



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**VDTA VE VDGA TABANLI GERİLİM MODLU SÜZGEÇ
TASARIMLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

İSMAİL ELSAİD

ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

**Şanlıurfa
2026**



**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**VDTA VE VDGA TABANLI GERİLİM MODLU SÜZGEÇ
TASARIMLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

İSMAİL ELSAİD

**ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali KIRÇAY**

**Şanlıurfa
2026**

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması ve tamamlanması sürecinde bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana her aşamada destek olan danışman hocam Prof. Dr. Ali Kırçay'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Değerli katkıları, yapıcı eleştirileri ve akademik bakış açısı, bu çalışmanın bilimsel niteliğinin gelişmesine önemli katkı sağlamıştır.

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, akademik ve mesleki gelişimime katkı sağlayan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün değerli öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince sağladıkları teknik destek ve katkılarından dolayı bölümdeki araştırma görevlilerine ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, sabır ve anlayışlarıyla her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde dolaylı ya da doğrudan katkı sağlayan herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	iv
SİMGELER	v
KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
1.1. Elektronik Filtreler Hakkında Genel Bilgi	1
1.2. Filtre Türleri ve Sınıflandırması	2
1.3. Aktif Elemanlar ve Filtrelerdeki Önemi	3
1.4. Araştırma Problemi ve Tezin Amaçları	5
1.5. Tez Yapısı	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
2.1. VDGA Tabanlı Filtre Tasarımları Üzerine Yapılan Çalışmalar	7
2.2. VDTA Tabanlı Filtre Tasarımları Üzerine Yapılan Çalışmalar	9
2.3. Literatürdeki Boşluk	10
3. GEREÇ VE YÖNTEM	12
3.1. Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) Yapısı	12
3.1.1. VDTA'nın İdeal Olmayan Modeli	15
3.2. Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) Yapısı	16
3.2.1. İdeal Olmayan Model	18
3.3. VDGA Tabanlı KHN Filtre Yapısı	19
3.3.1. Alçak Geçiren (LP) Çıkışı	21
3.3.2. Transfer Fonksiyonlarının Elde Edilmesi	21
3.3.3. VDGA Kullanılarak Bant Durduran (BS) ve Tüm Geçiren (AP) Çıkışlarının Elde Edilmesi	23
3.4. Karşılaştırma Metodolojisi	24
3.5. Analizde Kullanılan Varsayımlar	25
3.6. VDTA Tabanlı KHN Filtre Yapısı	26
3.6.1. Yüksek Geçiren (HP) Çıkışı	27
3.6.2. Bant Geçiren (BP) Çıkışı	27
3.6.3. Alçak Geçiren (LP) Çıkışı	27
3.6.4. Çıkış Denklemleri	28
3.6.5. VDTA Tabanlı Bant Durduran (BS) ve Tüm Geçiren (AP) Filtre Yapısı	29
3.6.5.1. Bant Durduran (BS) Çıkışının Elde Edilmesi	29
3.6.5.2. Tüm Geçiren (AP) Çıkışının Elde Edilmesi	30
4. BULGULAR	32
4.1. Frekans Tepkileri	33
4.2. Elektronik Ayarlanabilirlik Analizi	36
4.2.1. VDTA Tabanlı Yapıda g_m ile Ayarlanabilirlik	36
4.2.2. VDGA Tabanlı Yapıda β ile Ayarlanabilirlik	38
4.3. Doğrusallık ve THD Analizi	39
4.3.1. VDTA ve VDGA Tabanlı Yapıların THD Açısından Karşılaştırılması	41
4.4. Monte Carlo Analizi	42
4.4.1. VDTA ve VDGA Yapılarının Monte Carlo Analizi Açısından Karşılaştırılması	44
4.5. Karşılaştırmalı Değerlendirme	44
5. TARTIŞMA	47
6. SONUÇLAR	49
7. ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	54

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

VDTA VE VDGA TABANLI GERİLİM MODLU SÜZGEÇ TASARIMLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

İSMAİL ELİSAİD

HARRAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışman: Prof. Dr. Ali KIRÇAY

Yıl: 2026, Sayfa : 54

Bu tez çalışmasında, Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) ve Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) aktif yapı blokları kullanılarak, gerilim modlu ikinci dereceden Kerwin Huelsman–Newcomb (KHN) tipi analog filtre tasarımlarının gerçekleştirilmesi ve karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Her iki aktif eleman için de aynı KHN çekirdek topolojisi temel alınarak; alçak geçiren (LP), bant geçiren (BP), yüksek geçiren (HP), bant durduran (BS) ve tüm geçiren (AP) filtre fonksiyonları eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Önerilen filtre yapılarının teorik analizleri ideal aktif eleman varsayımları altında gerçekleştirilmiş, doğal frekans ve kalite faktörü gibi temel filtre parametrelerinin elektronik olarak ayarlanabilirliği analitik ifadelerle ortaya konulmuştur. Tasarlanan devreler, 0.18 μm CMOS teknolojisi kullanılarak PSpice ortamında transistor seviyesinde benzetilmiş ve teorik sonuçlar doğrulanmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları, VDTA tabanlı yapının özellikle doğrusal performans ve üretim toleranslarına karşı dayanıklılık açısından daha üstün olduğunu göstermiştir. VDTA tabanlı filtrede, giriş gerilimi 100 mV seviyesine kadar artırıldığında dahi toplam harmonik bozulma (THD) değerinin %0,1'in altında kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Monte Carlo analizleri, VDTA yapısında merkez frekans sapmasının daha düşük olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, VDGA tabanlı yapı, ilave bir gerilim kazanç parametresi (β) sayesinde kalite faktörü (Q) ve doğal frekansın (ω_0) birbirinden bağımsız olarak elektronik kontrolüne olanak tanıyarak daha yüksek tasarım esnekliği sunmaktadır. Ancak bu yapıda THD değerlerinin VDTA tabanlı yapıya kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, VDGA ve VDTA tabanlı KHN filtre yapılarının avantaj ve sınırlamalarını sistematik bir biçimde ortaya koyarak, düşük bozulma gerektiren uygulamalar için VDTA'nın; yüksek ayarlanabilirlik ve tasarım esnekliği gerektiren uygulamalar için ise VDGA'nın daha uygun bir seçenek olduğunu göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Analog filtreler, Aktif elemanlar, Gerilim modu, Elektronik ayarlanabilirlik, VDTA, VDGA, KHN

ABSTRACT

MASTER THESIS

IMPLEMENTATION OF VOLTAGE-MODE FILTER DESIGNS BASED ON VDTA AND VDGA

İSMAİL ELSAİD

HARRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE EDUCATION
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Ali KIRÇAY

Year: 2026, Page : 54

This thesis presents the implementation and comparative analysis of voltage-mode second-order Kerwin–Huelsman–Newcomb (KHN) analog filter designs using Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) and Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) active building blocks. For both active elements, the same KHN core topology is employed, enabling the simultaneous realization of low-pass (LP), band-pass (BP), high-pass (HP), band-stop (BS), and all-pass (AP) filter responses. The theoretical analysis of the proposed filter structures is carried out under ideal active element assumptions, and the electronic tunability of key filter parameters such as the natural frequency and quality factor is derived analytically. The designed circuits are verified through transistor-level PSpice simulations using 0.18 μm CMOS technology. Simulation results demonstrate that the VDTA-based structure exhibits superior linearity and improved robustness against process variations. For the VDTA-based filter, the total harmonic distortion (THD) remains below 0,1% even when the input signal amplitude is increased up to 100 mV. Moreover, Monte Carlo analyses reveal smaller deviations in the center frequency compared to the VDGA-based design. On the other hand, the VDGA-based structure provides greater design flexibility by allowing independent electronic control of the quality factor (Q) and natural frequency (ω_0) through an additional voltage gain parameter (β). However, this flexibility is achieved at the expense of higher THD levels. Overall, this study systematically highlights the advantages and limitations of VDGA- and VDTA-based KHN filter architectures, indicating that VDTA is more suitable for low-distortion applications, whereas VDGA is preferable in applications requiring enhanced tunability and design flexibility.

KEYWORDS: Analog filters, Active elements, Voltage mode, Electronic Tunability, VDTA, VDGA, KHN

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.11.	VDTA'nın şematik sembolü.	13
Şekil 3.12.	CMOS transistörlü VDTA'nın iç yapısı	14
Şekil 3.13.	VDGA'nın şematik sembolü.	16
Şekil 3.14.	CMOS transistörlü VDGA'nın iç yapısı	18
Şekil 3.15.	VDGA ile tasarlanmış KHN devresi	20
Şekil 3.16.	Önerilen VDGA tabanlı ikinci dereceden BS&AP temel yapısı.	23
Şekil 3.17.	VDTA ile tasarlanmış KHN devresi	26
Şekil 4.7.	VDTA tabanlı KHN filtresinin genlik tepkisi.	33
Şekil 4.8.	VDTA tabanlı KHN filtresinin faz tepkisi.	33
Şekil 4.9.	VDGA tabanlı KHN filtresinin genlik tepkisi.	35
Şekil 4.10.	VDGA tabanlı KHN filtresinin faz tepkisi.	35
Şekil 4.12.	Farklı gm ayarlarıyla alçak geçiş filtresinin frekans tepkisi.	37
Şekil 4.13.	β değişkeninin değiştirilmesinin kalite faktörü (Q) ve filtre tepki şekli üzerindeki etkisi	38
Şekil 4.17.	Önerilen VDTA tabanlı filtre için giriş voltajı genliğine bağlı olarak toplam harmonik bozulmanın (THD) değişimi.	39
Şekil 4.19.	Önerilen VDGA tabanlı filtre için giriş voltajı genliğine bağlı olarak toplam harmonik bozulmanın (THD) değişimi.	40
Şekil 4.20.	gm ve kapasitanslardaki varyasyonlarla 50 simülasyon çalışmasından elde edilen kesme frekansının Monte-Carlo dağılımı.	42
Şekil 4.21.	β , gm ve kapasitanslardaki varyasyonlarla 50 simülasyon çalışmasından elde edilen kesme frekansının Monte-Carlo dağılımı.	43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. VDTA ve VDGA Tabanlı KHN Filtre Yapılarının Karşılaştırılması	45
--	----

SİMGELER

g_m	Transkonduktans Parametresi
α_t	kazanç hata katsayısı
β	Gerilim Kazancı Parametresi

KISALTMALAR

AP	All-Pass Filter (Tüm Geçiren Süzgeç)
BP	Band-Pass Filter (Bant Geçiren Süzgeç)
BS	Band-Stop Filter (Bant Durduran Süzgeç)
CMOS	complementary metal oxide semiconductor
dB	Gerilim kazancı
ECG	Electrocardiography (Elektrokardiyografi)
EEG	Elektroensefalografi
HP	High-Pass Filter (Yüksek Geçiren Süzgeç)
IB	Bias Current (Öngerilim Akımı)
KHN	Kerwin-Huelsman-Newcomb
LP	Low-Pass Filter (Alçak Geçiren Süzgeç)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PSpice	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
Q	Quality Factor (Kalite Faktörü)
THD	Total Harmonic Distortion (Toplam Harmonik Bozulma)

1. GİRİŞ

1.1. Elektronik Filtreler Hakkında Genel Bilgi

Elektronik filtreler, çağdaş elektronik ve haberleşme sistemlerinde sinyal işleme sürecinin vazgeçilmez bileşenleri arasında yer almaktadır. Bu yapılar, sinyaller içerisindeki istenmeyen frekans bileşenlerini zayıflatmak ya da belirli frekans bantlarını seçici biçimde iletmek suretiyle, sistemlerin doğruluk, kararlılık ve güvenilirlik düzeylerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle analitik uygulamalar (biyomedikal sinyallerin matematiksel analizi, spektral çözümleme ve sistem karakterizasyonu gibi) ve biyomedikal uygulamalarda, filtre karakteristiklerinin doğru belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Örneğin elektrokardiyografi (ECG) ve elektroensefalografi (EEG) gibi biyomedikal sinyallerin değerlendirilmesi sırasında, düşük frekanslı sürüklenmelerin ve elektromanyetik girişimlerin giderilmesi gerekmektedir. Bu düşük frekanslı sürüklenmeler, genellikle hasta hareketleri, elektrot kayması veya solunum gibi fizyolojik etkilerden kaynaklanmaktadır. Bu tür parazitlerin yeterince bastırılmadığı durumlarda, elde edilen ölçüm verileri hatalı yorumlara yol açabilmekte ve yanlış teşhis riskini artırmaktadır.

Elektronik filtreler, biyomedikal alanın yanı sıra telekomünikasyon ve kablosuz haberleşme sistemlerinde de temel bir işlev üstlenmektedir. Radyo frekanslı haberleşme uygulamalarında, istenmeyen parazitlerin ve komşu kanal girişimlerinin bastırılması, veri kaybının azaltılmasına ve iletişim kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde, ses işleme sistemlerinde istenmeyen frekans bileşenlerinin filtrelenmesi, hem algılanan ses kalitesini yükseltmekte hem de ilgili elektronik donanımın performansını artırmaktadır. Görüntü işleme uygulamalarında ise, özellikle tıbbi görüntüleme ve güvenlik sistemlerinde, uygun filtreleme teknikleri kontrastın artırılması ve görüntü netliğinin iyileştirilmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır (Tsirimokou vd., 2016).

Elektronik filtrelerin kullanım alanları yalnızca haberleşme ve sinyal işleme ile sınırlı değildir. Otomotiv elektroniğinde motor kontrol üniteleri, radar tabanlı algılama sistemleri ve elektrikli araçlara ait batarya yönetim devreleri gibi birçok alt sistemde filtreleme işlemleri kritik görevler üstlenmektedir (Ribbens, 2017). Bu geniş uygulama yelpazesi, filtre tasarımlarının farklı frekans bantlarında yüksek hassasiyet ve güvenilir performans sunmasını zorunlu kılmaktadır. Bununla birlikte, modern elektronik sistemlerde artan entegrasyon düzeyi, düşük güç tüketimi ve kompakt devre gereksinimleri, filtrelerin daha karmaşık ancak optimize edilmiş

mimarilerle tasarlanmasını gerekli hale getirmiştir.

Sonuç olarak, elektronik filtrelerin önemi yalnızca sinyalin şekillendirilmesiyle sınırlı olmayıp; sistem güvenilirliği, enerji verimliliği ve donanım boyutlarının küçültülmesi gibi birçok mühendislik kriteriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, filtre tasarımlarında kullanılan aktif elemanların ve güncel tasarım yaklaşımlarının incelenmesi, hem akademik araştırmalar hem de pratik mühendislik uygulamaları açısından temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

1.2. Filtre Türleri ve Sınıflandırması

Elektronik filtreler, sinyal işleme süreçlerinde ve elektronik sistemlerin tasarımında farklı ihtiyaçlara cevap verecek biçimde çeşitli yapılarda geliştirilmiştir. Genel bir sınıflandırma kapsamında filtreler; alçak geçiren (low-pass), yüksek geçiren (high-pass), bant geçiren (band-pass) ve bant durduran (band-stop) filtreler olmak üzere dört temel grupta ele alınmaktadır. Bu filtre türlerinin her biri, belirli frekans bileşenlerinin iletilmesi ya da bastırılması esasına dayanmakta olup, hedeflenen uygulamaya göre uygun biçimde tasarlanmaktadır. Filtre sınıflandırması, sistemin frekans seçiciliğini ve genel performansını doğrudan belirleyen temel bir adımdır.

Alçak geçiren filtreler (LPF), tanımlanan kesim frekansının altında yer alan sinyal bileşenlerini büyük ölçüde zayıflatmaya uğratmadan iletirken, daha yüksek frekansları bastırma özelliğine sahiptir. Bu tür filtreler özellikle ses işleme uygulamalarında yüksek frekanslı parazitlerin giderilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, radyo frekans (RF) devrelerinde alıcı katlarının korunması amacıyla istenmeyen yüksek frekans bileşenlerinin bastırılmasında da LPF'ler önemli bir rol oynamaktadır .

Yüksek geçiren filtreler (HPF) ise alçak geçiren filtrelerin tamamlayıcısı niteliğinde olup, belirli bir kesim frekansının üzerindeki sinyalleri iletirken düşük frekanslı bileşenleri bastırır. Bu özellikleri sayesinde HPF'ler, özellikle görüntü işleme uygulamalarında kenar vurgulama ve kontrast artırma işlemlerinde tercih edilmektedir. Ayrıca titreşim ölçüm sistemleri ve sensör tabanlı uygulamalarda, düşük frekanslı sürüklenmelerin ve ofsetlerin giderilmesi amacıyla yüksek geçiren filtreler yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Bant geçiren filtreler (BPF), belirli bir frekans aralığını seçici olarak iletirken bu aralığın dışında kalan düşük ve yüksek frekans bileşenlerini zayıflatmaktadır. Bu

tür filtreler, haberleşme sistemlerinde belirli bir kanalın seçilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin, FM radyo alıcılarında istenilen yayın bandının ayrıştırılması bant geçiren filtreler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Benzer şekilde biyomedikal uygulamalarda, kalp atım sinyalleri veya EEG işaretleri gibi belirli frekans bantlarında yoğunlaşan sinyallerin analizinde BPF'ler etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Bant durduran filtreler (BSF) ise bant geçiren filtrelerin tersine, belirli bir frekans bandını bastırarak geri kalan sinyal bileşenlerinin iletilmesini sağlar. Bu filtreler özellikle güç sistemlerinde yaygın olan 50/60 Hz şebeke gürültüsünün bastırılmasında ve ölçüm sistemlerinde belirli parazit frekanslarının engellenmesinde önemli bir işleve sahiptir. Laboratuvar ortamlarında yapılan hassas ölçümlerde, istenmeyen harmonik bileşenlerin elimine edilmesi amacıyla bant durduran filtreler sıklıkla tercih edilmektedir.

Güncel filtre tasarım yaklaşımlarında, klasik filtre türlerine ek olarak elektronik olarak ayarlanabilir (tunable) filtreler (Sanchez-Sinencio & Silva-Martinez, 2000), çok bantlı filtre yapıları ve kesirli mertebeli filtreler (Tsirimokou vd., 2016) gibi daha gelişmiş mimariler de öne çıkmaktadır. Bu tür yapılar, dinamik çalışma koşullarına sahip sistemler ve çok frekanslı haberleşme uygulamaları için yüksek esneklik sunmaktadır (Razavi, 2012). Özellikle modern kablosuz haberleşme cihazlarında, tek bir entegre filtre yapısı kullanılarak birden fazla frekans bandının işlenebilmesi mümkün hale gelmiştir.

1.3. Aktif Elemanlar ve Filtrelerdeki Önemi

Elektronik filtre tasarımında kullanılan aktif elemanlar, pasif yapılara kıyasla daha yüksek esneklik, ayarlanabilirlik ve entegrasyon uygunluğu sağlamaktadır. Pasif filtreler yalnızca direnç, kapasitör ve endüktans elemanları kullanılarak gerçekleştirilebilmekte ve belirli uygulamalarda yeterli performans sunabilmektedir. Ancak endüktansların büyük fiziksel boyutları, maliyetleri ve tümleşik devre üretiminde karşılaşılan entegrasyon zorlukları, modern elektronik sistemlerde bu yapıların kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu durum, aktif eleman tabanlı filtre mimarilerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. (Wen & Chen, 2023).

Bu alanda yaygın olarak kullanılan ilk aktif yapı bloklarından biri operasyonel kuvvetlendiricilerdir (op-amp). Op-amp tabanlı filtreler, tasarım kolaylığı ve kazanç kontrolü sağlamaları nedeniyle uzun yıllar boyunca tercih edilmiştir. Bununla birlikte, sınırlı bant genişliği ve yüksek frekans bölgelerinde performans düşüşü

göstermeleri, op-amp tabanlı filtrelerin modern yüksek hızlı uygulamalarda yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, bu yapılarda transkonduktans parametresinin doğrudan kontrol edilememesi, elektronik ayarlanabilirlik açısından önemli bir kısıt oluşturmaktadır.

Op-amp tabanlı yapıların bu sınırlamalarını aşmak amacıyla geliştirilen Operational Transconductance Amplifier (OTA), girişteki gerilim farkını çıkış akımına dönüştüren bir aktif eleman olarak öne çıkmaktadır. OTA'nın en önemli avantajı, transkonduktans değerinin bias akımı aracılığıyla elektronik olarak ayarlanabilmesidir. Bu özellik, filtrelerin kesim frekansı ve kazanç parametrelerinin dinamik olarak kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Ancak OTA tabanlı yapıların tek çıkışlı olması, bazı çok fonksiyonlu filtre uygulamalarında ek devre gereksinimlerini beraberinde getirmektedir.

Bu noktada, Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) yapısı, diferansiyel giriş mimarisi ve ayarlanabilir gerilim kazancı özelliği ile dikkat çekmektedir (Biolek vd., 2022). VDGA tabanlı filtreler, özellikle gerilim modlu birinci dereceden süzgeçler ve analog hesaplama devrelerinde sade ve etkin çözümler sunmaktadır (Roongmuanpha vd., 2023). Ayarlanabilir kazanç ve transkonduktans özelliklerinin birlikte kullanılabilmesi, VDGA'yı kompakt ve entegrasyona uygun filtre tasarımları için cazip bir aktif eleman haline getirmiştir. Bununla birlikte, VDGA yapılarında çıkış çeşitliliğinin sınırlı olması, daha karmaşık ve evrensel filtre mimarilerinde belirli kısıtlar doğurabilmektedir (Roongmuanpha vd., 2022).

Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) ise VDGA'nın sunduğu avantajları daha ileri bir seviyeye taşıyan gelişmiş bir aktif yapı bloğu olarak öne çıkmaktadır. VDTA, birden fazla akım çıkış terminali (Z , X^+ ve X^-) sayesinde ikinci dereceden ve çok çıkışlı filtre yapılarının gerçekleştirilmesine imkân sağlamaktadır. Ayrıca doğal frekans ve kalite faktörünün transkonduktans parametresi üzerinden elektronik olarak ayarlanabilmesi, VDTA tabanlı filtreleri düşük güç tüketimli, yüksek frekanslı ve yeniden yapılandırılabilir sistemler için uygun hale getirmektedir.

Bu kapsamda, op-amp, OTA, VDGA ve VDTA gibi aktif yapı blokları, analog filtre tasarımında farklı seviyelerde esneklik ve performans sunmaktadır. Bu aktif elemanların karşılaştırmalı olarak incelenmesi, uygulama gereksinimlerine en uygun filtre mimarisinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, VDGA ve VDTA tabanlı gerilim modlu filtre tasarımları ele

alınarak, her iki yapının sunduğu avantajlar ve sınırlamalar sistematik biçimde değerlendirilmektedir. (Shaktour, 2023).

1.4. Araştırma Problemi ve Tezin Amaçları

Son yıllarda düşük güç tüketimli, elektronik olarak ayarlanabilir ve tümleşik devre tasarımlarına uygun analog filtrelerin geliştirilmesine yönelik ilgi giderek artmaktadır. Klasik op-amp veya OTA tabanlı filtre yapıları, belirli frekans ve kazanç değerlerinde başarılı sonuçlar sunabilse de, yüksek frekans uygulamalarında performans sınırlamaları ve esneklik eksikliği göstermektedir. Ayrıca endüktans içeren tasarımlar, büyük fiziksel boyutları ve yüksek maliyetleri nedeniyle entegre devre uygulamalarında tercih edilmemektedir.

Bu doğrultuda, VDGA ve VDTA tabanlı filtre yapıları; elektronik ayarlanabilirlik, düşük güç tüketimi, kompakt mimari ve geniş bant genişliği gibi avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, mevcut literatürde bu aktif elemanların genellikle belirli filtre türleri veya sınırlı uygulamalar kapsamında ele alındığı görülmektedir. Bu durum, VDGA ve VDTA'nın farklı filtre yapılarındaki performanslarının sistematik ve karşılaştırmalı olarak incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Bu tezin temel amacı, VDGA ve VDTA aktif yapı blokları kullanılarak gerilim modlu analog filtre tasarımlarının gerçekleştirilmesi, teorik analizlerinin yapılması ve benzetim sonuçları ile doğrulanmasıdır. Ayrıca elde edilen sonuçların mevcut literatürle karşılaştırılması ve önerilen tasarımların avantajlarının ortaya konulması hedeflenmektedir.

Bu tez çalışması, yazarın VDGA ve VDTA tabanlı analog devreler üzerine daha önce gerçekleştirdiği bilimsel çalışmaların devamı ve genişletilmiş bir versiyonu niteliğindedir. Tez kapsamında sunulan bazı analizler ve devre gerçekleştirmeleri, uluslararası bir konferansta yayımlanmış ve ayrıca iki farklı bilimsel makale hakem değerlendirme sürecinde bulunmaktadır. Bu tez çalışması, söz konusu yayınlarda sunulan temel yaklaşımları daha kapsamlı teorik analizler, ayrıntılı karşılaştırmalar ve ek benzetim sonuçları ile genişleterek akademik literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1.5. Tez Yapısı

Bu tez çalışması, yedi ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan Giriş kısmında, çalışmanın motivasyonu, amacı ve kapsamı ortaya konulmuş; elektronik

filtrelerin temel kavramları, aktif elemanların filtre tasarımındaki rolü ve araştırma problemi açıklanmıştır. Ayrıca bu bölümde, tezin literatüre sağlayacağı katkılara genel bir çerçeve sunulmuştur.

İkinci bölümde, Önceki Çalışmalar başlığı altında, VDGA ve VDTA tabanlı analog filtre tasarımlarına yönelik literatürde yer alan çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda mevcut yaklaşımlar değerlendirilmiş ve literatürdeki araştırma boşlukları belirlenerek bu tez çalışmasının özgün yönleri ortaya konulmuştur.

Üçüncü bölüm olan Gereç ve Yöntem kısmında, çalışmada kullanılan VDGA ve VDTA aktif yapı bloklarının çalışma prensipleri açıklanmış; önerilen gerilim modlu filtre devrelerinin tasarım süreci ve matematiksel modelleri sunulmuştur. Ayrıca benzetim ortamı ve kullanılan analiz yöntemleri bu bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, Bulgular başlığı altında, tasarlanan filtre devrelerine ait benzetim sonuçları verilmiş ve elde edilen frekans tepkileri, faz davranışları ve elektronik ayarlanabilirlik özellikleri grafikler ve tablolar yardımıyla sunulmuştur.

Beşinci bölüm olan Tartışma kısmında, elde edilen bulgular literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış; VDGA ve VDTA tabanlı tasarımların performansları, avantajları ve sınırlamaları ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde, Sonuçlar başlığı altında, çalışmadan elde edilen temel çıkarımlar özetlenmiş ve VDGA ile VDTA tabanlı gerilim modlu filtre tasarımlarının analog devreler alanına sağladığı katkılar vurgulanmıştır.

Son olarak, yedinci bölüm olan Öneriler kısmında, bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar doğrultusunda gelecekte gerçekleştirilebilecek araştırmalara ve olası geliştirme alanlarına yönelik öneriler sunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Analog filtre tasarımı alanında gerçekleştirilen önceki çalışmalar, ağırlıklı olarak aktif yapı bloklarının kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Özellikle operasyonel kuvvetlendirici tabanlı filtreler, tasarım kolaylığı ve yaygın kullanılabilirlikleri nedeniyle uzun süre tercih edilmiştir. Ancak bu yapıların sınırlı bant genişliği, yüksek frekans uygulamalarındaki performans düşüşleri ve elektronik olarak ayarlanabilirliğin kısıtlı olması, alternatif aktif elemanların geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu gereksinimler doğrultusunda, analog filtrelerin daha kompakt, düşük güç tüketimli ve tümleşik devre uyumlu biçimde gerçekleştirilmesine yönelik araştırmalar hız kazanmıştır.

Bu bağlamda, transkonduktans temelli aktif elemanlar analog filtre tasarımında önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bu tür elemanlar, filtre parametrelerinin elektronik olarak kontrol edilebilmesine olanak tanıyarak, sabit pasif elemanlara olan bağımlılığı azaltmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, bu yaklaşımın özellikle yeniden ayarlanabilir ve çok fonksiyonlu filtre yapılarının gerçekleştirilmesinde avantaj sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, kullanılan aktif elemanın yapısına bağlı olarak elde edilen esneklik, çıkış çeşitliliği ve devre karmaşıklığı önemli ölçüde değişiklik göstermektedir.

Bu nedenle, son yıllarda farklı transkonduktans tabanlı aktif yapı blokları kullanılarak gerçekleştirilen filtre tasarımları detaylı biçimde incelenmekte; bu yapıların sağladığı avantajlar ve sınırlamalar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) ve Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) gibi daha gelişmiş aktif elemanların kullanımı, gerilim modlu filtre tasarımlarında yeni yaklaşımların ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Bu çalışmalar, modern analog filtre tasarımında aktif eleman seçiminin kritik bir tasarım parametresi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

2.1. VDGA Tabanlı Filtre Tasarımları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA), elektronik olarak ayarlanabilir kazanç ve transkonduktans özelliklerini bir arada sunması nedeniyle analog filtre tasarımında dikkat çeken aktif yapı bloklarından biri hâline gelmiştir. Bu özellikleri sayesinde VDGA, özellikle gerilim modlu filtrelerin daha sade devre yapılarıyla ve daha az pasif eleman kullanılarak gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu bölümde, literatürde VDGA kullanılarak önerilen filtre tasarımları incelenmekte ve bu çalışmaların sunduğu yaklaşımlar ile sınırlamalar özetlenmektedir.

Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) kullanılarak gerçekleştirilen filtre tasarımları, literatürde özellikle sade devre yapıları ve elektronik ayarlanabilirlik özellikleri açısından ele alınmıştır. Bu alandaki temel çalışmalardan biri olan “Dual-Mode Multifunction Filter Realized with a Single Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA)” başlıklı çalışmada, araştırmacılar tek bir VDGA kullanarak gerilim modlu ve akım modlu çalışabilen çok fonksiyonlu bir biquad filtre yapısı önermiştir. Söz konusu tasarımda alçak geçiren (LP), bant geçiren (BP) ve yüksek geçiren (HP) filtre çıkışları elde edilmiş; kesim frekansı ve kalite faktörünün elektronik olarak ayarlanabildiği gösterilmiştir. Ancak çalışmada sunulan yapı, sınırlı çıkış sayısı nedeniyle evrensel filtre fonksiyonlarını tam olarak sağlayamamaktadır (Roongmuanpha vd., 2022).

Bunun yanı sıra, “Single VDGA-Based Mixed-Mode Universal Filter and Dual-Mode Quadrature Oscillator” başlıklı çalışmada, VDGA kullanılarak mixed-mode (gerilim ve akım modlarını birlikte destekleyen) evrensel bir filtre yapısı geliştirilmiştir. Bu çalışmada LP, BP ve HP filtre fonksiyonları tek bir yapı üzerinden elde edilirken, aynı devrenin küçük bir yeniden yapılandırma ile quadrature osilatör olarak da çalışabildiği gösterilmiştir. Çalışma, VDGA’nın çok işlevli analog devrelerde kullanılabilirliğini ortaya koymakla birlikte, devre karmaşıklığının artması önemli bir sınırlama olarak rapor edilmiştir.

Daha yakın tarihli bir çalışmada, “Single VDGA-Based Mixed-Mode Electronically Tunable First-Order Universal Filter” başlıklı makalede, tek bir VDGA kullanılarak birinci dereceden evrensel bir filtre tasarımı sunulmuştur. Bu yapıda alçak geçiren, yüksek geçiren ve tüm geçiren (all-pass) filtre çıkışları elde edilmiş ve filtre parametrelerinin VDGA’nın elektronik olarak ayarlanabilen parametreleri üzerinden kontrol edilebildiği gösterilmiştir (Roongmuanpha vd., 2023). Çalışma, düşük eleman sayısı ve entegrasyona uygunluk açısından önemli avantajlar sunmasına rağmen, yalnızca birinci dereceden filtre yapılarıyla sınırlı kalmaktadır.

Ayrıca, “Voltage Differencing Gain Amplifier-Based nth-Order Low-Pass Voltage-Mode Filter” başlıklı çalışmada, birden fazla VDGA kullanılarak n’inci dereceden alçak geçiren gerilim modlu filtrelerin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada yüksek mertebeli filtrelerin VDGA tabanlı olarak tasarlanabileceği ortaya konulmuş; ancak aktif eleman sayısının artmasıyla birlikte devre karmaşıklığı ve güç tüketiminin yükseldiği vurgulanmıştır (Madonsela & Srivastava, 2024).

Genel olarak değerlendirildiğinde, VDGA tabanlı filtre çalışmaları elektronik ayarlanabilirlik ve sade mimari açısından önemli katkılar sunmaktadır. Bununla birlikte, çok çıkışlı ve ikinci dereceden evrensel filtrelerin gerçekleştirilmesinde VDGA'nın yapısal sınırlamaları belirgin hâle gelmekte ve bu durum, daha gelişmiş aktif yapı bloklarına dayalı filtre tasarımlarına olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

2.2. VDTA Tabanlı Filtre Tasarımları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA), VDGA yapısına kıyasla daha gelişmiş bir aktif yapı bloğu olup, birden fazla akım çıkış terminali sunması sayesinde çok çıkışlı ve çok fonksiyonlu filtre tasarımlarına olanak sağlamaktadır. Bu özellik, özellikle ikinci dereceden ve evrensel analog filtrelerin gerçekleştirilmesinde VDTA'yı güçlü bir alternatif hâline getirmiştir. Literatürde VDTA tabanlı çalışmalar, elektronik ayarlanabilirlik, düşük pasif eleman sayısı ve geniş uygulama esnekliği açısından yoğun biçimde ele alınmıştır.

Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) tabanlı filtre tasarımları, çok çıkışlı yapıları ve elektronik ayarlanabilirlik özellikleri nedeniyle literatürde geniş biçimde ele alınmıştır. VDTA'nın filtre uygulamalarında kullanılmasına yönelik temel çalışmalardan biri, "A New CMOS Realization of Voltage Differencing Transconductance Amplifier and Its Filter Applications" başlıklı çalışmadır. Yeşil, Kaçar ve Kuntman tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, VDTA'nın CMOS gerçekleştirmesi tanıtılmış ve bu aktif elemanın ikinci dereceden analog filtre tasarımlarında kullanılabilirliği gösterilmiştir (Yeşil, Kaçar, & Kuntman, 2011). Çalışmada, kesim frekansının transkonduktans parametresi üzerinden elektronik olarak ayarlanabildiği ve aynı devre yapısından birden fazla filtre çıkışının elde edilebildiği ortaya konulmuştur.

VDTA tabanlı evrensel filtre tasarımlarına yönelik önemli bir diğer çalışma, "Universal Biquad Filter Using Voltage Differencing Transconductance Amplifier" başlıklı makaledir. Prasad ve Bhaskar tarafından sunulan bu çalışmada, VDTA kullanılarak alçak geçiren (LP), bant geçiren (BP), yüksek geçiren (HP), bant durduran (BS) ve tüm geçiren (AP) filtre fonksiyonlarını sağlayan bir evrensel biquad filtre tasarımı önerilmiştir. Tasarımda filtre parametrelerinin elektronik olarak ayarlanabilir olması ve pasif eleman sayısının düşük tutulması önemli avantajlar olarak rapor edilmiştir (Prasad, Bhaskar, & Srivastava, 2013).

VDTA'nın çok çıkışlı yapısından yararlanan bir başka çalışmada, "Voltage Differencing Transconductance Amplifier Based Universal Filter with Reduced

Number of Passive Components” başlıklı makalede, düşük pasif eleman sayısına sahip bir evrensel filtre mimarisi sunulmuştur. Bu çalışmada, VDTA kullanılarak farklı filtre çıkışlarının aynı anda elde edilebildiği ve devre yapısının entegrasyona uygun olduğu gösterilmiştir. Ayrıca önerilen tasarımın düşük güç tüketimi sağladığı vurgulanmıştır (Kumar & Maheshwari, 2015).

KHN-tipi filtre mimarilerinin VDTA ile gerçekleştirilmesine yönelik çalışmalarda ise, “VDTA-Based KHN Biquad Filter” başlıklı yaklaşımlarda, klasik Kerwin–Huelsman–Newcomb (KHN) yapısının VDTA kullanılarak yeniden tasarlandığı görülmektedir. Bu çalışmalarda, integratör bloklarının VDTA ile gerçekleştirilmesi sayesinde çoklu çıkışlı (LP, BP ve HP) filtre fonksiyonlarının aynı devre üzerinden elde edildiği ve filtre parametrelerinin elektronik olarak ayarlanabildiği rapor edilmiştir.

Daha ileri çalışmalarda, VDTA tabanlı filtre tasarımlarının kesirli mertebe ve yüksek mertebeli filtreler uyarlandığı da görülmektedir. Bu tür çalışmalarda, VDTA’nın elektronik ayarlanabilirliği kullanılarak farklı frekans karakteristiklerinin elde edilebildiği ve tasarımların biyomedikal sinyal işleme gibi uygulamalara uygun olduğu belirtilmiştir (Alaybeyoğlu & Kuntman, 2014). Bununla birlikte, aktif eleman sayısının artması devre karmaşıklığını artıran temel sınırlama olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde yer alan VDTA tabanlı filtre çalışmaları, çok fonksiyonlu ve elektronik olarak ayarlanabilir analog filtrelerin gerçekleştirilmesinde VDTA’nın güçlü bir aktif yapı bloğu olduğunu göstermektedir. Ancak mevcut çalışmaların önemli bir kısmı belirli filtre topolojileriyle sınırlı kalmış; minimalist yapı, düşük aktif eleman sayısı ve tasarım sadeleştirilmesi gibi konular yeterince ele alınmamıştır. Bu durum, VDTA tabanlı daha sade ve etkin filtre mimarilerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalara açık bir alan oluşturmaktadır.

2.3. Literatürdeki Boşluk

Literatürde aktif yapı blokları kullanılarak gerçekleştirilen analog filtre tasarımlarına yönelik çok sayıda çalışma bulunmakta olup, bu çalışmaların önemli bir kısmı farklı aktif elemanların sunduğu elektronik ayarlanabilirlik ve çok fonksiyonluluk özelliklerine odaklanmaktadır. Özellikle VDGA ve VDTA tabanlı filtre yapıları, sade mimarileri ve entegrasyona uygunlukları nedeniyle analog filtre tasarımında yaygın biçimde ele alınmıştır.

VDGA tabanlı filtre çalışmalarında, genellikle birinci dereceden veya sınırlı fonksiyonlu süzgeç yapılarının sade devre mimarileriyle gerçekleştirildiği görülmektedir. Bu çalışmalar, düşük aktif ve pasif eleman sayısı ile tasarım basitliği açısından önemli avantajlar sunmakla birlikte, çok çıkışlı ve ikinci dereceden KHN tipi filtre mimarilerinin gerçekleştirilmesinde yapısal sınırlamalara sahiptir. Özellikle LP, BP ve HP çıkışlarının aynı anda elde edilmesini sağlayan KHN çekirdeğinin VDGA kullanılarak etkin ve bütüncül bir şekilde gerçekleştirilmesine yönelik çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır.

Öte yandan, VDTA tabanlı filtre tasarımları, çoklu akım çıkış terminalleri sayesinde ikinci dereceden ve çok çıkışlı filtre mimarilerinin gerçekleştirilmesine daha elverişli bir yapı sunmaktadır. Literatürde VDTA kullanılarak gerçekleştirilen KHN tipi filtre çalışmalarında, genellikle çekirdek yapıdan yalnızca alçak geçiren (LP), bant geçiren (BP) ve yüksek geçiren (HP) çıkışlar elde edilmiştir. Bant durduran (BS) ve tüm geçiren (AP) filtre fonksiyonları ise çoğunlukla ele alınmamış veya farklı topolojiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmalarda, KHN çekirdeğinin korunarak BS ve AP çıkışlarının türetilmesine yönelik sistematik bir yaklaşımın yeterince incelenmediği görülmektedir.

Bununla birlikte, literatürde VDGA ve VDTA tabanlı KHN filtre tasarımlarının aynı çalışma kapsamında ele alındığı, bu iki aktif yapı bloğunun aynı filtre topolojisi altında karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği ve her iki yapının sağladığı avantaj ve sınırlamaların nesnel performans ölçütleri üzerinden analiz edildiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle devre karmaşıklığı, aktif eleman sayısı, elektronik ayarlanabilirlik, çıkış çeşitliliği ve entegrasyon uygunluğu gibi kriterler açısından yapılan doğrudan karşılaştırmalar literatürde yeterince yer bulmamıştır.

Bu bağlamda, VDGA ve VDTA kullanılarak gerçekleştirilen KHN tipi gerilim modlu filtre tasarımlarının aynı çalışma kapsamında ele alınması, her iki yaklaşımın LP, BP, HP, BS ve AP filtre fonksiyonlarını sağlama yeteneklerinin incelenmesi ve performans açısından karşılaştırılması literatürde önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır. Bu tez çalışması, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlayarak, VDGA ve VDTA tabanlı KHN filtre yapılarının teorik analizini ve benzetim doğrulamasını sunmakta; her iki aktif yapı bloğunun avantaj ve sınırlamalarını sistematik bir karşılaştırma ile ortaya koymaktadır.

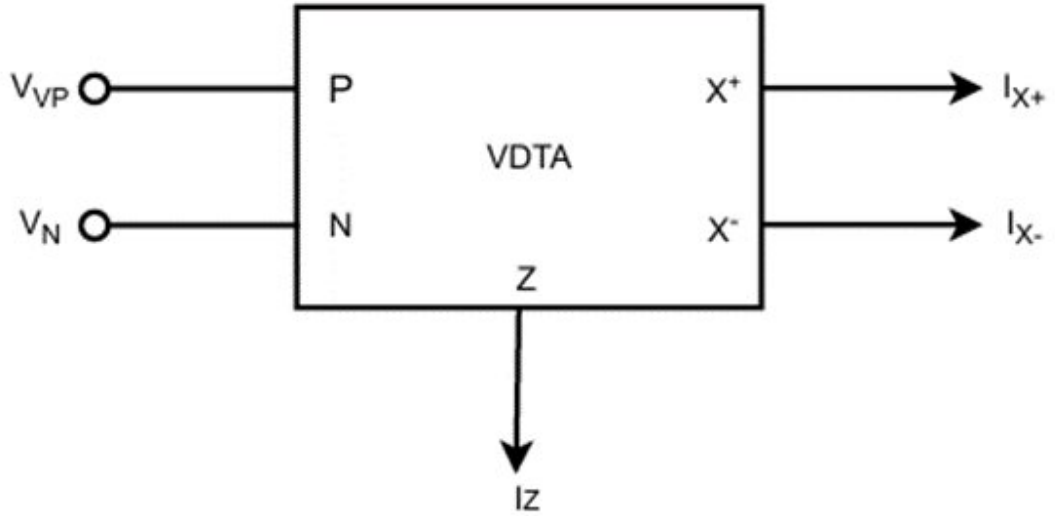
3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada izlenen tasarım yaklaşımı ve kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Çalışmanın temel metodolojisi, Kerwin–Huelsman–Newcomb (KHN) tipi gerilim modlu ikinci dereceden filtre topolojisinin aynı yapısal biçimde korunması ve bu topolojinin iki farklı aktif yapı bloğu kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmesine dayanmaktadır. Bu kapsamda, söz konusu KHN filtresi birinci yaklaşımda Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA), ikinci yaklaşımda ise Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) kullanılarak tasarlanmıştır. Böylece devre topolojisi, filtre fonksiyonları ve çalışma koşulları sabit tutulmuş; performans farklılıklarının yalnızca aktif eleman türünden kaynaklanması sağlanarak adil ve sistematik bir karşılaştırma yapılmıştır.

Önerilen KHN çekirdeği, her iki yaklaşımda da üç aktif blok kullanılarak oluşturulmuş ve çekirdek yapıdan alçak geçiren (LP), bant geçiren (BP) ve yüksek geçiren (HP) çıkışlar eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Buna ek olarak, bant durduran (BS) ve tüm geçiren (AP) filtre fonksiyonları, KHN çekirdeğinin yapısal bütünlüğü korunarak, çekirdekten elde edilen sinyallerin ayrı türetilmiş kademeler üzerinden işlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla her iki tasarımda da yalnızca ilgili aktif yapı bloğu (VDGA veya VDTA) kullanılmış; op-amp veya farklı aktif elemanlara başvurulmamıştır. Bu yaklaşım, çekirdeğin yüklenmesini önleyerek kararlılığı artırmakta ve tasarımın entegrasyona uygunluğunu güçlendirmektedir.

Filtrelerin teorik analizleri ideal aktif eleman modelleri üzerinden gerçekleştirilmiş; doğal frekans ve kalite faktörü gibi temel parametrelerin elektronik olarak ayarlanabilirliği analitik ifadelerle ortaya konulmuştur. Önerilen devrelerin doğrulanması amacıyla benzetim çalışmaları yürütülmüş ve her iki yaklaşım, aktif eleman sayısı, pasif bileşen sayısı, elektronik ayarlanabilirlik, çıkış çeşitliliği ve frekans tepkisi gibi ölçütler açısından karşılaştırılmıştır. Bu bölümde sunulan yöntemsel çerçeve, sonraki bölümlerde verilen bulguların ve tartışmaların temelini oluşturmaktadır.

3.1. Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) Yapısı



Şekil 3.11. VDTA'nın şematik sembolü.

Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA), diferansiyel giriş gerilimleri arasındaki farkı işleyerek bu farkı akım biçiminde bir veya daha fazla çıkış terminaline aktaran, elektronik olarak ayarlanabilir bir aktif yapı bloğudur. Burada elektronik olarak ayarlanabilirlikten kasıt, VDTA'nın transkonduktans parametresi olan gm değerinin, harici bir bias akımı aracılığıyla elektronik olarak kontrol edilebilmesidir. Bu sayede filtrelerin doğal frekansı ve kazanç karakteristikleri, devredeki pasif elemanlar değiştirilmeden dinamik olarak ayarlanabilmektedir.

VDTA, özellikle çok çıkışlı yapısı ve transkonduktans parametresinin bias akımı ile kontrol edilebilmesi sayesinde, analog filtre ve sinyal işleme devrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Entegre devre uygulamalarına uygun kompakt yapısı, VDTA'yı modern analog tasarımlar için cazip bir alternatif hâline getirmiştir .

VDTA'nın temel yapısı; iki adet yüksek empedanslı diferansiyel gerilim giriş ucu (P ve N), bir adet yüksek empedanslı ara düğüm (Z) ve genellikle biri pozitif diğeri negatif yönlü olmak üzere iki adet akım çıkış terminalinden (X_+ ve X_-) oluşmaktadır. Bu terminaller, VDTA'nın diferansiyel gerilim işleme ve akım üretme işlevlerini aynı yapı içerisinde gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır.

İdeal bir VDTA için terminal ilişkileri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

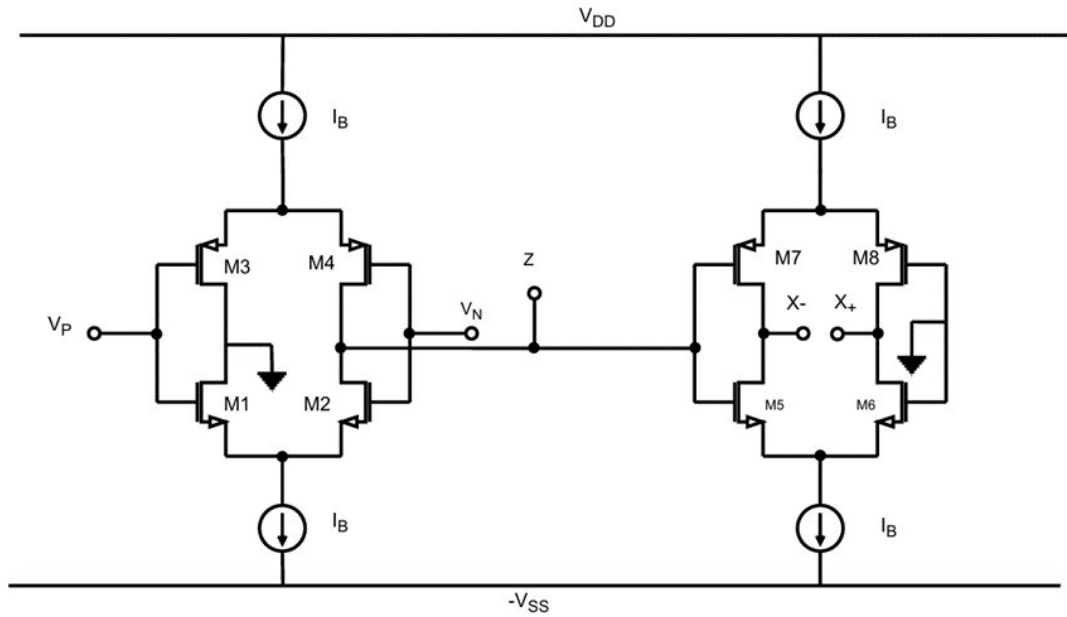
$$V_Z = V_P - V_N \quad (3.1)$$

$$I_{X+} = gm.V_Z \quad (3.2)$$

$$I_{X-} = -gm.V_Z \quad (3.3)$$

Burada V_P ve V_N sırasıyla terslemeyen ve tersleyen giriş uçlarındaki gerilimleri, V_Z diferansiyel giriş geriliminden elde edilen ara düğüm gerilimini temsil etmektedir. I_{X-} ve I_{X+} ise VDTA'nın pozitif ve negatif akım çıkışlarını göstermektedir. Transkonduktans değeri gm , bias akımı aracılığıyla elektronik olarak ayarlanabilmekte ve bu sayede filtrelerin doğal frekansı ve kazanç karakteristikleri pasif elemanlar değiştirilmeden kontrol edilebilmektedir.

VDTA'nın ideal modelinde giriş uçlarının sonsuz empedanslı, akım çıkış uçlarının ise yüksek çıkış empedansına sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu özellik, VDTA tabanlı devrelerin kademeler arası yüklenmeden etkilenmeden çalışmasını sağlamak ve çok çıkışlı filtre yapılarının gerçekleştirilmesini kolaylaştırmaktadır.



Şekil 3.12. CMOS transistörlü VDTA'nın iç yapısı

VDTA'nın fonksiyonel ve küçük işaret eşdeğer modelleri Şekil 3.4. 'de gösterilmektedir. Çalışma prensibi temel olarak iki aşamada açıklanabilir. İlk aşamada, yüksek empedanslı P ve N giriş uçları arasındaki gerilim farkı alınarak ara düğüm gerilimi V_z elde edilir. İkinci aşamada ise bu gerilim, transkonduktans kademesi aracılığıyla akıma dönüştürülerek çıkış terminallerinde I_{X+} ve I_{X-} akımları üretilir. Çıkış akımlarının genlikleri eşit, yönleri ise zıttır; bu özellik VDTA'yı diferansiyel ve çok çıkışlı analog filtre tasarımları için uygun hâle getirmektedir.

VDTA'nın yalnızca akım çıkışları sunması, onu temel olarak akım modlu veya gerilim-akım dönüşümüne dayalı (transkonduktans temelli) uygulamalar için elverişli kılmaktadır. Ancak uygun pasif elemanlar kullanılarak VDTA tabanlı devrelerden gerilim modlu çıkışlar elde edilmesi de mümkündür.

3.1.1. VDTA'nın İdeal Olmayan Modeli

VDTA'nın daha gerçekçi bir analizi, iç CMOS yapısından kaynaklanan ideal olmayan etkilerin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Bu ideal olmayan etkiler başlıca parazitik elemanlar ve transkonduktans kazanç hatalarından oluşmakta olup, özellikle yüksek frekanslarda devre performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Pratik gerçekleştirimlerde, VDTA'nın her bir terminali sonlu parazitik empedanslara sahiptir. Buna göre, giriş terminalleri olan V_p ve V_N uçlarında paralel parazitik dirençler (R_p , R_N) ve kapasitanslar (C_p , C_N) bulunmaktadır. Benzer şekilde, ara düğüm olan Z terminali sonlu bir çıkış direnci R_z ve parazitik kapasitans C_z ile modellenmektedir. Akım çıkış terminalleri $X+$ ve $X-$ uçlarında ise sonlu çıkış dirençleri (R_x) ve parazitik kapasitanslar (C_x) mevcuttur. Bu parazitik elemanlar, VDTA'nın ideal frekans tepkisini değiştirerek sistemde ilave kutupların oluşmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan α_t ve β_t katsayıları, VDTA'nın iç transkonduktans kademelerinde oluşan kazanç sapmalarını analitik olarak modellemek amacıyla tanımlanmış ideal olmayanlık parametreleridir. Bu katsayılar, üretim kaynaklı eşleşme hataları, sonlu kazanç ve bias akımı sapmaları gibi etkilerin matematiksel bir temsili olup, doğrudan fiziksel bir devre parametresi olarak ele alınmamaktadır.

Monte Carlo analizinde ise benzer ideal olmayan etkiler, α_t ve β_t katsayıları ayrı ayrı tanımlanmaksızın, transkonduktans (gm) ve kapasitans değerlerindeki istatistiksel varyasyonlar üzerinden dolaylı olarak modellenmiştir. Bu yaklaşım

sayesinde, teorik ideal olmayan model ile istatistiksel üretim toleransları arasında tutarlı ve tamamlayıcı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

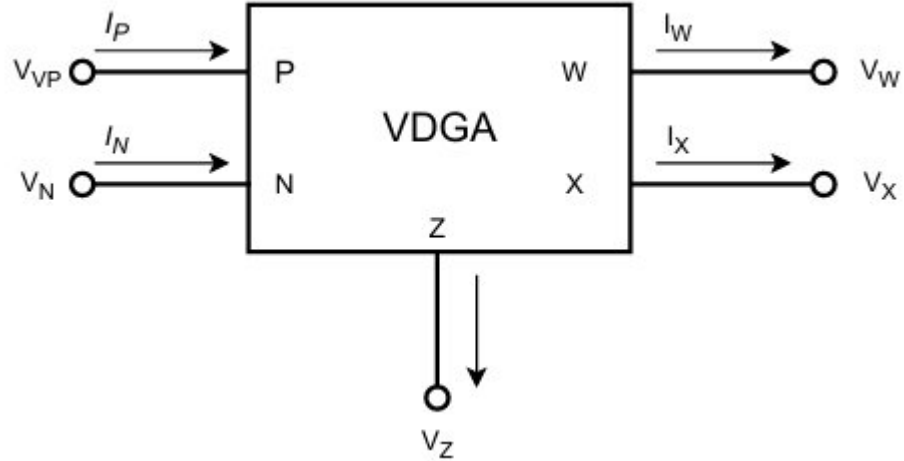
$$I_Z = \alpha_t . gm_f (V_P - V_N) \quad (3.4)$$

$$I_{X+} = \beta_t . gm_s . V_Z \quad (3.5)$$

Burada α_t ve β_t katsayıları sırasıyla birinci ve ikinci transkonduktans kademelerine ait kazanç hatalarını temsil etmektedir.

Bu ideal olmayan model, VDTA tabanlı devrelerin yüksek frekans davranışının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle Z terminalinde bulunan parazitik kapasitans CZ, istenmeyen kutupların oluşmasına neden olarak filtrenin çalışma bant genişliğini sınırlayabilmekte ve teorik olarak elde edilen frekans tepkisinden sapmalara yol açabilmektedir

3.2. Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) Yapısı



Şekil 3.13. VDGA'nın şematik sembolü.

Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA), Voltage Differencing Transconductance Amplifier (VDTA) yapısının geliştirilmiş bir türeği olarak tanımlanan gelişmiş bir aktif yapı bloğudur. VDGA, gerilim farkı alma, gerilim

kazancı sağlama ve transkonduktans dönüşümünü tek bir kompakt CMOS yapı içerisinde birleştirerek, analog devre tasarımlarında daha yüksek esneklik ve elektronik ayarlanabilirlik sunmak amacıyla literatüre kazandırılmıştır.

VDTA'dan farklı olarak VDGA, diferansiyel gerilim girişlerine ve akım modlu çıkışlara ek olarak, iç düğüm geriliminin yükseltilmiş bir kopyasını sağlayan W adlı ilave bir gerilim çıkış terminaline sahiptir. Bu ek terminal sayesinde VDGA, hem gerilim modlu hem de akım modlu uygulamalarda aynı anda kullanılabilmekte ve böylece çok yönlü bir aktif eleman hâline gelmektedir. VDGA'nın şematik sembolü Şekil 3.1. 'de gösterilmektedir.

VDGA yapısı temel olarak beş adet terminalden oluşmaktadır:

- P: terslemeyen, yüksek empedanslı gerilim giriş ucu,
- N: tersleyen, yüksek empedanslı gerilim giriş ucu,
- Z: P ve N girişleri arasındaki gerilim farkını temsil eden yüksek empedanslı ara düğüm,
- X: düşük empedanslı akım çıkış ucu,
- W: iç düğüm geriliminin yükseltilmiş hâlini sağlayan gerilim çıkış ucu.

Bu terminaller aracılığıyla VDGA; diferansiyel gerilim yükseltme, gerilim ölçekleme ve gerilimden akıma dönüşüm işlemlerini tek bir yapı içerisinde gerçekleştirebilmektedir .

İdeal bir VDGA için terminal ilişkileri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

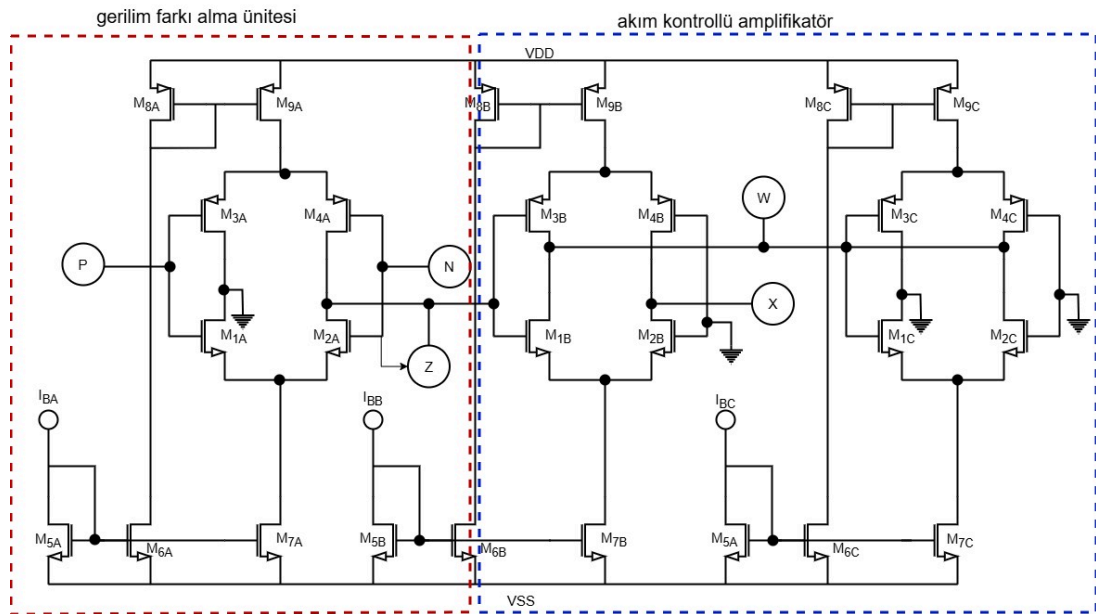
$$V_Z = V_P - V_N \quad (3.6)$$

$$I_X = g_m.V_Z \quad (3.7)$$

$$V_W = \beta.V_Z$$

(3.8)

Burada g_m , bias akımı I_{gm} aracılığıyla elektronik olarak ayarlanabilen transkonduktans kazancını (A/V), β ise bias akımı I_B ile kontrol edilen gerilim kazancını temsil etmektedir. V_P, V_N, V_Z ve V_W ilgili terminallerdeki gerilimleri, I_X ise düşük empedanslı X ucundan akan çıkış akımını göstermektedir. W terminali ideal olarak yüksek empedanslı bir gerilim çıkışı olup, bu terminalden akan akım ihmal edilebilir düzeydedir ($I_W=0$). Bu özellikleri sayesinde VDGA, hem gerilim çıkışı (W ucu) hem de akım çıkışı (X ucu) sunarak karma modlu (mixed-mode) sinyal işleme uygulamaları için uygun bir yapı oluşturmaktadır.



Şekil 3.14. CMOS transistörlü VDGA'nın iç yapısı

CMOS Gerçekleştirim

VDGA'nın CMOS tabanlı bir gerçekleştiriminde üç ana transistor bloğu yer almaktadır. İlk blok, V_P ve V_N gerilimleri arasındaki farkı üreten NMOS diferansiyel giriş çifti ve PMOS aktif yüklerden oluşmaktadır. İkinci blok ara düğüm gerilimini çıkış akımına dönüştüren ve transkonduktansı I_{gm} ile kontrol edilen transkonduktans kademesidir. Üçüncü blok ise gerilim kazancını sağlayan ve kazancı I_B bias akımı I_B ile ayarlanan programlanabilir bir yükselteç kademesidir.

3.2.1. İdeal Olmayan Model

İdeal Olmayan Model

Pratik CMOS gerçekleştirimlerinde, sonlu giriş ve çıkış empedansları, parazitik kapasitanslar ve eleman uyumsuzlukları nedeniyle ideal davranıştan küçük sapmalar oluşmaktadır. Bu durum, aşağıdaki ideal olmayan terminal ilişkileri ile modellenebilir:

$$V_Z = (1 - \varepsilon_1) (V_P - V_N) \quad (3.9)$$

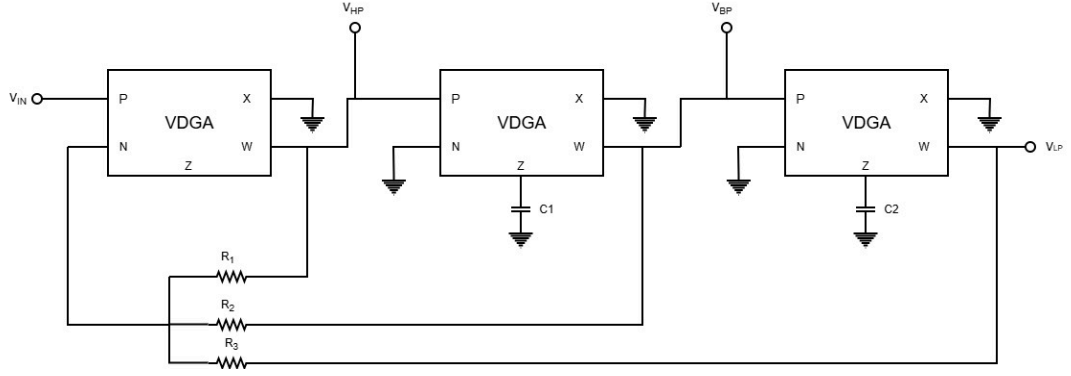
$$I_X = (1 - \varepsilon_2) gm.V_Z \quad (3.10)$$

$$V_W = (1 - \varepsilon_3) \beta.V_Z \quad (3.11)$$

Burada ε_1 , ε_2 ve ε_3 katsayıları; eşleşme hataları, parazitik yükleme etkileri ve bias değişimlerinden kaynaklanan küçük hata terimlerini temsil etmektedir. Tipik olarak P ve N giriş uçlarının empedansı 10 M Ω 'dan büyük, X çıkış ucunun empedansı 100 Ω 'dan küçük olup, W ucunun empedansı bağlanan yüke bağlı olarak değişmektedir.

3.3. VDGA Tabanlı KHN Filtre Yapısı

Bu bölümde, Kerwin–Huelsman–Newcomb (KHN) tipi ikinci dereceden gerilim modlu filtrenin, Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA) kullanılarak gerçekleştirilen tasarımı ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Önerilen yapı, klasik KHN filtre topolojisinin temel çalışma prensiplerini korumakta olup, aktif eleman olarak VDGA'nın sunduğu elektronik ayarlanabilirlik ve çoklu çıkış avantajlarından yararlanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, alçak geçiren (LP), bant geçiren (BP) ve yüksek geçiren (HP) filtre çıkışları aynı çekirdek devre üzerinden eş zamanlı olarak elde edilebilmektedir.



Şekil 3.15. VDGA ile tasarlanmış KHN devresi

HP çıkışı, giriş işaretinin BP ve LP yollarından geri beslenen bileşenleri ile birlikte VDGA'nın diferansiyel girişlerinde işlenmesiyle elde edilmektedir. Önerilen devrede HP çıkışı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir

$$V_{HP}(s) = K_{LP}V_{LP}(s) - K_{BP}V_{BP}(s) - V_{IN} \quad (3.12)$$

$$K_{LP} = K_{BP} = \beta \quad (3.13)$$

filtrenin sönümlleme terimini ve dolayısıyla kalite faktörünü belirleyen tasarım parametreleridir. Tüm çıkışların VDGA'nın W terminalinden alınması nedeniyle, gerilim kazancı β HP çıkışına doğrudan etki etmektedir.

Birinci integratör ($VDGA_2 + C_1$) bant geçiren çıkışı üretmektedir. VDGA'nın ideal terminal ilişkileri ve Z terminaline bağlı kapasitör dikkate alındığında, aşağıdaki diferansiyel denklem yazılabilir:

$$gmV_{HP}(t) = \frac{dV_{BP}}{dt}C_1 \quad (3.14)$$

BP çıkışı VDGA'nın W terminalinden alındığı için:

$$V_{BP}(s) = \beta V_{Z2} \quad (3.15)$$

Laplace dönüşümü uygulandığında BP çıkışı:

$$V_{BP}(s) = \frac{\beta g_m}{sC_1} V_{HP} \quad (3.16)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade, HP çıkışının birinci dereceden integrasyonu sonucunda bant geçiren karakteristiğini elde edildiğini göstermektedir.

3.3.1. Alçak Geçiren (LP) Çıkışı

İkinci integratör ($VDGA_3 + C_2$), bant geçiren çıkışı bir kez daha entegre ederek alçak geçiren çıkışı üretmektedir. VDGA'nın ideal terminal ilişkileri dikkate alındığında, Z_3 terminaline bağlı kapasitör üzerinden akan akım aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$g_m V_{BP}(t) = \frac{\partial V_{Z3}(t)}{\partial t} C_2 \quad (3.17)$$

Bu denklemin Laplace dönüşümü alındığında:

$$V_{Z3}(s) = \frac{g_m}{sC_2} V_{BP}(s) \quad (3.18)$$

LP çıkışı VDGA'nın W terminalinden alındığı için:

$$V_{LP}(s) = \beta V_{Z3}(s) \quad (3.19)$$

Sonuç olarak:

$$V_{LP}(s) = \frac{\beta^2 g_m^2}{s^2 C_1 C_2} V_{HP}(s) \quad (3.20)$$

şeklinde yazılabilir.

3.3.2. Transfer Fonksiyonlarının Elde Edilmesi

Yukarıdaki bağıntılar HP çıkışı denkleminde yerine konulduğunda, VDGA tabanlı KHN çekirdek yapısına ait karakteristik denklem aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$s^2 + s \frac{\beta g m}{C} + \left(\frac{\beta g m}{C} \right)^2 = 0 \quad (3.21)$$

(Burada $C_1=C_2=C$, $R_1=R_2=R_3=R$ varsayılmıştır.)

Bu sonuç kullanılarak, çekirdek yapının gerilim modlu transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir:

Yüksek Geçiren (HP):

$$V_{HP}(s) = \frac{K.s^2}{s^2 + s \frac{\beta g m}{C_1} + \frac{(\beta g m)^2}{C_1 C_2}} \quad (3.22)$$

Bant Geçiren (BP)

$$V_{BP}(s) = \frac{K.S \frac{\beta g m}{C_1}}{S^2 + S \frac{\beta g m}{C_1} \frac{R_1}{R_2} + \frac{(\beta g m)^2}{C_1 C_2} \frac{R_1}{R_3}} \quad (3.23)$$

Alçak Geçiren (LP):

$$V_{LP}(s) = \frac{\frac{\beta g m}{C}}{s^2 + s \frac{\beta g m}{C} + \left(\frac{\beta g m}{C} \right)^2} \quad (3.24)$$

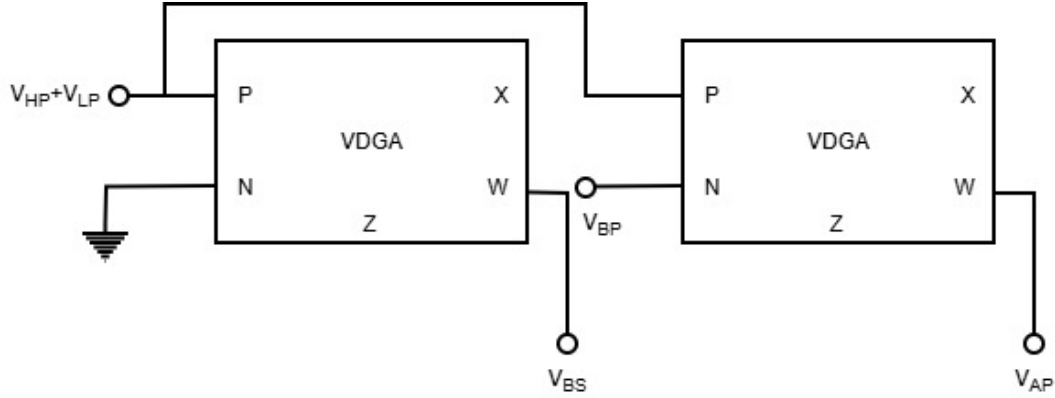
Bu ifadelerden filtrenin doğal açısal frekansı ve kalite faktörü:

$$Q = 1, \omega_0 = \frac{\beta g m}{C} \quad (3.25)$$

olarak elde edilmektedir.

3.3.3. VDGA Kullanılarak Bant Durduran (BS) ve Tüm Geçiren (AP) Çıkışlarının Elde Edilmesi

VDGA tabanlı KHN filtre çekirdeğinden elde edilen yüksek geçiren (VHP), bant geçiren (VBP) ve alçak geçiren (VLP) çıkışlar kullanılarak, bant durdurucu (BS) ve tüm geçiren (AP) filtre fonksiyonları ek bir VDGA kademesi yardımıyla elde edilebilmektedir. Bu yaklaşım, KHN çekirdeğinin yapısını bozmadan ilave filtre karakteristiklerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.16. Önerilen VDGA tabanlı ikinci dereceden BS&AP temel yapısı.

Önerilen BS ve AP üretim devreleri Şekil 3.6.'da gösterilmektedir. İlk VDGA bloğunda, VHP ve VLP sinyalleri diferansiyel girişlere uygulanarak bant durdurucu filtre çıkışı elde edilmektedir. VDGA'nın diferansiyel giriş yapısı sayesinde, bu iki sinyalin cebirsel toplamı doğrudan gerçekleştirilmekte ve çıkış gerilimi W terminalinden alınmaktadır. Böylece bant durdurucu çıkış aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$V_{BS}(s) = V_{LP}(s) + V_{HP}(s) \quad (3.26)$$

Bu ifade kullanılarak bant durdurucu filtreye ait transfer fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$V_{BS}(s) = \frac{s^2 + \left(\frac{\beta qm}{C}\right)^2}{s^2 + s\frac{\beta qm}{C} + \left(\frac{\beta qm}{C}\right)^2} \quad (3.27)$$

Bu sonuç, elde edilen BS çıkışının klasik ikinci dereceden bant durdurucu filtre

karakteristiği ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

İkinci VDGA bloğu ise tüm geçiren (AP) filtre fonksiyonunun elde edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu yapıda, bant geçiren çıkış VBP ve bant durduran çıkış VBS uygun VDGA girişlerine uygulanmakta ve VDGA'nın gerilim kazancı özelliğinden yararlanılarak faz karakteristiği frekansa bağlı olarak değiştirken genlik cevabı tüm frekanslar boyunca sabit kalmaktadır. Bu durumda tüm geçiren çıkış W terminalinden alınmakta olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$V_{AP}(s) = V_{HP}(s) + V_{LP}(s) - V_{BP}(s) \quad (3.28)$$

Buna karşılık tüm geçiren filtreye ait transfer fonksiyonu şu şekilde elde edilir:

$$V_{AP}(s) = \frac{s^2 - s\frac{\beta_{gm}}{C} + \left(\frac{\beta_{gm}}{C}\right)^2}{s^2 + s\frac{\beta_{gm}}{C} + \left(\frac{\beta_{gm}}{C}\right)^2} \quad (3.29)$$

Bu transfer fonksiyonu, genliğin tüm frekanslar boyunca sabit kaldığını ve fazın frekansa bağlı olarak değiştiğini göstermekte olup, klasik ikinci dereceden tüm geçiren filtre yapısı ile birebir uyumludur.

3.4. Karşılaştırma Metodolojisi

Bu çalışmada, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının performanslarının adil ve tutarlı bir biçimde karşılaştırılabilmesi amacıyla ortak bir karşılaştırma metodolojisi benimsenmiştir. Karşılaştırma sürecinde, her iki yapı da aynı KHN topolojisi temel alınarak tasarlanmış ve pasif eleman değerleri eşit seçilmiştir. Bu kapsamda, integratör kademelerinde kullanılan kapasitör değerleri $C_1=C_2=C$ olarak alınmış; geri besleme ağında yer alan dirençler R_1, R_2, R_3 her iki yapı için de aynı değerlerde belirlenmiştir. Böylece elde edilen sonuçların, yalnızca kullanılan aktif yapı bloğundan (VDTA veya VDGA) kaynaklanan farkları yansıtması amaçlanmıştır.

Tüm analiz ve benzetim çalışmalarında, VDTA ve VDGA tabanlı devreler için aynı besleme gerilimleri, aynı kapasitör değerleri ($C_1=C_2$) ve aynı transkonduktans değerleri (gm) kullanılmıştır. VDGA tabanlı yapıda ek olarak

gerilim kazancı parametresi β tanımlanmış; bu parametrenin filtre karakteristikleri üzerindeki etkisi, VDTA tabanlı yapı ile doğrudan karşılaştırılabilir bir çerçevede incelenmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, VDGA'ya özgü çift elektronik ayarlanabilirlik (hem gm hem de β üzerinden ayarlama) açık bir biçimde ortaya konulmuştur.

Karşılaştırma kapsamında değerlendirilen temel performans ölçütleri; doğal açılmalık frekans (ω_0), kalite faktörü (Q), elde edilebilen filtre fonksiyonları (HP, BP, LP, BS ve AP), elektronik ayarlanabilirlik, devre karmaşıklığı ve aktif/pasif eleman sayısıdır. Ayrıca, analitik olarak elde edilen transfer fonksiyonları, gerçekçi CMOS VDTA ve VDGA modelleri kullanılarak gerçekleştirilen benzetim sonuçları ile doğrulanmış ve her iki yapı için teorik ve pratik davranışlar arasındaki uyum karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Bu metodoloji doğrultusunda elde edilen sonuçlar, bir sonraki bölümde sunulan benzetim bulguları ve tartışma kısmında ayrıntılı olarak ele alınmış; VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının avantajları ve sınırlamaları nesnel bir bakış açısıyla ortaya konulmuştur.

3.5. Analizde Kullanılan Varsayımlar

Bu çalışmada sunulan VDGA ve VDTA tabanlı KHN filtre yapılarının analitik türetilmesi sırasında, filtre topolojisinin temel çalışma prensiplerinin açık bir şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla bazı ideal varsayımlar yapılmıştır. Bu kapsamda, analizlerde kullanılan aktif elemanların ideal davranış gösterdiği kabul edilmiş; parazitik dirençler, kapasitanslar ve kazanç hata katsayıları ilk aşamada ihmal edilmiştir.

Bunun temel nedeni, söz konusu ideal olmayan parametrelerin filtre karakteristiği üzerindeki etkilerinin, devrenin temel çalışma mekanizmasından ziyade ikincil düzeltmelere yol açmasıdır. İdeal analiz sayesinde, önerilen filtrenin doğal açılmalık frekansı, kalite faktörü ve filtre tipleri arasındaki ilişkiler açık ve kapalı biçimde elde edilebilmiştir. Öte yandan, parazitik etkilerin ve üretim toleranslarının filtre performansı üzerindeki etkileri, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde gerçekleştirilen non-ideal analizler ve Monte Carlo simülasyonları aracılığıyla ayrıca incelenmiştir. Böylece, ideal varsayımlar yalnızca teorik türetme aşamasıyla sınırlandırılmış, elde edilen sonuçların pratik geçerliliği sayısal doğrulamalarla desteklenmiştir.

Tüm analizlerde, integratör kademelerinde kullanılan kapasitör değerlerinin eşit olduğu ($C_1=C_2=C$) ve her iki yapıda da aktif elemanların aynı transkonduktans

ayarlanabilirlik sunması bakımından VDGA tabanlı yapıdan ayrılmaktadır.

Önerilen VDTA tabanlı KHN çekirdek yapısında, yüksek geçiren (HP), bant geçiren (BP) ve alçak geçiren (LP) olmak üzere üç temel filtre çıkışı, ardışık iki integratör ve bir geri besleme ağı kullanılarak elde edilmektedir. Devre topolojisi klasik KHN prensibini temel almakta olup, gerilim modlu çalışma esasına dayanmaktadır.

3.6.1. Yüksek Geçiren (HP) Çıkışı

VDTA tabanlı KHN yapısında HP çıkışı, giriş işareti ile BP ve LP yollarından geri beslenen işaretlerin VDTA'nın diferansiyel girişlerinde cebirsel olarak toplanmasıyla elde edilmektedir. Bu yapı için HP çıkışı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$V_{HP}(s) = K_{LP}V_{LP}(s) - K_{BP}V_{BP}(s) - V_{IN} \quad (3.30)$$

Burada K_{BP} ve K_{LP} katsayıları, filtrenin sönümleme katsayılarını ve dolayısıyla kalite faktörünü belirleyen tasarım parametreleridir. VDTA yapısında, VDGA'dan farklı olarak ilave bir gerilim kazancı parametresi bulunmadığından, HP çıkışı yalnızca bu geri besleme katsayıları tarafından belirlenmektedir.

3.6.2. Bant Geçiren (BP) Çıkışı

Birinci integratör kademesi ($VDTA_2 + C_1$) bant geçiren çıkışı üretmektedir. VDTA'nın ideal terminal ilişkileri dikkate alındığında, bu kademe için aşağıdaki diferansiyel denklem yazılabilir:

$$g_m V_{HP}(t) = \frac{dV_{BP}(t)}{dt} C_1 \quad (3.31)$$

Laplace dönüşümü uygulandığında BP çıkışı

$$V_{BP}(s) = \frac{g_m}{sC_1} V_{HP} \quad (3.32)$$

3.6.3. Alçak Geçiren (LP) Çıkışı

İkinci integratör kademesi ($VDTA_2 + C_2$), BP çıkışının integralini alarak alçak geçiren çıkışı üretmektedir. Bu kademe için diferansiyel denklem:

$$g_m V_{BP}(t) = \frac{dV_{LP}(t)}{dt} C_2 \quad (3.33)$$

şeklinde yazılabilir. Laplace uzayında bu ifade:

$$V_{LP}(s) = \frac{g_m}{sC_1} V_{BP} \quad (3.34)$$

olur. BP ifadesi yerine konulduğunda

$$V_{LP}(s) = \frac{(g_m)^2}{s^2 C_1 C_2} V_{HP} \quad (3.35)$$

elde edilir.

3.6.4. Çıkış Denklemleri

BP ve LP bağıntıları HP çıkışı denkleminde yerine konulduğunda, VDTA tabanlı KHN çekirdek yapısının karakteristik denklemi aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2 = 0 \quad (3.36)$$

BP ve LP bağıntıları HP çıkışı denkleminde yerine konulduğunda, VDTA tabanlı KHN çekirdek yapısının karakteristik denklemi aşağıdaki biçimde elde edilir:

$$\omega_0 = \frac{gm}{\sqrt{C_1 C_2}} \quad (3.37)$$

$$Q = \frac{1}{K_{LP} K_{BP} K_{HP}} \quad (3.38)$$

Basitlik amacıyla $C_1=C_2=C$ ve $K_{LP}=K_{BP}=K_{HP}$ seçildiğinde, gerilim modlu transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir:

Yüksek Geçiren (HP):

$$V_{HP}(s) = \frac{s^2}{s^2 + s\frac{gm}{C} + \left(\frac{gm}{C}\right)^2} \quad (3.39)$$

Bant Geçiren (BP):

$$V_{BP}(s) = \frac{s\frac{gm}{C}}{s^2 + s\frac{gm}{C} + \left(\frac{gm}{C}\right)^2} \quad (3.40)$$

Alçak Geçiren (LP):

$$V_{LP}(s) = \frac{\left(\frac{gm}{C}\right)^2}{s^2 + s\frac{gm}{C} + \left(\frac{gm}{C}\right)^2} \quad (3.41)$$

Elde edilen sonuçlar, VDTA tabanlı yapının klasik KHN filtre karakteristiğini başarıyla gerçekleştirdiğini ve HP, BP ve LP çıkışlarının aynı payda polinomu sayesinde faz uyumu sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, filtrenin doğal frekansının yalnızca VDTA'nın transkonduktans parametresi gm üzerinden elektronik olarak ayarlanabilmesi, bu yapının sade ve etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

3.6.5. VDTA Tabanlı Bant Durduran (BS) ve Tüm Geçiren (AP) Filtre Yapısı

Önerilen VDTA tabanlı KHN çekirdek yapısı, yüksek geçiren (HP), bant geçiren (BP) ve alçak geçiren (LP) çıkışları eş zamanlı olarak üretebildiği için, bu temel çıkışların uygun lineer kombinasyonları aracılığıyla bant durduran (BS) ve tüm geçiren (AP) filtre karakteristiklerinin elde edilmesine imkân tanımaktadır. Bu yaklaşımda, KHN çekirdeğinin yapısı değiştirilmeden, yalnızca mevcut çıkışların ağırlıklı toplamaları kullanılarak ilave filtre fonksiyonları gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde, VDTA tabanlı KHN çekirdeğinden elde edilen HP, BP ve LP çıkışları kullanılarak BS ve AP filtre çıkışlarının analitik türetilmesi sunulmaktadır.

3.6.5.1. Bant Durduran (BS) Çıkışının Elde Edilmesi

Bant durduran filtre çıkışı, yüksek geçiren ve alçak geçiren çıkışların uygun şekilde toplanmasıyla elde edilmektedir. Önerilen VDTA tabanlı yapıda BS çıkışı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$V_{BS}(s) = V_{HP}(s) + V_{LP}(s) \quad (3.42)$$

Bu ifade kullanılarak, BS çıkışına ait transfer fonksiyonu:

$$V_{BS}(s) = \frac{s^2 + \left(\frac{qm}{C}\right)^2}{s^2 + s\frac{qm}{C} + \left(\frac{qm}{C}\right)^2} \quad (3.43)$$

şeklinde elde edilir. Bu sonuç, elde edilen BS çıkışının klasik ikinci dereceden bant durduran filtre karakteristiği ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Filtre, rezonans frekansı civarında sinyalleri bastırırken, düşük ve yüksek frekans bileşenlerini geçirmektedir

3.6.5.2. Tüm Geçiren (AP) Çıkışının Elde Edilmesi

Tüm geçiren filtre çıkışı, bant durduran ve bant geçiren çıkışların uygun lineer kombinasyonu ile elde edilmektedir. Önerilen VDTA tabanlı yapıda AP çıkışı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$V_{AP}(s) = V_{LP}(s) + V_{HP}(s) - V_{BP}(s) \quad (3.44)$$

Bant geçiren çıkışın genlik cevabı yalnızca rezonans frekansı civarında maksimum

değer almakta, buna karşılık düşük ve yüksek frekans bölgelerinde genliği ihmal edilebilir seviyelere düşmektedir. Bu nedenle $V_{BP}(s)$, düşük ve yüksek frekans bölgelerinde tüm geçiren çıkış üzerinde belirleyici bir etki oluşturmamaktadır. Ancak rezonans frekansı civarında, bant geçiren bileşenin katkısı belirgin hâle gelmektedir. Bu katkının genlik cevabını etkilemeden yalnızca faz karakteristiğini şekillendirebilmesi amacıyla, bant geçiren çıkış uygun işaretle çıkıştan çıkarılmaktadır. Böylece, tüm frekanslar boyunca genlik cevabı sabit kalırken, faz cevabı frekansa bağlı olarak değişen klasik ikinci dereceden tüm geçiren filtre

davranışı elde edilmektedir.

Bu bağıntı kullanılarak tüm geçiren filtreye ait transfer fonksiyonu:

$$V_{AP}(s) = \frac{s^2 - s \frac{qm}{C} + \left(\frac{qm}{C}\right)^2}{s^2 + s \frac{qm}{C} + \left(\frac{qm}{C}\right)^2} \quad (3.45)$$

şeklinde elde edilir. Bu transfer fonksiyonu, tüm frekanslar boyunca genliğin sabit kaldığını ve yalnızca fazın frekansa bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Dolayısıyla önerilen yapı, klasik ikinci dereceden tüm geçiren filtre davranışını başarıyla gerçekleştirmektedir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, önerilen VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının benzetim sonuçları sunulmakta ve analitik olarak elde edilen ifadelerin doğruluğu gerçekçi CMOS devre modelleri kullanılarak doğrulanmaktadır. Tüm benzetim çalışmaları, 0.18 μm CMOS teknolojisi kullanılarak PSpice simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.

Devreler, düşük gerilimli çalışmaya uygun olacak şekilde $V_{DD}=V_{SS}=1.5\text{V}$ besleme gerilimi altında çalıştırılmıştır. VDTA ve VDGA tabanlı yapılarda kullanılan tüm MOS transistörlerin boyutları aynı seçilerek, karşılaştırmanın yalnızca aktif yapı bloğundan kaynaklanan farkları yansıtmayı sağlanmıştır.

Filtre çekirdeğinde yer alan integratör kademelerinde kullanılan kapasitör değerleri her iki yapı için de eşit alınmış olup,

$$C_1=C_2=159\text{pF}$$

olarak belirlenmiştir. Bu seçim, analiz bölümünde yapılan varsayımlarla uyumludur ve filtre yapısının simetrik bir frekans tepkisi sunmasını sağlamaktadır.

VDTA ve VDGA tabanlı yapılarda transkonduktans parametresi g_m , bias akımı aracılığıyla elektronik olarak ayarlanmıştır. Benzetimlerde kullanılan nominal transkonduktans değeri:

$$g_m=100\mu\text{A/V}$$

olarak seçilmiş ve bu parametrenin filtrenin doğal frekansı üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

VDGA tabanlı yapıda buna ek olarak, aktif elemanın gerilim kazancı parametresi β tanımlanmış ve benzetimlerde:

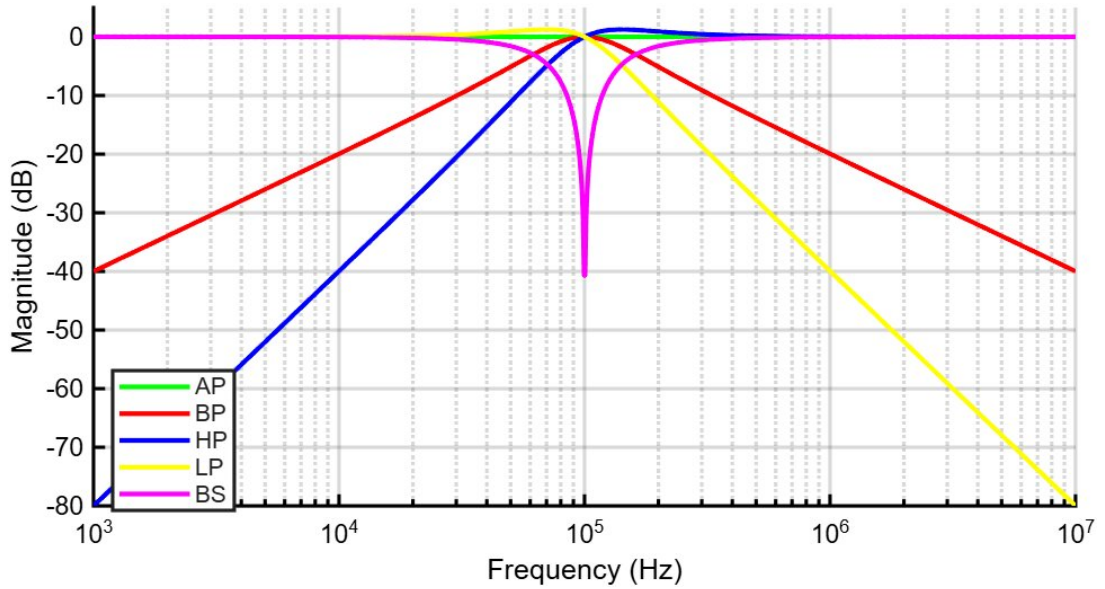
$$\beta=1.4$$

değeri kullanılmıştır. Ayrıca, β parametresinin değiştirilmesiyle filtrenin frekans karakteristiklerinin elektronik olarak ayarlanabildiği gösterilmiştir.

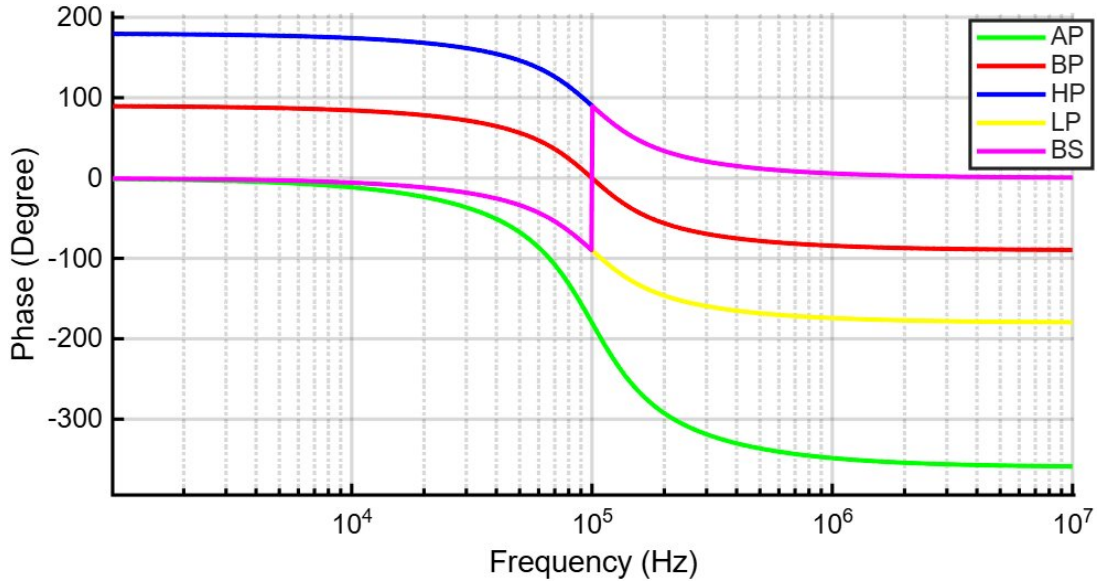
Tüm benzetimlerde, VDTA ve VDGA tabanlı devreler için aynı pasif eleman

değerleri, aynı besleme gerilimi ve aynı giriş sinyalleri kullanılarak, elde edilen sonuçların yalnızca kullanılan aktif yapı bloğunun (VDTA veya VDGA) yapısal özelliklerinden kaynaklanan farkları yansıtmaması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, analitik sonuçlar ile benzetim bulguları arasındaki uyum açık bir biçimde değerlendirilmiştir.

4.1. Frekans Tepkileri



Şekil 4.7. VDTA tabanlı KHN filtresinin genlik tepkisi.



Şekil 4.8. VDTA tabanlı KHN filtresinin faz tepkisi.

Şekil 4.54. ve Şekil 4.55.'te, VDTA tabanlı KHN filtre yapısına ait yüksek

geçiren (HP), bant geçiren (BP), alçak geçiren (LP), bant durduran (BS) ve tüm geçiren (AP) çıkışların genlik ve faz frekans tepkileri gösterilmektedir. Benzetimler, bir önceki bölümde belirtilen devre parametreleri ve çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir.

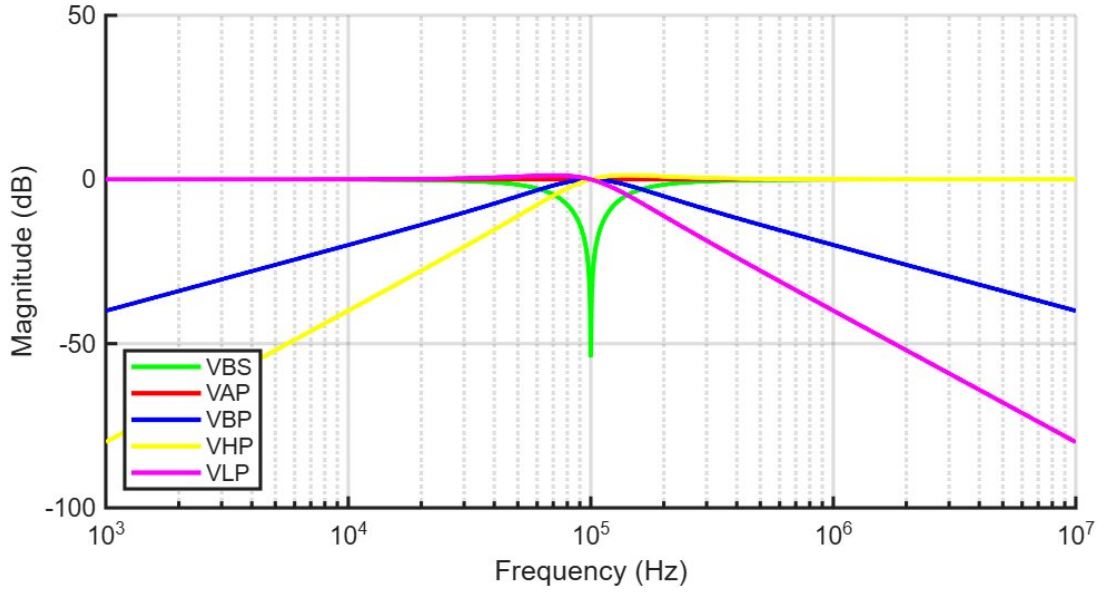
Şekil 4.54.'te sunulan genlik frekans tepkileri incelendiğinde, Yüksek geçiren (HP) çıkışın, kesim frekansından sonra yaklaşık 0 dB kazanç seviyesine ulaştığı ve düşük frekans bölgesinde -20 dB/dec eğimle zayıfladığı görülmektedir. Alçak geçiren (LP) çıkış ise düşük frekanslarda yaklaşık 0 dB maksimum kazanca sahip olup, kesim frekansından sonra -20 dB/dec eğimle zayıflamaktadır.

Bant geçiren (BP) çıkışı, merkez frekans çevresinde yaklaşık 0 dB maksimum genliğe ulaşmakta, düşük ve yüksek frekans bölgelerinde ise simetrik olarak -20 dB/dec eğimle zayıflamaktadır. Bant durduran (BS) çıkışı, merkez frekansta yaklaşık -40 dB seviyesinde belirgin bir çentik (notch) oluşturarak bu frekans bileşenini bastırmakta; düşük ve yüksek frekans bölgelerinde ise yaklaşık 0 dB kazanç sağlamaktadır.

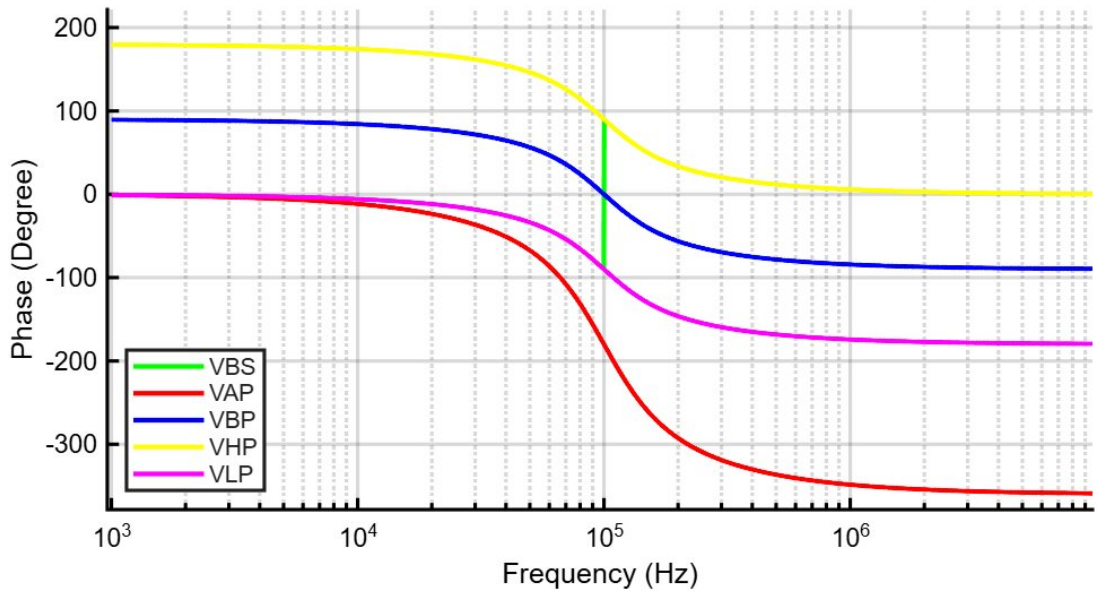
Tüm geçiren (AP) çıkışı ise tüm frekans aralığı boyunca yaklaşık 0 dB genlikte kalarak, teorik tüm geçiren filtre davranışıyla uyumlu bir karakteristik sergilemektedir.

Şekil 4.55.'te verilen faz frekans tepkileri, elde edilen filtre fonksiyonlarının teorik beklentilerle uyumlu olduğunu doğrulamaktadır. HP çıkışı, frekansla birlikte yaklaşık $+180^\circ$ 'den 0° 'ye doğru değişen bir faz karakteristiği gösterirken, LP çıkışı 0° 'den -180° 'ye doğru bir faz geçişi sergilemektedir. BP çıkışının fazı merkez frekans civarında -90° değerine yaklaşmakta olup, bu durum bant geçiren filtrelerin karakteristik faz davranışıyla uyumludur. BS çıkışının fazında merkez frekans civarında ani bir değişim gözlemlenirken, AP çıkışı frekansa bağlı olarak yaklaşık 360° 'lik sürekli bir faz kayması sağlayarak tüm geçiren filtre yapısının temel özelliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Elde edilen genlik ve faz tepkileri birlikte değerlendirildiğinde, VDTA tabanlı KHN filtre yapısının tüm temel filtre fonksiyonlarını (HP, BP, LP, BS ve AP) aynı çekirdek yapı üzerinden başarıyla gerçekleştirdiği görülmektedir. Ayrıca, tüm çıkışların aynı payda polinomuna sahip olması, faz uyumunun korunmasını sağlamış ve teorik analiz bölümünde elde edilen sonuçların benzetimlerle doğrulandığını göstermiştir.



Şekil 4.9. VDGA tabanlı KHN filtresinin genlik tepkisi.



Şekil 4.10. VDGA tabanlı KHN filtresinin faz tepkisi.

Şekil 4.56. ve Şekil 4.57.'de, VDGA tabanlı KHN filtre yapısına ait yüksek geçiren (VHP), bant geçiren (VBP), alçak geçiren (VLP), bant durduran (VBS) ve tüm geçiren (VAP) çıkışların genlik ve faz frekans tepkileri gösterilmektedir. Benzetimler, VDTA tabanlı yapı ile aynı pasif eleman değerleri ve aynı nominal transkonduktans parametresi altında gerçekleştirilmiştir.

Genlik frekans tepkileri incelendiğinde, VHP çıkışının düşük frekanslarda yüksek zayıflama gösterdiği ve frekans arttıkça kazancın yükselerek yüksek frekans

bölgesinde yaklaşık 0 dB seviyesine ulaştığı görülmektedir. VLP çıkışı ise düşük frekanslarda maksimum kazanca sahip olup, kesim frekansından sonra -20 dB/dec eğimle zayıflamaktadır. VBP çıkışı, merkez frekans civarında maksimum genlik sergileyerek karakteristik bant geçiren filtre davranışını doğrulamaktadır. VBS çıkışı, merkez frekansta belirgin bir çentik oluşturarak bu frekans bileşenini etkin bir şekilde bastırmakta, VAP çıkışı ise tüm frekans bandı boyunca yaklaşık sabit genlikte kalarak tüm geçiren filtre karakteristiği sergilemektedir.

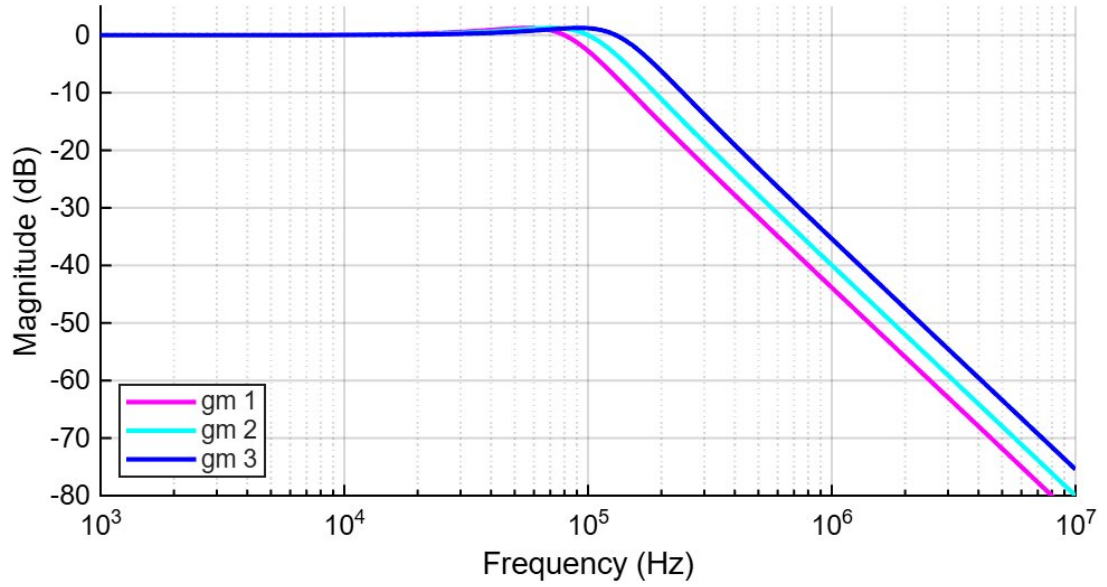
Faz frekans tepkileri değerlendirildiğinde, VDGA tabanlı yapının faz davranışlarının da teorik KHN filtre karakteristikleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. VHP ve VLP çıkışları sırasıyla pozitiften negatife doğru düzgün bir faz geçişi sergilerken, VBP çıkışının fazı merkez frekans civarında -90° değerine yaklaşmaktadır. VBS çıkışında merkez frekans etrafında ani bir faz değişimi gözlemlenirken, VAP çıkışı yaklaşık 360° 'lik sürekli bir faz kayması sağlayarak tüm geçiren filtrelerin temel faz özelliğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

VDGA tabanlı KHN filtre yapısından elde edilen bu sonuçların, VDTA tabanlı yapı ile büyük ölçüde benzerlik göstermesi beklenen bir durumdur. Bunun temel nedeni, her iki yapının da aynı KHN topolojisi ve aynı pasif eleman değerleri altında tasarlanmış olmasıdır. Ancak VDGA tabanlı yapı, VDTA tabanlı tasarımdan farklı olarak ilave bir gerilim kazancı parametresi (β) sunmakta ve bu sayede filtrenin doğal frekansının yalnızca g_m üzerinden değil, aynı zamanda β parametresi üzerinden de elektronik olarak ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellik, VDGA tabanlı yapının frekans tepkisi açısından VDTA tabanlı yapıya eşdeğer performans sunarken, ayarlanabilirlik ve tasarım esnekliği bakımından önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir.

4.2. Elektronik Ayarlanabilirlik Analizi

Bu bölümde, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının elektronik ayarlanabilirlik özellikleri benzetim sonuçları üzerinden incelenmiştir. Ayarlanabilirlik analizi, filtrenin doğal frekansı ve kalite faktörü üzerindeki kontrol mekanizmalarının ortaya konulması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. VDTA Tabanlı Yapıda g_m ile Ayarlanabilirlik



Şekil 4.12. Farklı g_m ayarlarıyla alçak geçiş filtresinin frekans tepkisi.

Şekil 4.5.'te, VDTA tabanlı KHN filtre yapısının bant geçiren (BP) çıkışına ait genlik frekans tepkileri, farklı transkonduktans (g_m) değerleri için gösterilmektedir. Benzetimlerde g_m parametresi bias akımı aracılığıyla değiştirilmiş ve buna bağlı olarak filtrenin doğal frekansının sistematik bir şekilde kaydırılabildiği gözlemlenmiştir. Benzetimlerde transkonduktans parametresi g_{m_mgm} , aktif elemanların bias akımı değiştirilerek ayarlanmıştır. CMOS tabanlı transkonduktans kademelerinde, transkonduktans değeri bias akımı ile yaklaşık doğrusal bir ilişkiye sahiptir ve genel olarak

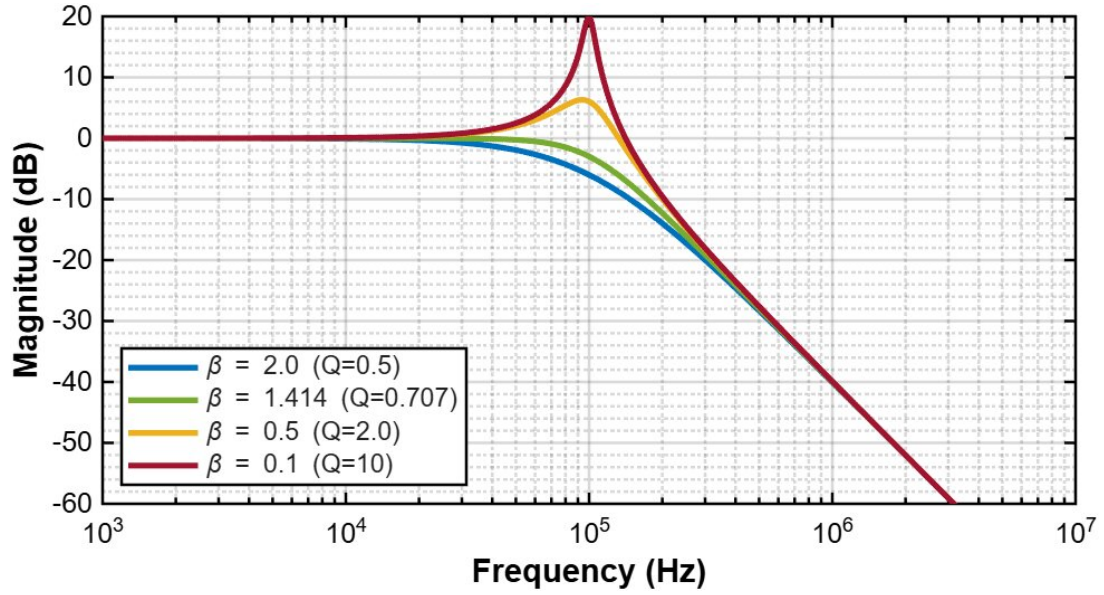
$$g_m = \frac{2I_b}{V_{ov}} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada I_b akımını, V_{ov} ise transistörün overdrive gerilimini temsil etmektedir. Bu ilişki sayesinde, bias akımının artırılmasıyla g_m değeri yükseltilmekte ve buna bağlı olarak filtrenin doğal frekansı elektronik olarak ayarlanabilmektedir.

Elde edilen sonuçlar, g_m değerinin artırılmasıyla merkez frekansın daha yüksek frekanslara taşındığını, azaltılmasıyla ise daha düşük frekanslara kaydığını göstermektedir. Bununla birlikte, g_m parametresindeki değişimin aynı zamanda filtre kazancı ve eğim karakteristikleri üzerinde de etkili olduğu görülmektedir. Bu durum, VDTA tabanlı yapının frekans ayarı açısından tek bir serbestlik derecesine sahip

olduğunu ve ayarlanabilirliğin yalnızca gerçekleştirilebildiğini ortaya koymaktadır.

4.2.2. VDGA Tabanlı Yapıda β ile Ayarlanabilirlik



Şekil 4.13. β değişkeninin değiştirilmesinin kalite faktörü (Q) ve filtre tepki şekli üzerindeki etkisi

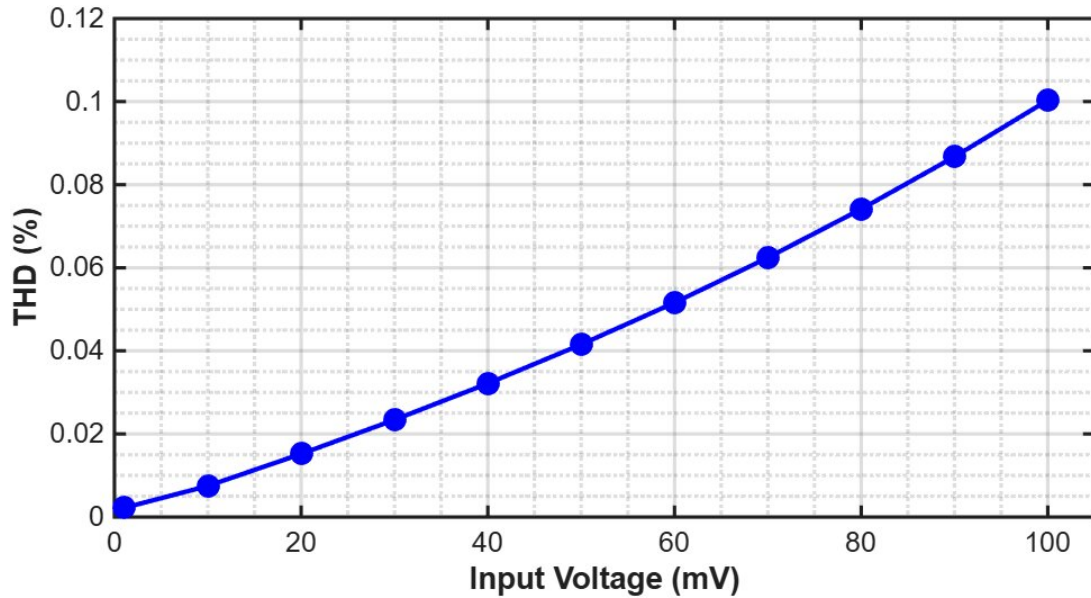
Şekil 4.6.'da VDGA tabanlı yapıda kullanılan β parametresi, iç gerilim yükseltme kademesinin efektif kazancını temsil etmektedir. Bu çalışmada, β değeri ilgili yükseltme kademesinin bias akımı değiştirilerek ayarlanmıştır. Bilindiği üzere, CMOS tabanlı yükseltme kademelerinde küçük işaret kazancı, transkonduktans ve çıkış direnci gibi parametrelerin bias akımına bağlı olması nedeniyle, bias akımındaki değişim doğrudan gerilim kazancını etkilemektedir. Bu sayede, VDGA yapısında β parametresi elektronik olarak ayarlanabilmiş ve bu ayarın filtre kalite faktörü üzerindeki etkisi incelenebilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, β değerinin azaltılmasıyla filtre tepkisinin daha keskin hale geldiği ve rezonans tepesinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Buna karşılık, β değerinin artırılması durumunda rezonans tepesinin bastırıldığı ve filtrenin daha sönümlü bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, β parametresinin filtre kalite faktörü (Q) üzerinde doğrudan etkili olduğunu açıkça göstermektedir. Nitekim benzetim sonuçları, β ile Q arasında ters orantılı bir ilişki bulunduğunu doğrulamaktadır. Bu özellik sayesinde VDGA tabanlı yapı, filtrenin kalite faktörünün ve rezonans davranışının, merkez frekans kaydırılmadan elektronik olarak ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, VDTA tabanlı yapıya kıyasla önemli bir tasarım avantajı sunmaktadır. Şekil 4.6'da ise VDGA tabanlı KHN

filtre yapısının bant geçiren çıkışına ait genlik frekans tepkileri, farklı gerilim kazancı (β) değerleri için sunulmaktadır. Bu benzetimlerde gm sabit tutulmuş ve yalnızca β parametresi değiştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, β değerinin azaltılmasıyla filtre tepkisinin daha

keskin hale geldiği ve rezonans tepesinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Buna karşılık, β değerinin artırılması durumunda rezonans tepesinin bastırıldığı ve filtrenin daha sönümlü bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, β parametresinin filtre kalite faktörü (Q) üzerinde doğrudan etkili olduğunu açıkça göstermektedir. Nitekim benzetim sonuçları, β ile Q arasında ters orantılı bir ilişki bulunduğunu doğrulamaktadır. Bu özellik sayesinde VDGA tabanlı yapı, filtrenin kalite faktörünün ve rezonans davranışının, merkez frekans kaydırılmadan elektronik olarak ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, VDTA tabanlı yapıya kıyasla önemli bir tasarım avantajı sunmaktadır

4.3. Doğrusallık ve THD Analizi

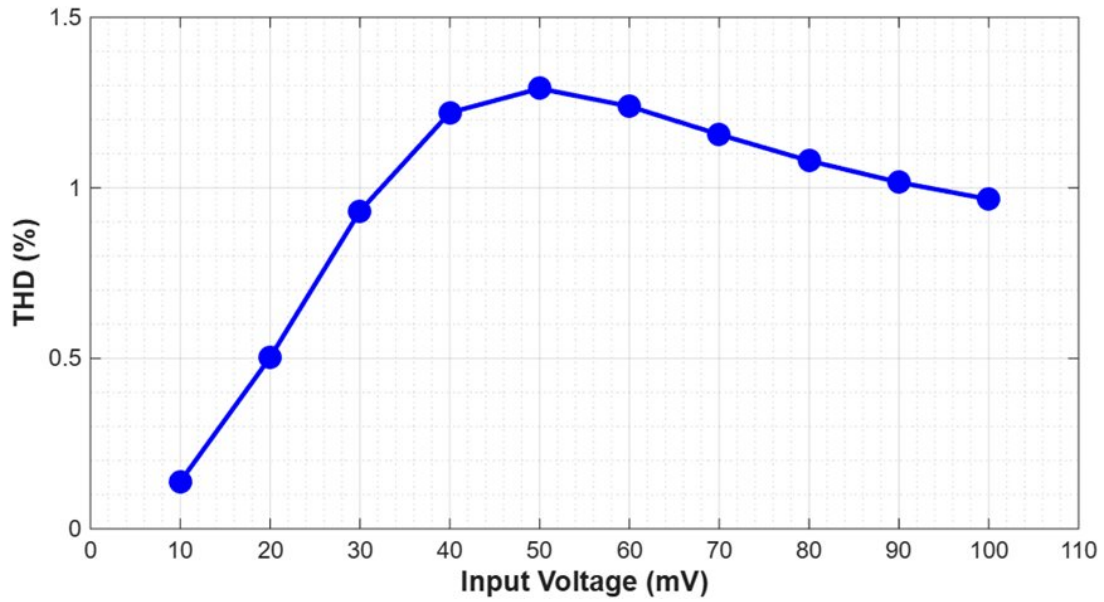


Şekil 4.17. Önerilen VDTA tabanlı filtre için giriş voltajı genliğine bağlı olarak toplam harmonik bozulmanın (THD) değişimi.

Şekil 4.7.'de, VDTA tabanlı KHN filtre yapısının doğrusal olmayan davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen toplam harmonik bozulma (THD) analizi sonuçları sunulmaktadır. Benzetimler, filtrenin bant geçiren (BP) çıkışı için, merkez frekansta sinüzoidal bir giriş sinyali uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Giriş sinyalinin genliği kademeli olarak artırılmış ve her bir genlik değeri için THD yüzdesi hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, giriş sinyal genliği düşük seviyelerde iken THD değerinin oldukça küçük olduğu ve neredeyse ihmal edilebilir düzeyde kaldığı görülmektedir. Giriş genliği arttıkça, aktif elemanların doğrusal olmayan karakteristiklerinin etkisiyle THD değerinin kademeli ve düzenli bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, giriş genliği 100 mV seviyesine kadar artırıldığında dahi THD değerinin %0,1'in altında kaldığı görülmektedir. Bu sonuç, VDTA tabanlı KHN filtre yapısının geniş bir giriş genliği aralığında yüksek doğrusal performans sergilediğini göstermektedir.

THD eğrisinin düzgün ve monoton bir artış göstermesi, devrenin kararlı bir doğrusal olmayan davranışa sahip olduğunu ve ani bozulmaların oluşmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, önerilen VDTA tabanlı KHN filtre yapısının analog sinyal işleme uygulamalarında, özellikle düşük bozulma gerektiren filtreleme işlemleri için uygun olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca elde edilen THD değerleri, CMOS teknolojisine dayalı gerçekçi devre modelleri kullanılarak gerçekleştirilen benzetimlere rağmen, teorik beklentilerle uyumlu bir doğrusal performans elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 4.19. Önerilen VDGA tabanlı filtre için giriş voltajı genliğine bağlı olarak toplam harmonik bozulmanın (THD) değişimi.

Şekil 4.8.'de, VDGA tabanlı KHN filtre yapısının bant geçiren (BP) çıkışı için elde edilen toplam harmonik bozulma (THD) sonuçları, giriş sinyal genliğine bağlı olarak sunulmaktadır. Benzetimler, merkez frekansta uygulanan sinüzoidal bir giriş sinyali için gerçekleştirilmiş ve giriş genliği kademeli olarak artırılarak her bir

durumda THD değeri hesaplanmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, düşük giriş genliklerinde VDGA tabanlı yapının kabul edilebilir bir doğrusal performans sergilediği görülmektedir. Ancak giriş genliği arttıkça, özellikle 30–60 mV aralığında, aktif elemanların doğrusal olmayan karakteristiklerinin etkisiyle THD değerinin belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu bölgede THD değerinin yaklaşık %1 seviyesine ulaştığı ve daha yüksek genliklerde ise sınırlı bir azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu davranış, VDGA yapısında yer alan ek kazanç katmanlarının ve gerilim kazancı parametresi β 'nin doğrusal olmayan etkilerinin daha baskın hale gelmesiyle açıklanabilir.

Elde edilen THD eğrisi, VDGA tabanlı KHN filtre yapısının özellikle orta ve yüksek giriş genliklerinde doğrusal olmayanlığa karşı daha hassas olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, düşük genlikli analog sinyaller için VDGA tabanlı yapı halen kabul edilebilir bir performans sunmakta ve ayarlanabilirlik avantajlarıyla birlikte değerlendirildiğinde belirli uygulamalar için uygun bir çözüm oluşturmaktadır.

VDTA ve VDGA Tabanlı Yapıların THD Açısından Karşılaştırılması

VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapıları birlikte değerlendirildiğinde, VDTA tabanlı yapının doğrusal performans açısından daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. VDTA tabanlı yapı için elde edilen THD değerlerinin, giriş genliği 100 mV seviyesine kadar artırıldığında dahi %0,1'in altında kaldığı gözlemlenirken, VDGA tabanlı yapıda THD değerlerinin aynı giriş genliği aralığında %1 mertebesine ulaştığı görülmektedir.

Bu farkın temel nedeni, VDGA yapısında bulunan ilave gerilim kazancı katmanının ve β parametresinin, doğrusal olmayan etkileri artırmasıdır. Buna karşılık, VDTA tabanlı yapının daha sade bir iç yapıya sahip olması, doğrusal performans açısından avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla, düşük bozulma gerektiren uygulamalarda VDTA tabanlı KHN filtre yapısı daha uygun bir seçenek olarak öne çıkarken, VDGA tabanlı yapı ayarlanabilirlik ve tasarım esnekliği gerektiren uygulamalar için tercih edilebilir bir alternatif sunmaktadır.

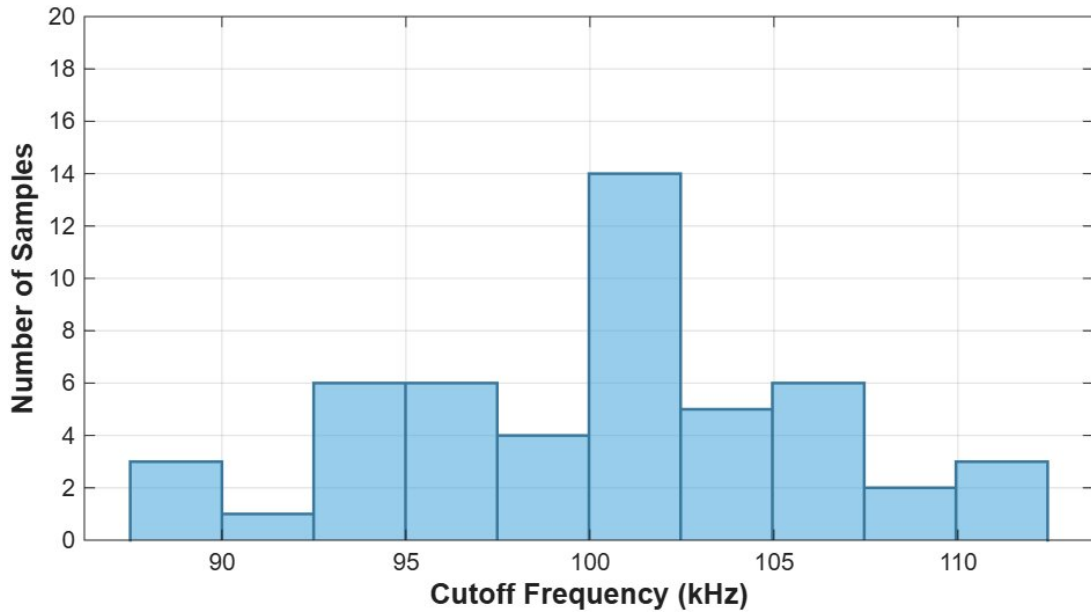
4.3.1. VDTA ve VDGA Tabanlı Yapıların THD Açısından Karşılaştırılması

VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapıları birlikte değerlendirildiğinde,

VDTA tabanlı yapının doğrusal performans açısından daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. VDTA tabanlı yapı için elde edilen THD değerlerinin, giriş genliği 100 mV seviyesine kadar artırıldığında dahi %0.1'in altında kaldığı gözlemlenirken, VDGA tabanlı yapıda THD değerlerinin aynı giriş genliği aralığında %1 mertebesine ulaştığı görülmektedir.

Bu farkın temel nedeni, VDGA yapısında bulunan ilave gerilim kazancı katmanının ve β parametresinin, doğrusal olmayan etkileri artırmasıdır. Buna karşılık, VDTA tabanlı yapının daha sade bir iç yapıya sahip olması, doğrusal performans açısından avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla, düşük bozulma gerektiren uygulamalarda VDTA tabanlı KHN filtre yapısı daha uygun bir seçenek olarak öne çıkarken, VDGA tabanlı yapı ayarlanabilirlik ve tasarım esnekliği gerektiren uygulamalar için tercih edilebilir bir alternatif sunmaktadır.

4.4. Monte Carlo Analizi



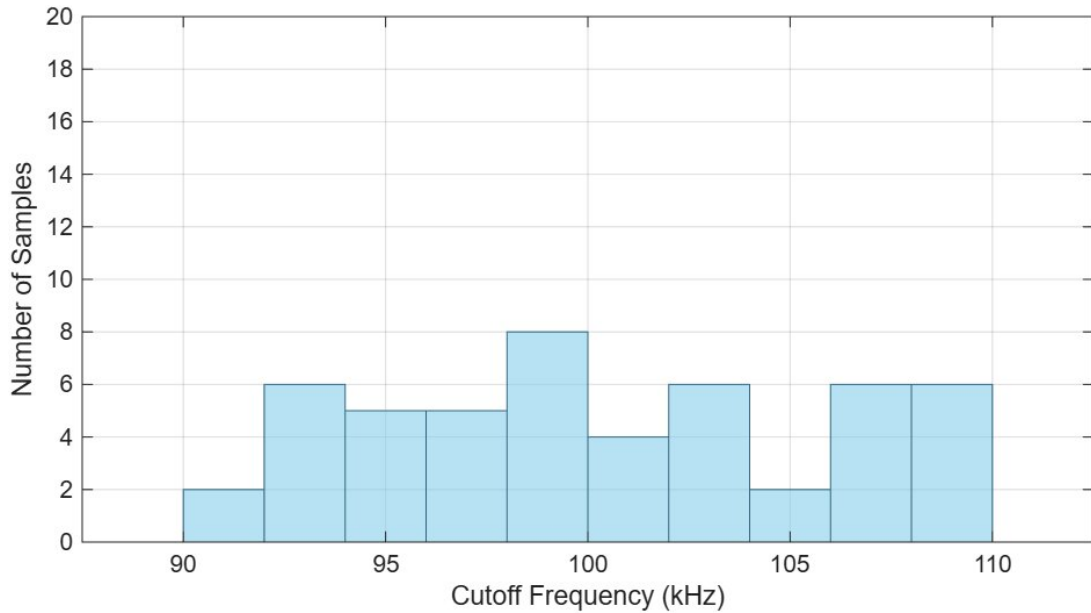
Şekil 4.20. gm ve kapasitanslardaki varyasyonlarla 50 simülasyon çalışmasından elde edilen kesme frekansının Monte-Carlo dağılımı.

Şekil 4.9.'da, VDTA tabanlı KHN filtre yapısının üretim toleranslarına ve devre parametrelerindeki rastgele sapmalara karşı duyarlılığını incelemek amacıyla gerçekleştirilen Monte Carlo analizi sonuçları sunulmaktadır. Bu analizde, devrede kullanılan pasif elemanlar ve aktif eleman parametreleri için istatistiksel varyasyonlar tanımlanmış ve çoklu benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Histogramdan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, filtrenin kesim frekansının

yaklaşık 100 kHz nominal değeri etrafında dar bir dağılım sergilediği görülmektedir. Frekans değerlerinin büyük çoğunluğunun 95 kHz ile 105 kHz aralığında toplandığı ve uç değerlerin sınırlı sayıda olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, VDTA tabanlı KHN filtre yapısının parametre toleranslarına karşı kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Elde edilen dağılımın simetrik ve merkez frekans etrafında yoğunlaşmış olması, devre topolojisinin üretim kaynaklı sapmalara karşı yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, transkonduktans parametresi ve kapasitör değerlerindeki rastgele değişimlere rağmen, filtrenin temel frekans karakteristiğinin büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, önerilen VDTA tabanlı KHN filtre yapısının pratik entegre devre uygulamaları için uygun ve güvenilir bir tasarım sunduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.21. β , g_m ve kapasitanslardaki varyasyonlarla 50 simülasyon çalışmasından elde edilen kesme frekansının Monte-Carlo dağılımı.

Şekil 4.10.'da, VDGA tabanlı KHN filtre yapısının üretim toleranslarına ve devre parametrelerindeki rastgele değişimlere karşı duyarlılığını incelemek amacıyla gerçekleştirilen Monte Carlo analizi sonuçları gösterilmektedir. Analiz kapsamında, aktif ve pasif eleman parametreleri için istatistiksel varyasyonlar tanımlanmış ve çoklu benzetim çalışmaları yürütülmüştür.

Histogram incelendiğinde, VDGA tabanlı yapının kesim frekansının yaklaşık 100 kHz nominal değeri etrafında dağıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, frekans

dağılımının VDTA tabanlı yapıya kıyasla daha geniş bir aralıkta gerçekleştiği ve dağılımın daha yaygın bir karakter sergilediği gözlemlenmiştir. Özellikle 90 kHz ile 110 kHz aralığında daha belirgin bir saçılma olduğu dikkat çekmektedir.

Bu durum, VDGA yapısında bulunan ilave gerilim kazancı katmanının ve β parametresinin, üretim toleranslarına karşı hassasiyeti artırdığını göstermektedir. Buna rağmen, elde edilen sonuçlar VDGA tabanlı KHN filtre yapısının temel frekans karakteristiğini büyük ölçüde koruduğunu ve pratik uygulamalar için kabul edilebilir bir kararlılık sunduğunu ortaya koymaktadır.

4.4.1. VDTA ve VDGA Yapılarının Monte Carlo Analizi Açısından Karşılaştırılması

VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının Monte Carlo analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, VDTA tabanlı yapının üretim toleranslarına karşı daha yüksek dayanıklılık sergilediği görülmektedir. VDTA tabanlı yapıda kesim frekansının nominal değer etrafında daha dar bir dağılım gösterdiği ve frekans sapmalarının sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.

Buna karşılık, VDGA tabanlı yapıda frekans dağılımının daha geniş olması, yapının ek ayarlanabilirlik parametresi olan β 'nın toleranslara duyarlılığı artırdığını göstermektedir. Ancak bu durum, VDGA tabanlı yapının sunduğu ilave tasarım esnekliği ve elektronik ayarlanabilirlik avantajlarıyla birlikte değerlendirilmelidir. Dolayısıyla, yüksek kararlılık gerektiren uygulamalarda VDTA tabanlı yapı daha uygun bir seçenek sunarken, ayarlanabilirlik ve parametre kontrolünün ön planda olduğu uygulamalarda VDGA tabanlı yapı tercih edilebilir bir alternatif oluşturmaktadır.

4.5. Karşılaştırmalı Değerlendirme

Bu bölümde, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarından elde edilen benzetim sonuçları, frekans alanı davranışı, elektronik ayarlanabilirlik, doğrusal performans ve üretim toleranslarına karşı dayanıklılık açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Karşılaştırma, her iki yapının aynı KHN topolojisi, aynı pasif eleman değerleri ve aynı nominal çalışma koşulları altında tasarlanmış olması sayesinde adil ve tutarlı bir çerçevede gerçekleştirilmiştir.

Frekans tepkileri incelendiğinde, VDTA ve VDGA tabanlı yapıların HP, BP, LP, BS ve AP çıkışları açısından büyük ölçüde benzer genlik ve faz karakteristikleri sunduğu görülmüştür. Bu sonuç, VDGA tabanlı yapının klasik VDTA tabanlı KHN

filtre davranışını başarıyla koruduğunu göstermektedir. Ancak elektronik ayarlanabilirlik açısından değerlendirildiğinde, VDGA tabanlı yapının ilave bir gerilim kazancı parametresi (β) sunması, tasarım esnekliğini önemli ölçüde artırmaktadır. VDTA tabanlı yapıda doğal frekans yalnızca gm üzerinden ayarlanabilirken, VDGA tabanlı yapıda hem gm hem de β parametreleri bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir.

Doğrusallık ve THD analizleri, VDTA tabanlı yapının düşük bozulma açısından daha avantajlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu analizlerde, giriş genliği için nominal değer 10 mV olarak seçilmiş ve genlik %100 artırılarak 100 mV seviyesine çıkarılmıştır. VDTA tabanlı KHN filtre yapısında, giriş genliği 100 mV seviyesine kadar artırıldığında dahi THD değerinin %0.1'in altında kaldığı gözlemlenmiştir.

Buna karşılık, VDGA tabanlı yapıda giriş genliğinin nominal değere göre %50–%100 oranında artırılması durumunda THD değerlerinin özellikle orta genlik aralığında %1 mertebesine ulaştığı görülmüştür. Bu durum, VDGA yapısında bulunan ilave kazanç katmanlarının doğrusal olmayan etkileriyle açıklanabilir.

Monte Carlo analiz sonuçları da benzer bir eğilim sergilemektedir. VDTA tabanlı yapının kesim frekansı dağılımının nominal değer etrafında daha dar bir aralıkta toplandığı ve üretim toleranslarına karşı daha yüksek dayanıklılık sunduğu belirlenmiştir. VDGA tabanlı yapıda ise frekans dağılımının daha geniş olması, β parametresinin toleranslara duyarlılığını yansıtmaktadır. Bununla birlikte, VDGA tabanlı yapının sunduğu ilave ayarlanabilirlik, bu dezavantajla birlikte değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, VDTA tabanlı KHN filtre yapısı, düşük bozulma ve yüksek kararlılık gerektiren uygulamalar için daha uygun bir çözüm sunarken; VDGA tabanlı yapı, elektronik olarak ayarlanabilirlik ve tasarım esnekliğinin ön planda olduğu uygulamalar için güçlü bir alternatif oluşturmaktadır.

Çizelge 4.1. VDTA ve VDGA Tabanlı KHN Filtre Yapılarının Karşılaştırılması

Özellik	VDTA Tabanlı KHN	VDGA Tabanlı KHN
Çıkış Türleri	HP, BP, LP, BS, AP	HP, BP, LP, BS, AP
Doğal Frekans Ayarı	gm üzerinden	gm ve β üzerinden
Ayarlanabilirlik Derecesi	Tek serbestlik derecesi	İki serbestlik derecesi

Özellik	VDTA Tabanlı KHN	VDGA Tabanlı KHN
Kalite Faktörü (Q) Kontrolü	Sınırlı	β ile elektronik kontrol
THD (100 mV girişte)	>0.1%	$\approx 1\%$
Doğrusallık	Yüksek	Orta
Monte Carlo Dayanıklılığı	Yüksek	Orta
Devre Karmaşıklığı	daha basit	daha karmaşık
Tasarım Esnekliği	Orta	Yüksek

5. TARTIŞMA

Bu bölümde, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarından elde edilen benzetim sonuçları, teorik analizler ve literatürde rapor edilen benzer çalışmalar ışığında tartışılmaktadır. Tartışma kapsamında, frekans alanı davranışı, elektronik ayarlanabilirlik, doğrusal performans ve üretim toleranslarına karşı dayanıklılık gibi temel performans ölçütleri ele alınmıştır.

Frekans tepkileri incelendiğinde, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının HP, BP, LP, BS ve AP çıkışları açısından büyük ölçüde benzer genlik ve faz karakteristikleri sergilediği görülmüştür. Bu durum, her iki yapının da aynı KHN topolojisi temel alınarak tasarlanmış olmasının doğal bir sonucudur. Elde edilen bu benzerlik, VDGA tabanlı yapının klasik VDTA tabanlı KHN filtre davranışını başarıyla koruduğunu ve frekans alanındaki temel filtre özelliklerinden ödün vermediğini göstermektedir.

Elektronik ayarlanabilirlik açısından değerlendirildiğinde ise, iki yapı arasındaki temel fark açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. VDTA tabanlı yapıda filtrenin doğal frekansı yalnızca transkonduktans parametresi g_m üzerinden ayarlanabilirken, VDGA tabanlı yapıda ilave bir gerilim kazancı parametresi olan β 'nin bulunması, ayarlanabilirlik derecesini artırmaktadır. Bu ek serbestlik derecesi, VDGA tabanlı yapının merkez frekans ve kalite faktörü üzerinde daha hassas ve bağımsız bir kontrol sunmasına olanak sağlamaktadır. Bu özellik, VDGA tabanlı KHN filtre yapısını yeniden ayarlanabilir ve adaptif analog filtre uygulamaları için daha uygun hale getirmektedir.

THD analizleri, VDTA tabanlı yapının düşük bozulma seviyeleri sayesinde daha üstün bir doğrusal davranış sergilediğini ortaya koymuştur. VDTA tabanlı KHN filtre yapısında düşük giriş genlikleri boyunca oldukça küçük THD değerleri elde edilmiş ve yüksek doğrusal davranış korunmuştur. Buna karşılık, VDGA tabanlı yapıda özellikle orta giriş genliklerinde THD değerlerinin artması, yapının ilave kazanç katmanlarının doğrusal olmayan etkilerinin daha baskın hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir. Bu sonuçlar, VDGA tabanlı yapının sunduğu ayarlanabilirlik avantajının, doğrusal performans açısından belirli bir maliyetle elde edildiğini göstermektedir.

Monte Carlo analiz sonuçları da benzer bir eğilimi desteklemektedir. VDTA tabanlı KHN filtre yapısının kesim frekansının nominal değer etrafında daha dar bir dağılım sergilemesi, yapının üretim toleranslarına karşı daha dayanıklı olduğunu

ortaya koymaktadır. VDGA tabanlı yapıda ise frekans dağılımının daha geniş olması, β parametresinin üretim kaynaklı varyasyonlara duyarlılığını yansıtmaktadır. Bununla birlikte, VDGA tabanlı yapının sunduğu ilave ayarlanabilirlik ve tasarım esnekliği, bu hassasiyetle birlikte değerlendirilmelidir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının birbirini dışlayan değil, aksine farklı uygulama gereksinimlerine hitap eden tamamlayıcı çözümler sunduğunu göstermektedir. Düşük bozulma, yüksek kararlılık ve üretim toleranslarına karşı dayanıklılık gerektiren uygulamalarda VDTA tabanlı yapı öne çıkarken; elektronik olarak ayarlanabilirlik ve esnek parametre kontrolünün ön planda olduğu uygulamalarda VDGA tabanlı yapı daha uygun bir alternatif oluşturmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, VDTA ve VDGA tabanlı gerilim modlu KHN filtre yapılarının tasarımı, analitik analizi ve benzetim doğrulamaları ayrıntılı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, her iki aktif yapı bloğu kullanılarak aynı KHN topolojisi temel alınmış ve filtrelerin frekans alanı davranışı, elektronik ayarlanabilirlik, doğrusal performans ve üretim toleranslarına karşı dayanıklılığı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Elde edilen analitik ve benzetim sonuçları, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının yüksek geçiren (HP), bant geçiren (BP), alçak geçiren (LP), bant durduran (BS) ve tüm geçiren (AP) filtre fonksiyonlarını aynı çekirdek yapı üzerinden başarıyla gerçekleştirdiğini göstermiştir. Frekans tepkileri, her iki yapının da klasik KHN filtre karakteristikleriyle uyumlu genlik ve faz davranışları sergilediğini doğrulamıştır.

Elektronik ayarlanabilirlik analizleri, VDTA tabanlı yapıda filtrenin doğal frekansının yalnızca transkonduktans parametresi g_m üzerinden ayarlanabildiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, VDGA tabanlı yapının ilave bir gerilim kazancı parametresi (β) sunması, filtrenin hem doğal frekansının hem de kalite faktörünün elektronik olarak daha esnek bir şekilde kontrol edilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu özellik, VDGA tabanlı yapının yeniden ayarlanabilir ve adaptif analog filtre uygulamaları açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

Doğrusallık ve toplam harmonik bozulma (THD) analizleri, VDTA tabanlı KHN filtre yapısının düşük bozulma açısından daha üstün bir performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bu analizlerde giriş genliği için nominal değer 10 mV olarak belirlenmiş ve genlik %100 artırılarak 100 mV seviyesine çıkarılmıştır. VDTA tabanlı yapıda, giriş genliği 100 mV seviyesine kadar artırıldığında dahi THD değerlerinin oldukça düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, VDGA tabanlı yapıda özellikle orta giriş genliklerinde daha yüksek THD değerleri elde edilmiştir. Bu durum, VDGA yapısında bulunan ilave kazanç katmanlarının doğrusal olmayan etkilerinin daha belirgin hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir.

Monte Carlo analiz sonuçları, VDTA tabanlı yapının üretim toleranslarına karşı daha yüksek dayanıklılık sergilediğini ve kesim frekansının nominal değer etrafında daha dar bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. VDGA tabanlı yapıda ise frekans dağılımının daha geniş olduğu gözlemlenmiş, bu durum β parametresinin toleranslara duyarlılığı ile açıklanmıştır. Bununla birlikte, VDGA

tabanlı yapının sunduğu ilave ayarlanabilirlik avantajları, bu hassasiyetle birlikte değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının birbirini tamamlayan iki farklı tasarım yaklaşımı sunduğunu göstermiştir. VDTA tabanlı yapı, düşük bozulma ve yüksek kararlılık gerektiren uygulamalar için uygun bir çözüm sunarken; VDGA tabanlı yapı, elektronik olarak ayarlanabilirlik ve tasarım esnekliğinin ön planda olduğu uygulamalar için güçlü bir alternatif oluşturmaktadır

7. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar doğrultusunda, VDTA ve VDGA tabanlı KHN filtre yapılarının geliştirilmesine ve farklı uygulama alanlarına uyarlanmasına yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

İlerleyen çalışmalarda, önerilen filtre yapılarının farklı CMOS teknoloji düğümlerinde (örneğin 65 nm veya 45 nm) gerçekleştirilmesi, düşük besleme gerilimleri altında performans değişimlerinin incelenmesine olanak sağlayacaktır. Bu sayede güç tüketimi ve doğrusal performans arasındaki ödünleşim daha ayrıntılı olarak değerlendirilebilir.

VDGA tabanlı KHN filtre yapısında, gerilim kazancı parametresi β 'nın üretim toleranslarına olan duyarlılığını azaltmaya yönelik kompanzasyon veya geri besleme tekniklerinin uygulanması, yapının kararlılığını artırabilir. Bu tür iyileştirmeler, VDGA tabanlı yapıların pratik entegre devre uygulamalarında daha güvenilir hale gelmesini sağlayacaktır.

Çalışmanın devamı olarak, önerilen filtre yapılarına otomatik kazanç kontrolü (AGC) veya adaptif biaslama mekanizmalarının eklenmesi, doğrusal olmayan etkilerin azaltılmasına ve THD performansının iyileştirilmesine katkı sağlayabilir. Özellikle VDGA tabanlı yapılar için bu tür yaklaşımlar, ayarlanabilirlik avantajlarını korurken doğrusal performansı artırabilir.

Ayrıca, önerilen KHN filtre yapılarının biyomedikal sinyal işleme, haberleşme sistemleri ve sensör arayüzleri gibi uygulama alanlarında gerçekçi giriş sinyalleri altında test edilmesi, yapıların uygulama odaklı performansını ortaya koyacaktır. Bu kapsamda, düşük frekanslı biyomedikal sinyaller veya dar bantlı haberleşme sinyalleri üzerinde deneysel doğrulamalar yapılabilir.

Son olarak, VDTA ve VDGA tabanlı filtre yapılarının tümleşik bir sistem içerisinde birlikte kullanıldığı hibrit mimarilerin geliştirilmesi, düşük bozulma ve yüksek ayarlanabilirlik gereksinimlerini aynı anda karşılayabilen yeni analog sinyal işleme çözümlerinin ortaya çıkmasına katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Alaybeyoğlu, E., & Kuntman, H. (2014). A new VDTA based frequency agile filter. *Proceedings of the 2014 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 269–273.
- Biolek, D., Senani, R., Biolkova, V., & Kolka, Z. (2022). A linearly/electronically controllable high gain VDGA and its applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 152, Article 152390.
- Fungdetch, S., Charoenmee, A., Panikhom, S., & Jantakun, A. (2025). Implementation of a mixed-mode universal second-order filter based-on voltage differencing transconductance amplifiers. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 76–85.
- Ghosh, D., & Choudhury, A. (2015). A review of analytical modeling and designing of high speed VDTA-based MIMO filter. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(1), 16–19.
- Gupta, G., Singh, S. V., & Bhooshan, S. V. (2015). VDTA based electronically tunable voltage-mode and trans-admittance biquad filter. *Circuits and Systems*, 6(3), 93–102.
- Kircay, A., & Cam, U. (2006). A new log-domain realization of two-integrator-loop biquad. *Frequenz*, 60(3–4), 72–76.
- Kumar, M., & Maheshwari, S. (2015). CMOS realization of VDTA based electronically tunable wave active filter with minimum power consumption at low supply voltage ± 0.82 V. *Circuits and Systems*, 6(5), 11–26.
- Kumngern, M., Khateb, F., & Kulej, T. (2024). 0.5 V, low-power bulk-driven current differencing transconductance amplifier. *Sensors*, 24(21), Article 6852.
- Madonsela, Z. S., & Srivastava, V. M. (2024). Systematic realization of VDGA-based comb filter for biomedical applications. *Telecommunication Systems*, 85(2), 246–258.
- Maneewan, S., Udorn, N., Duangmalai, D., Silapan, P., & Jaikla, W. (2014). A voltage-mode first order allpass filter based on VDTA. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 12(6), 613–618.
- Pandey, N., & Paul, S. K. (2016). Operational simulation of LC ladder filter using VDTA. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 25(8), 1650090.
- Prasad, D., Bhaskar, D. R., & Srivastava, M. (2013). Universal current-mode biquad filter using a VDTA. *Circuits and Systems*, 4(1), 32–36.
- Prasad, D., Bhaskar, D. R., & Srivastava, M. (2013). Universal voltage-mode biquad filter using voltage differencing transconductance amplifier. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 51(12), 864–868.
- Razavi, B. (2012). *RF Microelectronics* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Reif, K. (Ed.). (2014). *Automotive Mechatronics: Automotive Networking, Driving Stability Systems, Electronics*. Springer Vieweg.

- Roongmuanpha, N., Likhitkitwoerakul, N., Fukuhara, M., & Tangsrirat, W. (2023). Single VDGA-based mixed-mode electronically tunable first-order universal filter. *Sensors*, 23(5), Article 2759.
- Roongmuanpha, N., Tangsrirat, W., & Pukkalanun, T. (2022). Single VDGA-based mixed-mode universal filter and dual-mode quadrature oscillator. *Sensors*, 22(14), Article 5303.
- Sanchez-Sinencio, E., & Silva-Martinez, J. (2000). CMOS transconductance amplifiers, architectures and active filters: A tutorial. *IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems*, 147(1), 3-12.
- Satansup, J., & Tangsrirat, W. (2012). Single VDTA-based current-mode electronically tunable multifunction filter. *Proceedings of the 2012 International Symposium on Electronic Engineering and Computer (I-SEEC)*, 266–272.
- Shaktour, I. A. M. (2023). New CMOS VDTA based low power 8th band-pass LC ladder filter. *Journal of Science and Basic and Applied Research*, 10, 31–36.
- Singh, D., & Paul, S. K. (2022). Improved current mode biquadratic shadow universal filter. *Informacije MIDEM: Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, 52(1), 51–66.
- Singh, S. K., & Srivastava, V. M. (2023). Current-mode first-order versatile filter using translinear current conveyors. *Electronics*, 12(13), Article 2828.
- Singh, S. V., Tomar, R., & Chauhan, D. S. (2018). Voltage difference transconductance amplifier based voltage mode band pass filter with constant Q-factor. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 27(11), 1850175.
- Srivastava, M., & Prasad, D. (2015). VDTA based electronically tunable purely active simulator circuit for realizing floating resistance. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 8(3), 112–116.
- Tsirimokou, G., Psychalinos, C., & Elwakil, A. S. (2016). Design of CMOS analog integrated fractional-order circuits: Applications in medicine and biology. Springer.
- Tsirimokou, G., Psychalinos, C., & Elwakil, A. S. (2016). Design of CMOS analog integrated fractional-order circuits: Applications in medicine and biology. Springer.
- Wen, S., & Chen, H.-P. (2023). Power-efficient KHN filter topologies for battery-operated IoT sensors. *Sensors*, 23(12), Article 5678.
- Yeşil, A., Kaçar, F., & Kuntman, H. (2011). New simple CMOS realization of voltage differencing transconductance amplifier and its RF filter application. *Radioengineering*, 20(3), 632–637.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

İsim Soyisim : İSMAİL ELSAİD
Doğum Tarihi : 1998-04-02
Doğum Yeri : MEYADİN/SURİYE
Telefon : 05382065605
E-Posta : ismail.sy1998@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Okul	Bölüm	Baş. Yılı	Bit. Yılı
HARRAN ÜNİVERSİTESİ	ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ	2017	2021