür. Her iki devreye ait çıkış işaretinden elde edilen gürültü seviyeleri sırasıyla $108 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ve $94 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ olarak ölçülmüştür.

8. ÜÇÜNCÜ DERECEDEDEN AB SINIFI KAREKÖK ORTAM FİLTRE DEVRESİ UYGULAMASI

8.1 Giriş

Tezin bu bölümünde AB sınıfı yapıda önerilmiş karekök ortam filtre tasarımı teorisine ait üçüncü dereceden alçak geçiren Butterworth filtresi uygulaması sunulmuştur. Bu bölümde de daha önceki uygulamalarda olduğu gibi ilk olarak Bölüm 5'te önerilmiş olan teori dikkate alınarak iki farklı devre yapısında tasarımlar sunulmuş, daha sonra ise bu tasarımlara ait PSpice programı analiz sonuçları verilmiştir.

8.2 Üçüncü Dereceden Alçak Geçiren Karekök Ortam Filtre Devresi Tasarımı

İkinci dereceden alçak geçiren bir filtre devresine ait transfer fonksiyonu Denklem (8.1)'de verildiği gibidir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{a_1 \omega_0^3}{s^3 + 2\omega_0 s^2 + 2\omega_0^2 s + \omega_0^3} \quad (8.1)$$

Denklem (8.1)'de verilen transfer fonksiyonuna *Companion-III* tekniği uygulanırsa elde edilen sistem denklemleri Denklem (8.2)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega_0 x_2 \\ \dot{x}_2 &= \omega_0 x_3 \\ \dot{x}_3 &= -\omega_0 x_1 - 2\omega_0 x_2 - 2\omega_0 x_3 + a_1 \omega_0 u \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (8.2)$$

Önerilen AB sınıfı karekök ortam filtre devresi tasarım yöntemine göre sistem denklemleri elde edilen filtre devresi iki farklı şekilde tasarlanabilmektedir.

8.2.1 Üçüncü dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-I

Denklem (8.2)'deki gibi elde edilen sistem denklemlerinin AB sınıfı yapıda elde edilebilmesi için AT-I yönteminde belirtilen işlemler bu sistem denklemlerine uygulanırsa L kısmına ait yeni sistem denklemleri Denklem (8.3)'te verildiği gibi olur. R kısmı sistem denklemleri de benzer şekilde elde edilir. Tezin bundan sonraki kısmında zorunlu haller dışında sadece L tarafına ait sistem ve devre denklemleri verilecektir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1L} &= \omega_0 x_{2L} - \left(\frac{\omega_0}{2}\right)u_L - \left(\frac{\omega_0}{2}\right)u_R \\ \dot{x}_{2L} &= \omega_0 x_{3L} - \left(\frac{\omega_0}{2}\right)u_L - \left(\frac{\omega_0}{2}\right)u_R \\ \dot{x}_{3L} &= -\omega_0 x_{1L} - 2\omega_0 x_{2L} - 2\omega_0 x_{3L} + a_1 \omega_0 u_L + \left(\frac{5-a_1}{2}\right)\omega_0 u_L + \left(\frac{5-a_1}{2}\right)\omega_0 u_R \\ y_L &= x_{1L}\end{aligned}\tag{8.3}$$

Denklem (8.3)'teki denklemlere karekök ortamda devre tasarımı yapılabilmesi için daha önceki bölümlerde kullanılan eşleştirmeler ve kabullenmeler uygulanırsa istenen devre yapısına ait denklemler Denklem (8.4)'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned}C\dot{v}_{1L} &= \sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{U_L}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{U_R}} \\ C\dot{v}_{2L} &= \sqrt{I_f i_{3L}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{U_L}} - \frac{1}{2}\sqrt{I_f i_{U_R}} \\ C\dot{v}_{3L} &= -\sqrt{I_f i_{1L}} - 2\sqrt{I_f i_{2L}} - 2\sqrt{I_f i_{3L}} + \left(\frac{5+a_1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_L}} + \left(\frac{5-a_1}{2}\right)\sqrt{I_f i_{U_R}} \\ y_L &= v_{1L}\end{aligned}\tag{8.4}$$

Denklem (8.4)'de verildiği gibi elde edilen devre denklemleri KAK ile yalnızca karekök alma blokları, akım kaynağı akım aynası ve kondansatör elemanları kullanılarak Şekil 8.1'de verildiği gibi tasarlanmıştır.

8.2.2 Üçüncü dereceden alçak geçiren filtre devresi alternatif tasarımı-II

Üçüncü dereceden Butterworth yaklaşımına sahip alçak geçiren bir filtrenin transfer fonksiyonu gösterimi Denklem (8.1)'de ve sistem denklemleri gösterimi Denklem (8.2)'de verildiği gibidir. Bu filtre devresine ait yeni sistem denklemleri

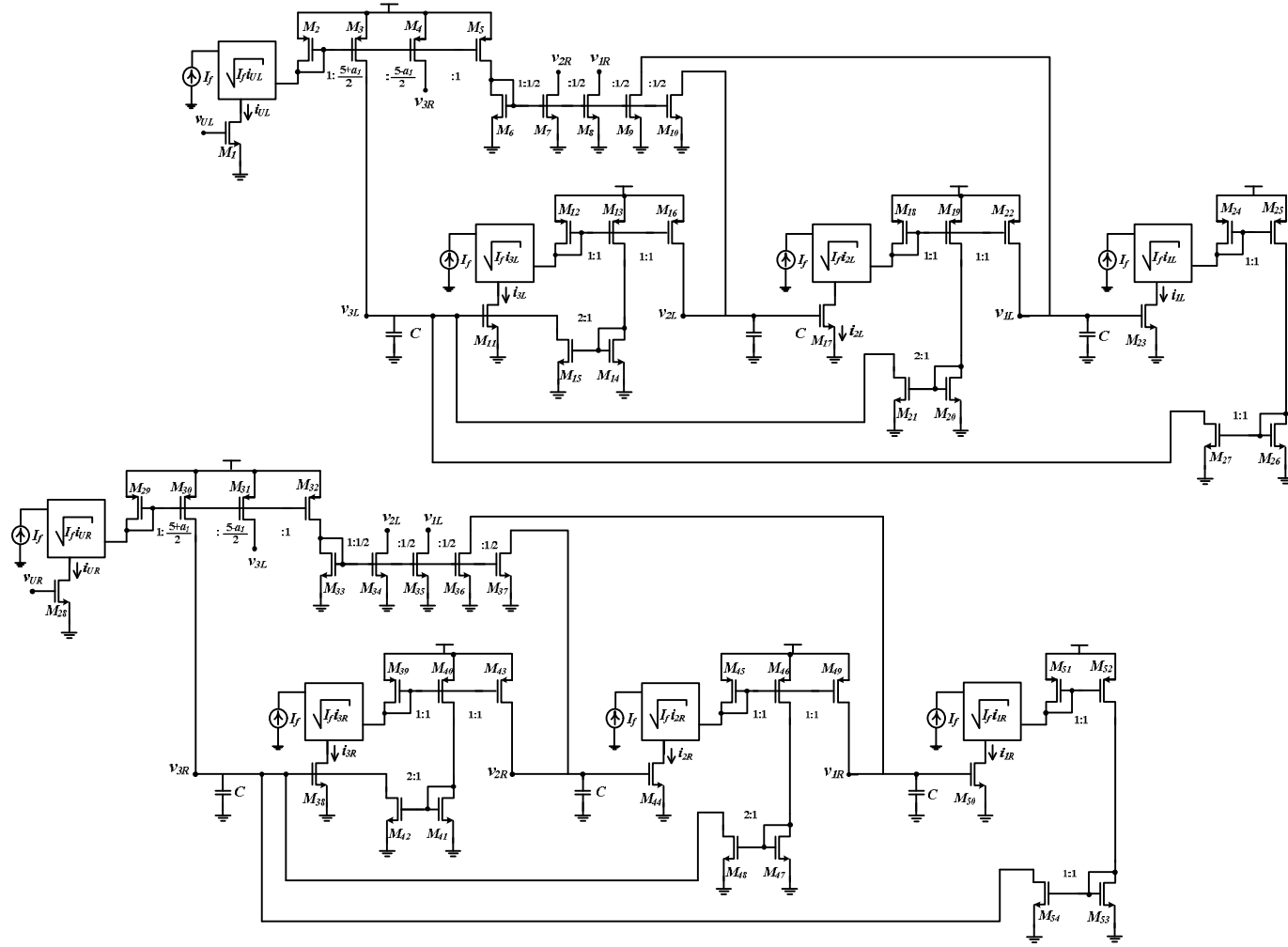
AB sınıfı yapıda Bölüm 5'te genel teorisi verilen AT-II yöntemi kullanılarak Denklem (8.5)'de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{1L} &= \frac{\omega_0}{2} x_{2L} - \frac{\omega_0}{2} x_{2R} \\
\dot{x}_{2L} &= \frac{\omega_0}{2} x_{3L} - \frac{\omega_0}{2} x_{3R} \\
\dot{x}_{3L} &= -\frac{\omega_0}{2} x_{1L} + \frac{\omega_0}{2} x_{1R} - \omega_0 x_{2L} + \omega_0 x_{2R} - \omega_0 x_{3L} + \omega_0 x_{3R} + \frac{a_1 \omega_0}{2} u_L - \frac{a_1 \omega_0}{2} u_R \\
y_L &= x_{1L}
\end{aligned} \tag{8.5}$$

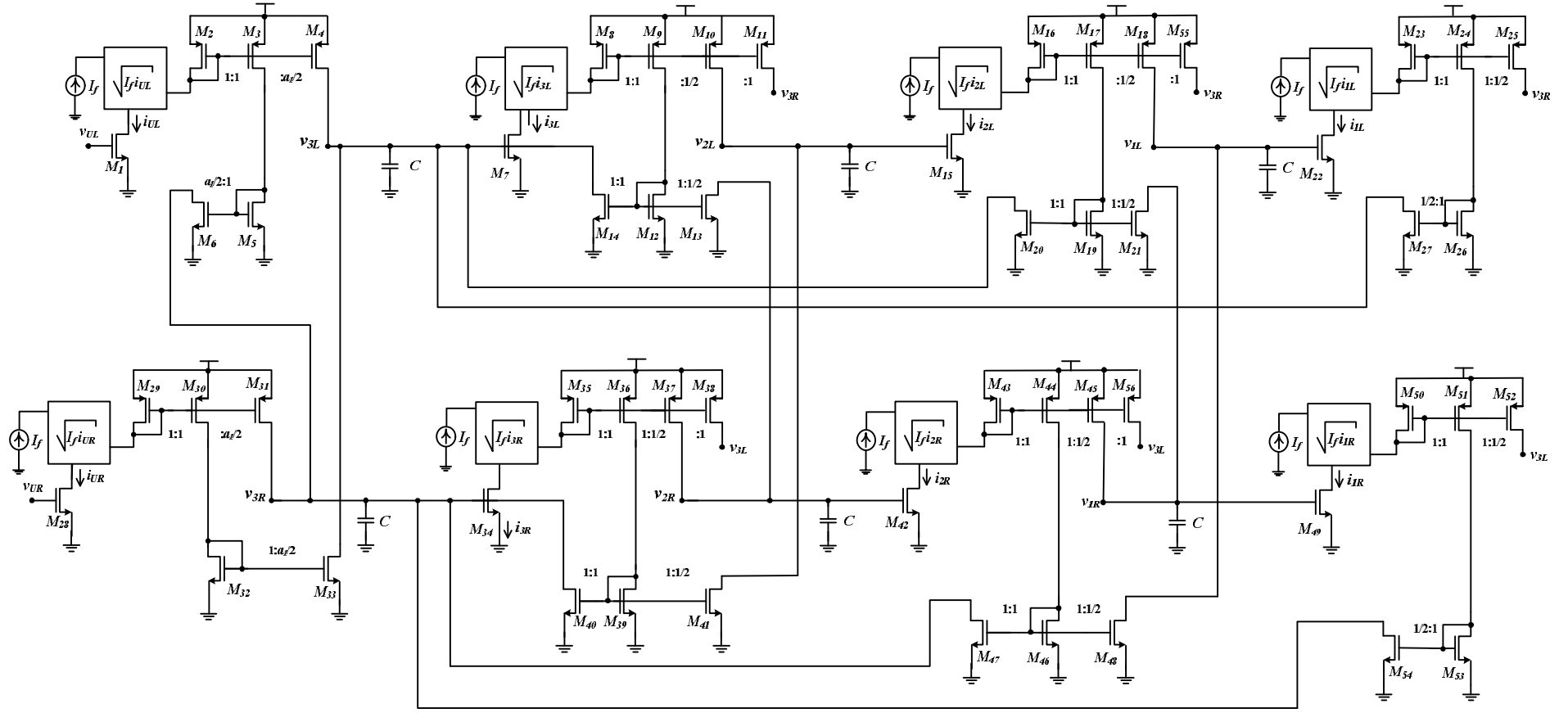
Elde edilen bu sistem denklemlerine daha önceki bölümlerde kullanılan eşleştirme fonksiyonları ve kabullenmeler uygulanırsa Denklem (8.6)'da verilen devre denklemleri elde edilir.

Devre denklemleri Denklem (8.6)'da verildiği gibi elde edilen bir filtre devresi KAK kullanılarak tasarlanabilir. Bunun için karekök alma blokları, akım kaynağı, akım aynası ve kondansatör elemanlarını kullanmak yeterlidir. Bu elemanlar kullanılarak AB sınıfı fark alan yapıda tasarlanmış üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devresi Şekil 8.2'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_{1L} &= \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2L}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{2R}} \\
\dot{v}_{2L} &= \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{3L}} - \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{3R}} \\
\dot{v}_{3L} &= -\frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1L}} + \frac{1}{2} \sqrt{I_f i_{1R}} - \sqrt{I_f i_{2L}} + \sqrt{I_f i_{2R}} \\
&\quad - \sqrt{I_f i_{3L}} + \sqrt{I_f i_{3R}} + \frac{a_1}{2} \sqrt{I_f i_{U_L}} - \frac{a_1}{2} \sqrt{I_f i_{U_R}} \\
y_L &= v_{1L}
\end{aligned} \tag{8.6}$$



Şekil 8.1: AT-I kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi



Şekil 8.2: AT-II kullanılarak tasarlanmış AB sınıfı üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtresi

8.2.3 AB sınıfı yapıda tasarlanmış üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtreleri analiz sonuçları

Daha önce birinci ve ikinci dereceden uygulamalarda olduğu gibi üçüncü dereceden alçak geçiren karakteristikte iki farklı yapıda Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’de verildiği gibi tasarlanmış olan AB sınıfı karekök ortam filtrelerinin de PSpice benzetim programında analizleri yapılmıştır.

Yapılan analizlerde devrenin kazanç değeri ($a_1=1$) olarak belirlenmiştir. Bunun yanında devrede kullanılan tüm MOS transistörler TSMC 0.35 μ m CMOS teknoloji parametreleri kullanılarak EK-1 de belirtildiği gibi tanımlanmıştır. Kullanılan teknolojiye ve tasarlanan filtrenin kazanç değerine göre devrede kullanılan tüm karekök alma blokları Şekil 2.6’da verildiği gibi ve Tablo 4.1’de verilen transistör boyutlarında modellenmiştir. Ayrıca devrelerin tümünde kullanılan transistörlerin boyutları da AT-I ve AT-II için sırasıyla Tablo 8.1 ve Tablo 8.2’de verildiği gibi değişmektedir.

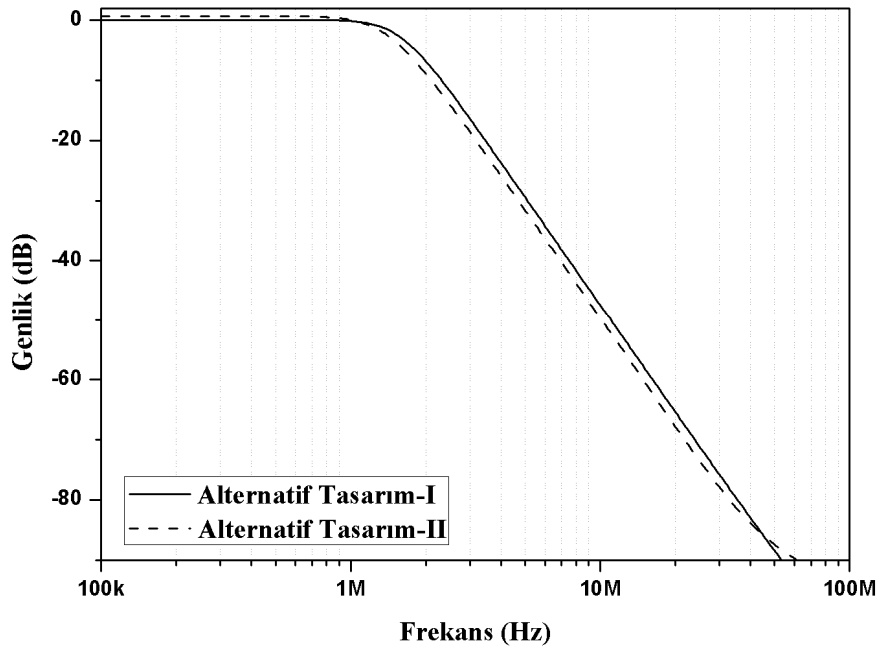
Tablo 8.1: Şekil 8.1’de verilen üçüncü dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

Transistör No	W/L [μ m]	Transistör No	W/L [μ m]
M ₂ , M ₅ , M ₁₂ , M ₁₃ , M ₁₆ , M ₁₈ , M ₁₉ , M ₂₂ , M ₂₄ , M ₂₅ , M ₂₉ , M ₃₂ , M ₃₉ , M ₄₀ , M ₄₃ , M ₄₅ , M ₄₆ , M ₄₉ , M ₅₁ , M ₅₂	21/.7	M ₁ , M ₆ , M ₁₁ , M ₁₄ , M ₁₇ , M ₂₀ , M ₂₃ , M ₂₆ , M ₂₇ , M ₂₈ , M ₃₃ , M ₃₈ , M ₄₁ , M ₄₄ , M ₄₇ , M ₅₀ , M ₅₃ , M ₅₄ ,	7/.7
M ₃ , M ₃₀	63/.7	M ₇ , M ₈ , M ₉ , M ₁₀ , M ₃₄ , M ₃₅ , M ₃₆ , M ₃₇	3.5/.7
M ₄ , M ₃₁	42/.7	M ₁₅ , M ₂₁ , M ₄₂ , M ₄₈	14/.7

Tablo 8.2: Şekil 8.2’de verilen üçüncü dereceden alçak geçiren AB sınıfı karekök ortam filtresinde kullanılan transistör boyutları

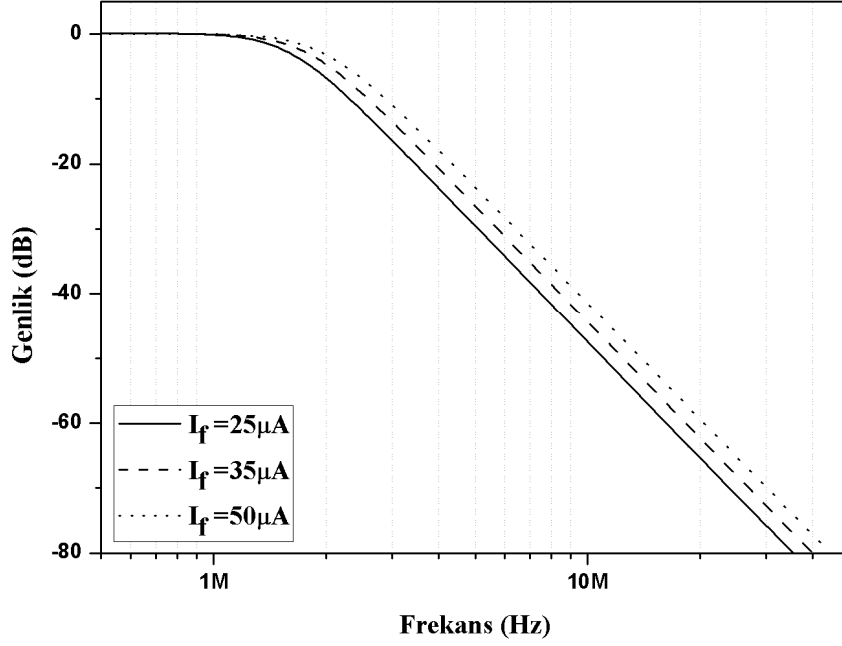
Transistör No	W/L [µm]	Transistör No	W/L [µm]
M ₂ , M ₃ , M ₈ , M ₉ , M ₁₁ , M ₁₆ , M ₁₇ , M ₂₃ , M ₂₄ , M ₂₉ , M ₃₀ , M ₃₅ , M ₃₆ , M ₃₈ , M ₄₃ , M ₄₄ , M ₅₀ , M ₅₁ , M ₅₅ , M ₅₆	21/.7	M ₁ , M ₅ , M ₇ , M ₁₂ , M ₁₄ , M ₁₅ , M ₁₉ , M ₂₀ , M ₂₂ , M ₂₆ , M ₂₈ , M ₃₂ , M ₃₄ , M ₃₉ , M ₄₀ , M ₄₂ , M ₄₆ , M ₄₇ , M ₄₉ , M ₅₃	7/.7
M ₄ , M ₁₀ , M ₁₈ , M ₂₅ , M ₃₁ , M ₃₇ , M ₄₅ , M ₅₂	10.5/.7	M ₆ , M ₁₃ , M ₂₁ , M ₂₇ , M ₃₃ , M ₄₁ , M ₄₈ , M ₅₄	3.5/.7

Tasarlanan üçüncü dereceden alçak geçiren karekök ortam filtre devrelerinin besleme gerilimi 1.5V, devrelerdeki kondansatör değerleri 14pF ve kullanılan bağımsız akım kaynaklarının değeri ise 25µA olarak seçilmiştir. Giriş işareti olarak 80mV tepe değerine sahip sinüs işareti uygulanan devrelerin kesim frekansı 1.6 MHz olarak elde edilmiştir. Tasarlanan karekök ortam filtre devreleri kesim frekansında çalıştırıldığında; PSpice programından elde edilen frekans ortamı genlik eğrisi Şekil 8.3’de verildiği gibidir.

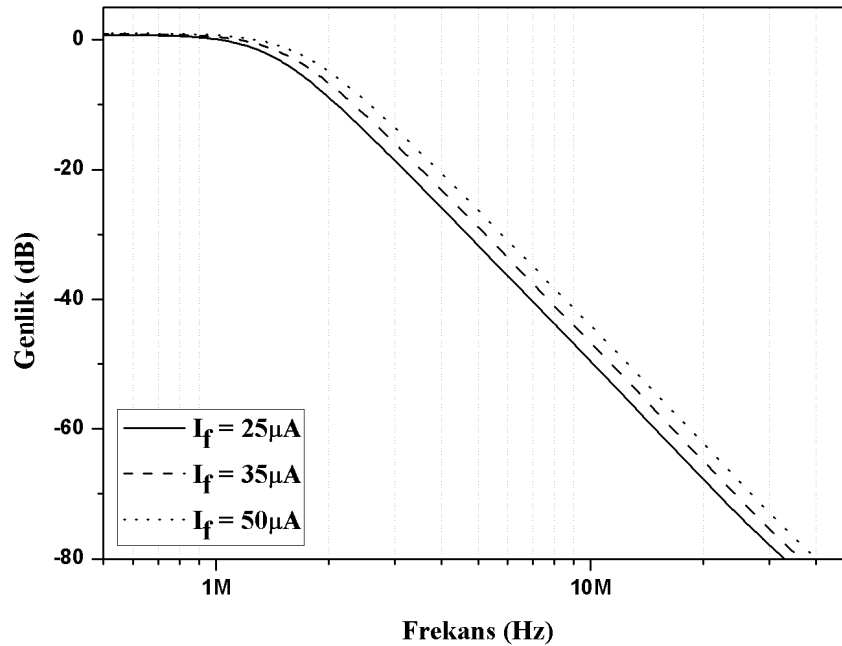


Şekil 8.3: Üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri genlik cevabı

Tasarlanan alçak geçiren karekök ortam filtre devreleri kesim frekansı devredeki akım kaynaklarının değerleri ile ayarlanabilir özelliktedir. Tasarlanan filtre devrelerinde kullanılan akım kaynaklarının değerleri $21\mu\text{A}$ ile $51\mu\text{A}$ arasında değiştirilerek Şekil 8.4 ve Şekil 8.5’de verilen faz eğrileri üzerinde bu özellik gösterilmiştir.

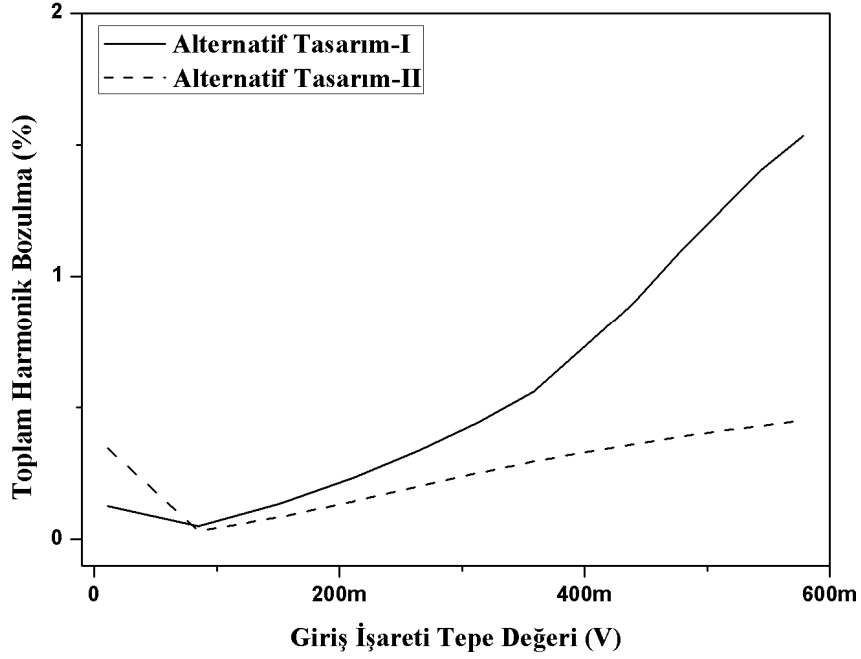


Şekil 8.4: Şekil 8.1’de verilen üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı



Şekil 8.5: Şekil 8.2’de verilen üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devresi ayarlanabilir frekans ortamı cevabı

Üçüncü dereceden Butterworth filtrelerine ait çıkış işaretindeki bozulma oranları ve gürültü seviyeleri PSpice programı yardımıyla irdelenmiştir. Giriş işaretinin tepe değeri 10mV ile 580mV arasında değiştirilerek devrelerin çıkış işaretindeki bozulma oranları belirlenmiştir. Giriş işaretinin tepe değerindeki değişime bağlı olarak her iki devrenin çıkışından elde edilen toplam harmonik bozulma oranları % olarak Şekil 8.6’da görüldüğü gibidir.



Şekil 8.6: Üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren filtre devreleri toplam harmonik bozulma oranları

Şekil 8.1 ve Şekil 8.2’deki devrelerin gürültü analizleri yapıldığında çıkış işaretinde meydana gelen gürültü seviyesi iletim bandında sırasıyla $148 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ve $136 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ olarak ölçülmüştür. Son olarak tasarlanan üçüncü dereceden alçak geçiren Butterworth filtre devrelerinden PSpice benzetimleri sonucu ölçülen güç tüketimleri Tablo 8.3’te verildiği gibidir.

Tablo 8.3: PSpice programından elde edilen üçüncü dereceden alçak geçiren filtre devrelerine ait güç tüketimi değerleri

Kullanılan tasarım yöntemi	Toplam güç tüketimi
Alternatif Tasarım-I	4.82mW
Alternatif Tasarım-II	9.54mW

9. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada analog translineer devre yapıları içerisinde yer alan karekök ortam filtre devrelerine ait daha önce literatürde olmayan farklı devre tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Bunun için A sınıfı ve AB sınıfı devre yapılarında iki farklı alternatif tasarım yöntemi önerilmiştir.

İlk olarak A sınıfı devre yapısının kullanıldığı bir sentez yönteminin geliştirilmesi yapılarak yüksek dereceden sistemlere uygulanmıştır. Bu kısımda geliştirilen yöntem ikinci dereceden çift çıkış fonksiyonuna sahip bir devrenin tasarımı için daha önce kullanılmış olup tez kapsamında bu yöntemin geliştirilmesi yapılmış ve yüksek dereceden devre performansları incelenmiştir. Geliştirilmesi yapılan yöntem ile hem istenen transfer fonksiyonuna sahip herhangi bir filtre devresinin karekök ortamda tasarlanabilmesi mümkün hale gelmiş, hem de bu yöntemin daha yüksek dereceden karekök ortam filtrelerinin tasarımını mümkün kıldığı gösterilmiştir. Bu yöntem ile tasarlanmış birinci, ikinci ve beşinci dereceden filtre devrelerine ait tasarımlar tez kapsamında sunulmuştur.

Tasarlanan devrelerin PSpice benzetim programında ayrıntılı analizleri yapılmış ve çalışma performansları izlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre devrelerin beklenen çıkış işareti karakteristiğini sağladığı, ayrıca literatürde daha önce yapılmış olan benzer bazı devrelere göre daha düşük güç tüketimi ve aynı giriş işareti değerinde daha az toplam harmonik bozulma oranına sahip olduğu gözlenmiştir.

Tez kapsamında ayrıca AB sınıfı devre yapısının kullanıldığı farklı bir sistematik sentez yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem tasarımcıya sistem denklemlerinde yapılacak düzenleme doğrultusunda birden fazla alternatif sunmaktadır. Bu alternatif tasarımlardan iki tanesi tezde ayrıntılı olarak verilmiş ve bu şekilde istenen transfer fonksiyonunda AB sınıfı devre yapısında karekök ortam filtresi tasarlanması mümkün hale getirilmiştir.

Geliştirilen AB sınıfı sistematik sentez yöntemi ile seçilen alternatif iki tasarım yöntemi kullanılarak birinci ve ikinci dereceden olası tüm filtre devrelerinin tasarımı

ve PSpice analizleri ayrıntılı olarak yapılmıştır. Bu sonuçlara göre tasarlanan filtre devrelerinin istenen karakteristikte olduğu ve zaman ve frekans ortamında iyi bir performans sunduğu gözlenmiştir. Geliştirilen AB sınıfı sistematik sentez yöntemi istenen tür ve dereceden filtre devrelerinin tasarlanmasını AB sınıfı devre yapısının avantajlarını kullanarak olanaklı hale getirmiştir. Örnek olarak tasarlanan üçüncü dereceden AB sınıfı alçak geçiren Butterworth filtre devresi uygulaması ve analizleri son bölümde ayrıntılı olarak sunulmuştur.

AB sınıfı yapı kullanılarak karekök ortam filtrelerinin tasarımı için geliştirilen sistematik sentez yöntemi oldukça kullanışlı olmasının yanında AB sınıfı devrelere ait avantajları da karekök ortam filtrelerine sunmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan AB sınıfı yapıdaki devrelerin tümünde dinamik giriş işareti aralığının A sınıfı devrelere göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Tez kapsamında önerilen yöntem ile tasarlanan ve analizleri yapılan filtre devreleri sadece geliştirilen teorinin birer uygulaması olarak sunulmuş olup optimize edilmemiştir. Sunulan teoriye uygun çok sayıda alternatif içerisinden daha farklı alternatif tasarımlar denenebilir ya da bu alternatif tasarımların hangi sistemlerde daha iyi sonuçlar verdiği ile ilgili optimizasyon çalışmaları yapılabilir.

Tez kapsamında geliştirilen sentez yöntemleri kullanılarak osilatör, diferansiyel alıcı gibi farklı devre yapılarının yanı sıra farklı türden filtre yaklaşımları kullanılarak yeni filtre devrelerinin tasarımı yapılabilir. Ayrıca tasarlanan avantajlı devre yapılarının fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve daha yeni teknolojiler ile tasarlanan devre yapılarının sınanarak daha düşük güç tüketimine sahip olmak gibi farklı üstünlükler de ortaya koymaya yönelik çalışmalar da yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

- Al-Gahtani M.**, Class-AB Square Root Domain Filter, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, vol. 5, no. 8, pp. 1381-1388, 2006.
- Ananda Mohan P. V.**, *Current-Mode VLSI Analog Filters Design and Applications*, Birkhauser Boston-Basel-Berlin, ISBN: 0-8176-4277-3, United States of America, 2003.
- Arslanalp R. and Tola A. T.**, Electronically tunable square-root domain filter circuit, *IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications Conference*, Eskisehir, Turkey, 2007.
- Arslanalp R.**, *Logaritmik ortamda eliptik filtre yaklaşımının gerçekleştirilmesi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, 2003.
- Arslanalp R., Tola A. T.**, State space representation for log domain filtering synthesis, *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, vol. 47, pp. 745-752, 2009.
- Bult K., Wallinga H.**, A Class of Analog CMOS Circuits Based on the Square-Law Characteristic of an MOS Transistor in Saturation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. SC-22, no. 3, pp. 357-365, June 1987.
- Cakır, C., Cam, U., Cicekoglu, O.**, Novel allpass filter configuration employing single OTRA, *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog Digit. Signal Process.*, vol. 52, no. 3, p. 122 -125, 2005.
- C. A. De La Cruz-Blas, A. Lopez-Martin, A. Carlosena and A. Sarmiento**; “Multiple operating points in a square-root domain first-order filter”, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 35, issue: 1, pp. 71-91, 2007.
- De La Cruz-Blas C.A., Lo’pez-Martin A.J., Carlosena A.**, 1.5 V Tunable Square-Root Domain Filter, *Electronics Letters*, vol. 40, no. 4, pp. 213-214, 2004.
- De La Cruz-Blas C.A., Lopez-Martin A.J., Carlosena A.**, 1.5-V Square-Root Domain Second-Order Filter with on-Chip Tuning, *IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers*, vol. 52, issue. 10, pp. 1996-2006, 2005.
- De La Cruz Blas C.A., Feely O.**, Limit Cycle Behavior in a Class-AB Second-Order Square Root Domain Filter, *Electronics, Circuits and Systems*, pp. 117-120,2008, DOI: 10.1109/ICECS.2008.4674805.
- Eskiyerli M. H., Payne A.J. and Toumazou C.**, State Space Synthesis of Integrators Based on the MOSFET Square Law, *Electronics Letters*, vol.32, no. 6, pp: 505-506, 1996a.

- Eskiyerli M. H., Payne A. J. and Toumazou C.**, State-space synthesis of biquads based on the MOSFET square law, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol.1, pp.321-324, 1996b.
- Eskiyerli M. H. and Payne A. J.**, Square Root Domain Filter Design and Performance, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 22, issue. 2-3, pp. 231-243, 2000.
- Farshidi E., Sayedi S.M.**, A Class-AB Square-Root Domain Biquad Filter Based on Floating Gate MOS Transistors, *IEEE 7th International Conference on ASIC*, pp.383-386, 2007.
- Farshidi E.**, Synthesis of class-AB log-domain filters based on nonlinear transconductance, *Microelectronics Journal*, vol. 41, issue. 5, pp. 266-276, 2010.
- Frey D.R.**, Log-domain filtering: an approach to current-mode filtering, *IEE Proceedings-g*, vol. 140(6), pp. 406-416, 1993.
- Frey D. R.**, Exponential state space filters: A generic current mode design strategy, *IEEE Trans. CAS-I: Fund. Theory and Appl*, vol. 43, pp. 34-42, 1996.
- Frey D. R., Tola A. T.**, State-space formulation for externally linear class AB dynamical circuits, *IEEE Trans Circuits Syst- II: Analog Digital Signal Process*; vol. 46, pp:306–14, 1999.
- Frey D.**, C-Log Domain filters, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2000)*, Geneva, Switzerland, May 28-31, 2000.
- Fouad K. O. M., Soliman A. M.**, Square root domain differentiator, *IEE Proc.-Circuits Devices Syst.*, vol. 152, no. 6, pp. 723-728, 2005.
- Gilbert B.**, Translinear Circuits: A Proposed Classification, *Electronics Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 14-16, January 1975.
- Gray P.R. , Hurst P.J. , Lewis S.H. , Meyer R.G. ,** *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, John Wiley High Education, Isbn: 9780470398777, 2009.
- Gotarredona T.S., Barranco B.L., and Andreou A.G.**, A General Translinear Principle for Subthreshold MOS Transistors, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 46, no. 5, pp. 607-616, May 1999.
- Kircay A., Keserlioğlu S. and Cam U.**, A New Current-Mode Square-Root-Domain Notch Filter, *European Conference on Circuit Theory and Design*, vol. 1-2, pp. 229-232, 2009.
- Kuo B. C.**, *Otomatik Kontrol Sistemleri*, (Çeviren: Atilla Bir), Literatür Yayıncılık, ISBN: 975-7860-94-8, 1999.
- Lathi B. P.**, *Linear Systems and Signals*, Oxford University Press, ISBN: 978-0-19-539256-2, United States of America, 2010.
- Leung V. W.**, *Analysis and Compensation of Log Domain Filter Deviations due to Transistor Nonidealities*, McGill University, Montreal 1998.

- Lopez-Martin, A. and Carlosena, A.**, “Geometric-mean based current-mode CMOS multiplier/divider,” in *Proceedings ISCAS '99*, Orlando, USA, pp. 342–345, 1999.
- Lopez-Martin A. J., Carlosena A.**, Current-Mode Multiplier/Divider Circuits Based on the MOS Translinear Principle, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 28, pp. 265–278, 2001a.
- Lopez-Martin A. J. and Carlosena A.**, A 1.5V CMOS Square-Root Domain Filter, *The 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2001)*, vol. 3, pp. 1465-1468, 2001b.
- Menekay S.**, *Karesel İşlemlerde Kullanılan MOS Translineer Çevrimli Devrelerde Hatanın Azaltılması*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2007.
- Menekay S., Tercan R.C. ve Kuntman H.**, Doğruluğu Arttırılmış Karekök Devresi ile Kurulmuş Düşük Gerilime Uygun İkinci Dereceden Alçak Geçiren Süzgeç Tasarımı, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO'2006)*, 18-22, 2006.
- Menekay S., Kuntman H.**, MOS translineer çevrimli yüksek doğruluklu akım modlu çarpıcı/bölücü devre, itüdergisi, cilt: 7, sayı: 6, sayfa: 59-68, Aralık 2008.
- Menekay S., Kuntman H. and Tarcan R. C.**, Square-Root Domain Linear Transconductance Circuit *IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference*, Aydın , Turkey. vol. 1-2, pp. 209-212, 2008.
- Menekay S., Tarcan R.C. and Kuntman H.**, Novel High-Precision Current-Mode Multiplier/Divider, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 60, issue. 3, pp. 237-248, 2009a.
- Menekay S., Tarcan R. C. and Kuntman H.**, Novel high-precision current-mode circuits based on the MOS-translinear principle, *AEÜ International Journal of Electronic and Communication*, vol. 63, pp. 992-997, 2009b.
- Metin B., Cicekoglu O.**, Component reduced all-pass filter with a grounded capacitor and high-impedance input, *Internaional Journal of Electronics*, vol. 96, p. 445-455, 2009.
- Minch B. A.**, MOS Translinear Principle for All Inversion Levels, *IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs*, vol. 55, no. 2, pp.121-125, February 2008.
- Mulder J., Serdjin W., Van der Woerd A. and Van Roermund A.**, *Dynamic translinear and log-domain circuits analysis and synthesis* Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA, 1999.
- Ogata K.**, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, ISBN: 0-13-043245-8, United States of America, 2002.
- Olmez S., Cam U.**, A Novel Square Root Domain Lossless Integrator and Its Application to KHN Biquad Filter Design, *6th International Conference On Electrical And Electronics Engineering*, 2009.

- Olmez S., Cam U.**, Realization of Square Root Domain Tow-Thomas Biquadratic Filter, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 19, no.5, pp. 1015-1024, 2010.
- Ölmez S., Cam U.**, A novel square-root domain realization of first order all-pass filter, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol.18, issue. 1 pp. 141-146, 2010.
- Ölmez S.**, *Novel Possibilities of Square-Root Domain Circuit Design*, Dokuz Eylül University, Natural and Applied Science, PhD Thesis, 2011.
- Psychalinos C. and Vlassis S.**, A High Performance Square-Root Domain Integrator", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 32, issue. 1, pp. 97–101, 2002a.
- Psychalinos C. and Vlassis S.**, A Signal Flow Graph Based Design Method for Square-Root Domain Circuits, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 22, pp. 209-2012, 2002b.
- Psychalinos C. and Vlassis S.**, A Systematic Design Procedure for Square-Root-Domain Circuits Based on the Signal Flow Graph Approach, *IEEE Transactions On Circuits And Systems—I: Fundamental Theory And Applications*, vol. 49, no. 12, pp. 1702-1712, December 2002c.
- Psychalinos C.**, Square-root domain wave filters", *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 35, issue. 2, pp. 131-148, 2007a.
- Psychalinos C.**, Square-Root Domain Operational Simulation of LC Ladder Elliptic Filters, *Circuits Systems Signal Processing*, vol.26, no.2, pp.263-280, 2007b.
- Psychalinos C.**, Design of square-root domain filters by substituting the passive elements of the prototype filter by their equivalents, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 36, issue. 2, pp. 185–204, 2008.
- Python D., Punzenberger M. and Enz C.**, A 1-V CMOS logdomain integrator., *Proc. 1999 ISCAS*, vol. 2, pp. 685-688, 1999.
- Razavi B.**, *Fundamentals of Microelectronics* , Wiley, ISBN: 978-0-471-47846-1, United States of America, 2008.
- Ragheb T. S.A., Soliman A. M.**, New Square-Root Domain Oscillators, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 47, pp. 165–168, 2006.
- Seevinck E.**, Companding Current-mode Integrator: A New Circuit Principle for Continuous-time Monolithic Filters, *Electronics Letters*, vol. 26, pp. 2046-2047, 1990.
- Seevinck E., Wiegerink R. J.**, Generalized Translinear Circuit Principle *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 26, no. 8, pp. 1098-1102, August 1991.
- Sedra A. S. and Smith K. C.**, *Microelectronic Circuits*, Revised Edition, 5th ed. Oxford University Press, USA, 2007.
- Stoumpou E., Khanday F. A., Psychalinos C. and Shah N. A.**, A low-voltage square-root domain n-th order multifunction FLF filter topology,

- Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 61, issue. 3, pp. 315-322, Dec. 2009.
- Stoumpou E. and Psychalinos C.**, Square-root domain linear transformation filters, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol.39, pp. 719-731, 2011.
- Surav Yilmaz S., Tola A. T.**, Fifth Order Butterworth Low Pass Square-Root Domain Filter Design, *Electronics and Electrical Engineering*, vol.9, no.115, pp.55-58, 2011.
- Surav Yilmaz S., Tola A. T. and Arslanalp R.**, A Second Order Square-Root Domain All-Pass Filter, *15th International Conference on Electronics*, 17-19 May 2011, Kaunas and Vilnius, Lithuania, 2011.
- Surav Yilmaz S., Tola A. T. and Arslanalp R.**, A Novel Second-Order All-Pass Filter Using Square-Root Domain Blocks, *Radioengineering*, 2013 (Basım aşamasında)
- Tola A. T., Arslanalp R., Surav Yilmaz S.**, Current mode high-frequency KHN filter employing differential class AB log domain integrator, *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, vol. 63, pp. 600-608, 2009a.
- Tola A. T., Arslanalp R., Surav Yilmaz S.**, Current Mode Tow-Thomas Biquadratic Differential Class AB Log Domain Filter, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, vol. 4(6), pp. 1426-1432, 2009b.
- Tola A. T., Frey D. R.**, A study of different class AB log domain first order filters. *Analog Integrated Circuits Signal Process*, vol.22, pp.163–76, 2000.
- Toumazou C., Lidgley F. G. and Haigh D. G.**, Analog IC Design the current-mode approach, *IEEE Circuits and Systems Series*, Chapter 2, 1990.
- Tsividis Y. P., Gopinathan V., Toth L.**, Companding in Signal Processing, *Electronics Letters*, vol. 26, no. 17, pp. 1331-1332, 1990.
- Tsividis Y. P.**, Externally Linear, Time-Invariant Systems and Their Application to Companding Signal Processors, *IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 44, no. 2, pp. 65-85, February 1997.
- Vittoz E. and Fellrath J.**, CMOS analog integrated circuits based on weak-inversion operation, *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-12, no. 3, pp. 224–231, Jun. 1977.
- Vlassis S. and Psychalinos C.**, A Square-Root Domain Differentiator Circuit, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 40, no. 1, pp. 53–59, 2004.
- Yu G. J.**, Design of Low-voltage Square-root domain filters and systematic Synthesis of High-order filters, PhD Thesis, National Chung Kung University, 2005.
- Yu G. J.**, A Systematic Synthesis for High-Order Square-Root Domain Filters with Reduced Voltage, *Life Science Journal-Acta Zhengzhou University Overseas Edition*, vol. 7, issue. 1, pp. 15-29, 2010.

- Yu G. J. and Lin Y. S.**, Low Voltage Tunable Square-Root Domain Band-Pass Filter with Translinear Loop Technique in Biomedical Engineering, *Life Science Journal*, vol. 7, no. 1, 2010.
- Yu G. J., Liu B., Hsu Y C. and Huang C.**, Design of Log Domain Low Pass Filters by MOSFET Square Law, *IEEE Asia Pacific Conference*, pp. 9-12, 2000.
- Yu G. J., Chen J. J., Lin H. Y., Liu B. D., and Huang C. Y.**, A low voltage low-power log-domain band-pass filter, *IEEE Int. Symp. on VLSI Technology, Systems, and Applications*, pp. 219–222, 2003.
- Yu G. J., Huang C. Y., Liu B. D. and Chen J. J.**, Design of Square-Root Domain Filters, *Analog Integrated Circuits and Signal Proc.*, vol. 43, issue. 1, pp. 49–59, 2005a.
- Yu. G. J., Huang C. Y., Chen J. J. and Liu B. D.**, Design of Current-Mode Square-Root Domain Band-Pass Filter with Reduced Voltage, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 44, Issue. 3, pp. 239–250, 2005b.
- Yuce E., Pal K. and Minaei S.**, A high input impedance voltage-mode all-pass/notch filter using a single variable gain current conveyor, *Journal of Circuits, Systems, and Computers (JCSC)*, vol. 17, no. 5, p. 827-834, 2008.

EKLER

EK-I

TSMC 0.35um CMOS Model Parametreleri

```
.MODEL CMOSN NMOS (LEVEL = 3
+ TOX = 7.9E-9 NSUB = 1E17 GAMMA = 0.5827871
+ PHI = 0.7 VTO = 0.5445549 DELTA = 0
+ UO = 436.256147 ETA = 0 THETA = 0.1749684
+ KP = 2.055786E-4 VMAX = 8.309444E4 KAPPA = 0.2574081
+ RSH = 0.0559398 NFS = 1E12 TPG = 1
+ XJ = 3E-7 LD = 3.162278E-11 WD = 7.046724E-8
+ CGDO = 2.82E-10 CGSO = 2.82E-10 CGBO = 1E-10
+ CJ = 1E-3 PB = 0.9758533 MJ = 0.3448504
+ CJSW = 3.777852E-10 MJSW = 0.3508721 )
```

```
.MODEL CMOSP PMOS ( LEVEL = 3
+ TOX = 7.9E-9 NSUB = 1E17 GAMMA = 0.4083894
+ PHI = 0.7 VTO=-0.7140674 DELTA = 0
+ UO = 212.2319801 ETA = 9.999762E-4 THETA = 0.2020774
+ KP= 6.733755E-5 VMAX = 1.181551E5 KAPPA = 1.5
+ RSH = 30.0712458 NFS = 1E12 TPG=-1
+ XJ = 2E-7 LD = 5.000001E-13 WD = 1.249872E-7
+ CGDO = 3.09E-10 CGSO = 3.09E-10 CGBO = 1E-10
+ CJ =1.419508E-3 PB = 0.8152753 MJ = 0.5
+ CJSW = 4.813504E-10 MJSW = 0.5 )
```

ÖZGEÇMİŞ

21 Ocak 1981 tarihinde İzmir'in Ödemiş ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini burada tamamladıktan sonra 1997 yılında Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne girdi. 2001 yılında bu bölümden mezun oldu ve Pamukkale Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2002 yılında Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında başladığı yüksek lisans eğitiminden 2005 yılında yüksek lisans derecesi ile mezun oldu. 2008 yılında aynı bölümde doktora eğitimine başladı. Halen Pamukkale Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. İngilizce bilir, evli ve bir çocuk annesidir.