



**ÇOK ÇIKIŞLI OTA TABANLI MEMKAPASİTÖR
VE MEMİNDÜKTÖR TASARIMI VE
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Eyyüp DEMİR

Danışman: Prof. Dr. Tevhit KARACALI

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2021

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ÇOK ÇIKIŞLI OTA TABANLI MEMKAPASİTÖR VE MEMİNDÜKTÖR TASARIMI
VE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

(Multi-output OTA Based Memcapacitor and Meminductor Design and Investigation of Their Behaviors)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eyyüp DEMİR

Danışman: Prof. Dr. Tevhit KARACALI

Erzurum
Nisan, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Eyyüp DEMİR tarafından hazırlanan “Çok Çıkışlı OTA Tabanlı Memkapasitör ve Memindüktör Tasarımı ve Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı çalışması 27/04/2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Tevhit KARACALI
Atatürk Üniversitesi

Danışman: Prof. Dr. Tevhit KARACALI
Atatürk Üniversitesi

Jüri Üyesi: Doç. Dr. Abdullah YEŞİL
Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Ü. Gökhan ÖZTÜRK
Atatürk Üniversitesi

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Unvan Ad SOYAD

Enstitü Müdürü

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. Tevhit KARACALI* danışmanlığında sunulan “Çok Çıkışlı OTA Tabanlı Memkapasitör ve Memindüktör Tasarımı ve Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Metot	0	35
Araştırma Bulguları	3	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	1	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Eyyüp DEMİR	Prof. Dr. Tevhit KARACALI
24.5.2021	24.5.2021
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenim hayatımda ilk başta danışmanım Prof. Dr. Tevhit KARACALI'ya teşekkürü bir borç bilirim. Fikirleriyle ve destekleriyle yanımda olan, bana ışık gösteren, ışık olan değerli hocam Doç. Dr. Yunus BABACAN'a minnettar olduğumu belirtmek isterim. Görüşleriyle bana yardımcı olan Doç. Dr. Abdullah YEŞİL'e teşekkür ederim. Hayatım boyunca bana sabreden annem Sakine DEMİR'e, eşim hayatıma girdikten sonra bana da annelik ve babalık yapan Melek TOPAL'a, Ramazan TOPAL'a çok müteşekkirim. Yaşadığı süre boyunca çok iyi babalık yapan rahmetli babam Mehmet DEMİR'i saygıyla anarım. Hayatıma girip bana renk katan, mutluluk getiren biricik eşim Güneş DEMİR'e ve doğduğu andan itibaren beni değiştiren, dönüştüren güzel kızım Eda Güney DEMİR'e yaşamımdaki güzelliklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

Eyyüp DEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK ÇIKIŞLI OTA TABANLI MEMKAPASİTÖR ve MEMİNDÜKTÖR TASARIMI ve DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Eyyüp DEMİR

Danışman: Prof. Dr. Tevhit KARACALI

Amaç: Bu çalışmada, çok çıkışlı işlemsel geçiş iletkenliği yükseltici (OTA) kullanılarak bir memkapasitör (memory+capacitor) ve bir memindüktör (memory+inductor) devresi tasarlanması amaçlanmıştır.

Yöntem: Memkapasitör ve memindüktör özelinde mem-elementlerle ilgili kısa bir tarihçe verilmiştir. Araştırmacıların mem-elementleri kullanma çabası sonucu literatüre kazandırılmış olan akademik çalışmalar derlenmiş olup, ilgili çalışmaların avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir. Araştırmacıların yapmış oldukları bilimsel çalışmaları detaylıca incelenmekle birlikte yapılan çalışmaların nitelikleri, tasarlanan memkapasitör ve memindüktör devreleri ile karşılaştırılmıştır. Literatürde yer alan devreler ile tez çalışmasında önerilen devreler arasındaki farklılıklar çeşitli parametrelerce irdelenmiştir. Bu çalışmada önerilen memkapasitör ve memindüktör devreleri LT-Spice benzetim programı kullanılarak tasarlanmıştır. Benzetim uygulamaları ise Virtuoso Analog Design Environment of Cadence ortamında 0.18 μm teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar analiz edilmiş ve önceki çalışmalarla karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Bulgular: Memkapasitör ve memindüktörlerin tasarımlarında sıkça kullanılan aktif devre elemanlarından OTA'nın tasarlanan taklit devrelerdeki önemi vurgulanmıştır ve devrenin memkapasitör ile memindüktör gibi davranmasındaki etkisi gösterilmiştir. Tasarlanan devrelerin benzetim çalışması sonucu çeşitli parametrelerde detaylı analiz yapılmıştır. Tüm bu analizlerin ışığında tasarlanan devrelerin memkapasitör ve memindüktör özelliklerini taşıdığı ve memkapasitör ile memindüktör olarak kullanılabileceği kanıtlanmıştır.

Sonuç: Elektronik devrelere olumlu katkı sunacağı aşikâr olan memkapasitör ve memindüktörün üretimi yapılana kadar sunulan ve sunulacak olan devre tasarımlarının, hemen hemen bütün elektronik sistemlerde aktif olarak yer alacağı göz ardı edilemeyecek bir gerçek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında önerilen memkapasitör ve memindüktör devrelerinin literatüre katkı sağlayacağı ve daha sonra yapılacak çalışmalara temel teşkil edeceği düşünülmektedir. Ayrıca daha üst dereceli lineer olmayan devre elemanlarının anlaşılmasına da bu çalışmanın katkı yapacağı öngörülmektedir.

Nisan 2021, 64 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

MULTI-OUTPUT OTA BASED MEMCAPACITOR AND MEMINDUCTOR DESIGN AND INVESTIGATION OF THEIR BEHAVIORS

Eyyüp DEMİR

Supervisor: Prof. Dr. Tevhit KARACALI

Purpose: In this study, it is aimed to design a memcapacitor (memory+capacitor) and a meminductor (memory+inductor) circuit using a multi-output operational transconductance amplifier (OTA).

Method: A brief history about mem-elements specific to memcapacitors and meminductors is given. The academic studies that have been brought to the literature because of the researchers' efforts to use mem-elements are compiled, and the advantages and disadvantages of the related studies are shown. Beside scientific studies made by researchers were examined in detail, the qualities of the studies were compared with the designed memcapacitor and meminductor circuits. The differences between the circuits in the literature and the circuits proposed in the thesis have been examined by various parameters. Memcapacitor and meminductor circuits proposed in this study were designed using LT-Spice simulation program. Simulation applications are conducted using the Virtuoso Analog Design Environment of Cadence with TSMC 0.18 μm technology parameters. The results obtained were analyzed and interpreted in comparison with previous studies.

Findings: The importance of OTA, which is an active circuit, element frequently used in the design of memcapacitors and meminductors in simulated circuits has been emphasized and its effect on the circuit acting as a memcapacitor and a meminductor has been shown. As a result of the simulation study of the designed circuits, detailed analysis was made in various parameters. In the light of all these analyzes, it can be proved that the circuits designed have the characteristics of memcapacitor and meminductor and can be used as memcapacitor and meminductor.

Results: It is an undeniable fact that the circuit designs presented and to be presented until the production of memcapacitor and meminductor, which is obvious to make a positive contribution to electronic circuits, will actively take place in almost all electronic systems. It is thought that memcapacitor and meminductor circuits proposed in this thesis will contribute to the literature and will serve as a basis for future studies. In addition, it is predicted that this study will contribute to the understanding of the higher order nonlinear circuit elements.

Nisan 2021, 64 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	7
MATERYAL VE METOT.....	12
İdeal Memkapasitör.....	12
İdeal Memindüktör.....	14
Aktif Devre Elemanları	15
MOS Tranzistör.....	19
Monte Carlo Analizi.....	21
ARAŞTIRMA BULGULARI	23
Tasarlanan Memkapasitör Devresi.....	26
Tasarlanan Memindüktör Devresi.....	35
SONUÇ VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	51

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1 Temel Pasif Devre Elemanlarının Dereceleri	3
Tablo 2. Memkapasitör Devresinin Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması	35
Tablo 3. Memindüktör Devresinin Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması	42



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Dört temel pasif devre elemanı.	2
Şekil 2. Memristör gerilim-akım karakteristiği.	2
Şekil 3. İlk 25 temel devre elemanı (L. O. Chua 2003).	4
Şekil 4. Memristif elemanların simgeleri (Di Ventra et al. 2009a).	5
Şekil 5. Memkapasitör ve memindüktör temel denklemleri.	13
Şekil 6. Memkapasitör yük-gerilim karakteristiği.	14
Şekil 7. Memindüktör akı-akım karakteristiği.	15
Şekil 8. OPAMP blok diyagramı.	16
Şekil 9. CCII blok diyagramı.	17
Şekil 10. CDBA blok diyagramı.	17
Şekil 11. CDTA blok diyagramı.	18
Şekil 12. OTA Sembolü	19
Şekil 13. N ve P kanallı MOS tranzistör.	20
Şekil 14. MOS Tranzistör akım-gerilim karakteristiği.	21
Şekil 15. Değişken kapasitör olarak kullanılan MOS tranzistör (Tiebout 2003).	23
Şekil 16. Gövde ve geçit-kaynak gerilimlerine bağlı kapasite değişimi.	24
Şekil 17. Çok Çıkışlı OTA blok diyagramı.	24
Şekil 18. Çok çıkışlı OTA iç yapısı (Demir et al. 2021).	25
Şekil 19. Tasarlanan memkapasitör devresi.	26
Şekil 20. MO-OTA serimi (layout).	27
Şekil 21. Memkapasitör devresindeki gerilim-zaman ve akım-zaman grafiği.	28
Şekil 22. Yük-gerilim karakteristiği.	29
Şekil 23. Memkapasitör hafıza testi.	30
Şekil 24. Kutuplama akımına bağlı olarak değişen yük-gerilim karakteristiği.	31
Şekil 25. Memkapasitörlerin bağlanma durumuna bağlı yük-gerilim karakteristiği.	32
Şekil 26. Farklı sıcaklık değerlerinde yük-gerilim karakteristiği.	33
Şekil 27. Memkapasitör devresine ait Monte Carlo Analizi.	34
Şekil 28. Tasarlanan memindüktör devresi.	36
Şekil 29. Memindüktör devresindeki gerilim-zaman ve akım-zaman grafiği.	37
Şekil 30. Akı-akım karakteristiği.	37
Şekil 31. Kutuplama akımına bağlı olarak değişen akı-akım karakteristiği.	38

Şekil 32. Meminkörlerin bağlanma durumuna bağlı akı-akım karakteristiği.	39
Şekil 33. Farklı sıcaklık değerlerinde akı-akım karakteristiği.	40
Şekil 34. Memindüktör devresine ait Monte Carlo Analizi.	41



SİMGELER VE KISALTMALAR

°C	: Celcius
A	: Amper
C	: Kondansatör
CBTA	: Current Backward Transconductance Amplifier (Geriye Dönük Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi)
CCII	: Current Conveyor II Generation (2. Kuşak Akım Taşıyıcı)
CDBA	: Current Differencing Buffered Amplifier (Akım Farkı Alan Tamponlanmış Kuvvetlendirici)
CDTA	: Current Difference Transconductance Amplifier (Akım Farkı Alan Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi)
CFOA	: Current-Feedback Operational Amplifier (Akım Geri Beslemeli İşlemsel Kuvvetlendirici)
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken)
FPAA	: Field Programmable Analog Array (Alan Programlanabilir Analog Dizi)
g_m	: Geçiş iletkenliği
HP	: Hewlett-Packard
Hz	: Hertz
I_D	: Savaktan Akan Akım
i	: Akım
L	: İndüktör
M	: Memristör
M_C	: Memkapasitör
M_L	: Memindüktör
MO-OTA	: Multi Output Operational Transconductance Amplifier (Çok Çıkışlı İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi)
MOS	: Metal Oxide Semiconductor (Metal Oksit Yarı İletken)
NMOS	: N tipi MOS
OPAMP	: Operational Amplifier (İşlemsel Yükselteç)
OTA	: Operational Transconductance Amplifier (İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi)
q	: Yük
R	: Direnç
t	: Zaman
V	: Gerilim
V_{DS}	: Savak-Kaynak Gerilimi
V_{GS}	: Geçit-Kaynak Gerilimi
V_{TH}	: Eşik Gerilimi
ρ	: Akının Zamana Göre İntegrali

σ : Yükün Zamana Göre İntegrali
 φ : Akı



GİRİŞ

Temel pasif devre elemanları olan direnç, kapasitör ve indüktör sırasıyla gerilim-akım, gerilim-yük, akım-manyetik akı arasındaki matematiksel bağıntının fiziksel karşılığı olan pasif devre elemanlardır. Chua (1971) bu matematiksel bağıntılara ek olarak manyetik akı ile yük arasında da matematiksel bir ilişki olması gerektiğini öngörmüştür ve bu bağıntıyı sağlayan eksik devre elemanını memristör (memory+resistor) yani hafızalı direnç olarak tanımlamıştır (L. Chua 1971). Şekil 1’de görüleceği üzere 3 temel devre elemanının (direnç, kapasitör, indüktör) ve 5 temel denklemin aşağıda sıralanmıştır.

$$dV=Rdi \quad (1)$$

$$d\phi=Vdt \quad (2)$$

$$dq=CdV \quad (3)$$

$$dq=idt \quad (4)$$

$$d\phi=Ldi \quad (5)$$

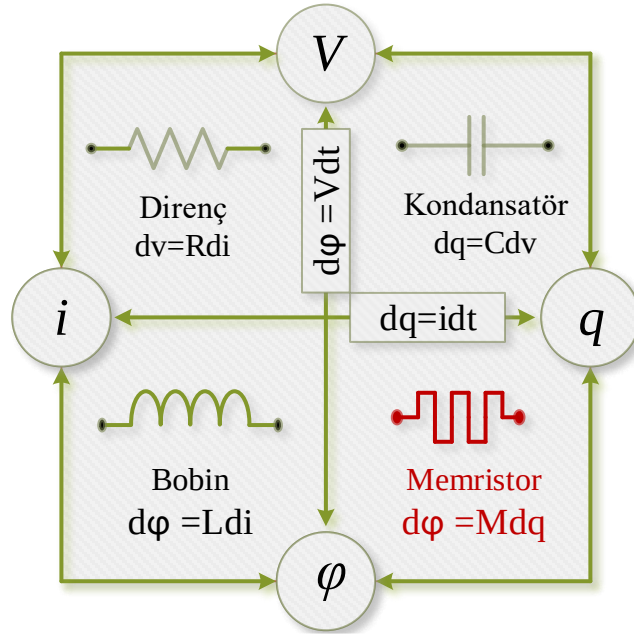
Temel devre elemanlarından eksik olan 4. eleman memristör ve 6. denklem

$$d\phi=Mdq \quad (6)$$

olarak tamamlanmıştır. Her ne kadar bu matematiksel ilişki 1971’de teorik olarak doğrulanmış olsa bile, zamanının imkanları doğrultusunda yeterli ilgiyi görmemiş, memristörün ilk fiziksel üretimi ancak teorik doğrulamadan 37 sene sonra yani 2008 yılında HP araştırmacıları tarafından yapılmıştır (Strukov et al. 2008). Memristör için matematiksel ilişki akı ile yük arasındaki bir fonksiyondan oluşur. Denklem (7)’deki fonksiyon Denklem (8)’e Şekil 1’den anlaşılacağı üzere evrilir.

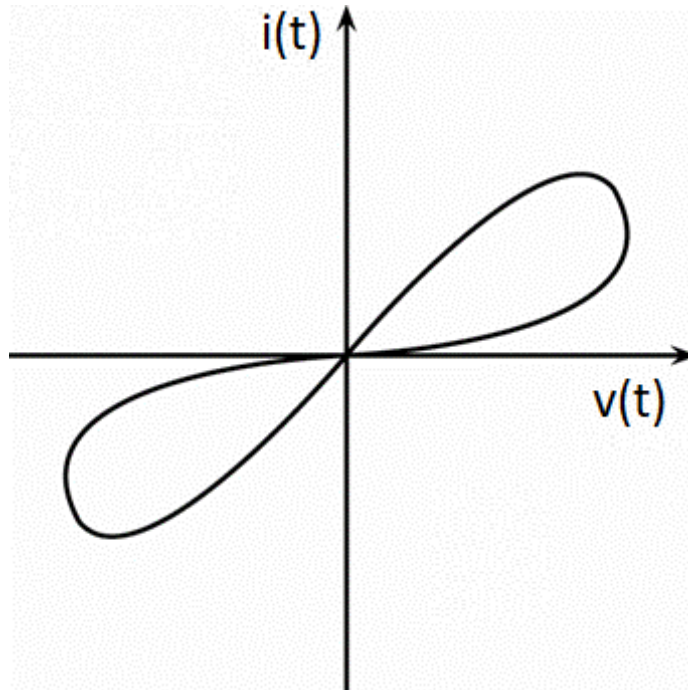
$$f(\phi, q) = 0 \quad (7)$$

$$M = \frac{d\phi}{dq} \quad (8)$$



Şekil 1. Dört temel pasif devre elemanı.

Gerilim-akım karakteristiği Şekil 2'deki histerezis eğrisi olan memristörün üretimi elektrik ve elektronik devre tasarımlarında yeni bir sıçrama yaşatmış ve yüksek dereceli pasif devre elemanı olan memristör kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır (Babacan et al. 2017; D Biolek and Biolkova 2010; Di Ventra et al. 2009c; Sánchez-López et al. 2015; Wang et al. 2012; Yesil 2018; Yildirim and Kacar 2020; Yu et al. 2019; Yuan and Li 2019; Q. Zhao et al. 2019).



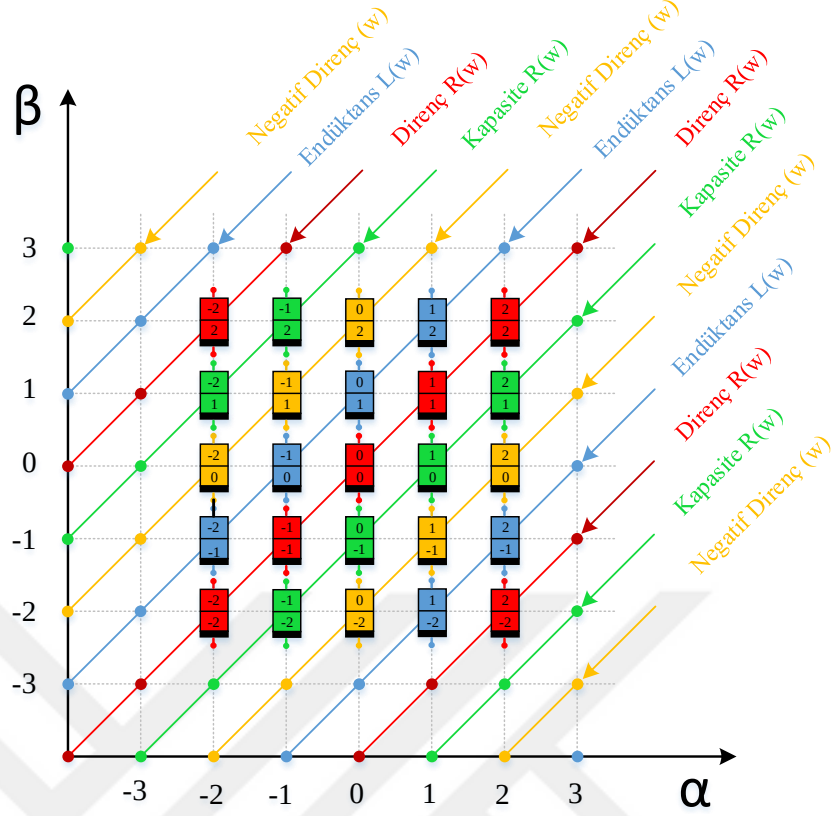
Şekil 2. Memristör gerilim-akım karakteristiği.

Chua, sadece memristörden bahsetmekle kalmamış, temel devre elemanlarının türev ve integralleri ile genişletilebilecek daha fazla sayıda temel eleman olması gerektiğinden söz etmiştir. Şekil 3'te gerilim ve akımın -2 ile +2 arasında değişen türev veya integral derecelerine göre ilk 25 temel devre elemanları gösterilmiş olup memkapasitör ve memindüktör elemanları ilk bakışta göze çarpmaktadır. (L. O. Chua 2013). α ve β 'nin bir değere göre temel devre elemanları Tablo 1'deki gibi ortaya çıkartılabilir. Tabloya bakıldığı zaman akım ve gerilimin üst dereceli integrallerinde memristör, memkapasitör ve memindüktör gibi farklı elemanların elde edildiği görülmektedir.

Tablo 1. Temel Pasif Devre Elemanlarının Dereceleri

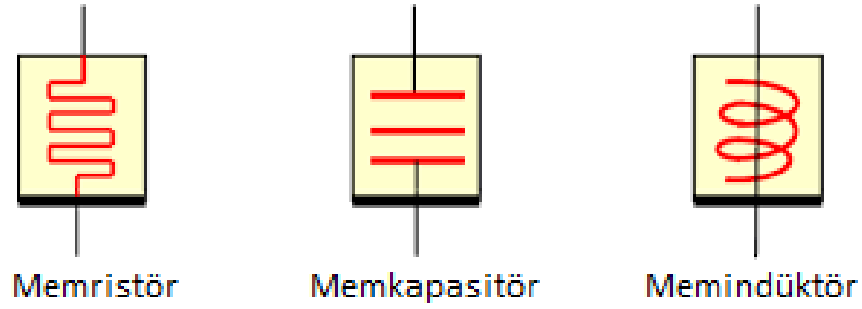
	α	β	Derecesi
Direnç	0	0	$v^{(0)}, i^{(0)}$
Kapasitör	0	-1	$v^{(0)}, i^{(-1)}$
İndüktör	-1	0	$v^{(-1)}, i^{(0)}$
Memristör	-1	-1	$v^{(-1)}, i^{(-1)}$
Memkapasitör	-1	-2	$v^{(-1)}, i^{(-2)}$
Memindüktör	-2	-1	$v^{(-2)}, i^{(-1)}$

Nasıl ki direncin hafıza özelliği olmadığı halde memristörün hafıza özelliği varsa; memkapasitör ve memindüktörün de kapasitör ve indüktörün aksine hafıza özelliğinin olma ihtimali düşünülebilir. Memristörün bu denli önem kazanmasının ardından diğer memristif elemanların, özellikle memkapasitör (memory+capacitor) ve memindüktör (memory+inductor), kullanımı gündeme gelmiştir. Çünkü, memristörün fiziksel olarak üretimi ve yaygın bir şekilde kullanılabilir olması diğer memristif elemanlarının üretimine zemin hazırlayacak olması mutlak bir sonuç olarak görülmektedir.



Şekil 3. İlk 25 temel devre elemanı (L. O. Chua 2003).

Memristif elemanlardan memristör, memkapasitör ve memindüktörlerin simgeleri Şekil 4'teki gibi ortaya çıkarılmıştır (Di Ventra et al. 2009a). Bu sembollerin kalın çizgi ile gösterilen ucuna pozitif bir gerilim uygulanırsa memristör, memkapasitör ve memindüktör değerleri yükselir, negatif bir gerilim uygulanırsa değerleri düşer. Memkapasitör ve memindüktör üretimi gerçekleşene kadar, bu konu üzerinde çalışan bilim insanlarının ihtiyaçlarını, onlar gibi davranan taklit devre tasarımları karşılamaktadır. Nihayetinde, memkapasitör ve memindüktör taklit devreleri birçok araştırmacı tarafından tasarlanmaya başlanmıştır (D Biolek and Biolkova 2010; Fouda and Radwan 2012; Yu V Pershin and Di Ventra 2011; Yuriy V Pershin and Di Ventra 2010; Sah et al. 2014; Sozen and Cam 2020; Wang et al. 2012; Yesil and Babacan 2020; Yu et al. 2014, 2019; Yuan, Deng, et al. 2019; Yuan, Li, et al. 2019; Yuan and Li 2019). Bu şekilde elde edilmiş ve edilecek olan memkapasitör ve memindüktör taklit devreleri birçok devrede kullanıma hazır olacağı ve elektronik devrelerin kullanımını daha efektif olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4. Memristif elemanların simgeleri (Di Ventra et al. 2009a).

Devrelerin artık daha hızlı ve daha kesin doğrularla çalışması elektronik mühendisliğinin olmazsa olmazıdır. Bu şartla birlikte memkapasitörler ve memindüktörler, memristörlerin yaptığı katkıya ek olarak devrelerin daha efektif olmalarını sağlayacaklardır. Bu elemanların devrelerde kullanımının yaygınlaşması birçok alanda olumlu bir ivmelenmeye vesile olacaktır. Bu bilgiler ışığında memkapasitör ve memindüktörlerin tez çalışmasında kullanılacak olması bu elemanların kullanımının yaygınlaşmasına katkı verecektir.

Gerek memkapasitör gerekse memindüktör tıpkı memristör gibi hem hafızalı eleman olmaları hem de öğrenme yeteneğine sahip olmaları birçok alanda kullanılabileceğini göstermektedir. Bu alanlara örnek olarak mantık devreleri, kaotik devreler, yapay sinir ağları, harici güç kesildiğinde bile hafızada tutan bellek yapıları gibi alanlar gösterilebilir (Abbas et al. 2017; Guo et al. 2021; Ma et al. 2020; G. Zhang et al. 2018). Üretimi gerçekleştirilen memristör çeşitli devrelerde kullanılmaya başlandı. Lineer olmayan bir çalışma biçime sahip olmaları, fazladan yazılım olmadan çalışabilmeleri ve öğrenme yeteneklerinin üst seviyede olması memristif elemanların kullanımının artacağına işaret etmektedir. Memkapasitör ve memindüktörlerin de üretimiyle yapay zekâ, akıllı şehirler, giyilebilir teknolojiler gibi alanlarda devrelerin önemli bir parçası olarak kullanılacaklardır. Bu elemanlar, nöron devreleri gibi biyolojik taklit devrelerinde de kullanılabilir. Memristif elemanlar, memkapasitör ve memindüktörlerin de yaygınlaşmasıyla biyomedikal teknolojilerde önemli bir yere sahip olacaklardır. Yine bu elemanların sayesinde nöromühendislik anlamda sinir hücrelerinin taklit edilmesi daha kolay olacaktır. Özetlemek gerekirse öncelikli alanlardan olan akıllı ve yenilikçi malzemeler, biyomedikal ve biyomedikal teknolojiler, nöromühendislik gibi alanlara memristif elemanlar yani memristör, memkapasitör ve memindüktörler, kullanılacak olup ilgili alanlara hızlılık, kesinlik ve kolay tasarlanabilirlik özellikleri ekleyecektir.

Memkapasitör ve memindüktörler önceki durumu hafızlarında tutabildikleri, hızlı çalışabildikleri ve nanoteknoloji ile yapay zekâ teknolojisine uygun olarak kullanılabilecekleri

için gelecekte birçok devrede kullanılacaktır. Günümüzde tümdevre tasarımları, kaotik devreler, elektronik devreleri vb. uygulamalarda kullanılıyor olup elektronik olarak kontrol edilebiliyorlar. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada, memkapasitör ve memindüktör devreleri tasarlanacaktır. Tasarlanacak olan devrelerde memkapasitör ve memindüktörün çalışma mekanizması ve benzetim çalışmalarına yer verilecektir. Tasarlanacak taklit devrelerle birlikte memkapasitör ve memindüktör devrelerinin analizi yapılacak olup literatürde yer alan diğerk devrelerle karşılaştırılacaktır. Devrelerin stnlkleri ve handikapları araştırılmıştır.



KURAMSAL TEMELLER

Memristör 1960 yılında Widrow tarafından kullanılmış olup yeni bir üç terminalli devre elemanı olarak lanse edilmiştir (Widrow et al. 1961). Fakat, memristör bilim dünyasına Chua tarafından 1971 yılında sokulmuştur (L. Chua 1971). Chua yaptığı çalışmada direnç, kapasitör ve indüktörün ardından dördüncü temel eleman olan memristörün matematiksel denklemlerini ortaya koymuştur.

Gündüzalp (1982) yılındaki tezinde doğrusal olmayan devre teorisi ışığında memristör uygulamaları yapmıştır. Ayrıca memristör kullanarak yeni bir transistör modeli geliştirmiştir (Gündüzalp 1982).

2008 yılında HP laboratuvarlarında memristörün üretimi yapılabilmesinden sonra memristöre ve memristif elemanlara olan ilgi artmıştır (Strukov et al. 2008). Her ne kadar memristörün üretimine başlansa da ticari olarak istenilen seviyeye ulaşmaması birçok araştırmacıyı memristör gibi çalışan taklit devre tasarlamaya itmiştir. Böylece bir çok memristör modeli ve taklit devreleri tasarlanmıştır (Kim et al. 2012; Yakopcic et al. 2011; Yang et al. 2013; Y. Zhang et al. 2009).

Memristör bir sonraki aşamada birçok farklı devre ve uygulamaya entegre edilmiştir. Jameel (2013) yılındaki çalışmasında aktif devre uygulamaları için memristör kullanmıştır (Jameel 2013). Yener (2014) yılında yazdığı tezde, memristörün filtre devrelerine, CMOS temelli devrelere ve kaotik devrelere adapte edilebileceğini göstermiştir (Yener 2014). Yücel (2014) yılında, kübik memristörü kullandığı tezinde beynin hafıza özelliğini araştırmış ve memristör ile olan ilişkiyi incelemiştir (Yücel 2014). Arık (2015) yılında 3 adet memristör tabanlı kaotik sistem tasarlamış ve deneysel olarak davranışlarını incelemiştir. Böylece farklı emülatör devreleri olmaksızın memristör tabanlı kaotik sistemi gerçekleştirmiştir (Arık 2015). Babacan (2016) yılında yaptığı tez çalışmasında, hem memristör özelliği taşıyan devreleri gerçekleştirmiş hem de nöron devresi için bir memristör tasarlamıştır. Tasarladığı bu devrenin fourier analizini de yapmıştır (Babacan 2016). Şevgin (2016) yılında, memristör modeli tasarlamış olup, klasik memristörler ile performans karşılaştırması yapmıştır. Denetleyicilerin denetim üzerindeki durumları araştırılmıştır (Şevgin 2016). Solak (2017) yılındaki çalışmada modelleme yöntemi olarak parça-parça doğrusal modellemeyi seçmiş ve yeni bir memristör modeli oluşturmuştur. Bu modelleri filtre devrelerine uygulayarak test etmiştir (Solak 2017). Taşkiran (2018)'de yaptığı çalışmada Taşkiran, CCII ve OTA kullanarak iki adet memristör

taklit devresi tasarlamıştır ve deneysel sonuçları elde etmiştir (Taşkıran 2018). Her iki tasarımda da çok sayıda aktif devre elemanı kullanmıştır. Parlar (2018)'de memristör taklit devrelerinin, aktif ve pasif filtreler üzerindeki çeşitli parametreleri değerlendirmiştir. Bu filtre devreleri, alçak frekanslarda yüksek kalite faktörüne sahipken, yüksek frekanslarda bundan söz etmek olası değildir (Parlar 2018).Özdilli (2019) yılında yaptığı tez çalışmasında mantık işlemlerini ve tek/çoklu bit veri depolaması yapabilmek adına memristör kullanarak donanım mimarisi geliştirmiştir (Özdilli 2019). Kurt Demir (2019) yılında, testere dişi dalga kaynağının nonlinear sürüklenme hızlı memristör modelini kullanmıştır. Benzetimini de Matlab Simulink programında gerçekleştirmiştir (Kurt Demir 2019).

Tüm bu çalışmalar memristörün farklı uygulamalar altında kullanılabileceğini gösteren birer örnek olarak bilim insanları ve araştırmacılarca literatüre kazandırılmıştır.

Araştırmacılar memristör taklit devreleri tasarlamayı başarabilince bir sonraki adım olan memkapasitör ve memindüktörlerin taklit devreleri ortaya çıkmaya başlamıştır. Biolek ve Biolkova (2010)'da, ile Wang vd. (2012)'de memristör modelini temel alarak bir memkapasitör devresi tasarlamışlardır (D Biolek and Biolkova 2010; Wang et al. 2012). Bu tasarımlarının en büyük handikabı memkapasitörü kullanabilmek için memristöre ihtiyaç duyulmasıdır. Pershin ve Ventra (2011)'de çalışmasında akım taşıyıcı ve memristör kullanarak memkapasitör ve memindüktör taklit devreleri tasarlamışlardır (Yu V Pershin and Di Ventra 2011). Bu araştırmacıların yaptıkları devre tasarımında memristör kullanmış olmaları ve devrelerin topraklı olmaması ilk üretilen devrelerin olması sebebiyle mazur görülebilecek eksikliklerdir.

Fouda ve Radwan (2012)'deki çalışmasında memristör kullanmadan memkapasitör taklit devresi tasarlamışlardır (Fouda and Radwan 2012). Bu çalışmada memristör olmadan memkapasitör taklit devresi tasarlamak önemli bir yenilik olarak bilim dünyasının karşısına çıkar. Memristör kullanmayan bilim insanları devrenin stabil çalışmasına engel olan çok sayıda aktif devre elemanı kullanmışlardır. Bu devre elemanların azaltılması sonraki tasarımlarda dikkat edilecek husus olarak dikkate alınması gereken bir durumdur.

Sah vd. (2014) yılında memindüktör taklit devresi tasarımında çok sayıda aktif devre kullanmışlardır. Fakat araştırmacılar devrelerin kontrol edilebilirlik özelliğine dikkat çekmişler ve kontrol edilebilen bir memindüktör taklit devresi tasarlamışlardır (Sah et al. 2014). Sözen'in (2016) yılındaki tezinde memristör, memkapasitör ve memindüktör davranışı sergileyen taklit devreleri tasarlanmıştır. Sözen, bu hafızalı elemanların elektronik devrelerindeki potansiyel artılarına odaklanmıştır. Tasarlanan memkapasitör ve memindüktör

taklit devreleri elektronik olarak kontrol edilebiliyor ama çok sayıda aktif devre elemanı kullanılmıştır. (Sözen 2016).

Sözen ve Çam (2020) yılında yayınlamış oldukları makalede memristör kullanmadan tasarladıkları memindüktör devresinde bir OTA, bir analog çarpıcı, CCII, CFOA 8 direnç ve iki kapasitör kullandıklarını belirtmişlerdir (Sozen and Cam 2020). Bu çalışmada çok fazla sayıda devre elemanı kullanılmıştır.

Romero vd (2020)'de modifiye edilmiş Antoniou jirator tabanlı bir memindüktör taklit devresi tasarlamışlardır. Hali hazırda tasarlanmış olan Antoniou indüktör devresini memindüktör taklit devresine dönüştürmüşlerdir. Çeşitli parametrelerce testleri yapılan devre farklı frekans ve giriş değerlerinde testten geçmiştir (Romero et al. 2020).

Taşkıran vd (2020) yılında memkapasitör ve memindüktör devre tasarımlarında CBTA tabanlı bir mutator devre önermişlerdir. Bunun için topraklanmış bir memristör kullanmayı uygun görmüş ve benzetim sonuçlarına göre farklı frekanslarda histerezis eğrisi elde edebilmişlerdir (Çam Taşkıran et al. 2020).

Konal ve Kaçar (2020)'de iki OTA, bir analog çarpma devresi, iki direnç ve iki kapasitörden oluşan memindüktör taklit devresi tasarlamışlardır. Bu devre, OTA'nın kutuplama (bias) akımı yardımıyla elektronik olarak kontrol edilebilen bir devre özelliğine sahiptir. Devrenin performans testleri akı-akım, hafıza özelliği gibi durumlar için LT-Spice benzetim programında yapılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır (Konal and Kacar 2020).

Thongdit vd (2020)'de 5kHz, 10kHz ve 20kHz frekanslarında histerezis eğrisini alan programlanabilir analog dizi (FPAA) [field programmable analog array] tabanlı memindüktör tasarımıyla elde etmişlerdir. Benzetim programı olarak Anadigm Designer 2 yazılımını kullanan ekip benzetimlerini olumlu bir şekilde sonlandırmışlardır (Thongdit et al. 2020).

Yapay zekâ teknolojisindeki hızlı yükseliş hafızalı elemanların önemini arttırmıştır. Bu durumdan dolayı, Zhao vd (2020)'de fotoelektrik memkapasitör modeli önermişlerdir. Önerilen bu model optoelektronikte yeni fırsatların doğmasına ve yeni bir teknolojiye öncülük edecektir (L. Zhao et al. 2020).

Madsar vd (2020) yılında yük-gerilim ilişkisi lineer olmayan topraklı bir memkapasitör taklit devresi tasarlamışlardır. Az enerji tüketen devre MOS Tranzistör ve kapasitörlerden oluşmaktadır. Benzetim çalışması yapılmış olup çeşitli parametrelerce tartışılmıştır (MADSAR et al. 2020).

Tulumbacı vd (2020) yılında enerji verimliliğini tartıştıkları çalışmasında lineer olmayan metotları kullanarak depolanan enerjiyi hesaplamışlar ve çeşitli önerilerde bulunmuşlardır (Tulumbacı et al. 2020).

Guo vd (2021)'de tasarlamış oldukları memkapasitör devresinde iki kapasitörün yanı sıra SBT ($\text{Sr}_{0.95}\text{Ba}_{0.05}\text{TiO}_3$) memristör kullanmışlardır. Benzetim sonuçlarının farklı giriş değerleri ve parametrelerce devreler stabil çalışmış, dinamik davranışlar sergilemiştir. Devre kaotik devreler arasında farklı bir çalışma metodu ile tasarlanmıştır (Guo et al. 2021).

Qi vd (2021)'de yapmış oldukları çalışmada memindüktör tabanlı kaotik sistem tasarlamışlardır. Harici olarak uygulanan sinüzoidal sinyal ile kontrol edilebilen tasarımın teorik olarak analizi ve dijital olarak benzetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların devre parametrelerinin ve devrenin çalışma süresinin sistemi etkilediğini ortaya koymuştur (Qi et al. 2021).

Riordan jirator tabanlı yüzen (Floating) fakat akı kontrollü olan memindüktör tasarımlarında Romero vd (2021) yılında benzetim sonuçlarını farklı giriş sinyalleri ve frekanslarda elde etmişlerdir. Ekip ayrıca düşük frekansta çalışan bir devre gerçekleştirmiş ve çalışmalarına dahil etmiştir (Romero et al. 2021).

3 adet OTA ve iki adet kapasitör kullanarak ayarlanabilir topraklı bir memindüktör tasarımı gerçekleştiren Raj vd (2021)'de 0.18 μm CMOS teknoloji parametrelerinde Virtuoso Analog Design Environment of Cadence benzetim programında simülasyon yapmışlardır. 10MHz çalışma frekansına sahip olan devre farklı kapasitör değeri, farklı gerilim değeri, farklı sıcaklık değeri ve farklı frekans değeri kullanarak memindüktör devresini test etmişler ve başarılı sonuçlar almışlardır (Raj et al. 2021).

Örnekleri verilen çalışmaların bazıları memkapasitör ve/veya memindüktör tasarlarken memristör kullanmışlardır. Böylece devrede kullanılan aktif eleman sayısı artışıyla devrenin karmaşıklığı da artmıştır. Tasarlanan devrelerin gerçekleştirilmesi zor hale gelmiştir. Çok sayıda eleman kullanan devrelerde de devreyi gerçekleştirmek oldukça zordur. Bazı tasarımlarda floating (yüzen) bazı devrelerde grounded (topraklı) tasarımlar mevcuttur. Yukarıdaki bazı tasarımların da deneysel sonuçları verilememiştir.

Yukarıda yapılan atıflardan yola çıkarak yapılan tezlerin birçoğunun memristörle alakalı olduğu yargısı çıkarılmaktadır. Memkapasitör ve memindüktörlerin devrelerin daha efektif ve daha az enerji tüketerek gerçekleştirilmesini sağlayacaktır. Dolayısıyla bu elemanların literatüre örnek olarak eklenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında memkapasitör ve memindüktör elemanlarının devre modelleri çıkartılacak olup, ilgili

elemanların benzetimi ve analizleri yapılacaktır. Ayrıca, literatürde var olan devrelerle karşılaştırılacaktır. Önceki devrelerin handikapları ve/veya üstünlükleri çeşitli parametrelerce incelenecektir. Bütün analog ve dijital devrelerde kullanılan temel eleman olan kapasitörün yerine memkapasitör, indüktör yerine memindüktör kullanımının yaygınlaşmasıyla devrelerin daha kararlı, daha güvenilir, daha hızlı çalışacağı tahmin edilmektedir.



MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında memkapasitör ve memindüktör devreleri tasarlanmıştır. Bundan dolayı öncelikle memkapasitör ve memindüktörler hakkında teorik bilgi vermek gerekmektedir. Daha sonra devre tasarlanırken dikkat edilmesi gereken hususların başında yer alan devrede kullanılacak elemanları seçimi gelmektedir. Bu durumdan dolayı aktif devre elemanlarından bahsetmek gerekmektedir.

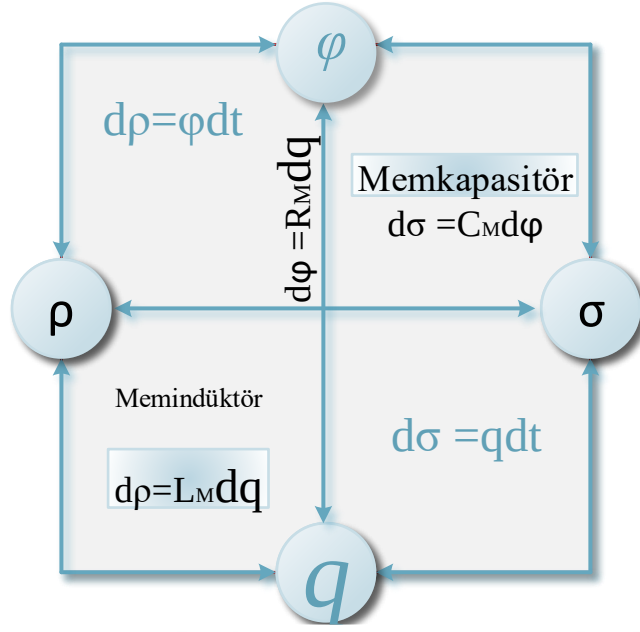
İdeal Memkapasitör

Memkapasitör yine memristör gibi devre elemanının hafızalı olabileceği fikriyle memory+capacitor kelimelerinin kısaltması ile oluşturulmuştur. Memkapasitör için yük ve gerilim iki tamamlayıcı değişken olarak göze çarpar. Memristör gibi yük ve gerilim karakteristiği bir histerezis döngüsü olur (Di Ventra et al. 2009b). İster orijinden geçsin ister geçmesin periyodik bir giriş tarafından sürüldüğünde bu histerezis eğrisi değişmez. Sinüzoidal girişin artan frekansı ile beraber histerezis alanında azalma meydana gelir. Memkapasitörler geleneksel kapasitörler gibi pasif devre elemanlarıdır ama kapasitörlere göre memkapasitörlerin en büyük artılarından biri uygulanan giriş sinyalini hafızada tutarken aynı zamanda enerji depolayabilmesidir.

Memkapasitör de memristif kümesinin bir elemanı olduğundan dolayı iki değişkenli bir fonksiyon olarak tanımlanır. Denklem (9)'teki fonksiyon Şekil 5'teki temel denklemlerden yola çıkarak Denklem (10)'teki şeklini alır.

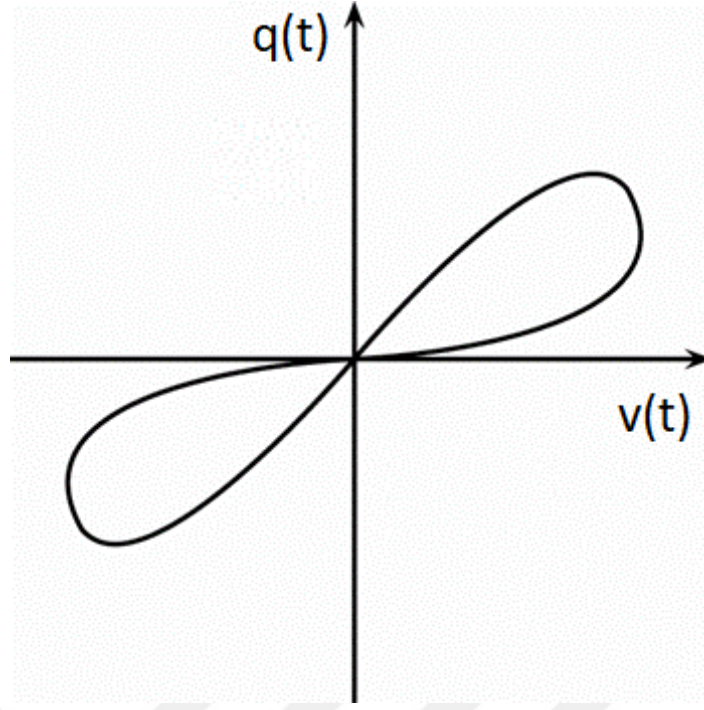
$$f(\varphi, \sigma) = 0 \quad (9)$$

$$M_C = \frac{d\varphi}{d\sigma} \quad (10)$$



Şekil 5. Memkapasitör ve memindüktör temel denklemleri.

Daha yüksek dereceli pasif devre elemanı olan memkapasitör temel denklemlerini belirlerken yeni değişkenlere ihtiyaç duyulabilir. Bu yüzden yükün integrali, σ sembolüyle klasik elektriksel büyüklüklere ek olarak tanımlanmıştır. Bir memkapasitör $q = C v$ ilişkisine uymak zorundadır. C sabit olmayan bir kapasitör olabilir, fakat yine de giriş parametresi olan q - v ilişkisi Şekil 6'daki gibi bir histerezis eğri olur. Memkapasitör farklı bir gerilim değeri uygulanıncaya kadar veya Memkapasitörün zayıflama süresine ulaşılan kadar ilk uygulanan gerilim değerine bağlı bir kapasiteye sahip olur. Bu durumda yüksek dereceli pasif devre elemanı memkapasitör geçmiş koşulları belleğinde tutan bir kapasitör olduğu söylenebilir. Hatta yüksek veri depolama , uzun süreli veri saklama ve hızlı erişim gibi yeteneklere sahip ve de çok az enerji tüketen önemli bir hafızalı pasif devre elemanı olur (Martinez-Rincon et al. 2010). Eğer değişken bir kapasitörün memristif karakteristiği sergilediği kanıtlanabilirse değişken kapasitörün bir memkapasitör olduğu kanıtlanabilir. Fakat ideal kapasitörün yük ve gerilim ile lineer bir ilişkisi olduğu ve matematiksel modellemeye göre doğru orantılı bir duruma sahip olduğu, dolayısıyla histerezis eğri karakteristiğini gösteremeyeceği için değişken kapasitör memkapasitör olarak kabul edilemez.



Şekil 6. Memkapasitör yük-gerilim karakteristiği.

İdeal Memindüktör

Memindüktör diğer yüksek dereceli pasif devre elemanları olan memkapasitör ve memristör gibi bilgileri belleğinde saklaması fikrinden dolayı memory+inductor sözcüklerinin birleşmesi sonucu adını almıştır. Memindüktör için akı ve akım iki değişken olup bu iki değişkenin meydana getireceği karakteristik özellik histerezis eğrisi şeklinde kendini gösterir. Bu eğrinin orijinden geçmesinden bağımsız olarak girişe uygulanan gerilimin periyodik olması eğrinin değişmemesi için yeterlidir. Sinüs dalga biçimiyle sürülen girişin frekansı artarsa histerezis alanı azalır. Memindüktörler klasik indüktörler gibi devrede pasif eleman olarak kullanılırlar fakat indüktörlerden ayrılan yönü giriş sinyalini belleğinde tutup enerji depolaması da yapabilmesidir.

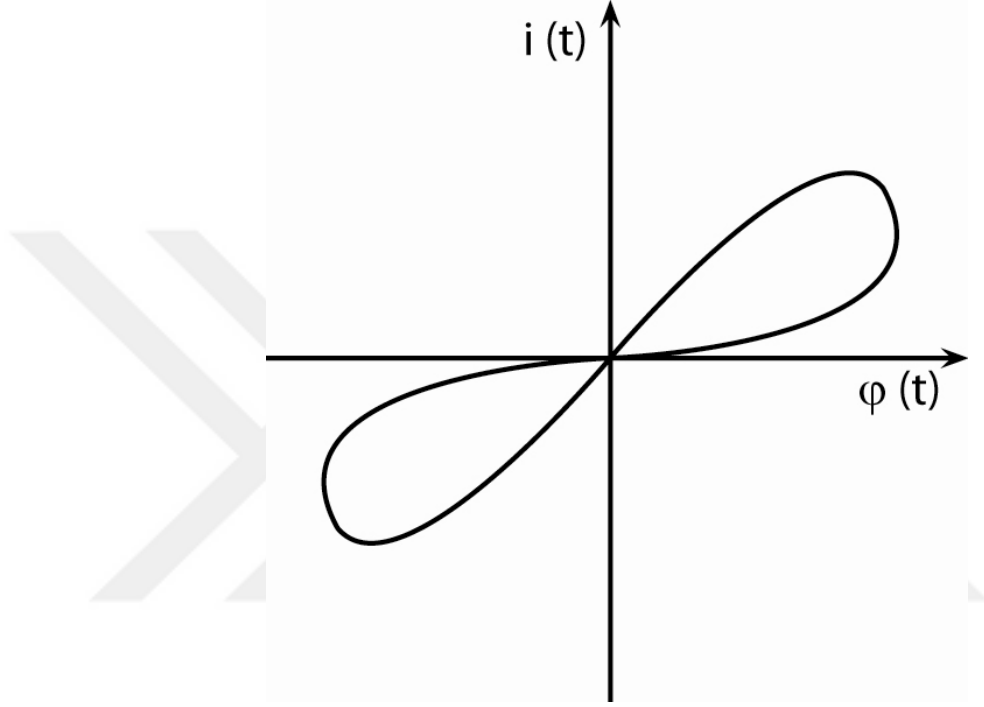
Memindüktör, memkapasitör gibi aynı kümenin bir elemanıdır ve iki değişkenli bir fonksiyon olarak tanımlanır. Denklem (11)'deki fonksiyon Şekil 5'teki temel denklemlere bağlı olarak denklem (12)'ye evrilir.

$$f(\rho, q) = 0 \quad (11)$$

$$M_L = \frac{d\rho}{dq} \quad (12)$$

Memindüktör yüksek dereceli pasif devre elemanı olduğundan dolayı temel denklemlerini belirlemek adına akının integrali, ρ sembolüyle geleneksel elektriksel

büyükliklerin yanına eklenmiştir. İndüktörün akı ile akım karakteristiği Şekil 7’de gösterilen bir histerezis döngüsü olur. Memindüktör farklı değerde bir giriş uygulanana veya memindüktörün zayıflama süresine ulaşılana kadar ilk uygulanan değeri belleğinde tutar. Yine memindüktör gibi yüksek veri depolama, uzun süreli veri saklama ve az enerji harcamasıyla indüktörden üstün hale gelir. Yani indüktör histerezis eğrisini elde edemeyeceği ve de belirli özelliklere sahip olamayacağı için memindüktör olarak kabul edilemez.



Şekil 7. Memindüktör akı-akım karakteristiği.

Aktif Devre Elemanları

Aktif devre elemanları deyince akla OPAMP (İşlemsel Yükselteç), CCII (İkinci Kuşak Akım Taşıyıcı) ve OTA (İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi) gelmektedir (Yeşil 2016). Aktif devre elemanları için daha fazla aktif devre elemanı önerilmiştir. CDBA(akım farkı alan tamponlanmış kuvvetlendirici) ve CDTA(akım farkı alan geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi) bunlardan ikisidir (Acar and Ozoguz 1999; Dalibor Biolek 2003).

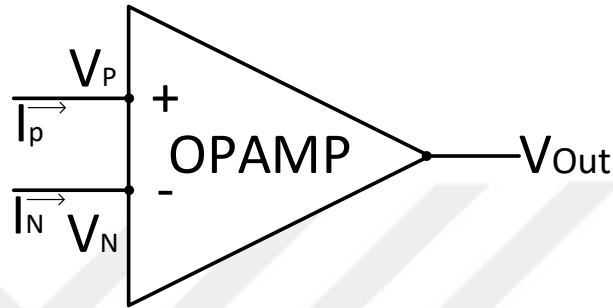
İki giriş ve bir çıkış terminali olan OPAMP yüksek kazançlı bir tümleşik elemandır. Bu terminaller kullanılarak harici eleman bağlanmasıyla geri beslemesi ve gerilim kazancı kontrol edilebildiği için OPAMP birçok devrede yaygın olarak kullanılmaktadır (Çelik 2007). OPAMP’ın temel olarak girişinde yüksek empedansa sahip 2 adet, çıkışında düşük empedansa sahip olan 1 adet terminali vardır. OPAMP kullanılmasıındaki temel amaç girişteki sinyalin

yükseltilerek çıkışa aktarılmasıdır. Açık çevrim kazancına bağlı olarak çıkışta oluşacak gerilim büyüklüğü değişebilir. İdeal OPAMP modeli Şekil 8’de gösterilmiştir. OPAMP’ın temel denklemleri pozitif ve negatif uçlar sırasıyla P ve N olarak adlandırılarak;

$$I_P=0, I_N=0 \quad (13)$$

$$V_P=V_N \quad (14)$$

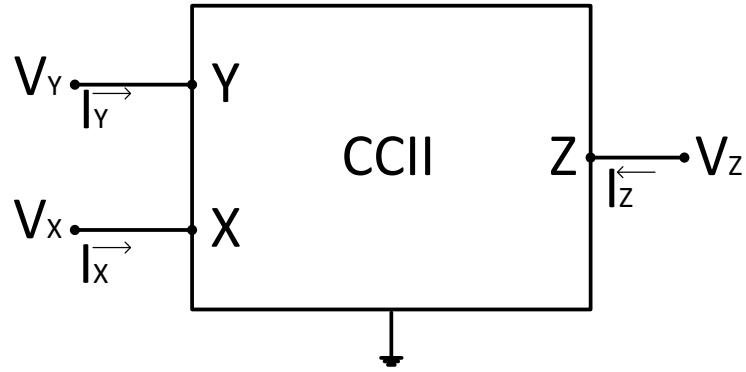
Olarak ifade edilir.



Şekil 8. OPAMP blok diyagramı.

Başlıca aktif devre elemanlarından olan CCII aslında ikinci kuşak bir akım taşıyıcıdır. İlk nesli 1968 yılında tasarlayan Smith ve Sedra, ikinci nesli 1970’de tasarlamışlardır (Smith and Sedra 1968, 1970). Üçüncü kuşak akım taşıyıcı tasarımı 25 yıl sonra gerçekleşmiştir (Fabre 1995). Her ne kadar üçüncü kuşak akım taşıyıcı tasarlanmış olsa da akım taşıyıcı denince ikinci kuşaktan bahsedildiği algılanmaktadır. Çünkü en yaygın olarak ikinci kuşak akım taşıyıcı kullanılmaktadır. Farklı bağlanma durumlarıyla birçok uygulamada kullanılabilen ve Şekil 9’da blok diyagramı verilmiş olan CCII temelde 2 giriş 1 çıkış olmak üzere üç terminale sahiptir. CCII’nin OPAMP’tan üstün olan tarafı akım modlu olmasıdır. Gerilim modlu olması sebebiyle OPAMP’ın bant genişliği nispeten düşük ve besleme gerilimi nispeten büyüktür. CCII’ya ait uç denklemlerine bakıldığında zaman Y terminalinden akım akmadığı, Z terminalindeki akımın X terminalindeki akıma ya da negatif akıma eşit olduğu görülmektedir. Bir diğer önemli denklem de X ve Y terminallerindeki gerilimin birbirine eşit olmasıdır.

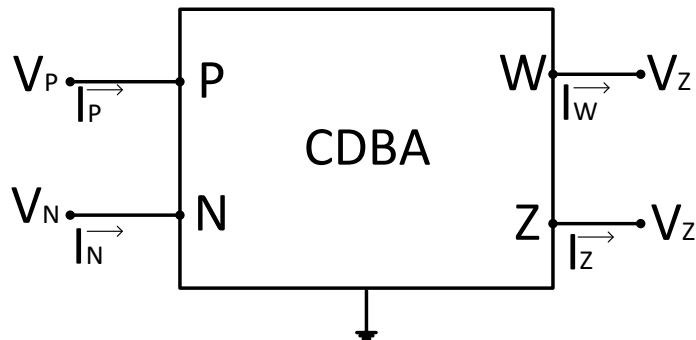
$$\begin{bmatrix} i_y \\ V_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ i_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (15)$$



Şekil 9. CCII blok diyagramı.

Şekil 10’da sembolü gösterilmiş olan CDBA akım modu ve gerilim modu sinyal işleme devre ve filtrelerinde kullanılan aktif devre elemanı olup 2 giriş 2 çıkış ve 1 de toprak olmak üzere 5 adet terminale sahiptir. Bu terminallerden p terminali pozitif, n terminali ise negatif girişi simgelemektedir. Çıkış terminallerine baktığımız zaman ise z terminali akım çıkışı, w terminali de gerilim çıkış olarak belirlenmiştir. Z terminali girişteki p ve n terminalleri arasındaki akım farkını izlediği için akım çıkışı, w terminali ise z terminalindeki gerilimi takip ettiği için gerilim çıkışı olarak kabul edilmektedir. Temel uç denklemlerine göre Z terminalindeki akımın P ve N terminallerindeki akım farkına, W terminalindeki gerilimin de Z terminalindeki gerilime eşit olduğu kolay bir şekilde çıkarılabilir.

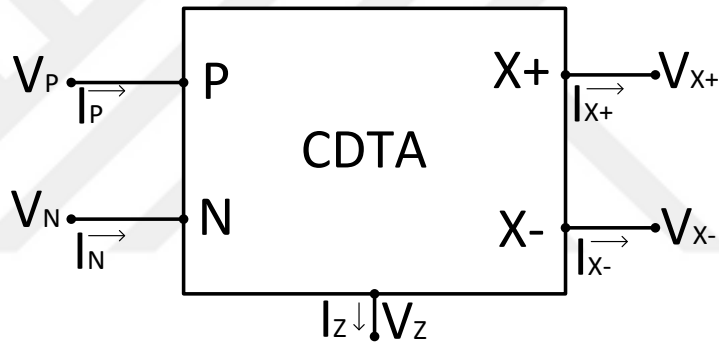
$$\begin{bmatrix} i_z \\ V_w \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_z \\ i_w \\ i_p \\ i_n \end{bmatrix} \quad (16)$$



Şekil 10. CDBA blok diyagramı.

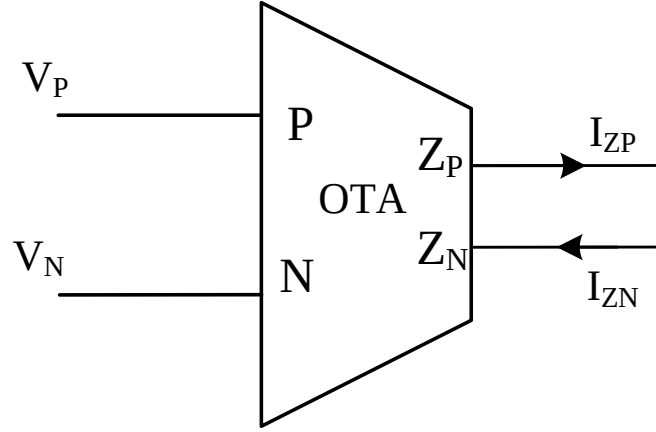
Yine 5 terminali olan aktif devre elemanı CDTA'nın 2 giriş, 1 ara, 2 çıkış olmak üzere 5 adet terminali vardır. P ve n girişleri, uygulanan akımın farkını alarak ara terminale (z'ye) iletir. Z terminaline bağlanan harici bir empedansla akım gerilime dönüştürülür. Bu şekilde elde edilen gerilim geçiş iletkenliği parametresi ile çarpılarak çıkış terminallerindeki dengeli akımlar meydana getirilir. Şekil 11'de sembolü verilmiş olan CDTA'nın giriş terminalleri, ara terminali ve çıkış terminalleri sırasıyla p, n, z, x+ ve x- olarak görünmektedir (Uygur 2006). P ve N terminallerinde herhangi bir gerilim söz konusu olmamakla birlikte, Z terminalindeki akım giriş terminallerindeki akımın farkına eşittir.

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ i_z \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_n \\ V_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (17)$$



Şekil 11. CDTA blok diyagramı.

OTA da akım modlu olarak çalışan bir aktif elemandır. Şekil 12'de verilmiş sembolde OTA, kolayca anlaşılabilirliği üzere 2 gerilim girişi 2 de akım çıkışı olmak üzere temelde 4 terminale sahiptir. Böylece gerilim kontrollü akım kaynağı olarak kullanılabilir. Kutuplama akımı veya gerilimi sayesinde geçiş iletkenliği elektronik kontrol edilebilir. OTA düşük besleme geriliminde geniş bant aralığıyla çalışma olanağına sahiptir. OPAMP'tan çok daha hızlıdır ve kazancı kutuplama akımlarıyla ayarlanabilir. İdeal olan OTA'da giriş ve çıkış dirençleri sonsuzdur. OTA akım çıkışlı olduğu için devre tasarımlarında buffer kullanılmaz. Güç tüketimi oldukça düşüktür. Yüksek frekanslarda da çalışabilir. Az alan kapsadığı için üretilecek entegrelerde yer kazancı sağlar.



Şekil 12. OTA Sembolü

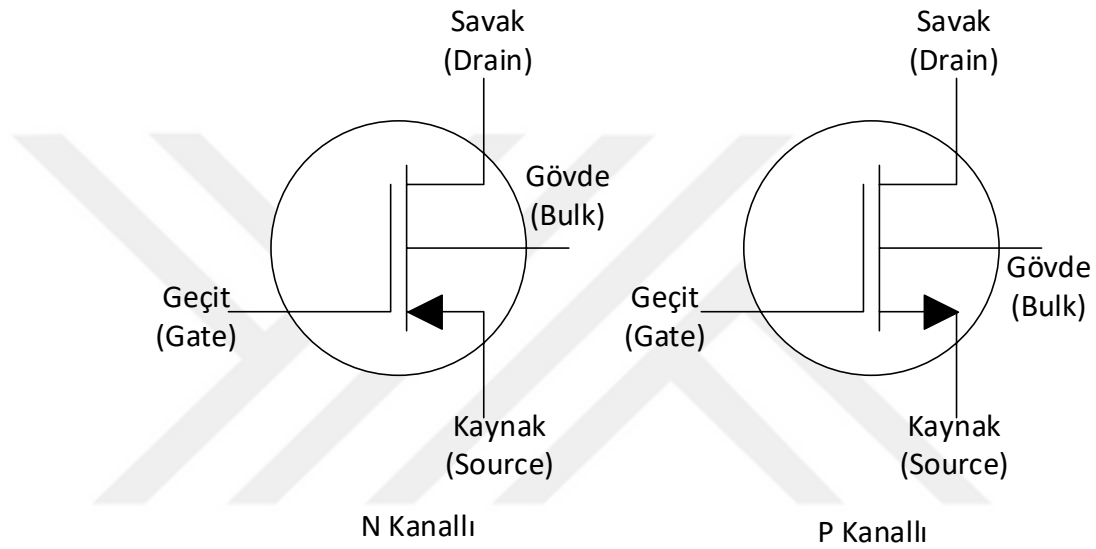
Tasarlanan devrelerin memkapasitör ve memindüktörlerin yapıları gereği lineer olmayan davranışta çalışmaları beklenmektedir. Bu şekilde lineer olmamasını sağlamak için iki yöntem kullanılabilir. Birincisi tranzistörlerin eşik altı bölgesinde çalışmaları sağlanarak lineer olmayan davranış elde edebilmektir. Böylece tranzistörlerde çok düşük akım meydana gelmekte olup, yüksek direnç elde edilebilmektedir (Babacan 2016). İkinci yöntem ise çarpma devresi kullanmaktır. Tez çalışmasında lineer olmama özelliğini sağlamak için çarpma devresi kullanılmaktadır. Tasarlanan devrelerde kullanılan çarpma devresiyle lineer olmayan özellikte memkapasitör ve memindüktör özelliği olan devre ortaya çıkacaktır.

İdeal bir OTA, diferansiyel bir gerilim tarafından kontrol edilen bir gerilim kaynağı olarak hareket eden ve sonlu bir değer gösteren ve frekanstan bağımsız olan geçiş iletkenliği g_m ile karakterize edilen bir aktif elemandır. Giriş ve çıkış empedansları teorik olarak sonsuzdur.

MOS Tranzistör

Tranzistör çeşitlerinden biri olan MOS (Metal Oxide Semiconductor) devrelerde görece fazla kullanılan devre elemanlarından birisidir. Metal oksit yarı iletken formunda olan MOS elektronların yarı iletken kanal boyunca akması ve bu kanalın kontrolünün de elektriksel bir alana bağlı olmasından dolayı alan etkili tranzistör (Field Effect Transistor) türü olarak ele alınır. Hem yarı iletkenlik hem de alan etkisi nedeniyle araştırmacılarca ismi MOS Tranzistör olarak anılır. MOS Tranzistörler bipolar tranzistörlere kıyasla daha ufak boyutlarda üretilebilirler, aynı büyüklükteki yüzey alanında daha fazla yerleştirilebilirler. Giriş empedans yüksekliğinden kaynaklı daha alt seviyede güç tükettiklerinden ve yüksek

frekanslarda çalışabildiklerinden dolayı çok sayıda tranzistöre ihtiyaç duyan elektronik devrelerde kullanım oranı oldukça yüksektir. Yine giriş empedansına bağlı olarak diğer tranzistörlerde olduğu gibi akım ile değil gerilim ile kontrol edilirler. Terminallerine bakıldığında zaman Savak (Drain) Kaynak, (Source) ve Geçit (Gate) olmak üzere üç adet terminali vardır. Bu terminallerdeki gerilimler Savak için V_D , Kaynak için V_S ve Geçit için V_G olarak ifade edilir. P ve N tipte kanallar olmak üzere iki türü bulunan MOS Tranzistörlerin sembolleri Şekil 13'te gösterilmiştir. P tipi taban üzerine N tipi kanal yerleştirilirse NMOS, N tipi taban üzerine de P tipi kanal yerleştirilirse PMOS elde edilir. NMOS'larda akım savaktan kaynağa doğru akarken PMOS'larda kaynaktan savağa doğru akmaktadır.



Şekil 13. N ve P kanallı MOS tranzistör.

Eşik gerilimi tranzistörlerin çalışması için gerekli olan minimum gerilim olarak tanımlanabilir. Savak-Kaynak gerilimi olarak da ifade edilebilen eşik gerilimi V_{TH} olarak simgeleştirilebilir. V_{TH} gerilimi yarı iletkeninin tipine, geçit iletkeninin tipine ve yapılan işlemlere göre değişkenlik gösterir. V_{GS} yani geçit ile kaynak arasındaki gerilimin V_{TH} 'den büyük olması şartıyla MOS Tranzistörün iki çalışma bölgesi vardır: lineer çalışma bölgesi ve doyma bölgesi. Lineer çalışma bölgesinde savaktan akan akım olan I_D , V_{GS} sabitken V_{DS} yani Savak-Kaynak gerilimiyle doğru orantılı olarak artar. Yani kısaca $V_{GS} > V_{TH}$ ve $V_{GS} - V_{TH} > V_{DS} > 0$ olmalıdır.

Savaktan akan akım denklem 18'le matematiksel olarak bulunabilir.

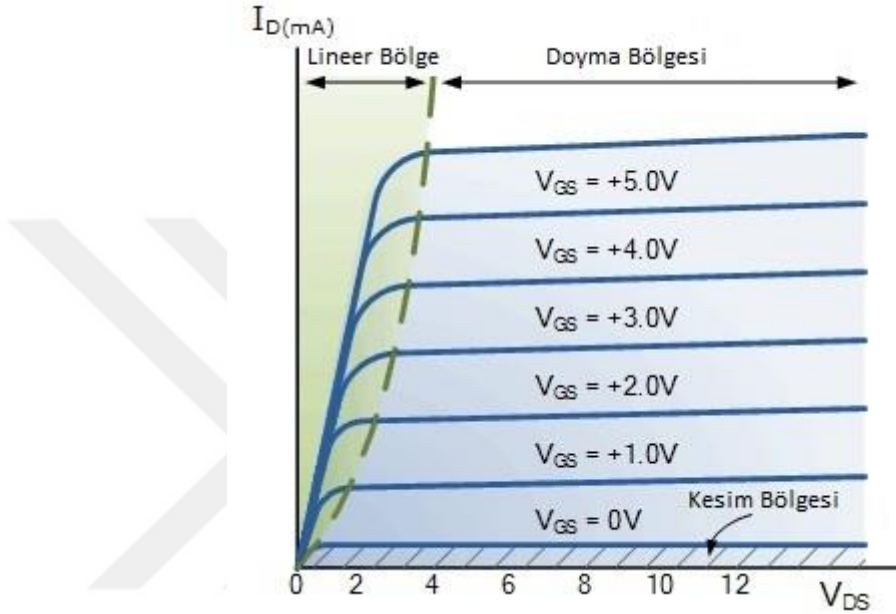
$$I_D = \beta V_{DS} (V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2}) \quad (18)$$

Diğer taraftan doyma bölgesinde I_D V_{DS} geriliminin değişiminden pek etkilenmez. NMOS tipi düşünüldüğünde geçit ile savak arasındaki gerilimin yani V_{GD} 'nin V_{TH} 'in altına

düşmesiyle doyma bölgesine geçiş yapılır. Başka bir ifadeyle $V_{GS} > V_{TH}$ ve $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ olması durumunda NMOS doyma bölgesinde çalışacaktır. Doyma bölgesinde I_D denklem 19'la hesaplanabilir.

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (19)$$

MOS Tranzistörlere ait I_D - V_{DS} karakteristiği Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 14. MOS Tranzistör akım-gerilim karakteristiği.

MOS Tranzistörün çalışma mantığına göre, V_{GS} geriliminin V_{TH} 'nin altında olması durumunda kanalın oluşmayacağı ve I_D akımının akmayacağı ön görülmektedir. Ancak, bunun tam olarak doğru bir ifade olduğunu söylemek mümkün değildir. NMOS tipi MOS Tranzistör örneklendirildiğinde, $V_{GS} < V_{TH}$ olmak şartıyla uygulanan V_{GS} gerilimine bağlı olarak geçitte n tipi küçük bir bölge oluşacak ve bu bölgeden küçük bir akım akacaktır. Bu akıma sızıntı akımı veya eşik altı akımı denmektedir. Bu akım V_{GS} geriliminin azalmasıyla üstel bir azalış davranışı sergilemektedir.

Monte Carlo Analizi

Monte Carlo Analizi çok büyük sayı setlerinin rasgele örneklenmesi temeline dayalı bir yöntemdir. Bu metotla herhangi bir sorunu çözmek için rasgele sayılar kullanılır ve böylece uygulamalarda yeterli yaklaşıklıkta çözümler üretilebilir. Monte Carlo metodunun en önemli karakteristiği herhangi bir problemin çözümüne ulaşmak için rasgele örnekleme

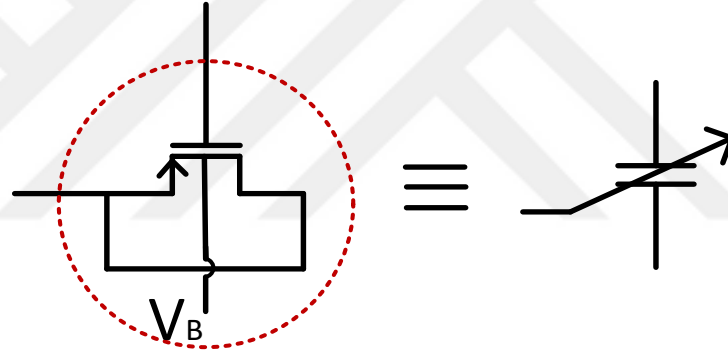
tekniğini kullanmasıdır. Elektrik ve elektronik devrelerin belli başlı kriterler göz önünde bulundurulmasıyla yapılacak Monte Carlo yöntemi, devrelerin tesadüf eseri çalışmadığını ve farklı koşullar altında da çalışabildiğini gösterdiğinden dolayı, devrelerin analizinde başvurulan bir yoldur.



ARAŞTIRMA BULGULARI

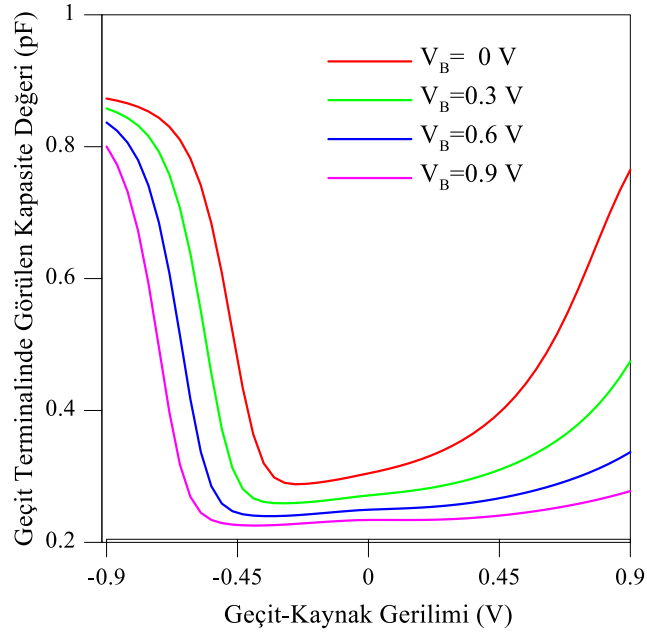
Tasarlanmış olan memkapasitör ve memindüktör devreleri MO-OTA, çarpma devresi ve birkaç pasif devre elemanından oluşmaktadır. Memkapasitör devresi MOS kapasitörün sürülmesiyle tasarlanmıştır. Memindüktör devresi sert anahtarlama yapısına sahiptir. Bütün simülasyon sonuçları Virtuoso Analog Design Environment of Cadence ortamında TSMC 0.18 μm teknolojisi kullanılarak elde edilmiştir. Bütün serimde (layout) $86.21\mu\text{m} \times 34.67\mu\text{m}$ ölçüleri kullanılmıştır.

Memkapasitör taklit devresi tasarımında kullanılan MO-OTA'nın gerilim girişleri ve akım çıkışları mevcuttur. Ayrıca gerilim kontrollü kapasitör ihtiyacı olduğu için drain (kanal) ve source (kaynak) uçları Şekil 15'teki gibi birleştirilmiş bir tranzistör kullanılmıştır. Bu durumda memkapasitör taklit devresi için önemli bir özellik olan ve devrenin kullanışlılık düzeyini bir üst seviyeye çıkaran devreyi elektronik olarak kontrol edebilme özelliği elde edilmiş olur.



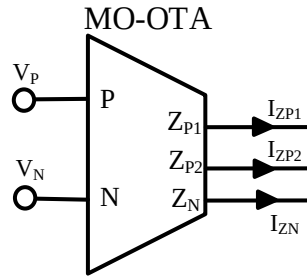
Şekil 15. Değişken kapasitör olarak kullanılan MOS tranzistör (Tiebout 2003).

Farklı bulk (gövde) gerilimleri altında geçit-kaynak gerilimi -0.9 V ile 0.9 V arasında sürülünce kapasitör değeri Şekil 16. Gövde ve geçit-kaynak gerilimlerine bağlı kapasite değişimi Şekil 16'da görülebileceği gibi 0.2 pF ile 0.9 pF arasında değer almaktadır. Eğer MOS tranzistör bu aralık içinde sürülebilirse değişken kapasitör olarak kullanabileceğimiz bir MOS tranzistör elde edilmiş olur.

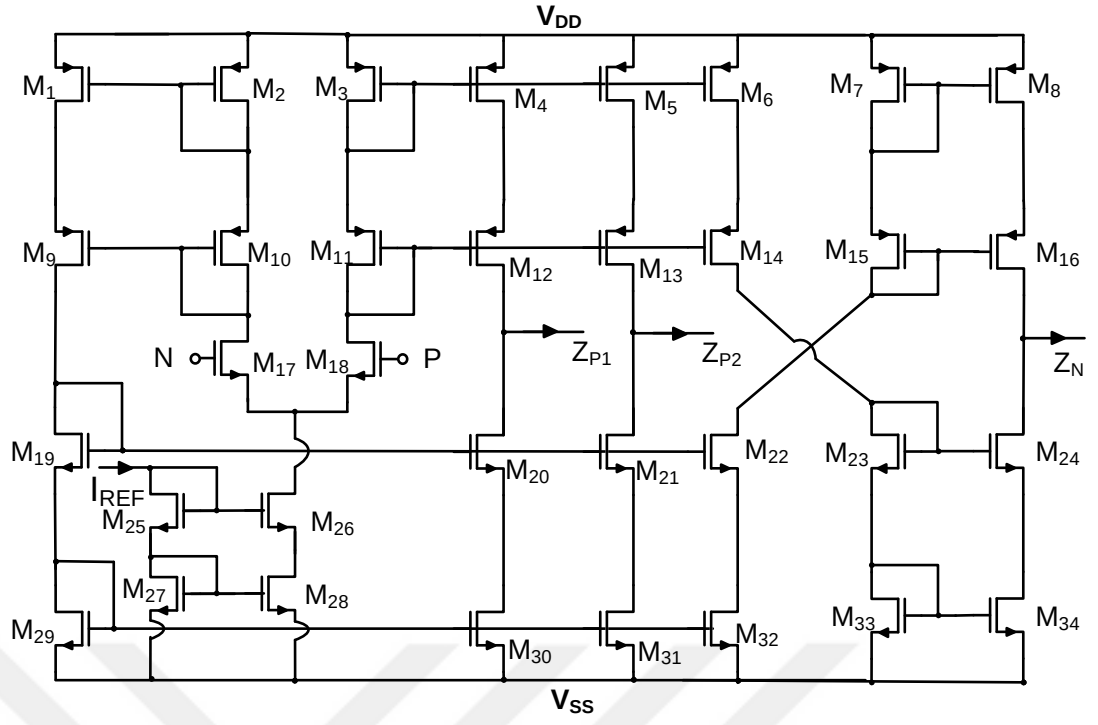


Şekil 16. Gövde ve geçit-kaynak gerilimlerine bağlı kapasite değişimi.

Memkapasitör ve memindüktör devreleri tasarlanırken kullanılan MO-OTA sayesinde çıkıştan alınan terminalleri devrede kullanmanın önemli bir anlamı vardır. Şekil 17’de sembolü ve Şekil 18’de görülen iç yapısının blok yapıda olmasından dolayı devre tasarımını kolaylaştırır.



Şekil 17. Çok Çıkışlı OTA blok diyagramı.



Şekil 18. Çok çıkışlı OTA iç yapısı (Demir et al. 2021).

MO-OTA'ya ait gerilim akım ilişkisi;

$$(V_{IN} - V_K) \times g_m = I = I_{ZP1} = I_{ZP2} = -I_{ZN} \quad (20)$$

Şeklindedir.

Kullanılan pasif devre elemanları üzerindeki gerilimler;

$$V_{R1} = I \times R_1, V_C = \frac{1}{C} \int Idt, V_S = -I \times R_2 \quad (21)$$

Olarak elde edilir.

Çarpma devresi için kullanılacak gerilim;

$$V_K = V_{R1} \times V_C = I \times R_1 \times \frac{1}{C} \int Idt \quad (22)$$

Şeklinde ortaya çıkar.

Eğer eşitlik (20) tekrar düzenlenirse;

$$\left[V_{IN} - I \times R_1 \times \frac{1}{C} \int Idt \right] \times g_m = I \quad (23)$$

Denklemini elde edilir.

I akımının $-\frac{V_s}{R_2}$ olduğu da bilinerek I görülen yerlere $-\frac{V_s}{R_2}$ yazılır ve

$$\left[V_{IN} - \frac{V_s}{R_2} \times R_1 \times \frac{1}{C} \int \frac{V_s}{R_2} dt \right] \times g_m = -\frac{V_s}{R_2} \quad (24)$$

Denklemine ulaşılır. Böylece giriş gerilimi;

$$V_{IN} = \frac{R_1}{C \times R_2^2} V_s \times \int V_s dt - \frac{V_s}{R_2 \times g_m} \quad (25)$$

Gibi formülize edilir.

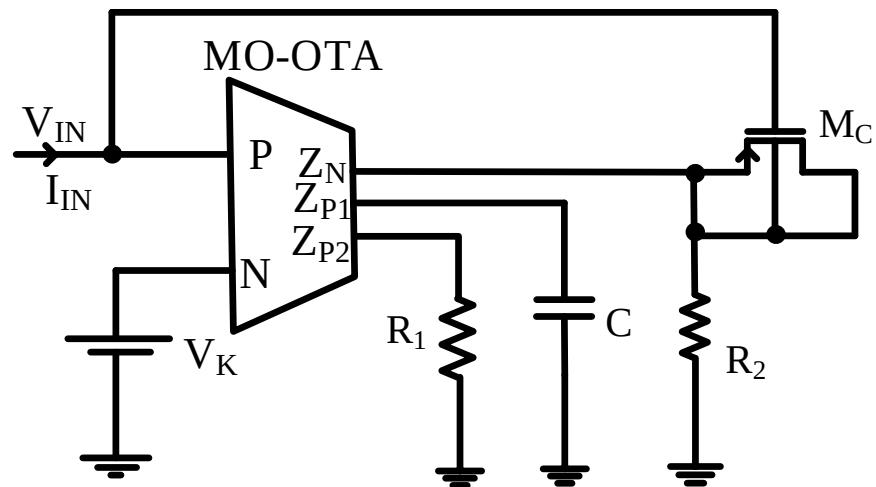
V_s 'nin integrali ϕ_s olarak kabul edilir MOS tranzistörü sürececek olan gerilim

$$V_s = \left[\phi_s \frac{R_1}{C \times R_2^2} - \frac{1}{R_2 \times g_m} \right]^{-1} \times V_{IN} \quad (26)$$

Olarak sadeleştirilebilir.

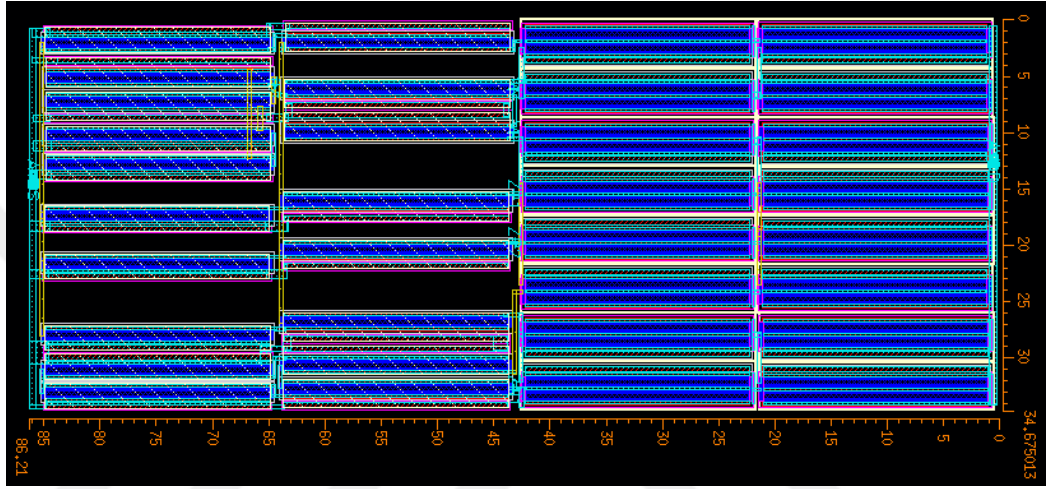
Tasarlanan Memkapasitör Devresi

Bir adet MO-OTA, bir adet çarpma devresi bir adet tranzistör ve 3 adet topraklı pasif devre elemanının kullanıldığı memkapasitör taklit devresi Şekil 19'da gösterilmiştir. Bu devrede çarpma devresindeki bileşenler R_1 direnci ve C kondansatörüdür. Çarpma devresinin devrede kullanılma amacı devreye lineer olmayan özellik katmaktır. R_2 direnci MO-OTA'nın çıkışında oluşan akımını gerilime çevirerek MOS kapasitörün sürülmesine olanak tanır. Ayrıca C kondansatörü devrenin stabil olarak çalışmasını mümkün kılar.



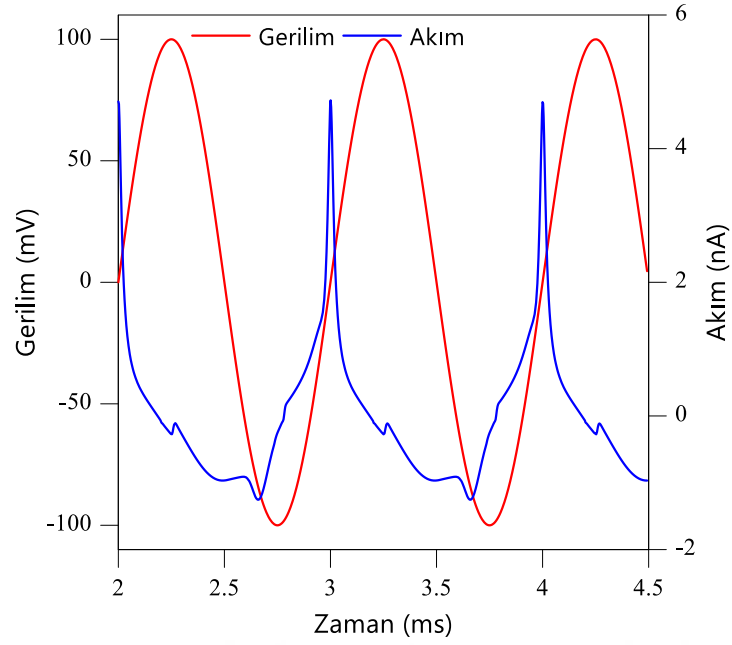
Şekil 19. Tasarlanan memkapasitör devresi.

Tasarlanan memkapasitör devresi Virtuoso Analog Design Environment of Cadence programıyla gerçekleştirilmiştir. DC gerilimi $V_{DD}=0.9V$ ve $V_{SS}=-0.9V$ ve $I_{REF}=1\mu A$ olarak seçilmiştir. $86.21\mu m \times 34.67\mu m$ boyutunda olan MO-OTA'nın serim(layout) çıktısı **Şekil 20**'de görülmektedir. MO-OTA içinde yer alan bütün NMOS tranzistörlerde en boy oranı $20\mu m / 0.7\mu m$, PMOS tranzistörlerde $40\mu m / 0.7\mu m$ olarak belirlenmiştir. Pasif devre elemanları $R_1=50k\Omega$, $R_2=1M\Omega$, $C=100pF$ ve M_C tranzistörün en boy oranı $100\mu m/1\mu m$ olarak ayarlanmıştır.



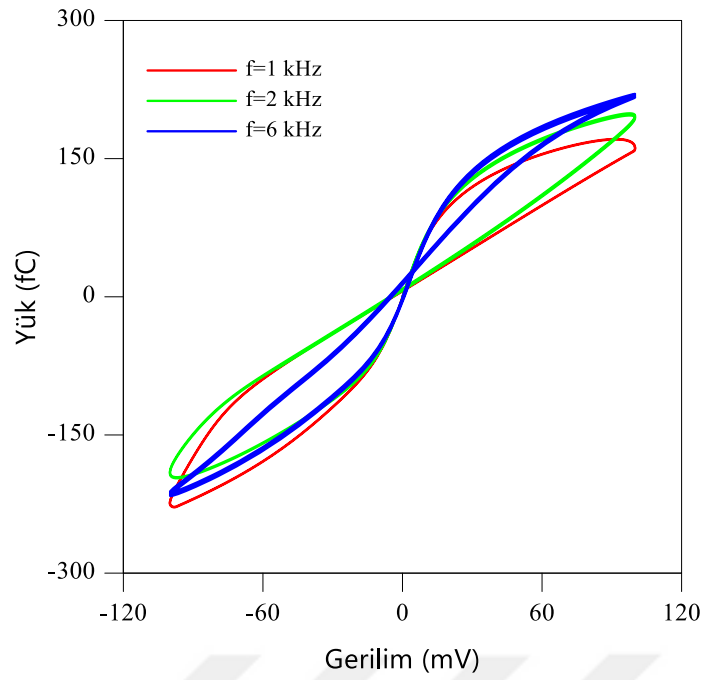
Şekil 20. MO-OTA serimi (layout).

Memkapasitör devresinin analizleri yapılırken öncelikle memkapasitör devresindeki gerilim ve akımın zamana bağlı değişimi incelenmelidir. Bu yüzden tasarlanan devreye 1 kHz frekansında 100 mV gerilimi uygulanmıştır. Memkapasitör devresine uygulanan sinüzoidal giriş gerilimi ve akımı grafiği Şekil 21'deki gibi elde edilmiştir. Grafiğe bakıldığında akım ve gerilimin memkapasitör devresinden beklenildiği gibi davrandığı yani akım ve gerilim arasında faz farkı olduğu gözlemlenmiştir.



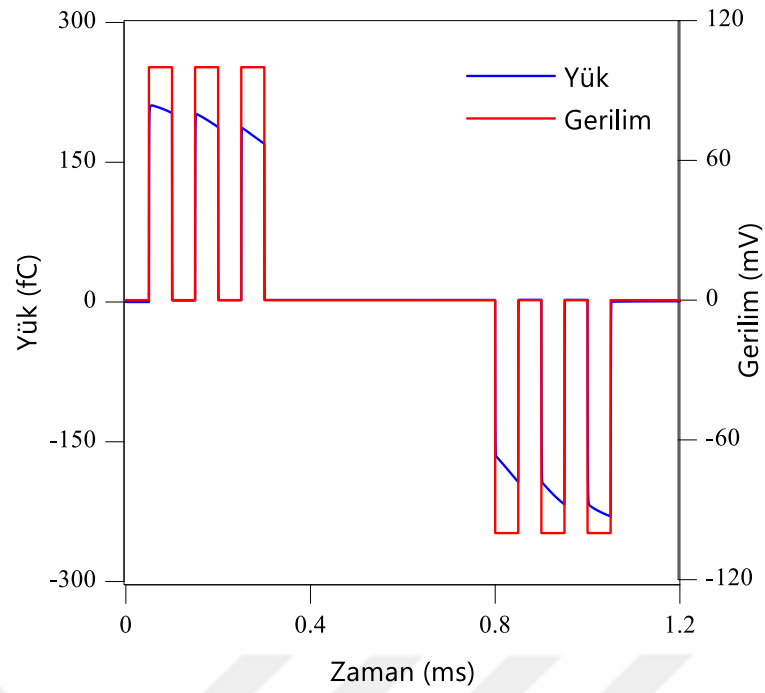
Şekil 21. Memkapasitör devresindeki gerilim-zaman ve akım-zaman grafiği.

Memkapasitör devresinin analizi gerilim-yük ilişkisini inceleyerek devam ettirilmelidir. Farklı frekanslarda histerezis eğrisinin ideal memkapasitör gibi elde edilmesi, memkapasitör taklit devresinin doğru çalıştığını göstermesi açısından önemli bir kriter olarak karşımıza çıkmaktadır. Tasarlanan devrenin 1 kHz, 2 kHz ve 6 kHz frekanslarında yine 100mV genlikle test edilmesi sonucunda yük ve gerilim arasındaki grafiğin ideal bir histerezis eğrisi olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 22’de belirtilen grafikte devredeki bileşenlerin değişimiyle ayarlanabilen ve kontrol edilebilen bir devre olduğu ortadadır. Örneğin, eğer kondansatör daha küçük değerde seçilirse devre yüksek frekansta çalışır. Diğer bileşenlerin yüksek veya düşük değerlerde olması da kontrol edilebilirliği sağlar.



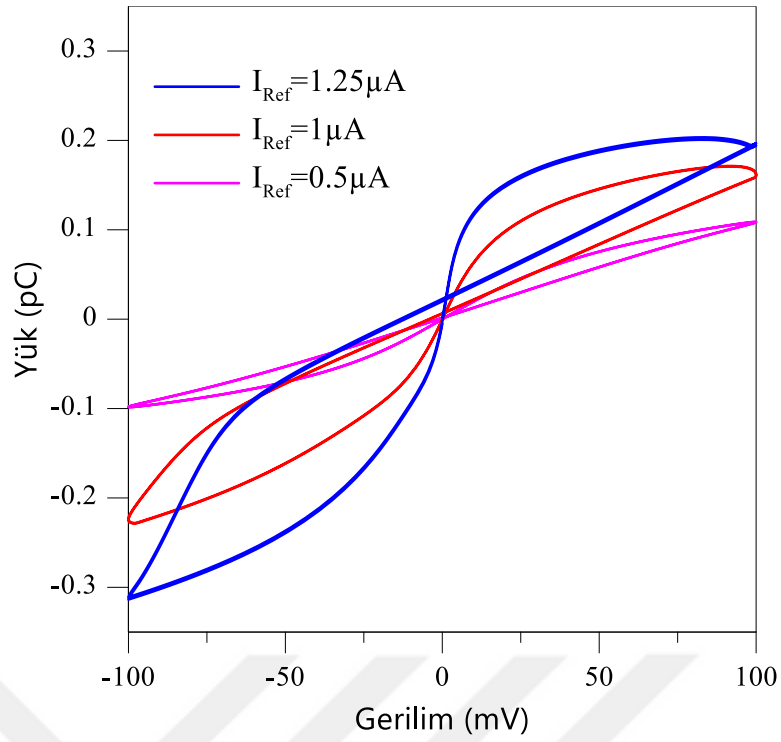
Şekil 22. Yük-gerilim karakteristiği.

Memkapasitörün sahip olması gereken bir diğer özellik yükün değişen gerilimle birlikte hafızada tutulmasıdır. Yani uygulanan gerilim boyunca belli bir değerde olan yükün, gerilimin kesilmesi ve bir süre sonra tekrar uygulanması halinde en son bulunduğu değerden yoluna devam etmesi gerekmektedir. Bunun test edilmesi için devreye 3 adet pozitif 3 adet negatif olmak üzere 6 adet kare dalga uygulanır ve yükün aynı belli aralıklarda nasıl davrandığı gözlenir. Şekil 23'te açıkça görüldüğü üzere memkapasitör devresi hafızalı eleman gibi davranmakta olup bir önceki değerini unutmadan çalışmaktadır.



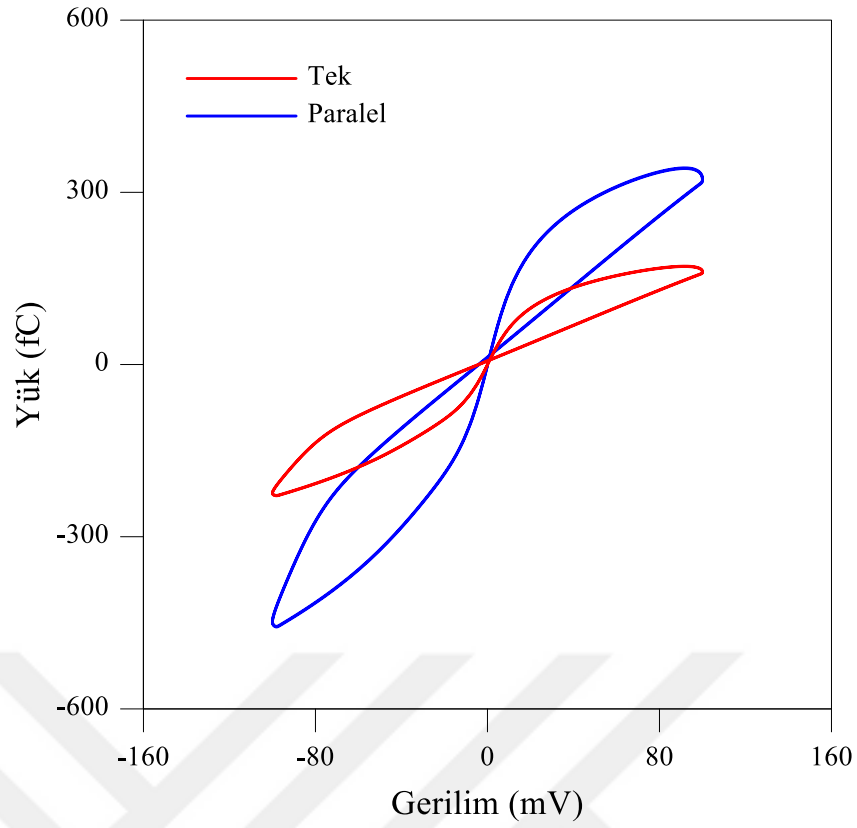
Şekil 23. Memkapasitör hafıza testi.

Elektronik olarak kontrol edilebilme memkapasitör devresinde olması gereken önemli özelliklerden biridir. MO-OTA'nın kutuplama (bias) akımı sayesinde memkapasitöre bu davranış kazandırılabilir. Kutuplama (bias) akımının devreye nasıl etki ettiğini göstermesi için farklı akımlarda analiz yapılmıştır. $0.5\mu\text{A}$, $1\mu\text{A}$ ve $1.25\mu\text{A}$ olarak seçilen akımların küçük değer daha dar büyük değerde daha geniş bir histerezis eğrisi olarak kendini göstermektedir. Şekil 24'teki grafik okunduğunda yükün farklı akım değerlerine göre değiştiği görülmektedir.



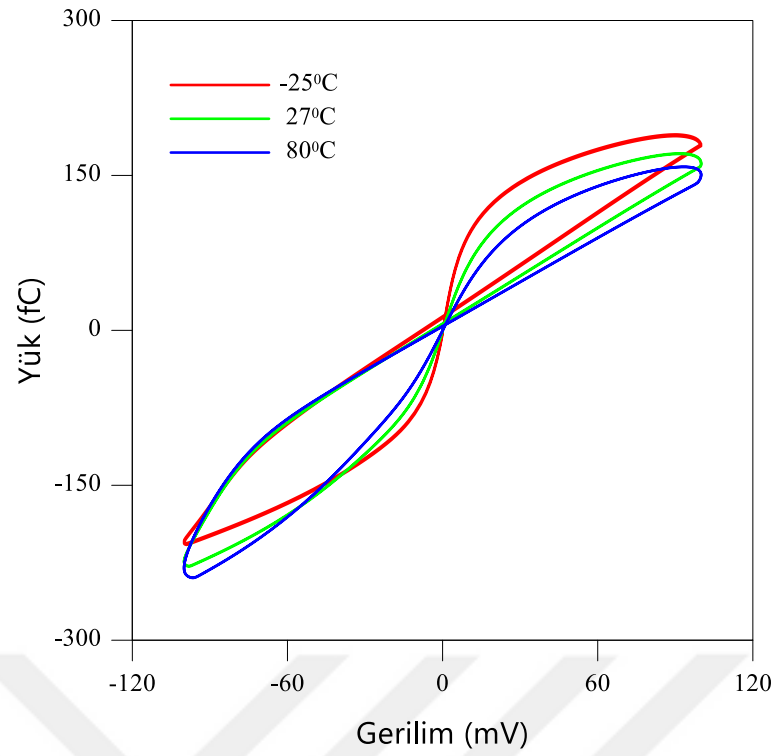
Şekil 24. Kutuplama akımına bağlı olarak değişen yük-gerilim karakteristiği.

Aynı giriş gerilimine bağlı olarak $q=C*V$ temel denkleminde de anlaşılabacağı üzere kapasite değeri artarsa yük de artmış olur. Bu bağlamda memkapasitörlerin hem tek başına hem de paralel bağlanması sonucunda Şekil 25'teki performansları incelendiğinde paralel bağlı memkapasitörlerin sığaları arttığından dolayı daha fazla yük bulunmaktadır. Bu durum memkapasitörün kapasitelerde olduğu gibi çalıştığını göstermektedir.



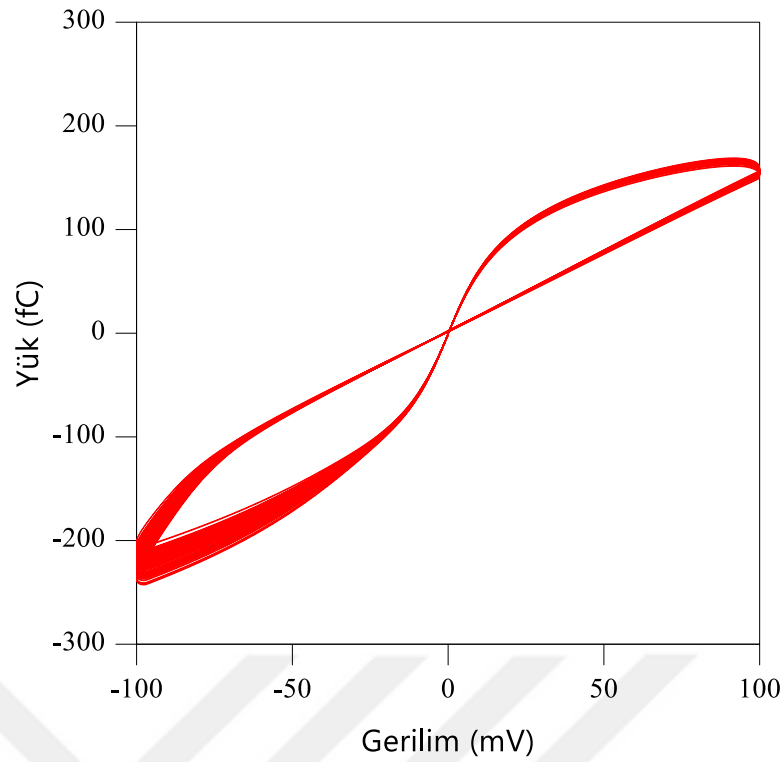
Şekil 25. Memkapasitörlerin bağlanma durumuna bağlı yük-gerilim karakteristiği.

Sıcaklık devre elemanlarının çalışmasını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Dolayısıyla aktif ve pasif devre elemanlarının sıcaklığa bağlı olarak stabil çalışmaya devam edebilmesi devreye artı özellik kazandırır. Memkapasitör devresinin farklı sıcaklık değerleri altında nasıl bir performansla çalıştığını incelemek ve devrenin kendi özelliklerini kaybetmeden farklı sıcaklıklarda çalışıp çalışmadığını araştırmak gerekmektedir. Bundan dolayı -25°C , 27°C ve 80°C olmak üzere 3 farklı sıcaklık değerinde memkapasitör devresi test edilmiştir. Şekil 26'da görüldüğü gibi 3 farklı sıcaklık değerinde de histerezis eğrisi ideal memkapasitör davranışı sergilemektedir.



Şekil 26. Farklı sıcaklık değerlerinde yük-gerilim karakteristiği.

Memkapasitör devresinin sınanmasında da Monte Carlo tekniğinin kullanılması devrenin doğru çalışmasını test eden önemli bir analiz olarak kendini göstermektedir. Bu durumdan dolayı Monte Carlo tekniği ile devre test edilmiş olup memkapasitör devresinin yük-gerilim grafiği Virtuoso Analog Design Environment of Cadence programı aracılığıyla teknolojik parametreler ve boyutlardaki uyumsuzluk koşulları gözetilerek Şekil 27'deki gibi elde edilmiştir. Grafik okunduğunda histerezis eğrisinin memkapasitör histerezis eğrisine uygun bir şekilde ortaya çıktığı anlaşılabılır.



Şekil 27. Memkapasitör devresine ait Monte Carlo Analizi.

Tasarlanan memkapasitör devresinin daha önce akademisyenler ve/veya araştırmacılar tarafından tasarlanmış olan memkapasitör taklit devreleri ile karşılaştırma durumu Tablo 2’de gösterilmiştir. Bu tablodan da anlaşılacağı gibi tez çalışmasında tasarlanan devrede diğer çalışmalara nazaran daha az aktif ve pasif devre elemanı kullanılmıştır. Ayrıca devrenin topraklı olması, memristör kullanımına yer verilmemesi ve elektronik olarak kontrol edilebiliyor olması bu devrenin önceki devrelere göre çok daha iyi bir yerde olduğunu göstermektedir. Özetle tasarlanan devre 2 aktif devre elemanı, 3 pasif devre elemanı ve bir adet PMOS tranzistör kullanılarak oluşturulmuş olup sadece bir akım kaynağı kullanılarak elektronik olarak kontrol edilebilme özelliğine sahiptir.

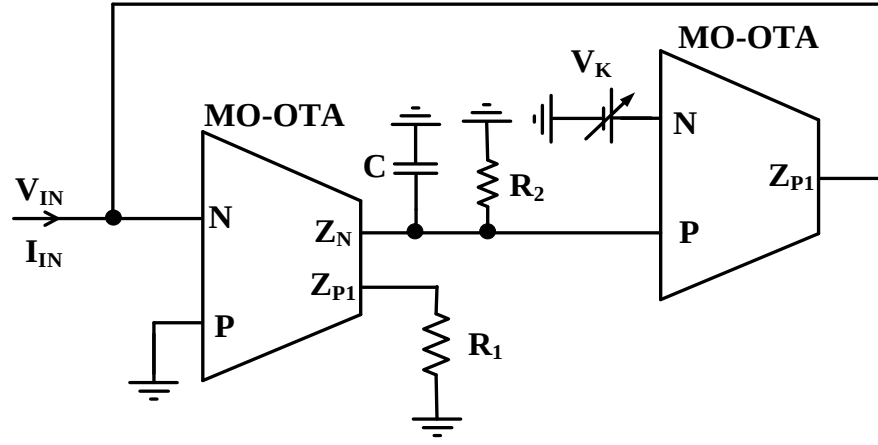
Tablo 2. Memkapasitör Devresinin Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması

Önceki Çalışmalar	Aktif Eleman Sayısı	Yüzen (Floating) Eleman Sayısı	Topraklı Eleman Sayısı	Frekans	Topraklı Olma Durumu	Memristör Kullanımı	Elektronik Olarak Kontrol Edilebilme
(Q. Zhao et al. 2019)	5	6	1	8 Hz	Yüzen	Hayır	Hayır
(Yuan, Li, et al. 2019)	5	13	3	50 Hz	Topraklı	Hayır	Hayır
(Fouda and Radwan 2012)	4	3	1	10 Hz	Topraklı	Hayır	Evet
(Yu V Pershin and Di Ventra 2011)	5	2	1	NA	Yüzen	Evet	Hayır
(Yuan and Li 2019)	3	8	1	80 Hz	Yüzen	Hayır	Hayır
(Yesil and Babacan 2020)	2	2	3	500 Hz	Topraklı	Hayır	Evet
Tasarlanan Memkapasitör Devresi	2	1*	3	1 kHz	Topraklı	Hayır	Evet

*Kapasitör olarak çalışan PMOS tranzistör Yüzen (Floating) devre elemanı olarak kabul edilmiştir.

Tasarlanan Memindüktör Devresi

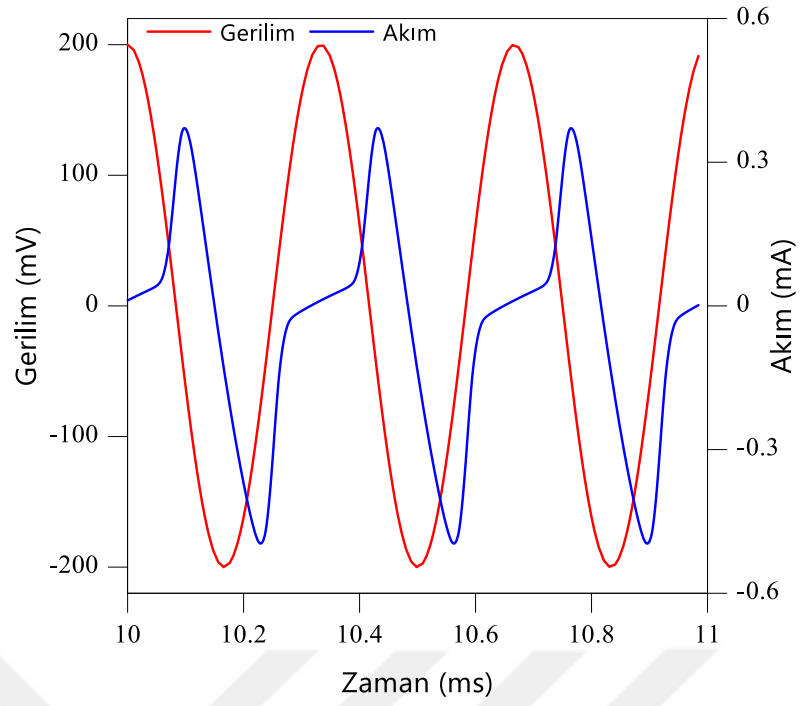
Bu tez çalışmasında tasarlanan bir diğer taklit devresi memindüktör taklit devresi olarak kendini göstermektedir. Temelde elektronik olarak kontrol edilebilen MO-OTA kullanılarak meydana getirilen memindüktör devresi Şekil 28’de görüldüğü üzere iki MO-OTA, bir çarpma devresi bir topraklı kondansatör ve iki topraklı dirençten oluşmaktadır. Lineer olmama özelliği olması için devrede yer alan çarpma devresinin bileşenleri R_1 direnci ve C kondansatörüdür. Bu çarpma devresi ikinci MO-OTA’yı sürmek için kullanılmaktadır. Sürülen ikinci MO-OTA birinci MO-OTA’nın negatif girişine bağlanmıştır.



Şekil 28. Tasarlanan memindüktör devresi.

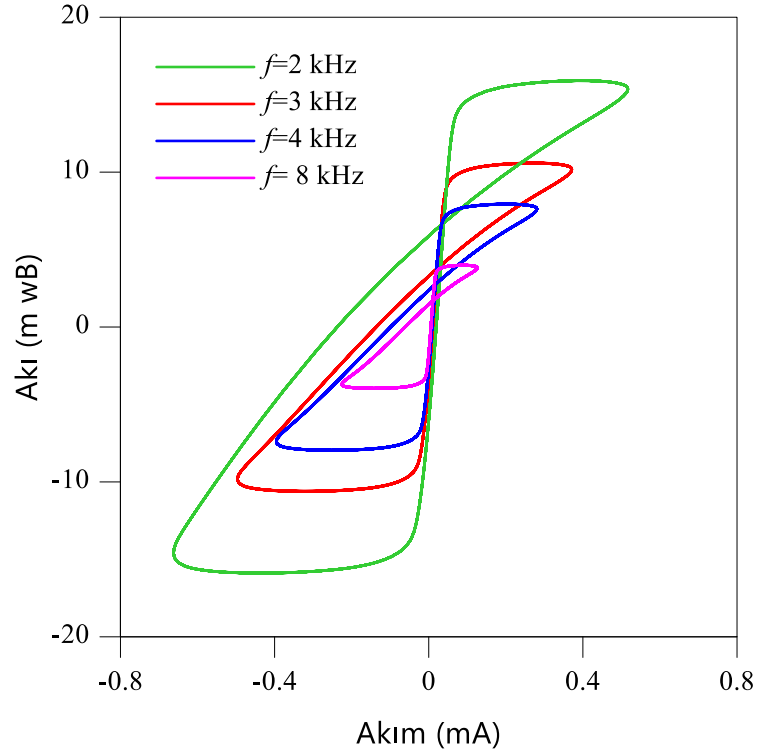
Tasarlanan memindüktör devresi Virtuoso Analog Design Environment of Cadence programıyla gerçekleştirilmiştir. DC gerilimi $V_{DD}=0.9V$ ve $V_{SS}=-0.9V$ ve $I_{REF}=1\mu A$ olarak seçilmiştir. $86.21\mu m \times 34.67\mu m$ boyutunda olan MO-OTA'nın serim(layout) çıktısı Şekil 20'de görülmektedir. MO-OTA içinde yer alan bütün NMOS tranzistörlerde en boy oranı $20\mu m / 0.7\mu m$, PMOS tranzistörlerde $40\mu m / 0.7\mu m$ olarak belirlenmiştir. Pasif devre elemanları $R_1=R_2=1M\Omega$ ve $C=3nF$ olarak ayarlanmıştır. Bu değerler, tasarlanan memindüktör devresinin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi halinde makul değerler olduğu için seçilmiştir. Bu değerler devrenin stabil çalışmasına yardımcı olacaktır.

Şekil 29'de görülebileceği üzere akım ile gerilim arasında tıpkı indüktörlerde olduğu gibi faz kayması meydana gelmektedir. 3 kHz frekansında 200 mV genlikle uygulanan gerilim altında akım ile gerilimin zamana bağlı değişimi indüktörlerle kıyaslandığında beklenildiği gibi benzer bir şekilde ortaya çıkmıştır.



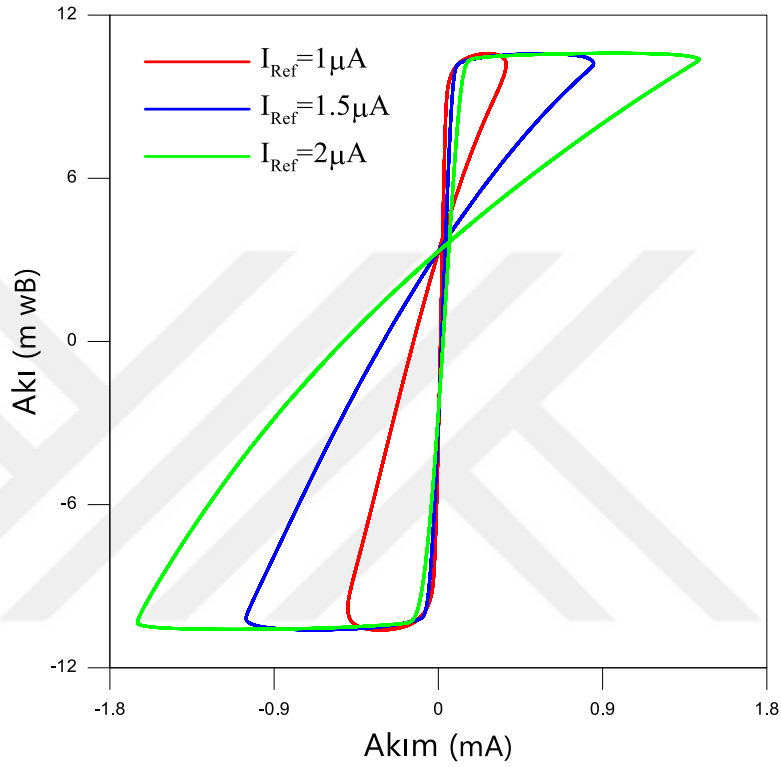
Şekil 29. Memindüktör devresindeki gerilim-zaman ve akım-zaman grafiği.

Akı ile akım arasındaki histerezis eğrisinin farklı frekanslarda da ideal bir şekilde ortaya çıkması memindüktör olarak çalıştığını gösteren önemli bir özelliktir. Şekil 30'a bakıldığında 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz ve 8 kHz'de çalıştırılan memindüktör devresine ait histerezis eğrisi beklenildiği gibi oluşmuştur.



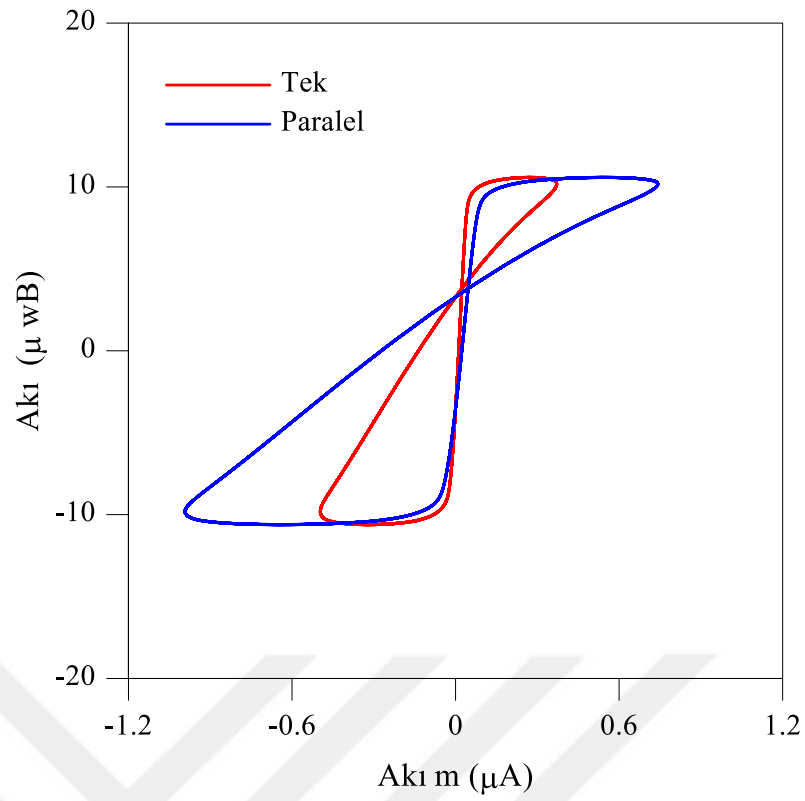
Şekil 30. Akı-akım karakteristiği.

MO-OTA'nın geçiş iletkenliği bir akım kaynağıyla kontrol edilebilir. Bu bilgi ışığında memindüktörün kontrol edilmesi kutuplama (bias) akımının kontrol edilmesiyle mümkün olur. Analiz yaparken bu kutuplama (bias) akımının devrenin nasıl çalıştığını görmek ve bu davranış gözlemlemek gerekir. şekil 31'deki gibi $1\mu\text{A}$, $1.5\mu\text{A}$ ve $2\mu\text{A}$ değerlerinde seçilen akımların memindüktör devresindeki histerezis eğrisinin çalışmasına etkisi incelenmiştir. MO-OTA'daki kutuplama (bias) akımının artması memindüktördeki akımın da artmasına sebebiyet vermiştir.



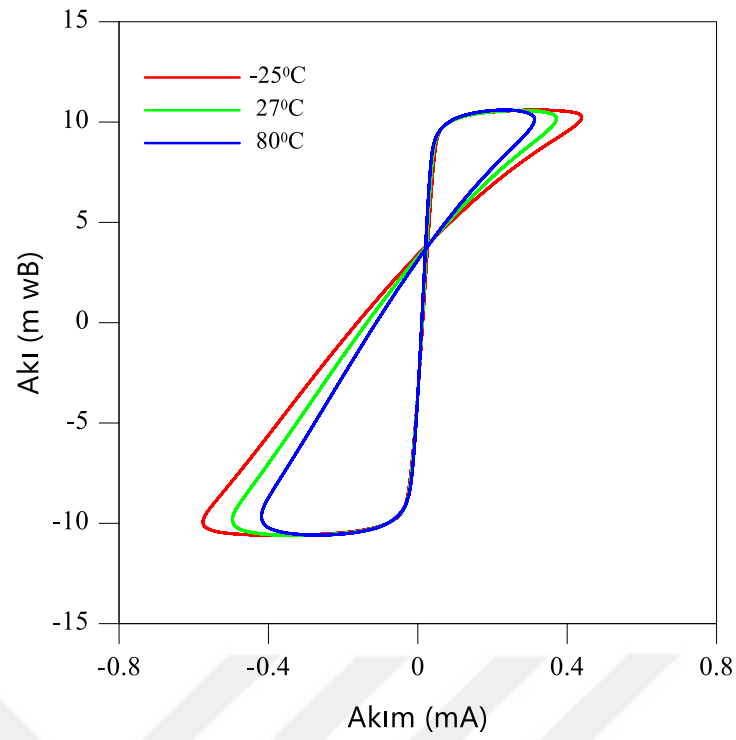
şekil 31. Kutuplama akımına bağlı olarak değişen akı-akım karakteristiği.

Aynı giriş gerilimine bağlı olarak $\varphi = L \cdot i$ temel denkleminde de anlaşılacağı üzere indüktörün değerinin azalışına bağlı olarak sabit akım altında akı azalır, sabit akı altında akım artar. Bu bağlamda paralel bağlanan memindüktörün değeri düşer ve memindüktörlerin hem tek başına hem de paralel bağlanması durumlarında şekil 32'de gösterilen performansları incelendiği zaman memindüktörün indüktörlerde olduğu gibi çalıştığı gözlemlenmektedir.



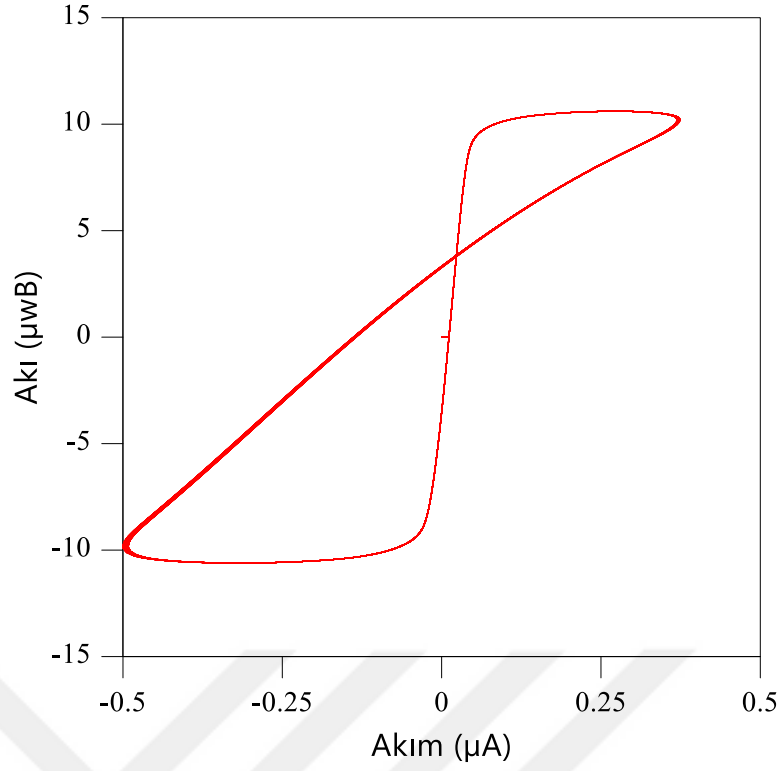
Şekil 32. Meminktörlerin bağlanma durumuna bağlı akı-akım karakteristiği.

Aktif ve pasif devre elemanlarının çalışması malzeme özelliğinden kaynaklı olarak sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir. Bu elemanlardan oluştuğu için memindüktör taklit devresinin performansı sıcaklıkla değişebilir. Bu sebeplerden dolayı farklı sıcaklıklar altında memindüktör devresinin nasıl çalıştığını gözlemlemek gerekir. Bu ilişki -25°C , 27°C ve 80°C gibi 3 farklı sıcaklık değerinde incelenmiştir ve Şekil 33'teki histerezis eğrisi ortaya çıkmıştır ve devrenin farklı sıcaklıklarda herhangi bir bozulmaya uğramadığı gibi iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 33. Farklı sıcaklık değerlerinde akı-akım karakteristiği.

Monte Carlo analizi memindüktör taklit devresine ilişkin yapılan simülasyon çalışmalarında yine önemli bir yere sahiptir. Devreye uygulanan rasgele değerlerle birlikte devrenin histerezis eğrisi formu yine ideal bir şekilde oluşmuştur. Şekil 34'te akı ile akım arasındaki grafiğin memindüktör gibi tepki verdiği net bir biçimde ortaya konmuştur.



Şekil 34. Memindüktör devresine ait Monte Carlo Analizi.

Daha önce memindüktörler ile ilgili çalışma yapmış olan akademisyenler, araştırmacılar ve bilim insanları birçok memindüktör devresi tasarlamışlardır. Bu tez çalışmasında üçer aktif ve pasif devre elemanı ile az sayıda devre elemanı kullanılarak tasarlanmış olan memindüktör taklit devresi, elektronik olarak kontrol edilebildiği için muadillerinin bir adım önüne geçmeyi başarabilmiştir.

Tablo 3'te önceki tasarımlarla çeşitli açılardan karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. Memindüktör Devresinin Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması

Önceki Çalışmalar	Aktif Eleman Sayısı	Yüzen (Floating) Eleman Sayısı	Topraklı Eleman Sayısı	Frekans	Topraklı Olma Durumu	Memristör Kullanımı	Elektronik Olarak Kontrol Edilebilme
(Sozen and Cam 2020)	6	4	5	200 Hz	Topraklı	Hayır	Evet
(Sah et al. 2014)	7	15	-	40 Hz	Yüzen	Hayır	Hayır
(Yu V Pershin and Di Ventra 2011)	4	2	1	Bilgi yok	Yüzen	Evet	Hayır
(Yuriy V Pershin and Di Ventra 2010)	1	4	-	Bilgi yok	Topraklı	Evet	Hayır
(Yu et al. 2019)	4	10	4	14 kHz	Topraklı	Hayır	Hayır
(Yuan and Li 2019)	8	15	-	80 Hz	Yüzen	Hayır	Evet
Tasarlanan Memkapasitör Devresi	3	-	3	3 kHz	Topraklı	Hayır	Evet

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yüksek dereceli ve lineer olmayan pasif devre elemanları olan memkapasitör ve memindüktör taklit devre elemanları tasarlanmış, benzetimi yapılmış ve davranışları incelenmiştir. Simülasyon analizlerinde zamana bağlı olarak gerilim, akım değişimleri; farklı frekans değerlerinde memkapasitör için gerilim-yük memindüktör için akım-akı karakteristikleri; MO-OTA'nın kutuplama akımına bağlı olarak memkapasitör için gerilim-yük memindüktör için akım-akı karakteristikleri; değişen sıcaklık değerlerine bağlı olarak memkapasitör için gerilim-yük memindüktör için akım-akı karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Tüm bu analizlere ilaveten Monte-Carlo analizi hem memkapasitör hem de memindüktör devresi için yapılmış ve gerilim-yük ve akım-akı histerezis eğrileri çizilmiştir. Tasarlanan devrelerde aktif devre elemanı olarak MO-OTA kullanılmıştır. Memkapasitör ve memindüktör devreleri fiziksel olarak gerçeklenmeye uygun şekilde tasarlanmıştır ve Virtuoso Analog Design Environment of Cadence programı kullanılarak serimi(layout) çıkarılmıştır. Kullanılan pasif devre elemanlarının değerleri yine fiziksel üretim için uygun olarak seçilmiştir. Devreler memristör kullanılmadan tasarlanmış olup hem topraklı yapıya sahiptir hem de görece az sayıda pasif ve aktif devre elemanı kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca, memkapasitör ve memindüktör taklit devreleri elektronik olarak kontrol edilebilme özelliğine sahiptir. Teorik olarak memkapasitör ve memindüktörlerin karakteristikleri ve özellikleri incelenmiştir. İdeal memkapasitör ve memindüktörlerin çalışma şekilleri ve temel denklemleri göz önüne serilmiştir. Tasarlanan memkapasitör ve memindüktör devreleri teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır ve bu devrelerin ideal memkapasitör ve memindüktör gibi davrandığı gözlemlenmiştir. Yakın gelecekte tasarlanan devrelerin fiziksel olarak gerçeklenmesi ile gerçekleştirilen devrelerin test ve analizlerinin yapılması literatüre olumlu katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasının önemi sadece akademik olmayıp aynı zamanda ticari olarak gelişime açık olan memkapasitörlerin ve memindüktörlerin yer alacağı birçok devre tasarımına ilham vermek, tasarlanacak olan devrelerin analizi ve benzetimine yardımcı olmaktır. Memkapasitör ve memindüktörler yüksek yoğunluklu bellek elemanlarında, sinaps modellerinde ve sensörler gibi birçok alanda kullanılmaya müsait olması beklenmektedir. Memkapasitörler ve memindüktörler herhangi bir harici kaynağa ihtiyaç duymadan yüksek ve değişken depolamalı sistemlerde kilit eleman olarak görev alacaklardır. Memristörler,

memkapasitörler ve memindüktörler analog ve dijital elektroniğin çalışma şeklini değiştirebilirler. İleride yapılacak çalışmalarda memkapasitörlerin ve memindüktörlerin fiziksel olarak üretilmesi ve bu üretime dayalı olarak daha efektif ve daha stabil çalışacak olan modelleri tasarlanması ön görülmektedir. Tasarlanan bu modellerin testleri ve davranışları incelenecektir. Hiç şüphe yok ki gelecek yıllarda gelişmiş malzeme laboratuvarı ve gelişen teknolojiyle birlikte memkapasitör ve memindüktörler birçok alanda kullanılacak ve araştırmacılar için yeni alanlar doğmuş olacaktır. Memkapasitör ve memindüktörlerin üretilmesiyle beraber artık taklit devrelerin nasıl çalıştığı değil, müdahil olduğu devreye ne kattığı ve ne derece etkili bir eleman olduğu tartışılacaktır. Şüphesiz bu elemanların elektronik devrelerde sıkça kullanılacak olması memkapasitör ve memindüktörlerin değerini arttıracaktır.

Sonuç olarak bu tez çalışması literatürdeki memkapasitör ile memindüktör taklit devreleri eksikliğini bir nebze gidermekte ve de ileride tasarlanacak memkapasitör ile memindüktör taklit devrelerin tasarımında yol göstermesi beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbas, H., Abbas, Y., Truong, S. N., Min, K. S., Park, M. R., Cho, J., Yoon, T. S., and Kang, C. J. ,2017. A memristor crossbar array of titanium oxide for non-volatile memory and neuromorphic applications. *Semiconductor Science and Technology*, 32(6).
- Acar, C., and Ozoguz, S. ,1999. *A new versatile building block : current differencing buffered amplifier suitable for analog signal-processing filters*. 30, 157–160.
- Arık, S. ,2015. Memristör Tabanlı Nonlinear Sistem Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Babacan, Y. ,2016. Memristör Tasarımı ve Yeni Uygulamaları. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Babacan, Y., Yesil, A., and Kacar, F. ,2017. Memristor emulator with tunable characteristic and its experimental results. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 81, 99–104.
- Biolek, D, and Biolkova, V. ,2010. Mutator for transforming memristor into memcapacitor. *Electronics Letters*, 46(21), 1428–1429.
- Biolek, Dalibor. ,2003. CDTA – Building Block for Current-Mode Analog Signal Processing. *Proceedings of the ECCTD*, 3, 397–400.
- Çam Taşkiran, Z. G., Sağbaş, M., Ayten, U. E., and Sedef, H. ,2020. A new universal mutator circuit for memcapacitor and meminductor elements. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 119.
- Çelik, B. ,2007. Ota tabanlı devre tasarımı ve multisim simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Chua, L. ,1971. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18(5), 507–519.
- Chua, L. O. ,2003. *Nonlinear Circuit Foundations for Nanodevices , Part I: The Four-Element Torus*. 91(11).
- Chua, L. O. ,2013. If it is pinched it is a memristor. R. Tetzlaff (Ed.) Vol. 9781461490, pp. 17–92.
- Demir, E., Yesil, A., Babacan, Y., and Karacali, T. ,2021. Operational Transconductance

- Amplifier-Based Electronically Controllable Memcapacitor and Meminductor Emulators. *Journal of Circuits, Systems and Computers*.
- Di Ventra, M., Pershin, Y. V., and Chua, L. O. ,2009a. Circuit elements with memory: Memristors, memcapacitors, and meminductors. *Proceedings of the IEEE*, 97(10), 1717–1724.
- Di Ventra, M., Pershin, Y. V., and Chua, L. O. ,2009b. Putting memory into circuit elements: Memristors, memcapacitors, and meminductors. *Proceedings of the IEEE*, 97(8), 1371–1372.
- Di Ventra, M., Pershin, Y. V, and Chua, L. O. ,2009c. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors. *Proceedings of the IEEE*, 97(10), 1717–1724.
- Fabre, A. ,1995. Third generation current conveyor: a new active element. *Electronics Letters*, 31(5), 338–339.
- Fouda, M. E., and Radwan, A. G. ,2012. Charge controlled memristor-less memcapacitor emulator. *Electronics Letters*, 48(23), 1454–1455.
- Gündüzalp, M. ,1982. Memristive Systems and The Use of Memristors in Modeling. Ms Thesis, Faculty of Engineering for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, İstanbul.
- Guo, M., Yang, R., Zhang, M., Liu, R., Zhu, Y., and Dou, G. ,2021. *A Novel Memcapacitor and Its Application in a Chaotic Circuit*. <https://europepmc.org/article/ppr/ppr292479>
- Jameel, S. ,2013. Computer Aided Design of The Biquadratic Filters Using Memristors. Ms Thesis, University of Gaziantep Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gaziantep.
- Kim, H., Sah, M. P., Yang, C., Cho, S., and Chua, L. O. ,2012. Memristor emulator for memristor circuit applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 59(10), 2422–2431.
- Konal, M., and Kacar, F. ,2020. Electronically tunable meminductor based on OTA. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 126(February), 153391.
- Kurtdemir, A. ,2019. Nonlinear Sürükleme Hızlı Memristör Modellerini Kullanarak Testere Dişi Sinyal Kaynağının Modellenmesi ve Benzetimi. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Ma, X., Mou, J., Liu, J., Ma, C., Yang, F., and Zhao, X. ,2020. A novel simple chaotic circuit

- based on memristor–memcapacitor. *Nonlinear Dynamics*, 100(3), 2859–2876.
- MADSAR, M., BABACAN, Y., and ÇİÇEK, K. ,2020. FCS Based Memcapacitor Emulator Circuit. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(1), 112–117.
- Martinez-Rincon, J., Di Ventra, M., and Pershin, Y. V. ,2010. Solid-state memcapacitive system with negative and diverging capacitance. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 81(19), 1–7.
- Özdilli, Ş. S. ,2019. CMOS Tabanlı Memristör Okuma Devresi Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Parlar, İ. ,2018. Memristör Devrelerin Aktif ve Pasif Filtreler Üzerindeki Etkilerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Pershin, Yu V, and Di Ventra, M. ,2011. Emulation of floating memcapacitors and meminductors using current conveyors. *Electronics Letters*, 47(4), 243–244.
- Pershin, Yuriy V, and Di Ventra, M. ,2010. Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors. *Electronics Letters*, 46(7), 517–518.
- Qi, A., Muhammad, K., and Liu, S. ,2021. Dynamical Analysis of the Meminductor-based Chaotic System with Hidden Attractor. *Fractals*, 29(5), 1–16.
- Raj, A., Kumar, K., and Kumar, P. ,2021. CMOS realization of OTA based tunable grounded meminductor. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, December 2020.
- Romero, F. J., Escudero, M., Medina-Garcia, A., Morales, D. P., and Rodriguez, N. ,2020. Meminductor emulator based on a modified antoniou’s gyrator circuit. *Electronics (Switzerland)*, 9(9), 1–10.
- Romero, F. J., Medina-Garcia, A., Escudero, M., Morales, D. P., and Rodriguez, N. ,2021. Design and implementation of a floating meminductor emulator upon Riordan gyrator. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 133(November 2020), 153671.
- Sah, M. P., Budhathoki, R. K., Yang, C., and Kim, H. ,2014. Charge controlled meminductor emulator. *Journal of Semiconductor Technology And Science*, 14(6), 750–754.
- Sánchez-López, C., Carrasco-Aguilar, M. A., and Muñoz-Montero, C. ,2015. A 16 Hz–160 kHz memristor emulator circuit. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 69(9), 1208–1219.

- Şevgin, E. ,2016. Kesir Dereceli Memristörler ile Uyarlamalı Denetleyici Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Smith, K. C., and Sedra, A. ,1968. The current conveyor—A new circuit building block. *Proceedings of the IEEE*, 56(8), 1368–1369.
- Smith, K. C., and Sedra, A. ,1970. second generation current conveyor and its applications. *Iee Transactions on Circuit Theory*, 17(1), 132–134.
- Solak, A. ,2017. Memristör için Parça-Parça Doğrusal Model Tasarımı ve Bu Modelin Memristör Tabanlı Filtrelere Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Sözen, H. ,2016. New Possibilities in Electronic Circuit Design Using Memristor. Ph. D. Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
- Sozen, H., and Cam, U. ,2020. A Novel Floating/Grounded Meminductor Emulator. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2050247.
- Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R., and Williams, R. S. ,2008. The missing memristor found. *Nature*, 453(7191), 80–83.
- Taşkıran, Z. G. Ç. ,2018. Memristör Simülatörü Ve Uygulamaları. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Thongdit, P., Chunchay, S., and Angkeaw, K. ,2020. A Meminductor Emulator Based on Flux-controlled Model Using Field Programmable Analog Array. 17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2020, 51–54.
- Tiebout, M. ,2003. Voltage-controlled capacitor.
- Tulumbaci, F., Yener, S. C., and Mutlu, R. ,2020. Stored Energy and the Charging Energy Efficiency in a Memcapacitor Circuit. *Proceedings of the 6th World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science*, 1–8.
- Uygur, A. ,2006. CDTA elemanı tasarımı ve uygulama devrelerinin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wang, X. Y., Fitch, A. L., Iu, H. H. C., and Qi, W. G. ,2012. Design of a memcapacitor emulator based on a memristor. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, 376(4), 394–399.
- Widrow, B., Pierce, W. H., and Angell, J. B. ,1961. Birth, Life, and Death in Microelectronic

- Systems. IRE Transactions on Military Electronics, MIL-5(3), 191–201.
- Yakopcic, C., Taha, T. M., Subramanyam, G., Pino, R. E., and Rogers, S. ,2011. A memristor device model. IEEE Electron Device Letters, 32(10), 1436–1438.
- Yang, J. J., Strukov, D. B., and Stewart, D. R. ,2013. Memristive devices for computing. Nature Nanotechnology, 8(1), 13–24.
- Yener, Ş. Ç. ,2014. New Opportunities in Analog Circuit Design Provided by Memristor. Ph. D. Thesis, Istanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, İstanbul.
- Yesil, A. ,2018. A new grounded memristor emulator based on MOSFET-C. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 91, 143–149.
- Yeşil, A. ,2016. Aktif Filtre Devrelerinin İyileştirilmesi İçin Yeni Olanaklar. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yesil, A., and Babacan, Y. ,2020. Electronically Controllable Memcapacitor Circuit with Experimental Results. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 7747(c), 1–1.
- Yildirim, M., and Kacar, F. ,2020. Chaotic circuit with OTA based memristor on image cryptology. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 127(October), 153490.
- Yu, D., Liang, Y., Iu, H. H. C., and Chua, L. O. ,2014. A universal mutator for transformations among memristor, memcapacitor, and meminductor. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 61(10), 758–762.
- Yu, D., Zhao, X., Sun, T., Iu, H. H. C., and Fernando, T. ,2019. A Simple Floating Mutator for Emulating Memristor, Memcapacitor, and Meminductor. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 67(7), 1334–1338.
- Yuan, F., Deng, Y., Li, Y., and Wang, G. ,2019. The amplitude, frequency and parameter space boosting in a memristor–meminductor-based circuit. Nonlinear Dynamics, 96(1), 389–405.
- Yuan, F., and Li, Y. ,2019. A chaotic circuit constructed by a memristor, a memcapacitor and a meminductor. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 29(10), 101101.
- Yuan, F., Li, Y., Wang, G., Dou, G., and Chen, G. ,2019. Complex dynamics in a memcapacitor-based circuit. Entropy, 21(2), 188.

- Yücel, U. ,2014. Brain Dynamics and Memory Enhancement : Memristor Based Models. Ms Thesis, Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Zhang, G., Wu, F., Hayat, T., and Ma, J. ,2018. Selection of spatial pattern on resonant network of coupled memristor and Josephson junction. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 65, 79–90.
- Zhang, Y., Zhang, X., and Yu, J. ,2009. *Approximated SPICE model for memristor*. 5, 928–931.
- Zhao, L., Fan, Z., Cheng, S., Hong, L., Li, Y., Tian, G., Chen, D., Hou, Z., Qin, M., Zeng, M., Lu, X., Zhou, G., Gao, X., and Liu, J. M. ,2020. An Artificial Optoelectronic Synapse Based on a Photoelectric Memcapacitor. *Advanced Electronic Materials*, 6(2), 1–11.
- Zhao, Q., Wang, C., and Zhang, X. ,2019. A universal emulator for memristor, memcapacitor, and meminductor and its chaotic circuit. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 29(1), 13141.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler
Ad Soyad: Eyyüp DEMİR
Eğitim Bilgileri
Lise: Siirt Atatürk Anadolu Lisesi Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans: Atatürk Üniversitesi
Tezden Üretilmiş Yayınlar
Demir, E., Yesil, A., Babacan, Y., & Karacali, T. (2021). Operational Transconductance Amplifier Based Electronically Controllable Memcapacitor and Meminductor Emulators. <i>Journal of Circuits, Systems and Computers</i> . https://doi.org/10.1142/S0218126621502224 Demir, E., Yesil, A., Babacan, Y., & Karacali, T. (2021). Yüksek Dereceli Pasif Devre Elemanları Memkapasitör ve Memindüktör Üzerine Bir Derleme. CIEA II International Conference On Innovative Engineering Applications, Muş.