

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AKTİF DEVRE ELEMANLARI KULLANILARAK
MEMKAPASİTÖR EMÜLATÖR DEVRESİ TASARIMI**

Müslüm GÜR

Danışman: Doç. Dr. Yunus BABACAN

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

ERZİNCAN

**2021
Her Hakkı Saklıdır.**

ÖZET

Yüksek Lisans

AKTİF DEVRE ELEMANLARI KULLANILARAK MEMKAPASİTÖR EMÜLATÖR DEVRESİ TASARIMI

Müslüm GÜR

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yunus BABACAN

Bu tez çalışmasında, aktif devre elemanları MO-OTA, MOS tranzistörler ve pasif devre elemanları kullanılarak yüzer (floating) memkapasitör emülatör devresi tasarlanmıştır. Literatürde yer alan diğer çalışmalar ile bu tez çalışmasında tasarlanan emülatör devresi çeşitli parametrelerde karşılaştırılmış olup avantaj ve dezavantajları tablo halinde verilmiştir. Önerilen memkapasitör emülatör devresi LT-SPICE benzetim programı kullanılarak tasarlanmıştır. Benzetim çalışmaları LT-SPICE ortamında 0.18 μm teknolojisi kullanılarak gerçekleştirildi. Tasarlanan memkapasitör emülatör devresinin benzetim çalışması sonuçları çeşitli parametrelerde detaylı analizleri yapılarak elde edildi. Bu analizler ideal memkapasitör benzetim sonuçları ile karşılaştırılıp tasarlanan emülatör devresinin memkapasitör özellikleri taşıdığı ve memkapasitör olarak farklı devre uygulamalarında kullanılabileceği kanıtlandı. Tasarlanan memkapasitör emülatör devresinin sonraki çalışmalara referans olabileceği ve daha yüksek dereceli doğrusal olmayan çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2021, 60 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Emülatör, Memkapasitör, MO-OTA, Tam Yüzer(floating)

ABSTRACT

MASTER THESIS

DESIGN OF MECCAPACITOR EMULATOR CIRCUIT USING ACTIVE CIRCUIT ELEMENTS

Müslüm GÜR

Erzincan Binali Yildirim University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc.Prof.Dr.Yunus BABACAN

In this thesis, a floating memcapacitor emulator circuit is designed by using active circuit elements MO-OTA, MOS transistors and passive circuit elements. The simulated circuit designed in this thesis study has been compared with other studies in the literature in various parameters and its advantages and disadvantages are given in a table. The proposed memcapacitor emulation circuit is designed using LTSPICE simulation program. Simulation studies were performed in LTSPICE using 0.18 μm technology. The results of the simulation study of the designed memcapacitor emulator circuit were obtained by making detailed analyzes in various parameters. These analyzes were compared with the ideal memcapacitor simulation results and it was proved that the designed emulator circuit has memcapacitor properties and can be used in different circuit applications as a memcapacitor. It is thought that the designed memcapacitor emulator circuit will be a reference for future studies and contribute to higher order nonlinear studies.

2021, 60 Pages

Keywords: Emulator, Fully Floating, Memcapacitor, MO-OTA

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmada bilgi, deneyim ve desteğini eksik etmeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Yunus BABACAN’a teşekkür ederim. Bu süreçte benden maddi, manevi yardımlarını esirgemeyen ve her zaman yanımda olan çok değerli ve kıymetli aileme en içten şükranlarımı sunarım.

Müslüm GÜR

Aralık, 2021



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ.....	1
2.KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1.Memristif Sistemler	4
2.1.1.Memristör	4
2.1.2. Memindüktör	7
2.1.3.Memkapasitör	9
2.2.Literatürdeki Bazı Memkapasitör Emülatör Devreleri.....	10
2.2.1.Memkapasitörün spice modeli	10
2.2.2.Mevcut elemanlar ile memkapasitör emülatör uygulaması	12
2.2.3.Memkapasitör tabanlı devrede karmaşık dinamikler.....	15
2.2.4.Yük-kontrollü memristörsüz memkapasitör emülatörü.....	18
2.2.5.İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) tabanlı memkapasitör ve memindüktör emülatörü.....	22
2.2.6. Yüzer akım kaynağı (FCS) tabanlı memkapasitör emülatör devresi.....	25
2.2.7.DVCCTA kullanılarak memkapasitör emülatör tasarımı	27
2.2.8.Deneysel sonuçlar ile elektronik olarak kontrol edilebilir memkapasitör devresi.....	29
2.2.9.İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) tabanlı elektronik olarak kontrol edilebilir memkapasitör ve memindüktör emülatörü	30
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1.Direnç	32
3.2.Kondansatör.....	33
3.2.1.Kondansatörün akım-gerilim ilişkisi	34

3.2.2.Kondansatörün enerji depolaması.....	34
3.3.Bobin	35
3.3.1.Bobinin akım-gerilim ilişkisi.....	35
3.4.İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (OTA)	36
3.5.MOS Tranzistör	37
4.ARAŞTIRMA BULGULARI.....	40
5.SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR	57



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. İlk 25 temel devre elemanı	2
Şekil 2.1. Temel devre değişkenleri ve aralarındaki bağıntılar	4
Şekil 2.2. Chua'nın tasarladığı memristör emülatörü.....	5
Şekil 2.3. Memristörün frekansa bağlı akım-gerilim karakteristiği.....	6
Şekil 2.4. Üretilen memristörün taramalı tünelleme mikroskobu ile alınan görüntüsü.....	7
Şekil 2.5. Memindüktör akı-akım karakteristiği	8
Şekil 2.6. Memkapasitör yük-gerilim karakteristiği.....	10
Şekil 2.7. Yük-kontrollü memkapasitörün spice modelinin blok diyagramı	11
Şekil 2.8. Memkapasitör emülatörünün temel konsepti. (a) V_B geriliminin bir fonksiyonu olarak memkapasitansın tersi. (b) Eşdeğer devre	12
Şekil 2.9. Ticari olarak mevcut olan elemanlar ile memkapasitör emülatör mimarisi ...	13
Şekil 2.10. Önerilen memkapasitör emülatörünün farklı frekanslardaki sıkış histerezis döngülerinin deneysel sonuçları.....	15
Şekil 2.11. Önerilen memkapasitör emülatörünün farklı frekanslardaki sıkış histerezis döngülerin benzetim sonuçları	15
Şekil 2.12. Yük-kontrollü memkapasitör eşdeğer devresi	16
Şekil 2.13. Memkapasitörün yük-gerilim karakteristik eğrisi	18
Şekil 2.14. Sırası ile C_0 ve q_0 10^{15} , 100nF, 0,1 μ C değerlerinde k' 'için zaman ve w_0 'a karşılık memkapasitansın($C(t)$) ani değişiminin 3D gösterimi	19
Şekil 2.15. k' için sırası ile C_0 ve V_0 10^{15} , 100nF, 1V değerlerinde memkapasitörün sayısal benzetimi (a) Sinüzoidal giriş sinyali için yük-gerilim eğrisi (b) 10 Hz'deki memkapasitöre ait kapasitans, yük ve gerilim değerlerinin zamana bağlı değişimleri.....	20
Şekil 2.16. Memkapasitör emülatör konsepti (a) V_{FB} karşı giriş kapasitansı (b) Emülatör devresi	20
Şekil 2.17. Önerilen memkapasitör emülatörünün gerçekleştirilmesi (a) V_{FB} karşı giriş kapasitansı (b) Memkapasitörün sembolü	21
Şekil 2.18. Sırası ile R, C_1 , C_2 , V_0 1k Ω , 1 μ F, 1 μ F, 100nF, 1V ve 10Hz değerindeki memkapasitörün PSPICE benzetim sonuçları (a) Sinüzoidal giriş sinyali uygulandığında elde edilen yük-gerilim eğrisi (b) Memkapasitöre ait kapasitans, yük ve gerilim değerlerinin zamana bağlı değişimleri.....	22
Şekil 2.19. İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi tabanlı memkapasitör emülatörü	23

Şekil 2.20. Memkapasitör emülatörü için sinüzoidal giriş sinyali altında benzetim sonuçları(a) Farklı frekanslarda akım-gerilim ilişkisi (b) Memkapasitörün yük ve giriş akımı	24
Şekil 2.21. FCS devresi	25
Şekil 2.22. Memkapasitör emülatör devresi	26
Şekil 2.23. 1,3.5 ve 7 Hz'deki Memkapasitör emülatör histerezis döngüleri	27
Şekil 2.24. DVCCTA devre sembolü	28
Şekil 2.25. Önerilen memkapasitör emülatör devresi	28
Şekil 2.26. Akım taşıyıcı tabanlı memkapasitör devresi	29
Şekil 2.27. Akım taşıyıcı ve işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) tabanlı memkapasitör devresi	30
Şekil 2.28. MO-OTA'nın devre sembolü	31
Şekil 2.29. Tasarlanan memkapasitör devresi	31
Şekil 3.1. Direnç çeşitlerinden bazılarının sembolik gösterimi	32
Şekil 3.2. Tipik bir direncin akım-gerilim karakteristiği	33
Şekil 3.3. Kondansatör çeşitlerinden bazılarının sembolik gösterimi.....	33
Şekil 3.4. Bir kondansatörün akım-gerilim karakteristiği	34
Şekil 3.5. Bobinin fiziksel yapısı.....	35
Şekil 3.6. Bobinin akım-gerilim karakteristiği.....	36
Şekil 3.7. İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendirici (OTA) sembolü	37
Şekil 3.8. N ve P Kanallı MOS Tranzistör.....	38
Şekil 3.9. MOS tranzistör akım-gerilim karakteristiği.....	39
Şekil 4.1. Kapasitör olarak kullanılan MOS tranzistör.....	40
Şekil 4.2. Çok çıkışlı OTA sembolü.....	41
Şekil 4.3. Çok çıkışlı OTA iç yapısı.....	41
Şekil 4.4. Aktif devre elemanları kullanılarak tasarlanan memkapasitör emülatör devresi	43
Şekil 4.5. a) Tasarlanan memkapasitör devresinde akım-gerilimin zamana bağlı değişimi b) yük-gerilim değişim.....	44
Şekil 4.6. Tasarlanan memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.....	45
Şekil 4.7. Farklı frekans değerlerinde memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.....	46
Şekil 4.8. Tasarlanan memkapasitörün her iki taraftan uygulanan darbeye göre hafıza testi.....	47
Şekil 4.9. Farklı R (direnç) değerleri kullanıldığında yükün zamana göre değişimi.....	47
Şekil 4.10. Farklı C (kapasitans) değerleri kullanıldığında yükün zamana göre değişim.....	48

Şekil 4.11. Farklı OTA akımları uygulandığında memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.....	49
Şekil 4.12. Farklı sıcaklıklarda memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.....	50
Şekil 4.13. Farklı MOS boyutlarında (W/L) memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi	50
Şekil 4.14. Farklı kapasitans ve frekans değerlerinde memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi. (a) $C=3\text{nF}$, $f=20\text{kHz}$ (b) $C=6\text{nF}$, $f=10\text{kHz}$ (c) $C=12\text{nF}$, $f=5\text{kHz}$	51
Şekil 4.15. Memkapasitörün fourier transfer formu yük genliği.....	52
Şekil 4.16. Memkapasitörün fourier transfer formu akım genliği.....	52
Şekil 4.17. (a) Önce pozitif sonra negatif gerilimin uygulanması (b) Önce negatif sonra pozitif gerilimin uygulanması.....	53
Şekil 4.18. Memkapasitör devresine ait STDP değişimi.....	53

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Temel pasif devre elemanlarının dereceleri.....	2
Tablo 4.1. MOS Tranzistörlerde kullanılan parametreler.....	42
Tablo 4.2. Tasarlanan memkapasitör devresinde devre elemanlarının değerleri.....	44
Tablo 4. 3. Tasarlanan Memkapasitör devresinin önceki çalışmalarla karşılaştırılması...	54



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

A	Amper
C	Kondansatör
Cox	Oksit kapasitesi
g_m	Geçiş iletkenliği
Hz	Hertz
HP	Hawlett-Packard
i	Akım
I_D	Savaktan Akan Akım
L	İndüktör
M	Memristör
M_C	Memkapasitör
M_L	Memindüktör
Pt	Platin
R	Direnç
t	Zaman
V	Gerilim
V_{DS}	Savak-Kaynak Gerilimi
V_{GS}	Geçit-Kaynak Gerilimi
V_{TH}	Eşik Gerilimi
W/L	MOS tranzistörün kanal genişliğinin kanal uzunluğuna oranı
$^{\circ}C$	Celcius
q	Yük
ρ	Akının Zamana Göre İntegrali
σ	Yükün Zamana Göre İntegrali
φ	Akı

Kısaltmalar

CCII	Second Generation Current Conveyor (2. Nesil Akım Taşıyıcı)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken)
DVCCTA	Difference Voltage Current Conveyor Transconductance Amplifier (Gerilim Farkı Alan Akım Taşıyıcı Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi)
FCS	Floating Current Source (Yüzer Akım Kaynağı)
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
OTA	Operational Transconductance Amplifier (İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi)
TiO2	Titanyum dioksit

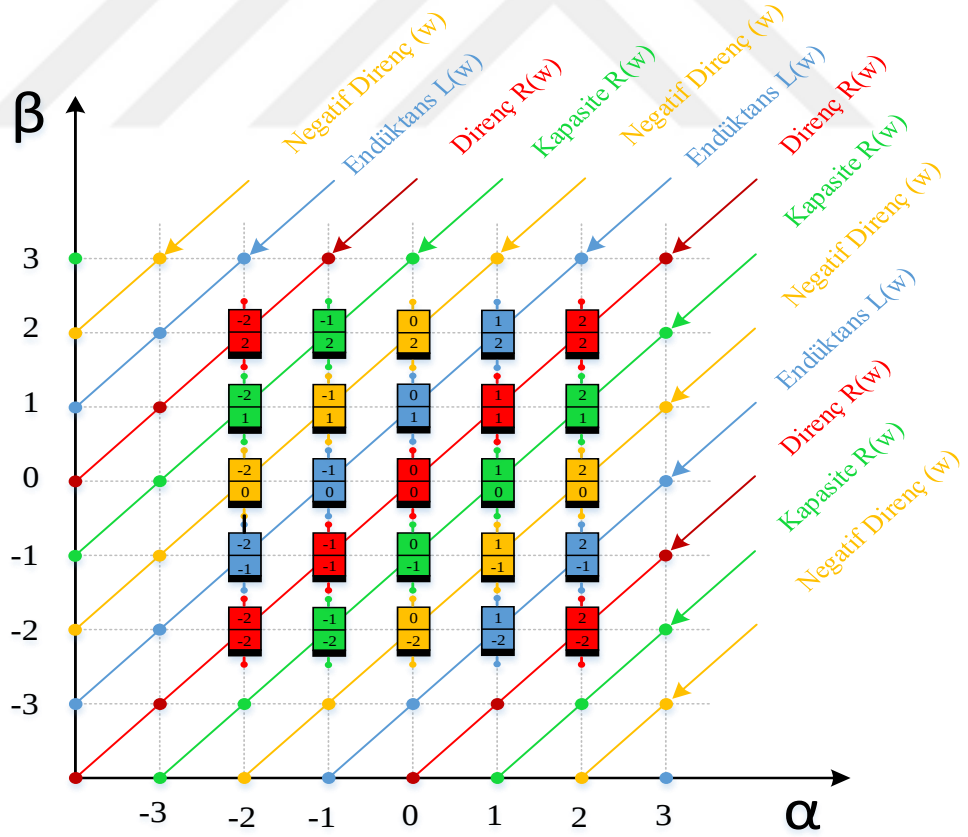
1. GİRİŞ

Elektronik devrelerin tasarımında hem pasif hem de aktif devre elemanları kullanılmaktadır. İlk olarak pasif devre elemanları düşünüldüğünde akla direnç, kondansatör ve bobin gelmektedir. Bu üç devre elemanı hemen hemen tüm elektronik devrelerde kullanılmaktadır. Temel büyüklüklerin arasındaki ilişkiyi fiziksel bir eleman olarak göstermektedir. Direnç; akım ile gerilim arasındaki ilişkiyi, kondansatör; gerilim ile yük arasındaki ilişkiyi, bobin; akım ile akı arasındaki ilişkiyi fiziksel olarak göstermektedir. Dört temel büyüklük olarak (gerilim-akım-yük-akı), arasında simetriden kaynaklanan fiziksel bir ilişki vardır. Ancak akı ve yük arasında da fiziksel bir ilişkinin olması gerektiği Kaliforniya (Berkeley) Üniversitesi'nden Dr. Leon Chua 1971 ve 1976 yıllarında yayınladığı makalelerde bu olaydan bahsederek yeni bir devre elemanı olması gerektiğini ifade etmiştir. Aynı zamanda Chua bu devre elemanına ait matematiksel ifadeleri göstermiş ve memory resistor (hafızalı direnç)'ün kısaltması olan memristör elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi temsil eden iki uçlu pasif devre elemanı olarak isimlendirmiştir (Chua, 1971; Chua ve Kang, 1976).

Chua'nın bu çalışmaları o zamanda ileri teknolojinin noksanlığından dolayı gerektiği şekilde bilim dünyasında ilgi görmemiştir. Hewlett Packard (HP) Firmasının araştırma ekibinin 2008 yılında memristörü fiziksel olarak gerçekleştirmesine kadar memristör üzerine ciddi çalışmalar bulunmamaktaydı (Snider vd., 2008). Bu çalışmanın ortaya koyulmasından sonra alana ilgi artmış, bilim insanları tarafından birçok çalışma ortaya koyulmuştur. Memristörün fiziksel olarak üretilmesi elektrik-elektronik devre tasarımlarında yeni imkânlar sunmuş ve memristör kullanılarak birçok çalışma ortaya koyulmuştur (Babacan vd., 2017; Biolek vd., 2010; Ventra vd., 2009). Chua devre elemanlarını türev ve integralleri ile mertebelenirerek daha fazla devre elemanı olabileceğinden bahsetmiştir. Şekil 1.1'de 25 tane temel devre elemanının türev ve integral derecelerine göre gösterilmiştir (Chua, 2003). Akım ve Gerilimin integral mertebelerine göre temel devre elemanları çıkarılabilir. Bu pasif temel devre elemanları α ve β değerlerine göre hangi elemanı ifade ettikleri Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Temel Pasif Devre Elemanlarının Dereceleri

Pasif Devre Elemanları	α Değeri	β Değeri	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	$v^{(-2)}, i^{(-1)}$



Şekil 1.1. İlk 25 temel devre elemanı (Chua,2003).

Direnç hafıza özelliği olmayan lineer bir devre elemanı olarak tanımlanırsa, memristör hafıza özelliği olan lineer olmayan bir tür direnç olarak tanımlanabilir. Aynı şekilde diğer elemanlarda hafızalı kapasitör ve hafızalı indüktör olarak tanımlanabilir. Di Ventra ve arkadaşları 2009 yılında memristör dışında hafızalı kapasitörler ve indüktörler hakkında çalışma yapmışlar ve bu elemanları memkapasitör ve memindüktör olarak adlandırmışlardır. (Ventra vd., 2009). Bu elemanların ilişkisini kurduğu iki temel değişken arasında sinüzoidal giriş sinyali uygulandığında genellikle histerezis bir ilişki bulunur. Memristör için akım-gerilim, memkapasitör için yük-gerilim ve memindüktör için akım-akı arasındaki ilişkidir. Bu elemanlar öğrenme, bilgi depolama, düşük güç tüketimi yüksek adaptiflik gibi özellikleri sayesinde devre tasarımlarında büyük avantajlar sağlamaktadırlar. (Chua,2013). Memkapasitörler piyasada ayrık devre elemanı olarak kolay bir şekilde bulunana kadar memkapasitör gibi davranan emülatör devreleri büyük önem arz etmektedir. Bu emülatör devreleri elektronik devrelerde kullanılarak birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Doğrusal olmayan bir çalışma şekline sahip olmaları ve öğrenme kabiliyetlerinin üst seviyede olmaları memristif sistemler üzerine çalışmaların artacağını göstermektedir. Memristif sistemlerin kullanılabileceği öngörülen bazı uygulamalar; yapay zekâ, giyilebilir teknoloji ve biyolojik taklit devreleri gibi bazı yapılarda kullanılabileceğini göstermektedir. Hâlihazırda memristif sistemlerin emülatör devreleri; kaotik devrelere, nöromorfik devrelere, şarj pompası, filtre devreler ve sinir hücrelerini taklit gibi bazı yapılara uygulanmaktadır (Babacan vd., 2016; Wang vd., 2016; Yuan vd., 2017; Esraa vd.,2017; Sozen ve Cam,2013; Yifan vd.,2017; Ruxin vd.,2020).

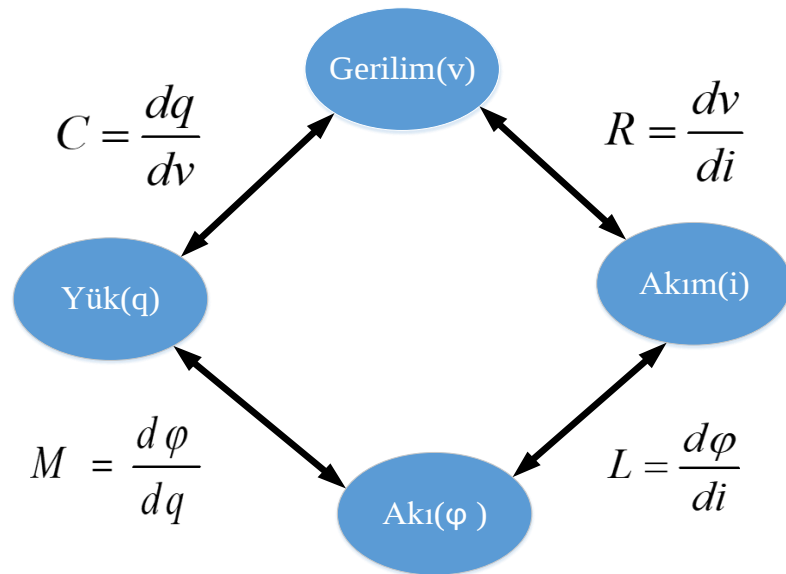
Bu çalışmada, ilk olarak ideal memkapasitörü en yakın gerçeklikte taklit edebilen devre tasarımı yapılmıştır. LTSPICE programı kullanılarak devre tasarlanmış ve gerekli benzetimleri yapılmıştır. Bununla birlikte memkapasitörün çalışma mantığı ve benzetim sonuçları ortaya çıkarılmıştır. Tasarlanan memkapasitörün yüzen uçlu(floating) ve basit bir yapıya sahip olması literatürdeki diğer memkapasitör çalışmalarına kıyasla büyük bir avantaja sahip olduğu ortaya koyulmuştur.

2.KAYNAK ÖZETLERİ

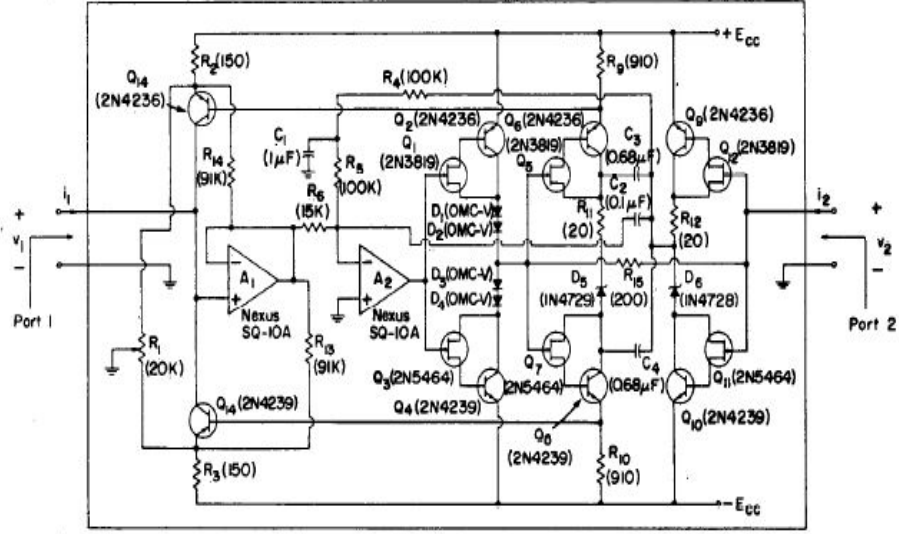
2.1.Memristif Sistemler

2.1.1.Memristör

Elektrik-elektronik devre teorilerinde kullanılan dört temel devre değişkeni bulunmaktadır. Bunlar; akım (i), gerilim (v), elektriksel yük (q) ve manyetik akıdır (ϕ). Temel pasif devre elemanları da bu değişkenlerin aralarındaki bağıntılardan meydana gelmektedir. Bu temel bağıntılar Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Yük ile gerilim arasındaki ilişkiden kondansatör ($q = C * v$), akım ile gerilim arasındaki ilişkiden direnç ($v = i * R$), akı ile akım arasındaki ilişkiden bobin ($\phi = L * i$) türetilmiştir. Chua, bu dört temel devre değişkeni arasındaki elektriksel yük ile manyetik akı arasındaki bağıntıyı tanımlamış ve bu elemanı da doğrusal olmayan pasif devre elemanı (memory+resistor) memristör olarak adlandırmıştır (Chua, 1971). 1971 yılında yayınlanan makalesinde iki tane işlemsel yükselteç(opamp), 6 diyot, 10 direnç, 4 kondansatör, 14 tranzistör ve bir tane potansiyometreden oluşan bir memristör devre modeli sunmuştur. Bu devre memristörün temel bağıntısını ifade ettiği için memristör özelliği taşımaktadır. Ancak devrede çok fazla aktif ve pasif eleman kullanılması ve devrenin karmaşık olması emülatör devresinin dezavantajlı olmasına neden olmaktadır. Şekil 2.2’de Chua’nın önerdiği memristör emülatör devre modeli verilmiştir.



Şekil 2.1. Temel devre değişkenleri ve aralarındaki bağıntılar.

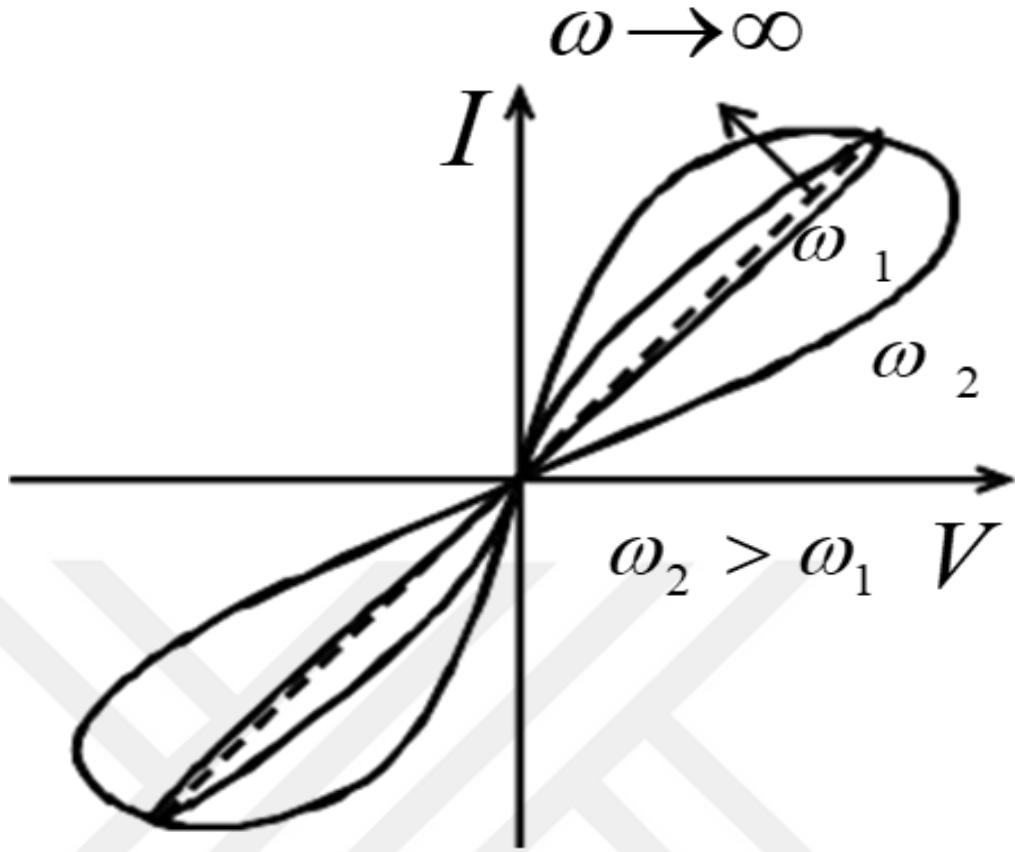


Şekil 2. 2. Chua'nın tasarladığı memristör emülatör devresi (Chua, 1971).

Chua ve Kang tarafından 1976 yılında yapılan çalışmada memristör hakkında daha detaylı bilgiler verilmiştir (Chua ve Kang, 1976). Şekil 2.3'te gösterilen memristörün akım-gerilim karakteristiğinin histerezis eğrisi ilk defa bu çalışmada yer almaktadır. Ayrıca bu çalışmada artan frekansla memristörün akım-gerilim karakteristiğinin doğrusal bir direncin akım-gerilim karakteristiğine benzediğinden bahsedilmektedir. Bu karakteristiğe göre memristörün devreye uygulanan frekans değerine bağlı olarak iki farklı direnç değeri arasında salınım yapan bir histerezis eğriye sahip olduğu Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Chua'nın 1980 yılındaki başka bir çalışmasında, cihaz modellemesinde yararlı olan bazı temel kavramlara memristör elemanını da dâhil ederek, temel yaklaşım-fiziksel yaklaşım ve kara kutu yaklaşımı sonuçlarını ve tekniklerini ortaya koymuştur (Chua, 1980). Memristörün matematiksel ifadeleri aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

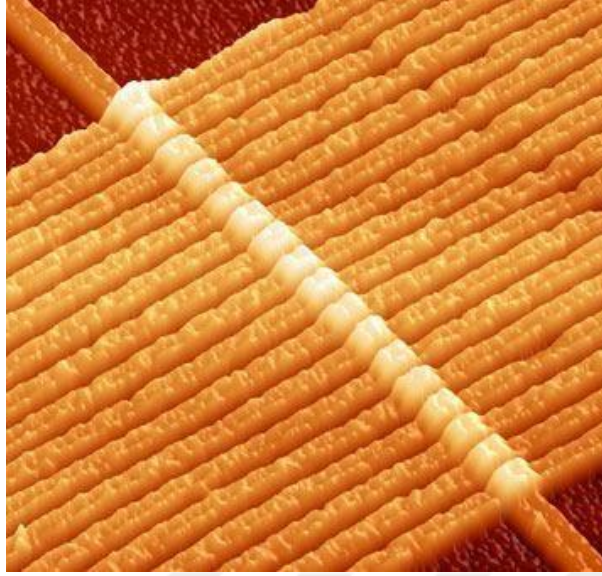
$$M(q) = \frac{d\phi}{dq} \quad (2.1)$$

$$M(q(t)) = \frac{\frac{d\phi}{dq}}{\frac{dq}{dt}} = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (2.2)$$



Şekil 2.3. Memristörün frekansa bağlı akım-gerilim karakteristiği (Chua ve Kang, 1976).

2008 yılında Hewlett Packard (HP) Laboratuvarı'ndan bir grup araştırmacı memristörü fiziksel olarak gerçekleştirdiler (Strukov vd., 2008). Fiziksel olarak gerçekleştirilen bu pasif devre elemanı iki platin (Pt) tabaka arasında yer alan saf ve katkılanmış titanyum dioksitten (TiO_2) meydana gelmektedir. TiO_2 yarıiletken bir malzemedir ve saf halde direnci oldukça yüksektir. Böylelikle TiO_2 direncini düşürmek için oksijen atomlarıyla katkılanmıştır. Bunun sonucunda memristörün akım-gerilim karakteristiğinde mevcut olan düşük ve yüksek direnç değerleri ortaya konmuştur. Şekil 2.4'te bu çalışmada bahsedilen memristörün nano boyuttaki hali gösterilmiştir. Memristörün HP laboratuvarlarında somut olarak modellenmesinin ardından birçok bilim insanı bu konu üzerine yoğunlaşmış, farklı modellemeler tasarlamış ve bu tasarımları farklı devrelere uygulanan çalışmalar sunmuşlardır (Nithya ve Paramasivam, 2020; Wang vd., 2009; Kim vd., 2012; Yener vd., 2014; Babacan, 2016).



Şekil 2.4. Üretilen memristörün taramalı tünelleme mikroskobu ile alınan görüntüsü (Strukov vd., 2008).

2.1.2. Memindüktör

Memindüktör, memristif sisteminin akı-akım değişkenleri arasındaki bağıntıdan teşekkül eden pasif devre elemanıdır. Bu nedenle akı ve akım arasında ortaya çıkan karakteristik özellik memindüktör histerezis eğrisini meydana getirir. Bu eğri Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Memristör emülatör devreleri tasarlanması ve farklı devrelere uygulanmasında avantajlı olabileceği düşüncesi ile bilim insanları farklı memristif sistemlere yönelmiştir. Bu sistemlerden biri olan memindüktör ile ilgili literatürde bazı araştırmacılar tarafından tasarlanan memindüktör taklit devreleri mevcuttur (Babacan. 2018; Raj vd., 2021; Sah vd., 2014). Memindüktif sistemin n. dereceden akım kontrollü akı denklemi 2.3'te ve x fonksiyonu denklemi 2.4'te ifade edilmiştir (Ventra vd., 2009).

$$\varphi(t) = L_M(x, i, t) i(t) \quad (2.3)$$

$$\dot{x} = f(x, i, t) \quad (2.4)$$

Bu denklemde $i(t)$ akımı, $\varphi(t)$ t zamanında indüktör akısını, L_M ise memindüktansı ifade etmektedir. Denklemin tam ifadesi denklem 2.5'te tekrar düzenlemiştir.

$$\varphi(t) = \left(\int_0^t q(t) dt \right) i(t) \quad (2.5)$$

Akım kontrollü memristif sisteme benzer şekilde akı kontrollü memristif sistem denklemi 2.6 ve 2.7'deki gibi ifade edilebilir.

$$i(t) = L_M^{-1}(x, \varphi, t) \varphi(t) \quad (2.6)$$

$$\dot{x} = f(x, \varphi, t) \quad (2.7)$$

L_M^{-1} ters memindüktans olarak ifade edilmektedir. Akım kontrollü ve akı kontrollü memindüktörler, denklem 2.8 ve 2.9'daki gibi zaman alanında birinci dereceden memindüktif sistemin bir parçası olarak ifade edilebilir.

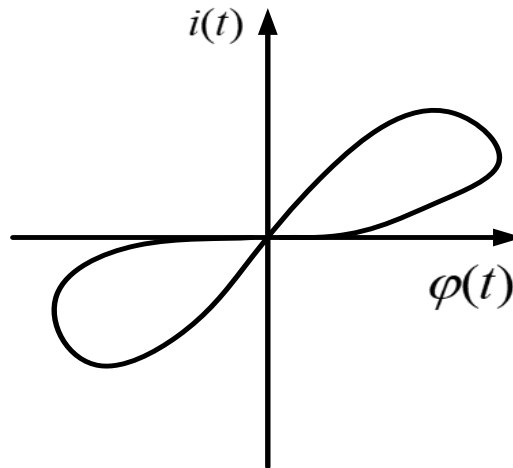
$$\varphi(t) = L_M \left(\int_0^t i(\tau) d\tau \right) i(t) \quad (2.8)$$

$$i(t) = L_M^{-1} \left(\int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \varphi(t) \quad (2.9)$$

Başlangıçta herhangi bir enerjiye sahip olmadığından başlangıç değeri sıfır olarak seçilmektedir. Denklem 2.10'daki akı kontrollü memindüktör denkleminde akının zamana göre integralinin denklem 2.9'da verilen şekilde tanımlanması durumunda denklem 2.11'deki şeklini alır.

$$\rho(t) = \left(\int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \quad (2.10)$$

$$i(t) = L_M^{-1}(\rho) \varphi(t) \quad (2.11)$$



Şekil 2.5. Memindüktör akı-akım karakteristiği.

2.1.3. Memkapasitör

Memkapasitör, memristif sisteminin bir parçası olduğundan iki değişkenli bir fonksiyon olarak ifade edilebilir. Kapasitör gibi pasif devre elemanı olarak düşünülebilir. Ancak memkapasitör uygulanan sinyali hafızada tutarken aynı zamanda enerji depolayabilir olması, doğrusal olmaması, ikili ve çoklu hafıza durumları gibi avantajlara sahip olması onu kapasitörden ayıran en belirgin özelliklerindendir. Memkapasitörde $q=CV$ ilişkisi kurulması zorunludur. Buradaki C her ne kadar sabit olsa da $q-v$ ilişkisi Şekil 2.6'daki gibi histeresis eğrisine sahip olur. Memkapasitörün bu özelliklere sahip olması onu bilim dünyasında önemli bir noktaya getirdi. Henüz piyasada fiziksel olarak ulaşılamasa da araştırmacılar tarafında memkapasitör gibi çalışan bazı emülatör devreleri tasarlanmıştır (Vista ve Ranjan, 2020; Birolek ve Biolkova, 2010; Wang vd., 2012; Sharma vd., 2020; Yu vd., 2013,2014; Fouda vd., 2013; Yesil ve Babacan,2020; Demir vd., 2021). Bir n . mertebeden gerilim kontrollü memkapasitif sistemi, 2.12 ve 2.13'teki denklemler kullanılarak ifade edilebilir (Ventra vd., 2009).

$$q(t) = C_M(x, v_c, t)v_c(t) \quad (2.12)$$

$$\dot{x} = f(x, v_c, t) \quad (2.13)$$

$V_c(t)$, kapasitif sistem boyunca aşırı gerilime karşılık gelir. $q(t)$ ise t zamandaki kapasitif sistem üzerindeki yük ve C_M ise sistemin memkapasitansıdır. n .mertebeden yük kontrollü memkapasitif sistemin denklem 2.14 ve 2.15'da ifade edilmiştir.

$$v(t) = C_M^{-1}(x, q, t)i(t) \quad (2.14)$$

$$\dot{x} = f(x, v, t) \quad (2.15)$$

C_M^{-1} ters memkapasitanstır. Gerilim kontrollü ve yük kontrollü memkapasitörler sırasıyla aşağıdaki denklem 2.16 ve 2.17'de olduğu gibi zaman alanında birinci dereceden memkapasitif sisteminin bir parçası olarak ifade edilebilir.

$$q(t) = C_M \left(\int_0^t v(\tau) d\tau \right) v(t) \quad (2.16)$$

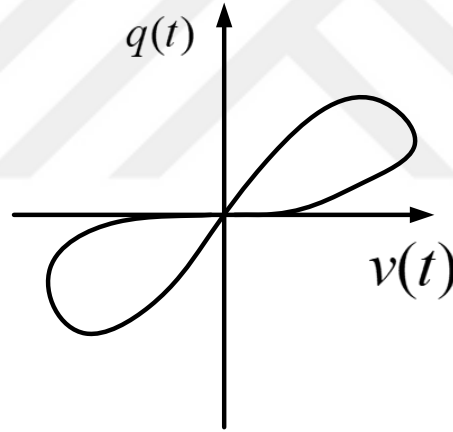
$$v(t) = C_M^{-1} \left(\int_0^t q(\tau) d\tau \right) q(t) \quad (2.17)$$

Başlangıçta deşarj olma enerjisi sıfır olduğundan ilk zaman momenti sıfır olarak seçilmektedir. Denklem 2.18'deki yük kontrollü memkapasitör denkleminde yükün zamana göre integralinin denklem 2.18'de verilen şekilde ifade edilmesi durumunda denklem 2.17; denklem 2.19'a dönüşür.

$$\sigma(t) = \int_0^t q(\tau) d\tau \quad (2.18)$$

$$v(t) = C_M^{-1} \sigma(t) \quad (2.19)$$

Memkapasitans değeri $\varphi - \sigma$ eğrisinin eğimi ile belirlenmektedir. Denklem 2.12'de de görüldüğü gibi gerilim sıfır olduğunda yük sıfır olur. Ancak başlangıçta akımın sıfır olması ($I=0$) durumunda yükünde sıfır olacağı ($q=0$) anlamına gelmediği ve bu nedenle memkapasitör elemanın enerji depolayabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.6. Memkapasitör yük-gerilim karakteristiği.

2.2.Literatürdeki Bazı Memkapasitör Emülatör Devreleri

2.2.1.Memkapasitörün spice modeli

Biölek ve arkadaşları memkapasitör modeli için bir yöntem açıkladılar. Model, cihazın somut fiziksel uygulamasına bağlıdır ve aygıtın hafıza etkisi ve kapasitansı, bir kapasitörün hafıza etkisini temsil eden bir alt modelden oluşmaktadır (Biölek vd., 2010). Yük-kontrollü memkapasitör doğrusal olmayan kurucu ilişki ile tanımlanmaktadır. Denklem 2.20'de gösterilmektedir.

$$\varphi = \varphi(\sigma) \quad (2.20)$$

Burada ϕ ve σ memkapasitörden geçen elektriksel yükün (q) ve memkapasitörün elektriksel geriliminin zaman alanındaki integralleridir. Denklem 2.21’de gösterilmektedir.

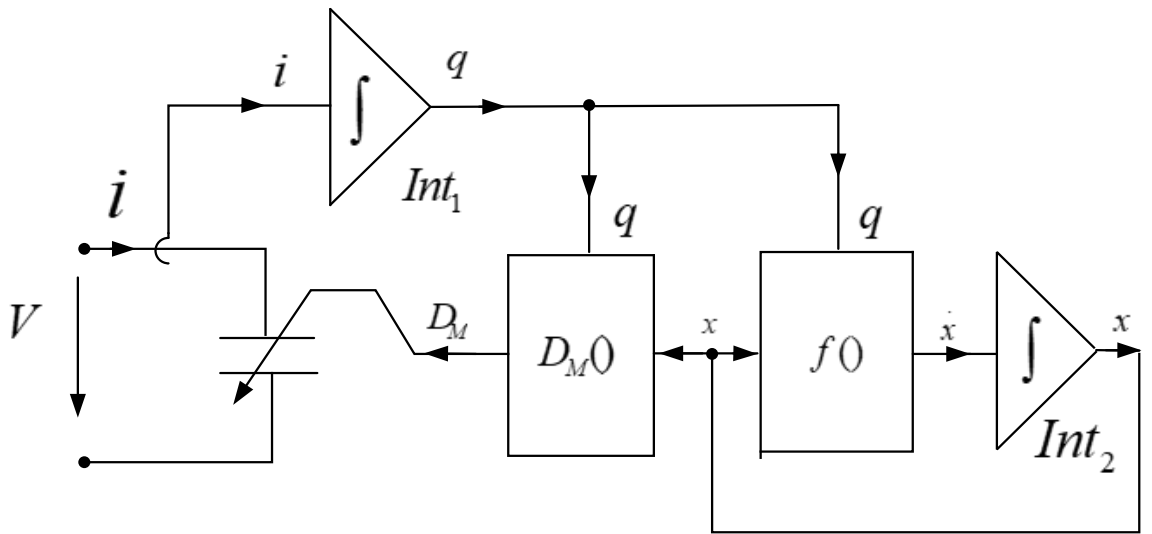
$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t v(\alpha) d\alpha \quad \sigma(t) = \int_{-\infty}^t q(\alpha) d\alpha \quad (2.21)$$

2.20 denklemindeki kurucu ilişki sinyal uyarma biçimine ve uyarma geçmişine bağlı değildir. Uygun karakteristiğın eğimi, verilen çalışma noktasındaki ters memkapasitansa $D_m = C_m^{-1}$ eşittir. Yük-kontrollü memkapasitör aşağıdaki cebirsel bağlantı noktası denklemi 2.22 ile tanımlanabilen daha genel bir birinci dereceden yük-kontrollü memkapasitif sistemin özel bir durumu olduğu gösterilmiştir. Sıralı diferansiyel denklemi de 2.23’te gösterilmektedir.

$$v = D_m(x, q, t)q \quad (2.22)$$

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} x = f(x, q, t) \quad (2.23)$$

Genel olarak $D_m()$ ve $f()$ memkapasitif sistemin veya memkapasitörün somut fiziksel uygulamasına bağlı doğrusal olmayan fonksiyonlardır. Denklem 2.22 ve 2.23 her tür fiziksel prensip temelinde çalışan yük-kontrollü memkapasitörün SPICE modelini oluşturmak için başlangıç noktalarıdır.



Şekil 2.7. Yük-kontrollü memkapasitörün spice modelinin blok diyagramı (Biolek vd., 2010).

Şekil 2.7'deki blok diyagramı kapasitans durumunu x tarafından ve doğrusal olmayan fonksiyon $D_m()$ 'ye göre elektriksel yük ile kontrol edilen bir memkapasitör modelidir. Yük akımının 1.zaman etki alanındaki integral ile hesaplanır. Durum denklemi (denklem 2.22) birbirine bağlı $f()$ ve integral 2 aracılığı ile modellenmiştir. Değişken kapasitansa (C_m) sahip kapasitörün genel denklemi 2. 24'te gösterilmektedir.

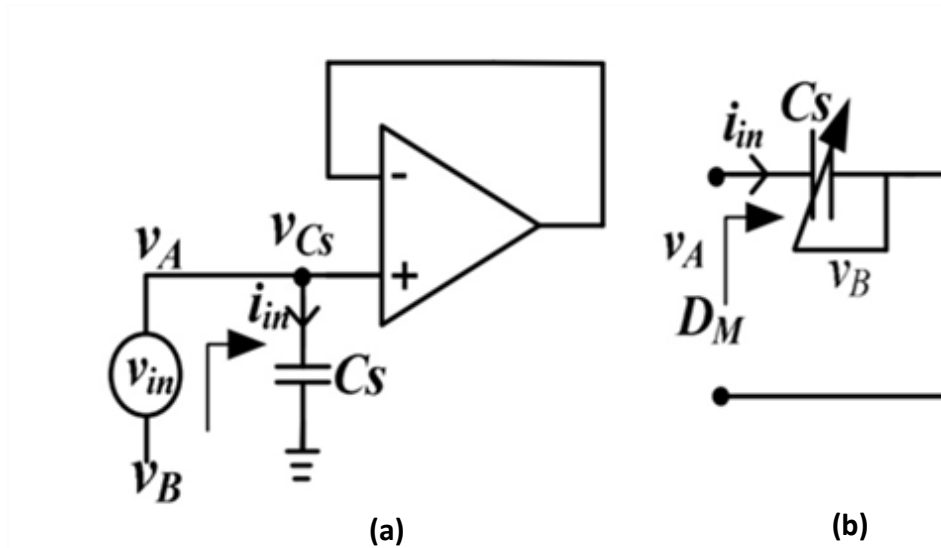
$$q(t) = q(0) + \int_0^t i(t)dt, \quad C_m(t)v(t) = C_m(0)v(0) + \int_0^t i(t)dt \quad (2.24)$$

Buradaki $q(0)$ ve $v(0)$ $t=0$ anındaki yük ve gerilim değerleridir. $D_m=C_m^{-1}$ denklem 2.25 ile tekrar yazılırsa;

$$v(t) = D_m(t) \left[C_m(0)v(0) + \int_0^t i(t)dt \right] \quad (2.25)$$

2.2.2.Mevcut elemanlar ile memkapasitör emülatör uygulaması

M.P. Sah ve arkadaşları piyasada mevcut olan elemanlar ile memkapasitör emülatör devresi tasarladı (Sah vd.,2013). Memkapasitör, harici akım veya gerilim ile değiştirilebilen bir elemandır. Önerilen memkapasitör, mutator gerektirmeyen bir devre mimarisine sahiptir.



Şekil 2. 8. Memkapasitör emülatörünün temel konsepti. **(a)** V_B geriliminin bir fonksiyonu olarak memkapasitansın tersi. **(b)** Eşdeğer devre (Sah vd., 2013).

Önerilen memkapasitör emülatörü, uygulanan gerilimin bir fonksiyonu olarak giriş kapasitansını oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.8(a) tampon (buffer) kullanılarak temel memkapasitör fikri oluşturulmuştur. Şekil 2.8 (a)'dan giriş gerilimi (V_{in}) denklemi 2.26'da gösterilmektedir.

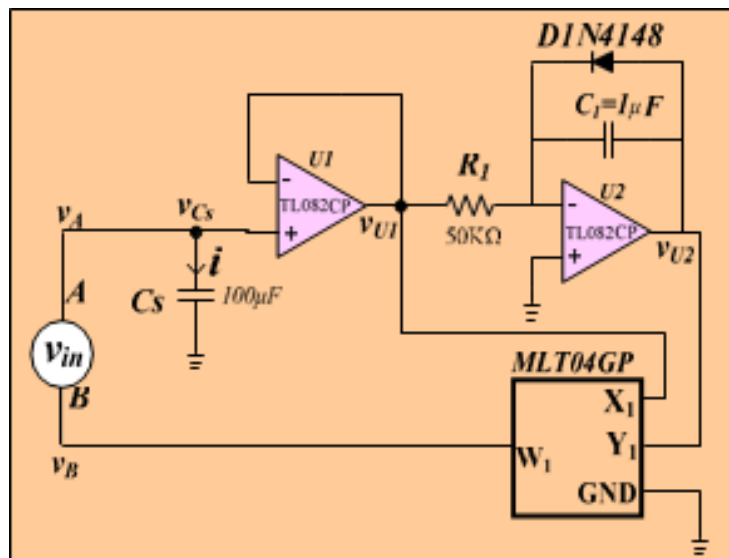
$$V_{in} = V_A - V_B = \frac{1}{C_s} \int i_{in} dt - V_B = \frac{q}{C_s} - V_B \quad (2.26)$$

Buradaki V_A C_s kapasitörü üzerindeki gerilim, V_B ise giriş terminaline giden gerilim ve I_{in} 'de kapasitörden akan giriş akımıdır. V_B yük ile orantılı ise;

$$V_{in} = \frac{q}{C_s} - mq = \left(\frac{1}{C_s} - m \right) q \quad (2.27)$$

Burada $V_B = m\phi$ denklem 2.27'ye ters memkapasitans uygulanırsa $D_M = C_M^{-1} = \left(\frac{1}{C_s} - m \right)$ olur.

Eğer m 'nin değeri yükün zaman integraline göre kontrol edilirse Şekil 2.8 bir memkapasitör görevi görür. Şekil 2.8'de sunulan memkapasitör emülatörünü piyasada mevcut olan elemanlar ile Şekil 2.9'da gerçekleştirilmiştir. Bunun için iki adet OPAMP(TL082CP), bir adet direnç, iki adet kondansatör, bir adet diyot (D1N4148) ve 1 adet gerilim yükseltici (MLT04GP) kullanılmıştır.



Şekil 2.9. Piyasada mevcut olan elemanlar ile memkapasitör emülatör devresi (Sah vd.,2013).

Bu devrede, C_s kapasitörü (i) akımının integrali ile V_{cs} gerilimi üretir. Denklem 2.29'da gösterilmektedir.

$$V_A = V_{cs} = \frac{1}{C_s} \int i(t) dt = \frac{q(t)}{C_s} \quad (2.29)$$

Ayrıca V_{U1} 'in çıkış terminalinde aynı gerilim elde edilir. R_1 boyunca akan akım denklem 2.30'da gösterilmektedir.

$$I_{R1} = \frac{q(t)}{R_1 C_s} \quad (2.30)$$

İntegral devresinin çıkış voltajı (V_{U2}) denklem 2.31'de gösterilmektedir.

$$V_{U2} = -\frac{1}{C_1} \int I_{R1} dt = -\frac{\int q(t) dt}{R_1 C_1 C_s} \quad (2.31)$$

Diyot (D1N4148), integral devresinin çıkışının her zaman negatif kalmasını sağlamak için kullanılmıştır. Önerilen memkapasitör emülatör devresinin düzgün çalışması için integral çıktısı sadece negatif bölgelerde değiştirilebilir. Ancak devredeki kaçak akımlardan dolayı integral çıktısı pozitif bölgelere girebilir. İntegral çıktısı ne zaman pozitif bölgeye girerse diyot ileri eğilimli olduğundan daima integral çıktısındaki gerilimi sıfır yapmaktadır. Böylece integral çıktısındaki gerilim daima negatif bölgede kalır.

V_{U1} ve V_{U2} arasında bir analog gerilim çarpıcı gerçekleştirilmiştir. Geri besleme gerilimi denklem 2.32'de elde edilmiştir.

$$V_B = \frac{V_{U1} \times V_{U2}}{2.5} = -Kq(t) \int q(t) dt \quad (2.32)$$

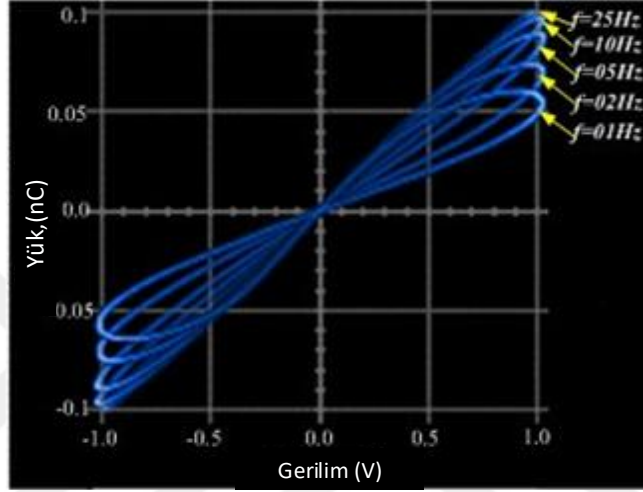
Buradaki $K = \frac{1}{2.5 R_1 C_1 C_s^2}$ denklem 2.29 ve denklem 2.32'den giriş gerilimi ifadesi;

$$V_{in} = V_{AB} = V_A - V_B = \left(\frac{1}{C_s} + K \int q(t) dt \right) q(t) \quad (2.33)$$

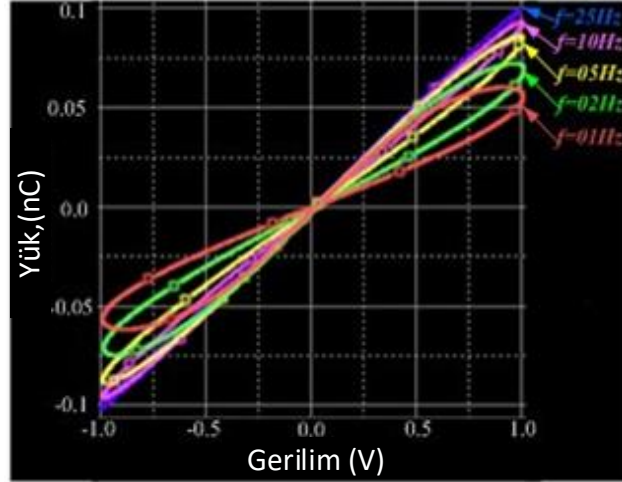
Bu nedenle Şekil 2.9'daki devrenin memkapasitansın tersinin olduğu bir memkapasitör devresi olduğu doğrulanmaktadır. Memkapasitans tersi denklem 2.34'te ifade

edilmektedir. Memkapasitör devresinin deneysel ve benzetim sonuçları Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de gösterilmektedir.

$$D_M = C_M^{-1} = \left(\frac{1}{C_s} + K \int q(t) dt \right) \quad (2.34)$$



Şekil 2. 10. Önerilen memkapasitör emülatörünün farklı frekanslardaki histerezis döngülerinin deneysel sonuçları (Sah vd., 2013).



Şekil 2.11. Önerilen memkapasitör emülatörünün farklı frekanslardaki histerezis döngülerinin benzetim sonuçları (Sah vd., 2013).

2.2.3.Memkapasitör tabanlı devrede karmaşık dinamikler

Fang Yuan ve arkadaşları tarafından kaotik bir osilatörün tasarlandığı ve sistem dinamik özelliklerinin hem analitik hem de deneysel olarak araştırıldığı bir memkapasitör

$$V_C(t) = C_M^{-1}(\sigma_M(t))q(t), \quad \dot{\sigma}_M = q_M(t) \quad (2.35)$$
$$V_C(t) = (\alpha + b|\sigma_M(t)|)q(t), \quad \dot{\sigma}_M = q_M(t) \quad (2.36)$$

16

Bu yük-kontrollü memkapasitörü gerçekleştirmek için devredeki bütün bileşenlerin kayıpsız ve ideal olduğu kabul edilmektedir. Çıkış gerilimi sınırlanması $\pm 15V$ ’dur.

Şekil 2.12’deki memkapasitör devresinde dirençler sırası ile $R_1=R_2$, $R_3=R_4$, $R_5=R_6$ ’dır. İşlemsel yükselteç olan U_1 , memkapasitörün yüzer terminaline giden akım olan I ’nın işaretini tersine çevirmek için kullanılmıştır. Daha sonra kapasitörden geçen yükü (q), I ’nın zaman alanındaki integrali alınarak hesaplanmaktadır. U_2 İşlemsel yükselteci, çıkış gerilimi ile C_1 kapasitörünün gerilimini çıkarmak için kullanılan bir çıkarma devresini oluşturmaktadır. Denklem 3.37 ile ifade edilmektedir.

$$V_{U2}(t) = -\frac{R_6}{R_4} V_{C1} = \frac{R_6 q_M(t)}{R_4 C_1} \quad (2.37)$$

İşlemsel yükselteç U_3 ’ün integral devresi ve çıkışı denklem 2.38 gösterilmektedir.

$$V_{U3}(t) = -\frac{1}{R_7 C_2} \int V_{U2}(t) dt = -\frac{R_6}{C_1 C_2 R_4 R_7} \int q_M(t) dt = -\frac{R_6}{C_1 C_2 R_4 R_7} \sigma_M(t) \quad (2.38)$$

Buradaki $\sigma_M(t)$, $q_M(t)$ ’nin integralidir. U_4 ve U_5 işlemsel yükselteçler, çıkış voltajı ile mutlak değerli bir devre oluşturmaktadır. Bu işlemsel yükselteçlerin ifadesi denklem 2.39’da gösterilmektedir.

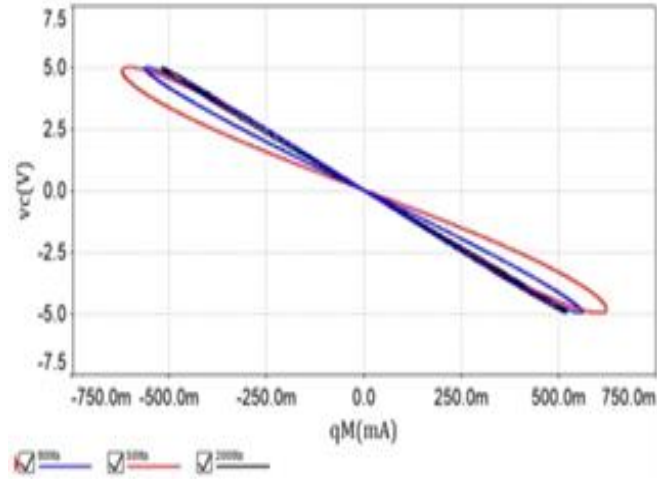
$$V_{U4}(t) = |V_{U3}(t)| = \frac{R_6}{C_1 C_2 R_4 R_7} |\sigma_M(t)| \quad (2.39)$$

Denklem 2.37 ve 2.39’a göre M_1 çarpanının çıkış gerilimi hesaplanırsa;

$$V_{M1}(t) = \frac{R_6^2}{C_1^2 C_2 R_4 R_7} |\sigma_M(t)| q_M(t) \quad (2.40)$$

Daha sonra topraklanmış memkapasitör emülatörünün gerilimi şu şekilde yazılabilir.

$$V_C(t) = V_{C1}(t) + V_{M1}(t) = \left(-\frac{1}{C_1} + \frac{R_6^2}{C_1^2 C_2 R_4 R_7} |\sigma_M(t)| \right) q_M(t) \quad (2.41)$$



Şekil 2.13. Memkapasitörün yük-gerilim karakteristik eğrisi (Yuan vd., 2019).

2.2.4.Yük-kontrollü memristörsüz memkapasitör emülatörü

Herhangi bir memristör emülatörü kullanılmadan memkapasitör emülatörü Mohammed E. Fouda ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmesi bilim dünyası için önemli bir yeniliktir (Fouda ve Radwan,2012). Ancak çok sayıda aktif devre elemanı kullanılması tasarımın dezavantajlarından. Önerilen memkapasitör emülatörün çalışmasını doğrulamak için devre ve matematiksel modellemesi analitik ve sayısal olarak gerçekleştirildi. Önerilen yük-kontrollü memkapasitör emülatörünün memkapasitansının matematik modellemesi, memristör modellenmesine (Strukov vd., 2008) ve memkapasitör modellenmesine (Biolek vd., 2010) benzer olarak denklem 2.42’de verilmektedir.

$$\frac{1}{C(t)} = \frac{1}{C_{\max}} + x(t) \left(\frac{1}{C_{\min}} - \frac{1}{C_{\max}} \right) \quad C \in (C_{\min}, C_{\max}) \quad (2.42)$$

Buradaki $C_{\min}$ ve $C_{\max}$ minimum ve maksimum kapasitans, ‘x’ise memkapasitörün dinamik durum değişkenidir.

$$\frac{dx}{dt} = kq(t) f(x) \quad (2.43)$$

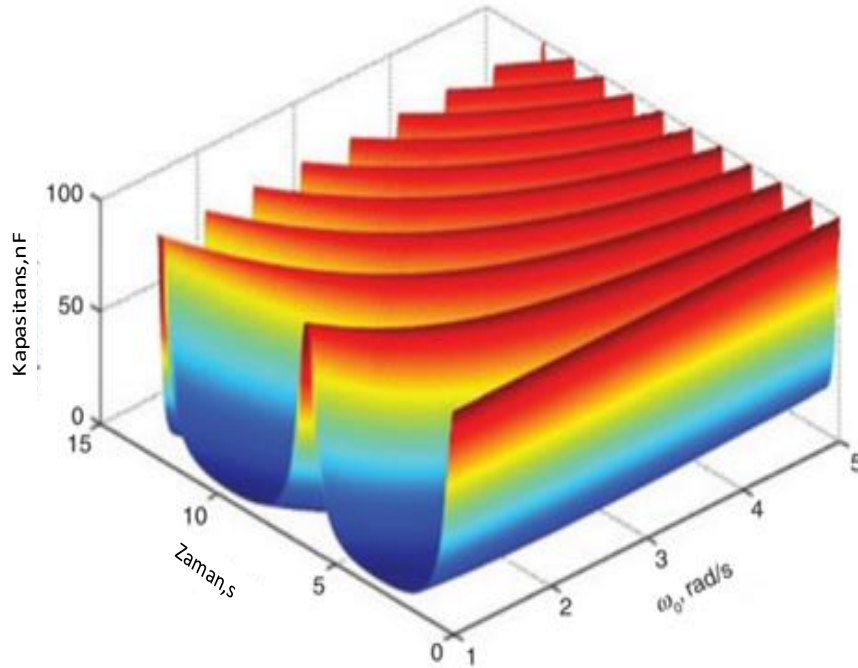
‘k’ değişkenlik faktörü $f(x)$ ise Joglekar’ın $f(x)=1-(2x-1)^{2p}$ pencere fonksiyonunu ifade eder. Doğrusal pencere fonksiyonu $f(x)=1$ için durum değişkeni denklem 2.44’te ifade edilmektedir.

$$x = x_0 + k \int_0^t q(\tau) d\tau \quad (2.44)$$

Buradaki x_0 , C_0 başlangıç kapasitansına karşılık gelen memkapasitörün başlangıç durum değişkenidir. Denklem 2.44 denklem 2.42’de yerinde kullanılarak memkapasitörün anlık kapasitansı şu şekilde verilir;

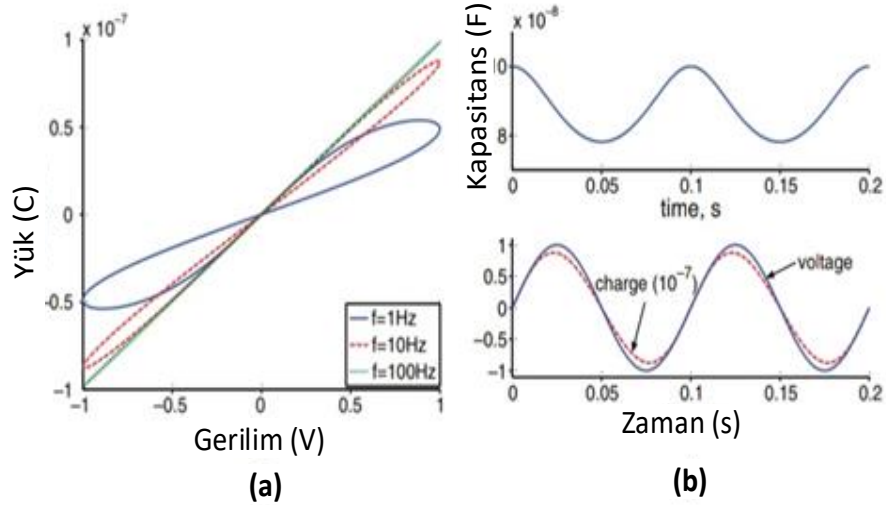
$$\frac{1}{C(t)} = \frac{1}{C_0} + k' \int_0^t q(\tau) d\tau \quad k' = \left(\frac{1}{C_{\min}} - \frac{1}{C_{\max}} \right) \quad (2.45)$$

Uygulanan yükün artması ile memkapasitans değeri azalır. Ayrıca frekansın artması ile de memkapasitans değeri azalır. Şekil 2.14’te gösterilmektedir.



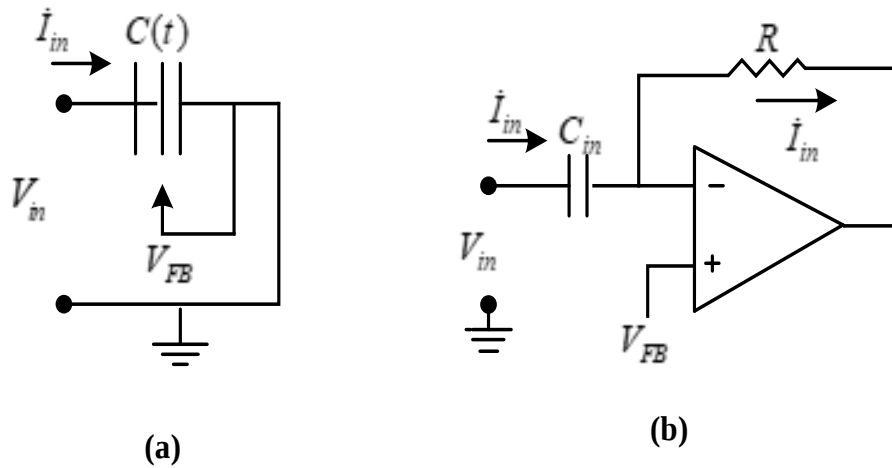
Şekil 2.14. Sırası ile C_0 ve q_0 , 10^{15} 100nF, 0,1C değerlerinde k' için zaman ve ω_0 'a karşılık memkapasitansın ($C(t)$) ani değişiminin 3D gösterimi (Fouda ve Radwan, 2012).

Uygulanan gerilim ile yük değeri artıyorsa artan memkapasitör, azalıyorsa azalan memkapasitör olarak adlandırılır. Şekil 2.15’te emülatör devresinin sayısal benzetimleri gösterilmektedir. Şekil 2.16’daki devre topraklı olduğu için ya azalan memkapasitör gibi davranacak ya da artan memkapasitör gibi davranacaktır. Bu davranış ise geri beslemenin pozitif veya negatif olmasına bağlıdır.



Şekil 2.15. k' için sırası ile C_0 ve $V_0, 10^{15} 100\text{nF}, 1\text{V}$ değerlerinde memkapasitörün sayısal benzetimi **(a)** Sinüzoidal giriş sinyali için yük-gerilim eğrisi **(b)** 10 Hz'deki memkapasitöre ait kapasitans, yük ve gerilim değerlerinin zamana bağlı değişimleri (Fouda ve Radwan,2012).

Kapasitans, frekansın bir fonksiyonu olan yükün integrali ile ters orantılı olduğu için uygulanan frekans azaltılarak memkapasitörün q-v histerezis eğrisi lineer bir duruma geçer. Direnç ve kapasitör için yük ve akım arasındaki ilişki kullanılarak önerilen memkapasitör emülatör devresi Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Memkapasitör emülatör konsepti **(a)** V_{FB} karşı giriş kapasitansı **(b)** Emülatör devresi (Fouda ve Radwan,2012).

Önerilen memkapasitör emülatörü şekil 2.16(a) gösterildiği gibi uygulanan gerilim farkındaki değişiklikler ile kapasitörün değişimini taklit edecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.16 (b)'de kapasitör boyunca akan giriş akımı denklem 2.46'da ifade edilmektedir.

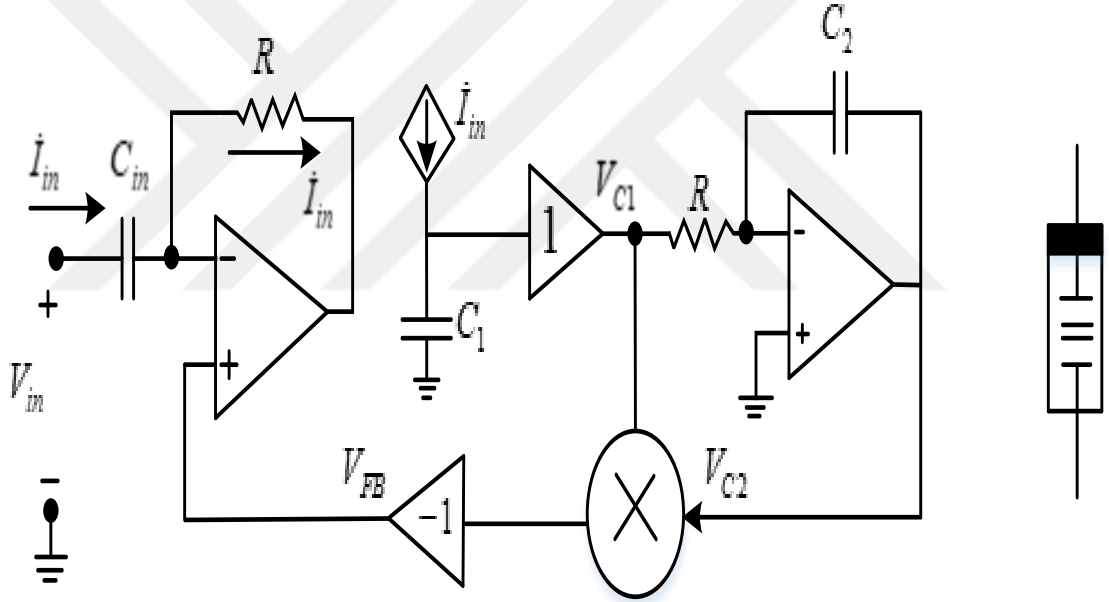
$$I_{in} = C_{in} \left(\frac{d(V_{in} - V_{FB})}{dt} \right) \quad (2.46)$$

Bu ilişki yükün bir fonksiyonu olarak tekrar yazılır ve denklem 2.45 ile karşılaştırılsa;

$$V_{in} = \frac{q(t)}{C_{in}} + V_{FB} = \frac{q(t)}{C_0} + k' q(t) \int_0^t q(\tau) d\tau \quad (2.47)$$

Şekil 2.17'deki memkapasitör emülatör devresinin geri beslemesi olan V_{FB} 'ye ait ifade yazılırsa;

$$V_{FB} = \frac{q(t)}{C_1^2} \frac{1}{RC_2} \int_0^t q(\tau) d\tau \quad (2.48)$$

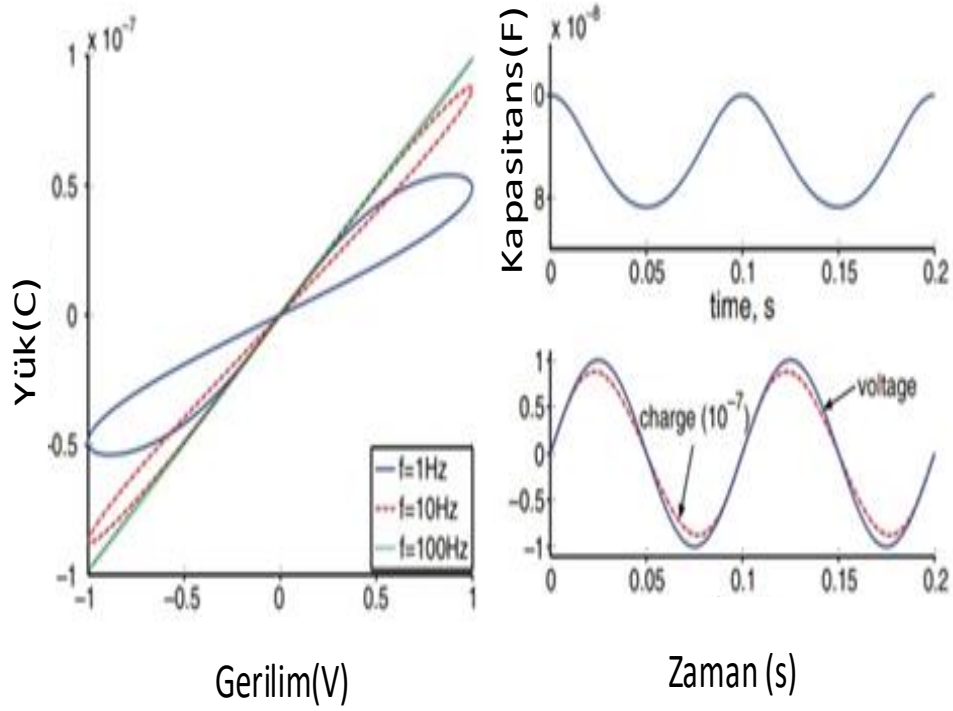


(a)

(b)

Şekil 2.17. Önerilen memkapasitör emülatörünün gerçekleştirilmesi (a) V_{FB} karşı giriş kapasitansı (b) Memkapasitörün sembolü (Fouda ve Radwan,2012).

Aynı parametreler için Şekil 2.15'teki sayısal benzetim ile eşleşen PSPICE benzetimi Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



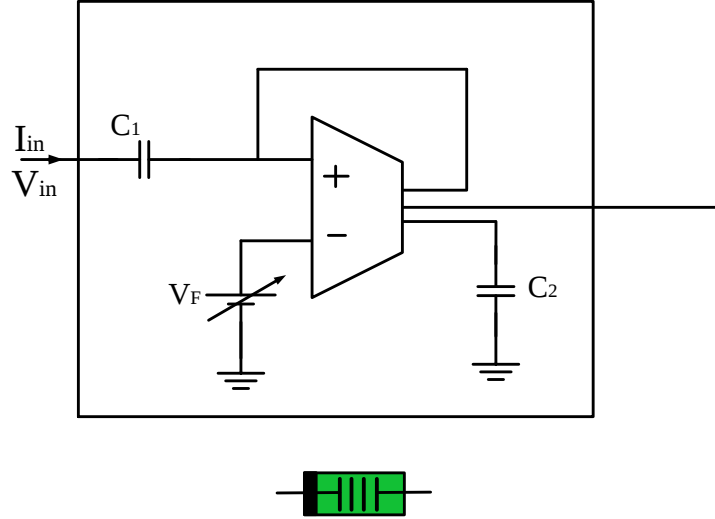
(a)

(b)

Şekil 2.18. Sırası ile R , C_1 , C_2 , V_0 $1k\Omega$, $1\mu F$, $1\mu F$, $100nF$, $1V$ ve $10Hz$ değerindeki memkapasitörün PSPICE benzetim sonuçları **(a)** Sinüzoidal giriş sinyali uygulandığında elde edilen yük-gerilim eğrisi **(b)** Memkapasitöre ait kapasitans, yük ve gerilim değerlerinin zamana bağlı değişimleri (Fouda ve Radwan,2012).

2.2.5.İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) tabanlı memkapasitör ve memindüktör emülatörü

Babacan'ın yaptığı çalışmada memristörden memkapasitöre veya memristörden memindüktöre dönüşüm için herhangi bir mutator kullanılmadan basit bir işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi tabanlı memkapasitör devresi sunulmuştur (Babacan,2018). Akım modlu yapılar çok az güç tükettiği için Şekil 2.19'daki emülatör devresinde işlemsel geçiş iletkenlik yükselteci (OTA) kullanılmıştır.



Şekil 2.19. İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi tabanlı memkapasitör emülatörü (Babacan,2018).

İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisinin bir çıkış terminali direnç davranışı sağlaması için pozitif giriş terminaline bağlanır. Diğer çıkışı ise önerilen emülatörde hafıza etkisini elde etmek için C_2 kapasitörüne bağlanmaktadır.

İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisinin negatif giriş terminali C_2 kapasitör geriliminin ve onun integralinin çarpımına bağlı olan gerilim kaynağına bağlanır. Memkapasitör giriş akımı denklem 2.49’da ifade edilmektedir.

$$I_{in} = C_1 \frac{d(V_{in} - V_F)}{dt} \quad (2.49)$$

Bu denklem tekrar yazılırsa;

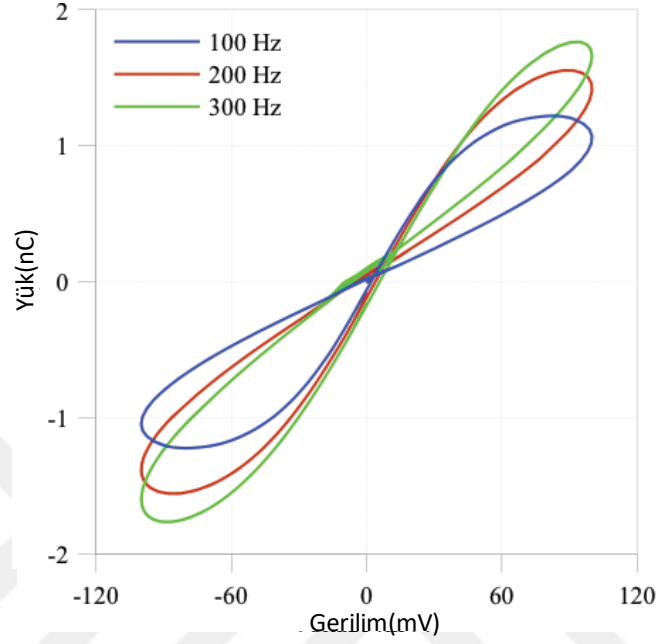
$$\frac{q(t)}{C_1} + V_F = V_{in} \quad (2.50)$$

İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisinin negatif girişine verilen V_F ’nin denklemi yazılırsa,

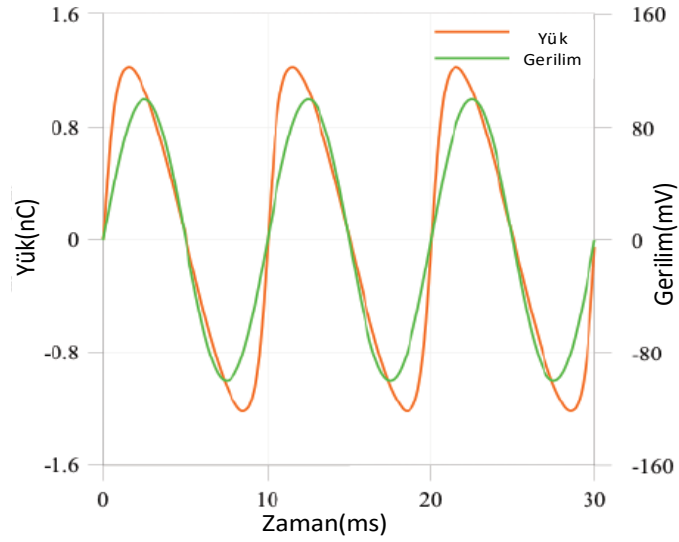
$$V_F = V_{C2} \int V_{C2} = \frac{q(t)}{C_2^2} \int q(t) dt, q(t) = C_2 V_{C2} \quad (2.51)$$

$q(t)$ önerilen emülatörün değişken bir parçasıdır. $q(t)$ ’nin değişmesi ile V_F değişir ve emülatör memkapasitif davranış sergiler.

Memkapasitör emülatörünün girişine farklı frekanslarda sinüzoidal 100mV geniş sinyali uygulanmıştır. Şekil 2.20’de görüldüğü gibi yük-gerilim eğrileri, gerilim-zaman ve yük-zaman grafikleri gösterilmektedir.



(a)

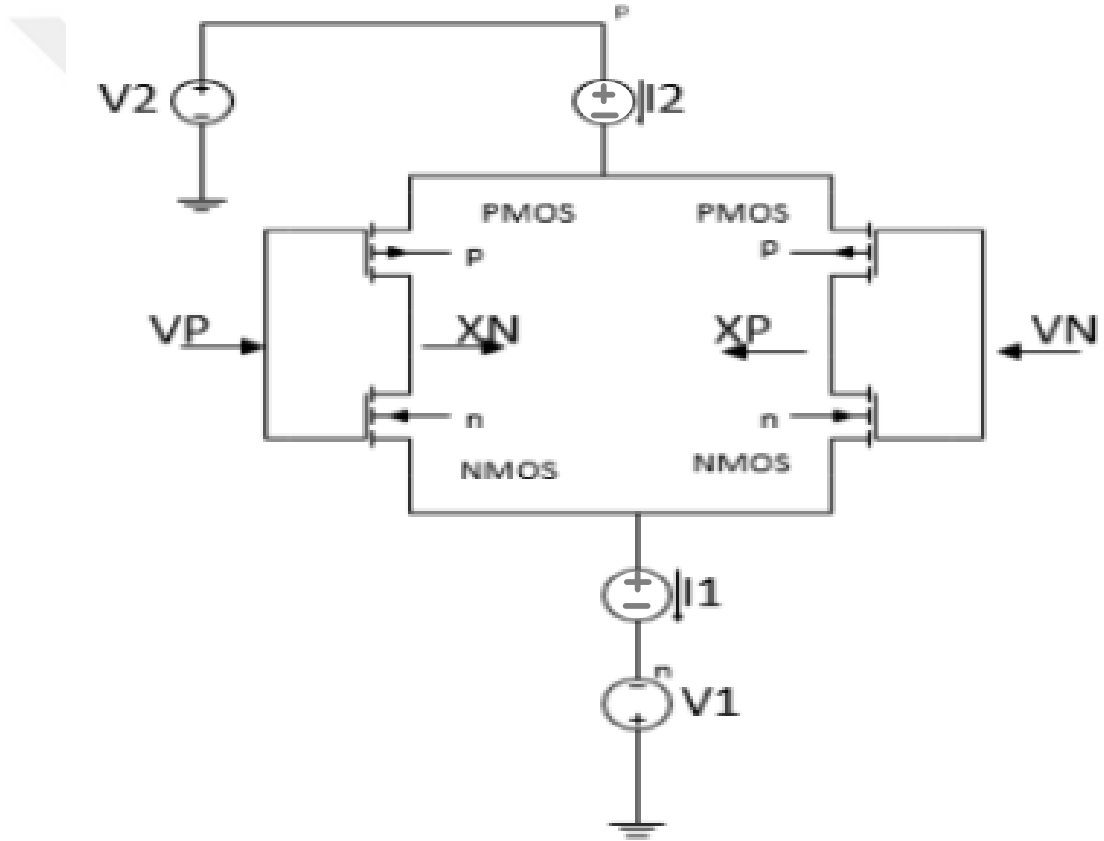


(b)

Şekil 2. 20. Memkapasitör emülatörü için sinüzoidal giriş sinyali altında benzetim sonuçları **(a)** Farklı frekanslarda akım-gerilim ilişkisi **(b)** Memkapasitörün yük-zaman ve akım-zaman grafiği (Babacan,2018).

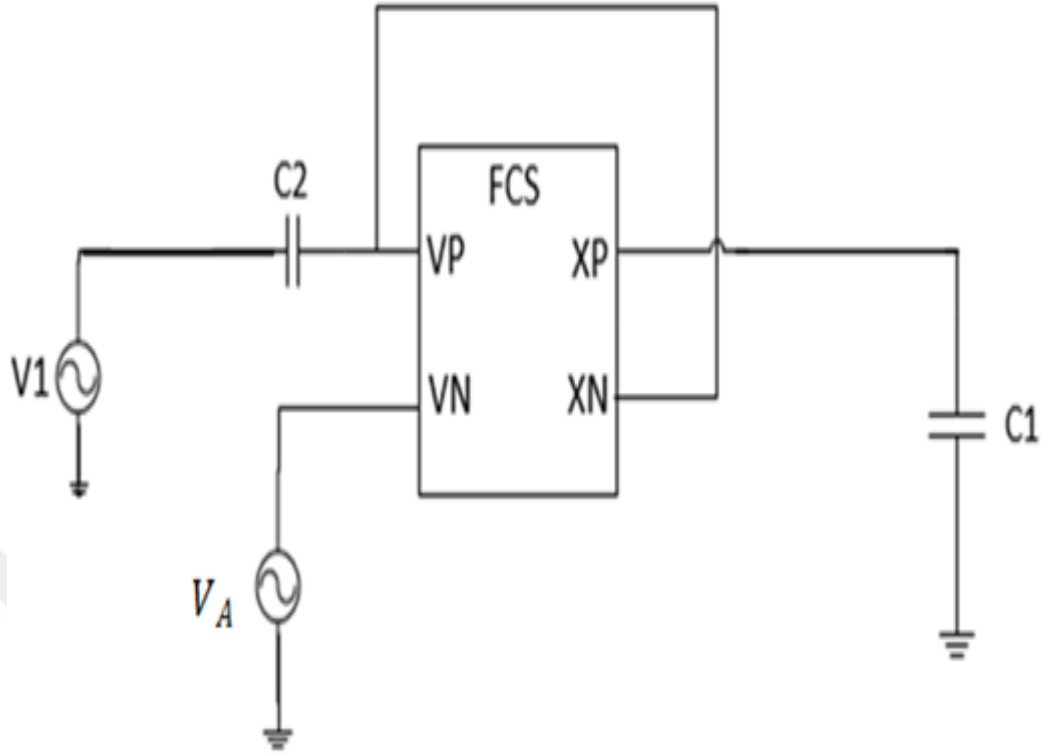
2.2.6. Yüzer akım kaynağı (FCS) tabanlı memkapasitör emülatör devresi

M. Madsar ve arkadaşları tarafından yük ile gerilim arasında doğrusal olmayan bir ilişki sağlayan memristif sistemin bir parçası olan topraklanmış bir memkapasitör tasarlanmıştır (Madsar vd.,2020). Bu devre düşük güç kullanımından dolayı yüzer akım kaynağı (FCS) kullanılmıştır. Emülatör devresi MOS'lar ve kapasitörlerden oluşmaktadır. Memkapasitör emülatör devresi Şekil 2.21'de gösterilen Arbel ve Goldminz tarafından önerilen yüzer akım kaynağı (FCS) devre tasarımı kullanılmıştır (Arbel ve Goldminz, 1992).



Şekil 2.21. FCS devresi (Arbel ve Goldminz, 1992).

Yüzer akım kaynağı (FCS)'nin (V_P , V_N) giriş gerilimleri arasındaki fark çıkışa aktarılır. V_P 'nin V_N 'den büyük olması durumunda çıkış pozitif tam tersi durumda ise çıkış negatif olur. Şekil 2.21'deki yüzer akım kaynağı (FCS) kullanılarak Şekil 2.22'de memkapasitör emülatör devresi tasarlanmıştır.



Şekil 2.22. Memkapasitör emülatör devresi (Madsar vd.,2020).

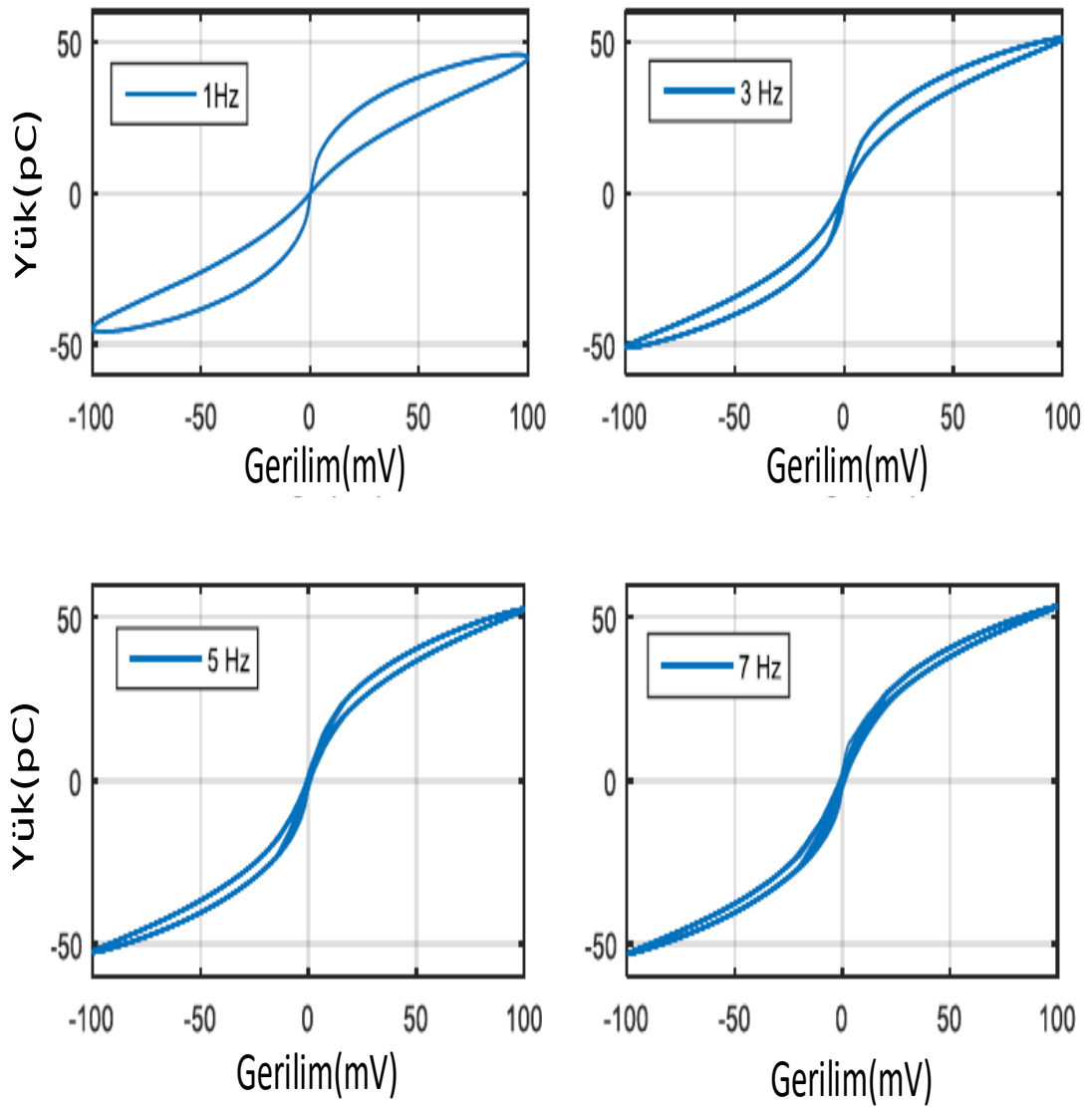
C_1 hafıza özelliği oluşturmak için yüzer akım kaynağı (FCS)'nin çıkışına bağlanmıştır ve yüzer akım kaynağı (FCS)'nin diğer çıkışı direnç davranışı sağlamak için pozitif girişe bağlanmıştır. V_A giriş gerilimi, C_1 kapasitörünün gerilimi ile onun integralinin çarpımına eşittir. Bu çarpma emülatör devresinde doğrusal olmayan ifadeyi sağlamak içindir. V_A 'nın matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemlerde ifade edilmektedir.

$$V_A = V_{C1} \int V_{C1} \quad (2.52)$$

$$V_A = \frac{q(t)}{C_1} \int \frac{q(t)}{C_1} dt \quad (2.53)$$

$$V_A = \frac{q(t)}{C_1^2} \int q(t) dt \quad (2.54)$$

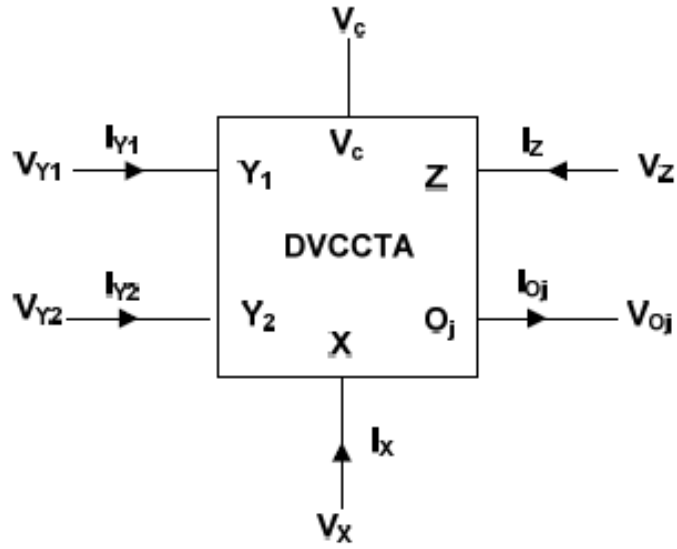
Yukarıdaki denklemlerden de anlaşılacağı üzere V_A gerilimi, $q(t)$ yüküne göre doğrusal olmayan bir özellik göstermektedir. Memkapasitör emülatörünün benzetim sonuçları Şekil 2.23'te gösterilmektedir.



Şekil 2.23. 1,3.5 ve 7 Hz’deki Memkapasitör emülatör histerezis eğrileri (Madsar vd.,2020).

2.2.7.DVCCTA kullanılarak memkapasitör emülatör tasarımı

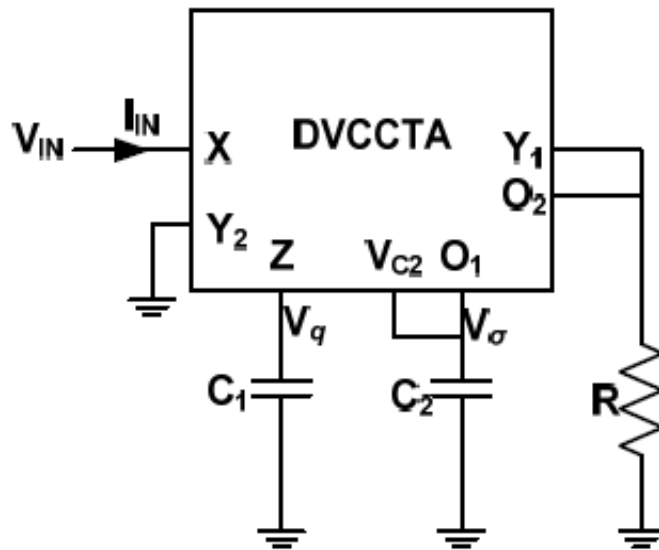
Vista ve Ranjan’ın yaptığı bu çalışmada DVCCTA aktif blok ve pasif devre elemanları kullanılarak topraklanmış memkapasitör emülatör devresi tasarlanmıştır (Vista ve Ranjan, 2019). Şekil 2.25’de gösterilen emülatör devresinde aktif blok kullanılması fiziksel olarak gerçekleştirebilmesi içindir. Devre tasarımında kullanılan aktif blok devre sembolü Şekil 2.24’te gösterilmektedir. Ancak çalışmada sadece benzetim çalışmaları verilmiş olup deneysel sonuçlar verilmemiştir. Tasarlanan memkapasitör emülatörü; basit tasarım, yüksek frekanslarda çalışabilme ve düşük güç tüketimi gibi avantajlara sahiptir.



Şekil 2.24. DVCCTA devre sembolü.

DVCCTA'nın ideal gerilim ve akım özellikleri aşağıdaki matris formu ile karakterize edilebilir.

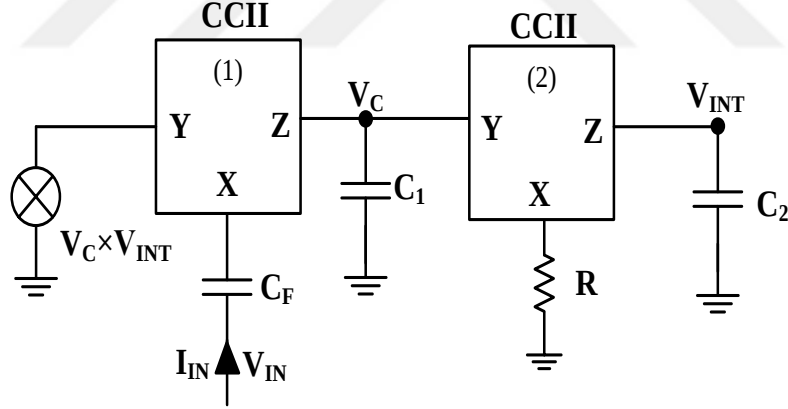
$$\begin{bmatrix} I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ V_X \\ I_Z \\ I_{Oj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ I_X \\ V_Z \\ V_{Oj} \end{bmatrix}$$



Şekil 2.25. Önerilen memkapasitör emülatör devresi (Vista ve Ranjan, 2019).

2.2.8. Deneyisel sonuçlar ile elektronik olarak kontrol edilebilir memkapasitör devresi

Memkapasitör, henüz piyasada kolay ulaşılabilir bir devre elemanı olarak bulunmasa da hafızaya sahip yeni bir devre elemanıdır. Yeşil ve Babacan tarafından yapılan çalışmada aktif devre elemanları kullanılarak iki adet memkapasitör emülatörü gerçekleştirilmiştir (Yeşil ve Babacan, 2020). Farklı frekanslara bağlı olarak yük-akı arasındaki ilişki önerilen her iki emülatör devresi için elde edilmiştir. Sırasıyla Şekil 2.26 ve Şekil 2.27'deki emülatör devrelerinde direnç ve g_m değerleri değiştirilerek elektronik olarak kontrol edilmektedir. Direnç, iki PMOS tranzistör ile sağlanmıştır ve direnç değeri, kontrol gerilimi değiştirilerek kontrol edilmektedir. Gerçek zamanlı performansını göstermek için breadbord üzerine kurularak deneysel olarak gösterilmiştir. Bunlar devrelerin avantajlarından sayılabilir. Devrelerde hem aktif hem de pasif devre elemanları kullanılması, devrelerin sadece topraklı olarak çalışması, çarpma devresinin bulunması ve kullanılan bütün pasif devre elemanlarının topraklanmamış olması dezavantajlarındandır.



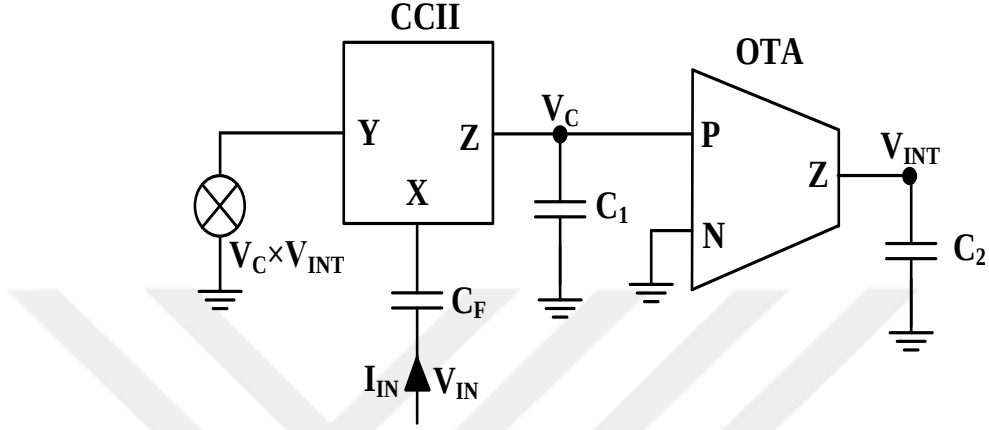
Şekil 2.26. Akım taşıyıcı tabanlı memkapasitör devresi (Yeşil ve Babacan, 2020).

Akım taşıyıcı tabanlı memkapasitör devresinin ters memkapasitans ve çarpma devresine ait matematiksel ifadeleri denklem 2.55 ve 2.56 gösterilmektedir.

$$C_M^{-1}(t) = D_M(t) = \frac{V_{IN}}{q(t)} = \frac{1}{C_F} \pm \frac{1}{RC_1^2 C_2} \int_0^t q(t) dt \quad (2.55)$$

$$V_Y = V_C \times V_{INT} = \frac{1}{RC_1^2 C_2} q(t) \int_0^t q(t) dt \quad (2.56)$$

Bu denklemlerden de anlaşıldığı gibi ters memkapasitanstaki $\frac{1}{C_F}$ sabit ve $\frac{1}{RC_1C_2} \int_0^t q(t)dt$ ifadesi değişken kısımdır. Ancak elektronik olarak kontrol edilmesi R değerinin değiştirilmesi ile sağlanmaktadır.



Şekil 2.27. Akım taşıyıcı ve işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) tabanlı memkapasitör devresi (Yeşil ve Babacan, 2020).

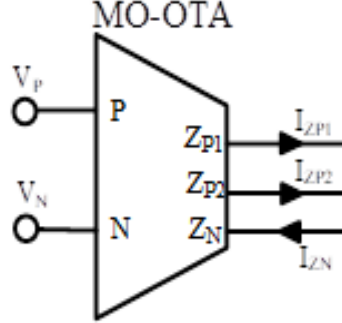
$$C_M^{-1}(t) = D_M(t) = \frac{V_{IN}}{q(t)} = \frac{1}{C_F} \pm \frac{g_m}{C_1^2 C_2} \int_0^t q(t)dt \quad (2.57)$$

Şekil 2.26'daki devre ile çok az farklılık göstermektedir. Buradaki ters memkapasitans ifadesindeki $\frac{1}{C_F}$ yine sabit kısmı ve $\frac{g_m}{C_1^2 C_2} \int_0^t q(t)dt$ değişkeni ifade etmektedir. Elektronik olarak kontrol edilmesi g_m değerinin değiştirilmesi ile mümkündür.

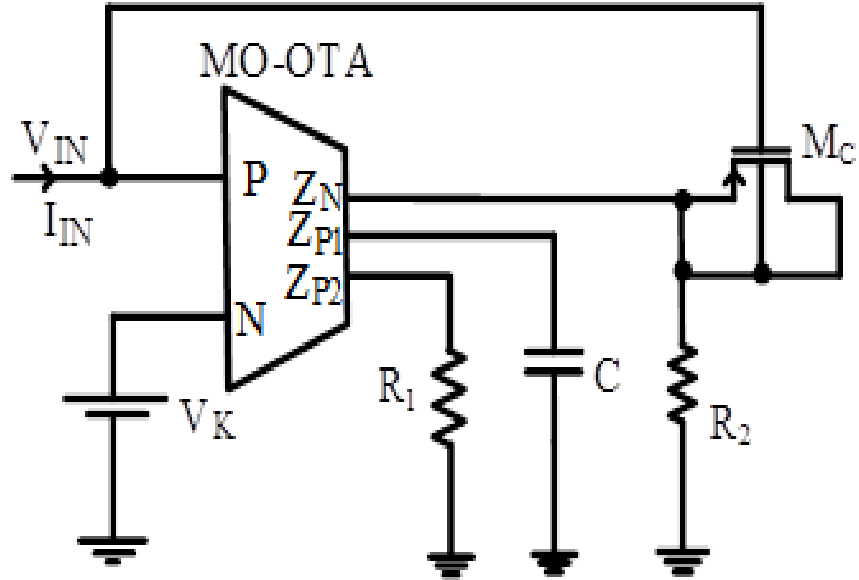
2.2.9. İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) tabanlı elektronik olarak kontrol edilebilir memkapasitör ve memindüktör emülatörü

Demir ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada OTA tabanlı elektronik olarak kontrol edilebilen memkapasitör ve memindüktör emülatörü tasarlanmıştır. Önerilen devrede aktif devre elemanı olarak kullanılan MO-OTA'nın devre sembolü Şekil 2.28'de gösterilmektedir. Şekil 2.29'daki devre tasarımında MOS tranzistörü kapasitör olarak çalıştırmak için savak-kaynak terminalleri birbirine bağlanmıştır (Demir vd., 2021). Bundan dolayı memkapasitörü bu terminallere verilen gerilim ile kontrol edilmiştir. Tasarım için hem aktif hem de pasif devre elemanları kullanılmıştır. Elektronik olarak

kontrol edilebilir olması tasarımın avantajlarından biridir. Ancak topraklanmış olması yani yüzer(floating) çalışmaması ve düşük frekanslarda çalışması dezavantajdır.



Şekil 2.28. MO-OTA'nın devre sembolü.



Şekil 2.29. Tasarlanan memkapasitör devresi (Demir vd., 2021).

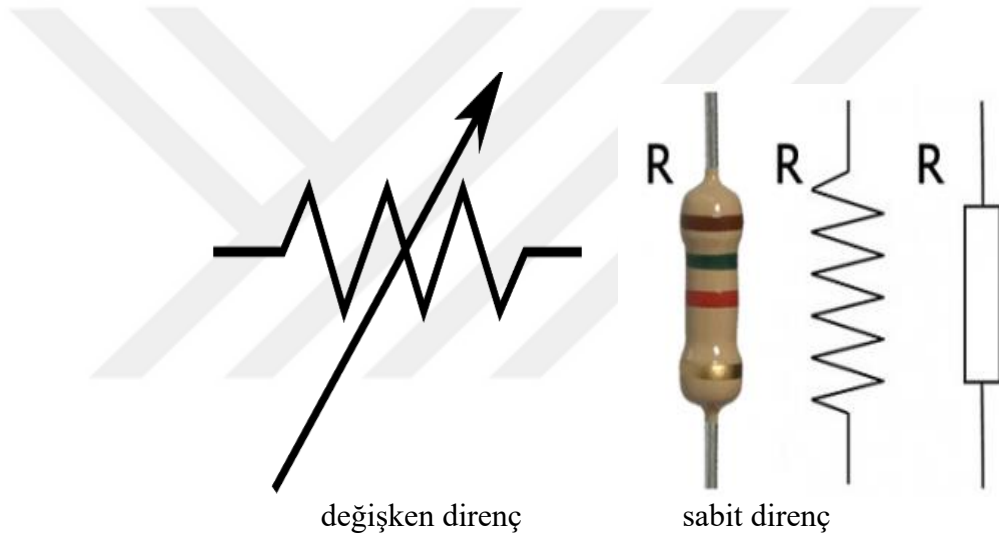
Tasarlanan memkapasitör devresinde bir adet MO-OTA, bir adet MOS tranzistör, bir adet çarpma devresi ve 3 adet pasif devre elemanı kullanılmıştır. V_K gerilimi doğrusal olmayan davranışı sağlamak için R_1 direnci ve C kapasitör gerilimlerinin çarpımıdır. MOS tranzistörü sürmek için MO-OTA'nın akımını gerileme dönüştürmek için R_2 direnci kullanılmıştır.

3.MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan aktif ve pasif devre elemanlarının özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.1.Direnç

Direnç, bir şeye karşı gösterilen mukavemettir. Devre elemanı olan dirençte devreden akan akıma karşı gösterilen mukavemettir. Bu mukavemet esnasında elektrik enerjisi direnç üzerinde ısıya dönüşerek harcanır. Şekil 3.1’de değişken direnç sembolleri gösterilmektedir.



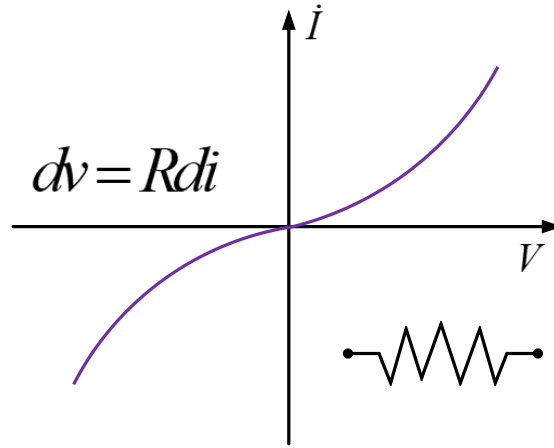
Şekil 3.1. Direnç çeşitlerinden bazılarının sembolik gösterimi.

Kesit alanı S (metrekare), uzunluğu L (metre) ve öz direnci ρ (ohm.metre) olan bir iletkenin direnci denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$R = \frac{L \cdot \rho}{S} (\text{ohm}) \quad (3.1)$$

$$V = I \cdot R \quad (3.2)$$

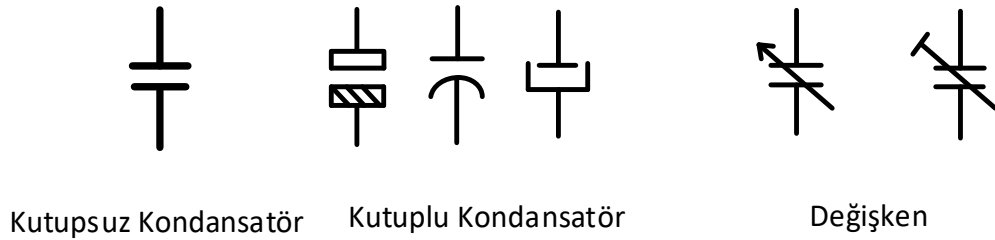
Denklem 3.2’deki ohm kanununa göre akımın gerilim ile doğru orantılı, dirençle ters orantılı olduğu görülmektedir. Şekil 3.2’de direncin akım-gerilim karakteristiği gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Tipik bir direncin akım-gerilim karakteristiği.

3.2.Kondansatör

Kondansatör, elektronların kutuplanıp elektriksel yükü elektrik alan içerisine kısa süreliğine depolayabildiği pasif devre elamanıdır. Kondansatörler fiziksel olarak bir yalıtkan maddenin iki metal tabaka arasına yerleştirilmesiyle oluşturulan pasif devre elemanıdır. Kondansatörün sembolü C, birimi ise Faraddır. Elektrik yükü depolama, reaktif güç kontrolü, bilgi kaybı engelleme, AC/DC dönüşüm yapma vs. avantajından dolayı elektronik devrelerde kullanılmaktadır. Sabit ve değişken olarak iki çeşittir. Şekil 3.3' te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Kondansatör çeşitlerinden bazılarının sembolik gösterimi.

Kondansatörün kapasitesi, plakalarında depoladığı yük ve plakalar arasındaki gerilim arasındaki bağıntı ile ifade edilir. Buna kondansatörün sığası denir. Sığa denklem 3.3 ile hesaplanır.

$$C = \frac{q}{V} \text{ (Farad)} \quad (3.3)$$

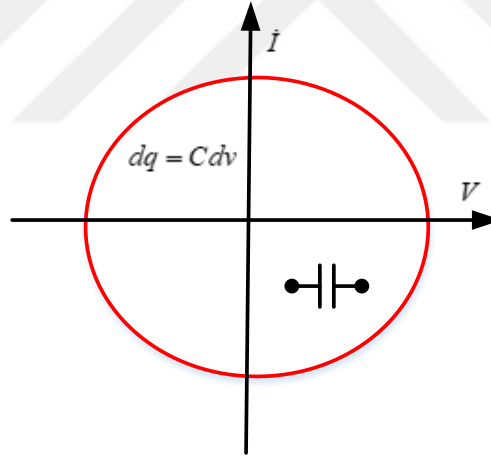
3.2.1.Kondansatörün akım-gerilim ilişkisi

Kondansatörden geçen akım, içinden geçen yükün akış hızıdır. Dielektrik tabakadan dolayı yükler ve elektronlar yalıtkan tabakadan geçemezler. Negatif tabaka üzerinde birikirler. Pozitif plakadan ayrılan her bir elektron için diğer plakada görünen aynı yüklü ancak zıt işaretli bir delik vardır. Bu nedenle elektrotlardaki yük akımının integraline eşittir ve gerilim ile orantılıdır. Kondansatörün türev ve integral formundaki denklemleri aşağıda gösterilmektedir.

$$v(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau + v(t_0) \quad (3.4)$$

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Kondansatörün akım gerilim ilişkisi Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4. Bir kondansatörün akım-gerilim karakteristiği.

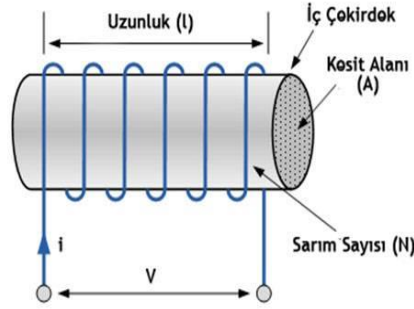
3.2.2.Kondansatörün enerji depolaması

Bir kondansatör yüklenirken elektriksel kuvvetlere karşı iş yapılmalıdır. Yapılan iş kondansatörde enerji olarak depolanır. Yapılan iş depolanan enerji ile bağlantılı olduğu denklem 3.6'da ifade edilmektedir.

$$W = \int_{q=0}^Q V dq = \int_{q=0}^Q \frac{q}{C} dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} VQ \quad (3.6)$$

3.3.Bobin

Elektrik akımındaki değişimlere karşı koyma yeteneğine sahip devre elemanıdır. İzoleli iletken tellerin sarmal bir şekilde üst üste ve yan yana sarılmasıyla elde edilen pasif devre elemanıdır. Bobinin büyüklüğü endüktans olarak ifade edilir, “L” ile gösterilir ve birimi “Henry” olup “H” harfi ile gösterilir. Bobine AC akım uygulandığında, akımın yönü sürekli değiştiğinden dolayı bobin etrafında bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan akıma karşı bir direnç gösterdiğinden, AC devrelerde bobinin akıma gösterdiği direnç artar. DC devrelerde ise bobinin akıma karşı gösterdiği direnç, sadece bobinin üretildiği metalden kaynaklanan omik dirençtir ve ihmal edilebilecek küçüktür. Bobinler, zaman gecikmeli devreler, filtre devreleri ve osilatör devrelerinde kullanılır. Bobinin fiziksel yapısı Şekil 3.5’te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Bobinin fiziksel yapısı.

Bir bobinin endüktans hesabı denklem 3.7’deki

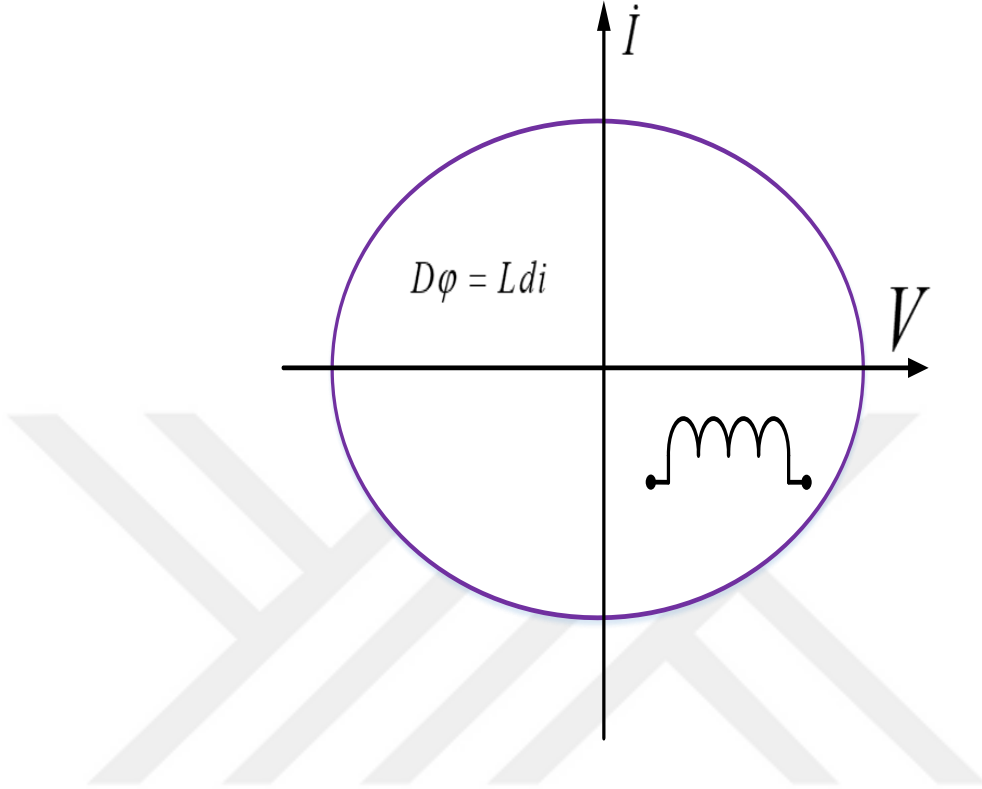
$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{\ell} (\text{Henry}) \quad (3.7)$$

μ manyetik geçirgenlik (H/m), A bobin kesit alanı m^2 , tel uzunluğu (l) olarak ifade edilir.

3.3.1.Bobinin akım-gerilim ilişkisi

Bir elektrik devresinde bobin, akımdaki değişim hızı ile orantılı olarak bir gerilim indükleyerek içinden geçem akımdaki değişikliklere karşı koyan pasif devre elemanıdır. Bir bobinin gerilim ile akım arasındaki matematiksel ifadesi denklem 3.8’de verilmektedir. Şekil 3.6’da bobinin akım-gerilim karakteristiği gösterilmektedir.

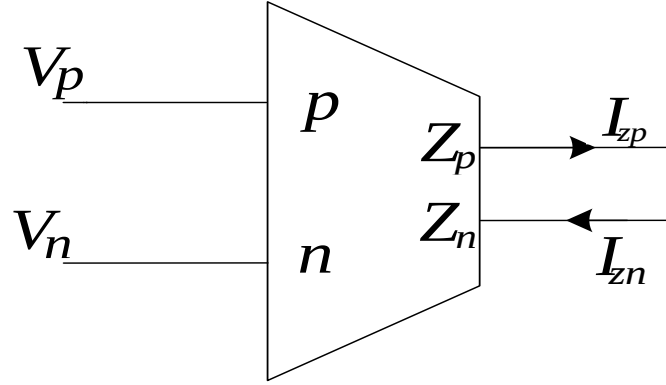
$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.8)$$



Şekil 3.6. Bobinin akım-gerilim karakteristiği.

3.4.İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (OTA)

İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA) akım modlu çalışan bir aktif devre elemanıdır. Girişine uygulanan gerilimlerin farkını alıp geçiş iletkenliği katsayısı ile çarpılıp çıkışa akım olarak aktaran aktif devre elemanlarından biridir. Bu nedenle gerilim kontrollü akım kaynağı olarak kullanılabilir. Geniş bantlı yapıya sahip olması nedeniyle yüksek frekanslardaki osilatörlerin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır. OTA'nın kullanılmasının başlıca nedenleri; akım modlu yapıya sahip olduğundan kapasitif yükler rahat sürülebilir, geçiş iletkenliğinden faydalanılarak pasif direnç yerine kullanılabilir, kutuplama akımı ile geçiş iletkenliği değiştirilebilir ve geniş frekans aralığında çalışabilmesidir. Şekil 3.7'de OTA'nın devre sembolü gösterilmiştir.



Şekil 3.7. İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendirici (OTA) sembolü.

OTA'nın geçiş iletkenliği denklemi 3.9'da ifade edilmektedir.

$$g_m = B \sqrt{I_B \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)} \quad (3.9)$$

Burada g_m geçiş iletkenliği, B akım aynaları arasındaki katsayı, μ_n OTA'nın iç yapısında bulunan MOS'lardaki elektronların hareket kabiliyetini, C_{ox} geçiş oksit kapasitesini, W ve L de tranzistöre ait kanal genişliği ve kanal uzunluğunu ifade etmektedir. OTA'nın genel denklemi 3.10'da ifade edilmektedir.

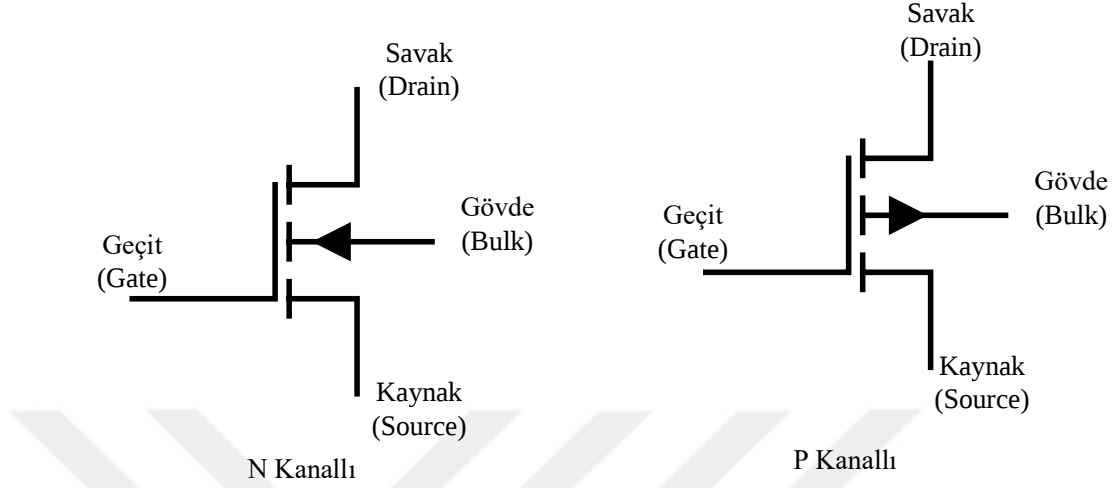
$$g_m (V_p - V_n) = I_{ZP} = -I_{ZN} \quad (3.10)$$

Tasarlanan memkapasitör emülatör devresinin doğrusal olmayan davranışlar sergilemesi gerekmektedir. MO-OTA'nın çıkışlarına pasif devre elemanlarından olan direnç ve kapasitörün bağlanması suretiyle, üzerlerindeki gerilimler çarpma devresi yardımıyla çarpılarak tasarlanan memkapasitör devresine doğrusal olmayan özellik kazandırılmıştır.

3.5.MOS Tranzistör

MOS (Metal Oxide Semiconductor) tranzistör gerilim kontrollü bir anahtarlama elemanıdır. Metal oksit yarı iletken yapısındaki MOS, elektronların iletken kanal boyunca akması ve bu kanalında elektriksel olarak kontrol edilebilmesinden dolayı alan etkili tranzistör (Field Effect Transistor) olarak da adlandırılmaktadır. Analog ve dijital devrelerde anahtarlama ve güç dengeleme amacı ile kullanılmaktadır. Bunun yanında başka avantajları da vardır bunlar; yüksek giriş empedansına sahip olmaları, düşük güç tüketimleri, yüksek frekanslarda çalışabilmeleri ve mekanik olarak dayanıklı olmalarından dolayı elektronik devrelerde oldukça fazla kullanılmaktadırlar. Savak

(Drain), Kaynak (Source) ve Geçit (Gate) olmak üzere üç adet terminale sahiptirler. MOS tranzistörler P ve N olmak üzere iki çeşittir. Şekil 3.8’de gösterilmektedir



Şekil 3.8. N ve P Kanallı MOS Tranzistörler.

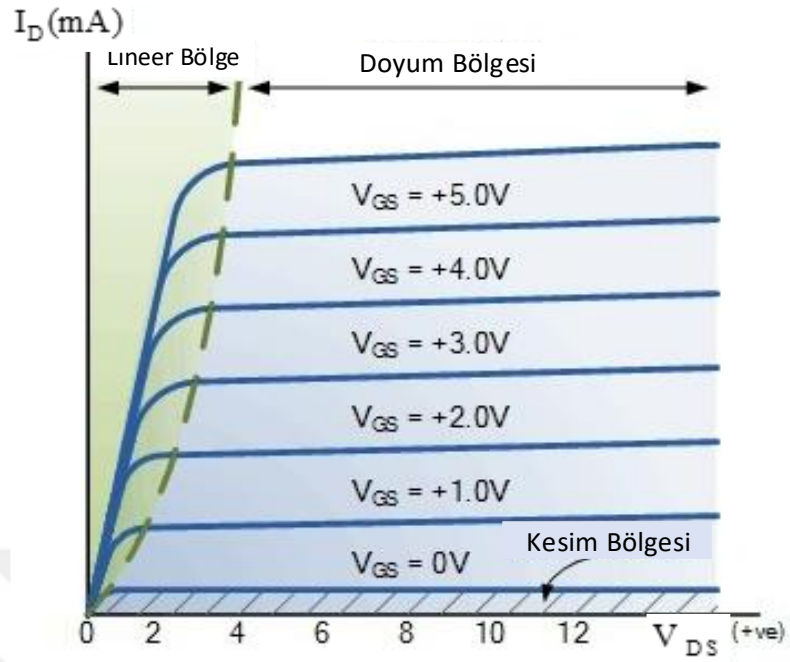
Eşik gerilimi, tranzistörlerin çalışabildiği minimum gerilim değeri olarak ifade edilebilir. Bu eşik gerilimi V_{TH} savak-kaynak gerilimi olarak adlandırılmaktadır. MOS tranzistörler lineer ve doyma bölgesi olmak üzere iki farklı çalışma bölgesine sahiptirler. Ancak bunun sağlanması için V_{GS} yani geçit-kaynak geriliminin savak-kaynak geriliminden büyük olması gerekmektedir. Yani $V_{GS} > V_{TH}$ ve $V_{GS} - V_{TH} > V_{DS} > 0$ olmalıdır. Başka bir ifade ile herhangi bir savak gerilimi değerinde, geçit gerilimi eşik geriliminin altında ise savak akımı akmayıp MOS tranzistör çalışmaz. Savak akımı denklem 3.11’de ifade edilmektedir.

$$I_D = \beta V_{DS} \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) \quad (3.11)$$

MOS tranzistör doyma bölgesinde ise savak akımı savak-kaynak geriliminin değişmesinden etkilenmez. NMOS tipi tranzistörler için geçit-savak gerilimi eşik geriliminin altına düştüğü zaman doyma bölgesine geçmiş olacaktır. Doyma bölgesindeki savak akımı denklem 3.12’de ifade edilmektedir.

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (3.12)$$

MOS tranzistöre ait savak akımı (I_D)-savak-kaynak gerilimi (V_{DS}) karakteristiği Şekil 3.9’da gösterilmektedir.

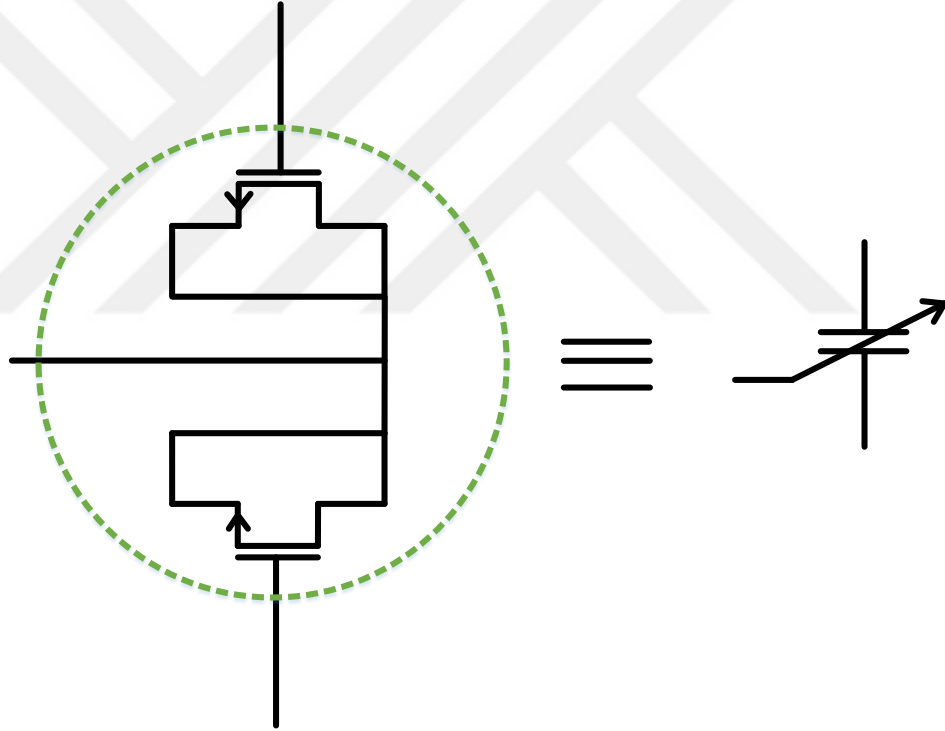


Şekil 3.9. MOS tranzistör akım-gerilim karakteristiği.

MOS tranzistörlerin genel çalışma prensiplerine göre geçit-kaynak gerilimi eşik geriliminin altında olduğu durumlarda akım akışı olmayacaktır. Ancak kanal ayarlamalı NMOS türlerinde V_{GS} gerilimi V_{TH} geriliminden küçük olsa bile savak ve kaynak arasında fiziksel olarak bir kanal olduğundan çok küçükte olsa bir sızıntı akımı akar.

4.ARAŞTIRMA BULGULARI

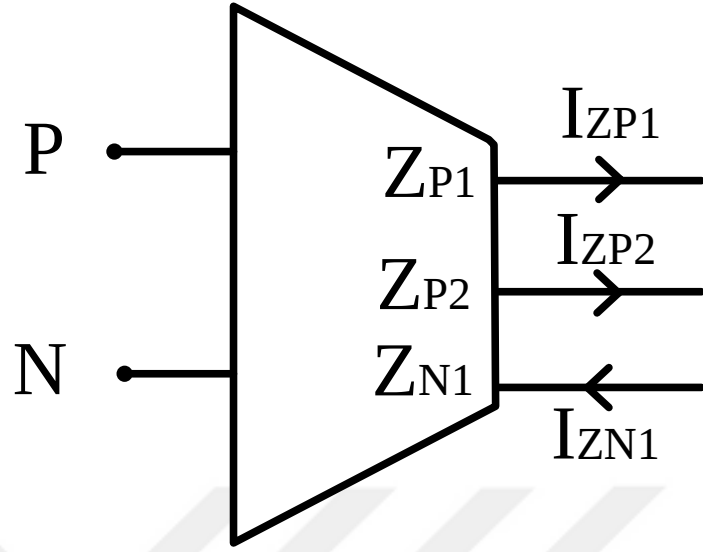
Bu bölümde çok yönlü kullanılabilecek tam yüzer uçlu (floating) memkapasitör emülatör devresi tasarlanmıştır. Kullanılacak yönlerinden bazıları şunlardır; çalışma frekansı, memkapasitans ve hafıza özelliği gibi birçok memkapasitöre ait özellikleri ayarlanabilen bir devre özelliğine sahiptir. Tasarımda iki adet MO-OTA, dört adet MOS tranzistör ve bir adet çarpma devresi ve iki adet pasif devre elemanı kullanılmıştır. Devrede gerilim kontrollü kapasitör olarak MOS tranzistörlerin savak-kaynak uçları Şekil 4.1’de gösterildiği şekilde birleştirilerek kullanılmıştır. Kullanılan OTA’nın kuyruk akımı ayarlanarak kapasitör olarak kullanılan MOS tranzistörler sürülmüş ve elektronik olarak kontrol edilebilirlik kazandırılmıştır.



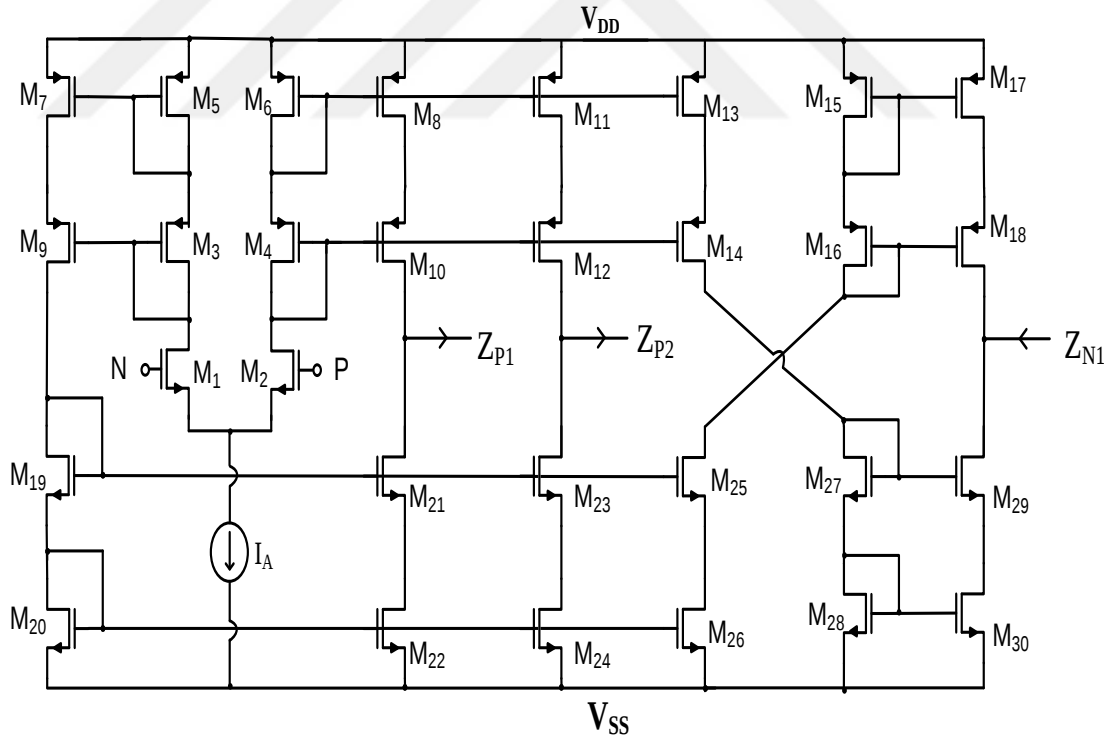
Şekil 4.1. Kapasitör olarak kullanılan MOS tranzistör (Tiebout 2003).

Memkapasitör emülatör devresinde kullanılan MO-OTA gerilim girişleri ve akım çıkışları bulunmaktadır. Girişine uygulanan gerilim farkı alınıp MO-OTA’nın geçiş iletkenliği ile çarpılıp çıkışa akım olarak verilmektedir. Şekil 4.2’de MO-OTA’nın sembolü ve Şekil 4.3’te de iç yapısı verilmiştir. MO-OTA’nın iç yapısında kullanılan MOS tranzistörlerin parametreleri Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

MO-OTA



Şekil 4.2.Çok çıkışlı OTA sembolü.



Şekil 4.3.Çok çıkışlı OTA iç yapısı $I_A = 33\mu A$, $(W/L)_{1,2,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30} = 20\mu m/0.7\mu m$, $(W/L)_{3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18} = 40\mu m/0.7\mu m$ $V_{DD} = -V_{SS} = 0.9V$

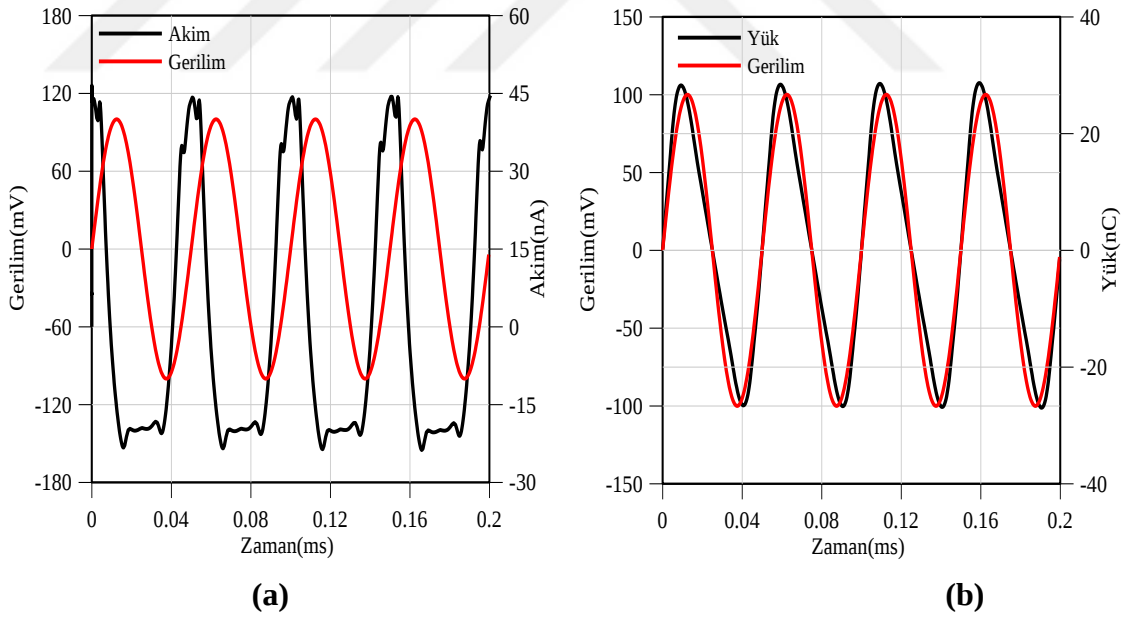
Tablo 4.1.MOS Tranzistörlerde kullanılan parametreler

0.18 μ m TSMC CMOS parametreleri
. MODEL CMOSN NMOS (LEVEL = 7, VERSION = 3.1, TNOM = 27, TOX = 4.1E-9, XJ = 1E-7, NCH = 2.3549E17, VTH0 = 0.3725327, K1 = 0.5933684, K2 = 2.050755E-3, K3 = 1E-3, K3B = 4.5116437, W0 = 1E-7, NLX = 1.870758E-7, DVT0W = 0, DVT1W = 0, DVT2W = 0, DVT0 = 1.3621338, DVT1 = 0.3845146, DVT2 = 0.0577255, U0 = 259.5304169, UA = -1.413292E-9, UB = 2.229959E-18, UC = 4.525942E-11, VSAT = 9.411671E4, A0 = 1.7572867, AGS = 0.3740333, B0 = -7.087476E-9, B1 = -1E-7, KETA = - 4.331915E-3, A1 = 0, A2 = 1, RDSW = 111.886044, PRWG = 0.5, PRWB = -0.2, WR = 1, WINT = 0, LINT = 1.701524E-8, XL = 0, XW = -1E-8, DWG = -1.365589E-8, DWB = 1.045599E-8, VOFF = - 0.0927546, NFACTOR = 2.4494296, CIT = 0, CDSC = 2.4E-4, CDSCD = 0, CDSCB = 0, ETA0 = 3.175457E-3, ETAB = 3.494694E-5, DSUB = 0.0175288, PCLM = 0.7273497, PDIBLC1 = 0.1886574, PDIBLC2 = 2.617136E-3, PDIBLCB = -0.1, DROUT = 0.7779462, PSCBE1 = 3.488238E10, PSCBE2 = 6.841553E-10, PVAG = 0.0162206, DELTA = 0.01, RSH = 6.5, MOBMOD = 1, PRT = 0, UTE = -1.5, KT1 = -0.11, KT1L = 0, KT2 = 0.022, UA1 = 4.31E-9, UB1 = -7.61E-18, UC1 = -5.6E-11, AT = 3.3E4, WL = 0, WLN = 1, WW = 0, WWN = 1, WWL = 0, LL = 0, LLN = 1, LW = 0, LWN = 1, LWL = 0, CAPMOD = 2, XPART = 0.5, CGDO = 8.53E-10, CGSO = 8.53E-10, CGBO = 1E-12, CJ = 9.513993E-4, PB = 0.8, MJ = 0.3773625, CJSW = 2.600853E-10, PBSW = 0.8157101, MJSW = 0.1004233, CJSWG = 3.3E-10, PBSWG = 0.8157101, MJSWG = 0.1004233, CF = 0, PVTH0 = - 8.863347E-4, PRDSW = -3.6877287, PK2 = 3.730349E-4, WKETA = 6.284186E-3, LKETA = - 0.0106193, PU0 = 16.6114107, PUA = 6.572846E-11, PUB = 0, PVSAT = 1.112243E3, PETA0 = 1.002968E-4, PKETA = -2.906037E-3) . MODEL CMOSP PMOS (LEVEL = 7, VERSION = 3.1, TNOM = 27, TOX = 4.1E-9, XJ = 1E-7, NCH = 4.1589E17, VTH0 = - 0.3948389, K1 = 0.5763529, K2 = 0.0289236, K3 = 0, K3B = 13.8420955, W0 = 1E-6, NLX = 1.337719E-7, DVT0W = 0, DVT1W = 0, DVT2W = 0, DVT0 = 0.5281977, DVT1 = 0.2185978, DVT2 = 0.1, U0 = 109.9762536, UA = 1.325075E-9, UB = 1.577494E-21, UC = -1E-10, VSAT = 1.910164E5, A0 = 1.7233027, AGS = 0.3631032, B0 = 2.336565E-7, B1 = 5.517259E-7, KETA = 0.0217218, A1 = 0.3935816, A2 = 0.401311, RDSW = 252.7123939, PRWG = 0.5, PRWB = 0.0158894, WR = 1, WINT = 0, LINT = 2.718137E-8, XL = 0, XW = -1E-8, DWG = -4.363993E-8, DWB = 8.876273E-10, VOFF = -0.0942201, NFACTOR = 2, CIT = 0, CDSC = 2.4E-4, CDSCD = 0, CDSCB = 0, ETA0 = 0.2091053, ETAB = -0.1097233, DSUB = 1.2513945, PCLM = 2.1999615, PDIBLC1 = 1.238047E-3, PDIBLC2 = 0.0402861, PDIBLCB = -1E-3, DROUT = 0, PSCBE1 = 1.034924E10, PSCBE2 = 2.991339E-9, PVAG = 15, DELTA = 0.01, RSH = 7.5, MOBMOD = 1, PRT = 0, UTE = -1.5, KT1 = -0.11, KT1L = 0, KT2 = 0.022, UA1 = 4.31E-9, UB1 = - 7.61E-18, UC1 = -5.6E- 11, AT = 3.3E4, WL = 0, WLN = 1, WW = 0, WWN = 1, WWL = 0, LL = 0, LLN = 1, LW = 0, LWN = 1, LWL = 0, CAPMOD = 2, XPART = 0.5, CGDO = 6.28E-10, CGSO = 6.28E-10, CGBO = 1E- 12, CJ = 1.160855E-3, PB = 0.8484374, MJ = 0.4079216, CJSW = 2.306564E-10, PBSW = 0.842712, MJSW = 0.3673317, CJSWG = 4.22E-10, PBSWG = 0.842712, MJSWG = 0.3673317, CF = 0, PVTH0 = 2.619929E-3, PRDSW = 1.0634509, PK2 = 1.940657E-3, WKETA = 0.0355444, LKETA = - 3.037019E-3, PU0 = -1.0227548, PUA = -4.36707E-11, PUB = 1E-21, PVSAT = -50, PETA0 = 1E-4, PKETA = -5.167295E-3)

Tablo 4.2. Tasarlanan memkapasitör devresinde devre elemanlarının değerleri

$C=3\text{nF}$
$R=12\text{k}\Omega$
$I_A=33\mu\text{A}$
$f=20\text{ kHz}$
$W/L (T_A, T_B, T_C, T_D)=100\mu\text{m}/0.36\mu\text{m}$
$V_{DD}=-V_{SS}=0.9\text{V}$

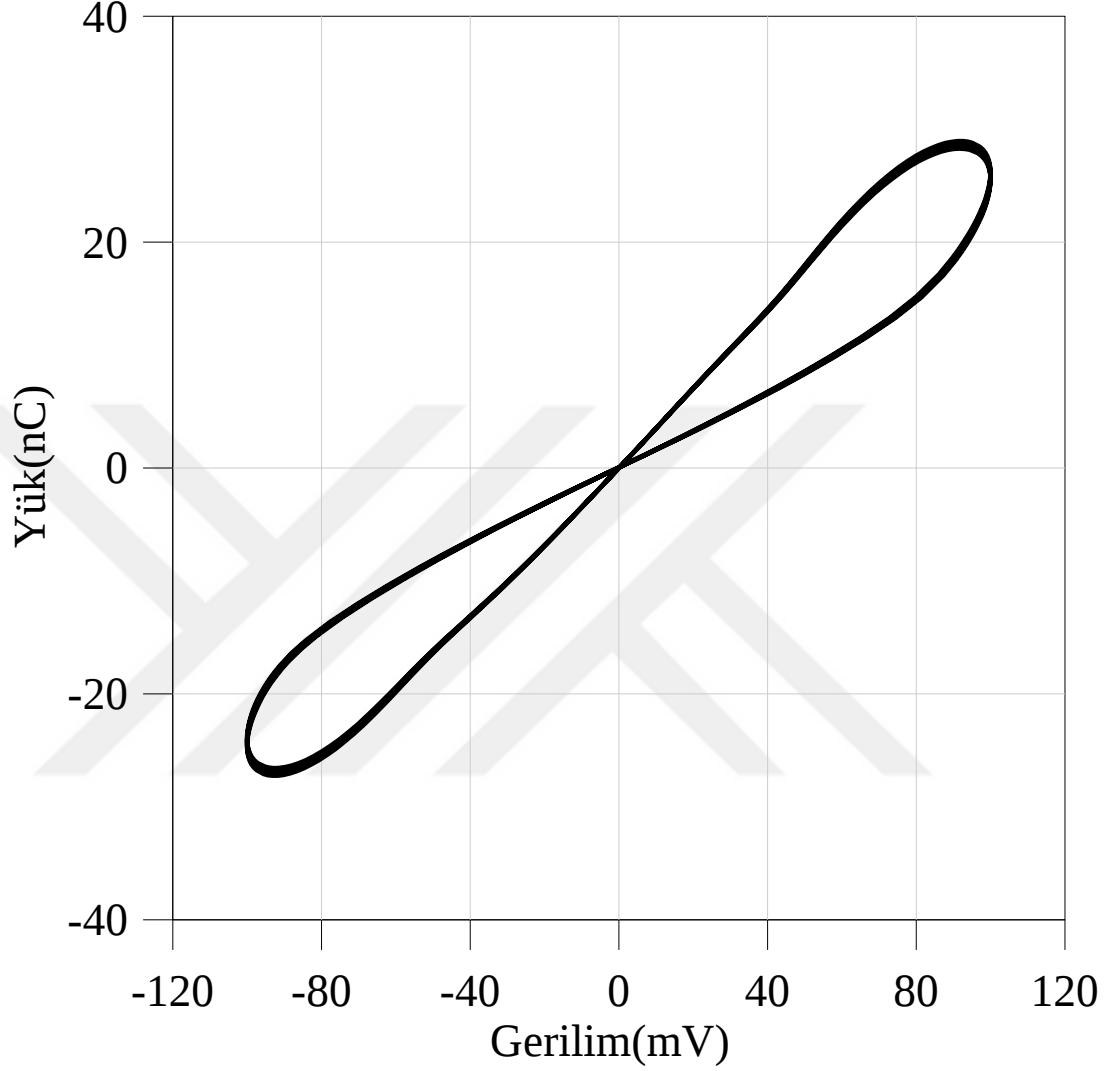
Memkapasitör devresinde incelenmesi gereken grafiklerden biri akım-gerilim ve yük - gerilim ilişkisinin zamana bağlı değişimidir. Tasarlanan memkapasitör devresi 20kHz frekans ve 100mV gerilim değerlerinde incelenmiştir. Memkapasitör bir tür kapasitör olduğu için sinüzoidal sinyal uygulanarak akım-gerilim arasında faz farkının olması gerektiği Şekil 4.5 a’da görülmektedir.



Şekil 4.5. (a) Tasarlanan memkapasitör devresinde akım-gerilimin zamana bağlı değişimi **(b)** yük-gerilim değişimi.

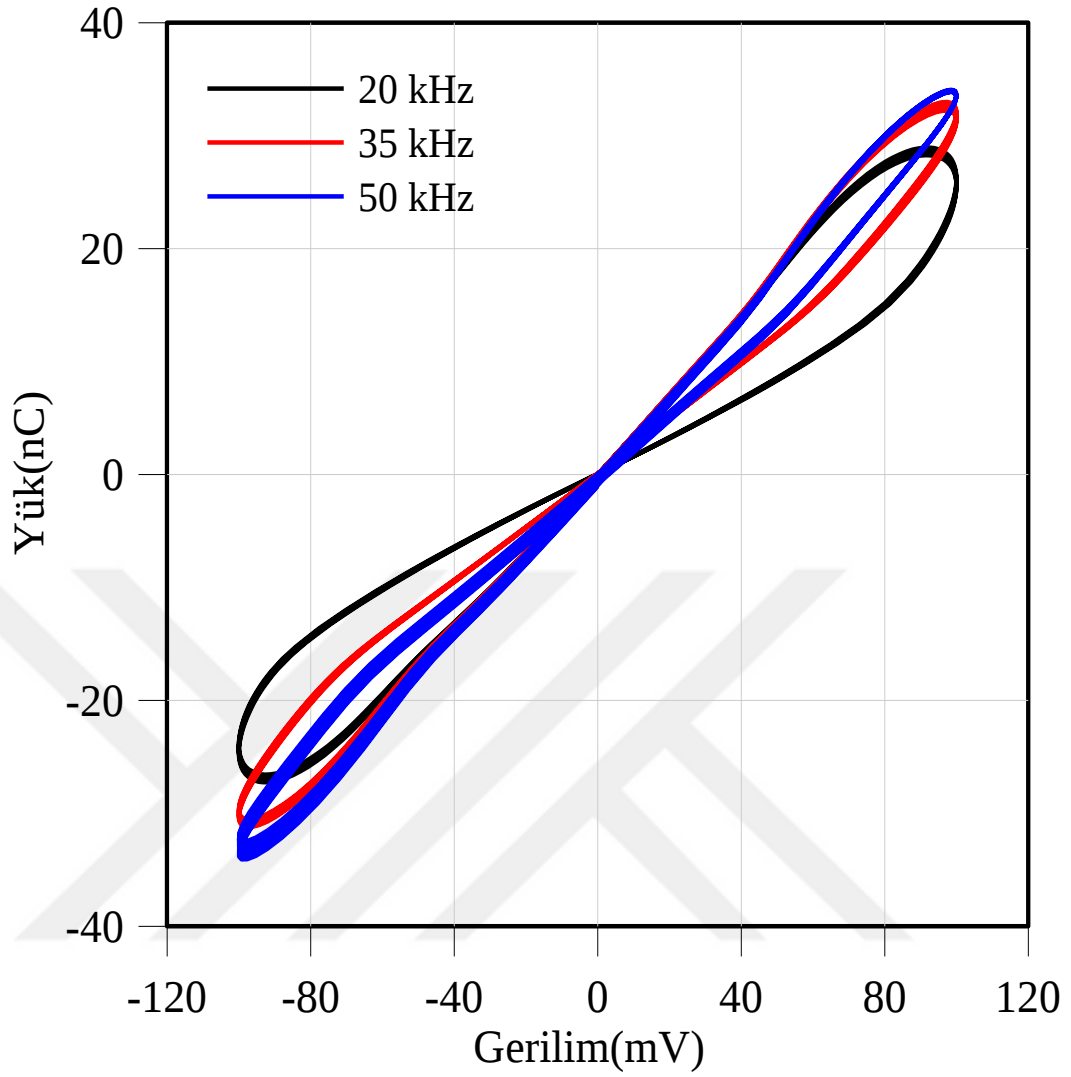
Araştırmacılar tarafından memristör, memkapasitör ve memindüktörde aranan ortak davranış histerezis eğrisi oluşturmaktadır. Ancak bu davranışı sergilemeyen memkapasitör emülatör devreleri literatürde mevcuttur. Tasarlanan emülatör devresinde yük-gerilim

arasında histerezis eğrisi oluşturduğu Şekil 4.6’da da görülmektedir. Histerezis eğrisinin tam sıfır noktasından geçtiği ve simetrik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



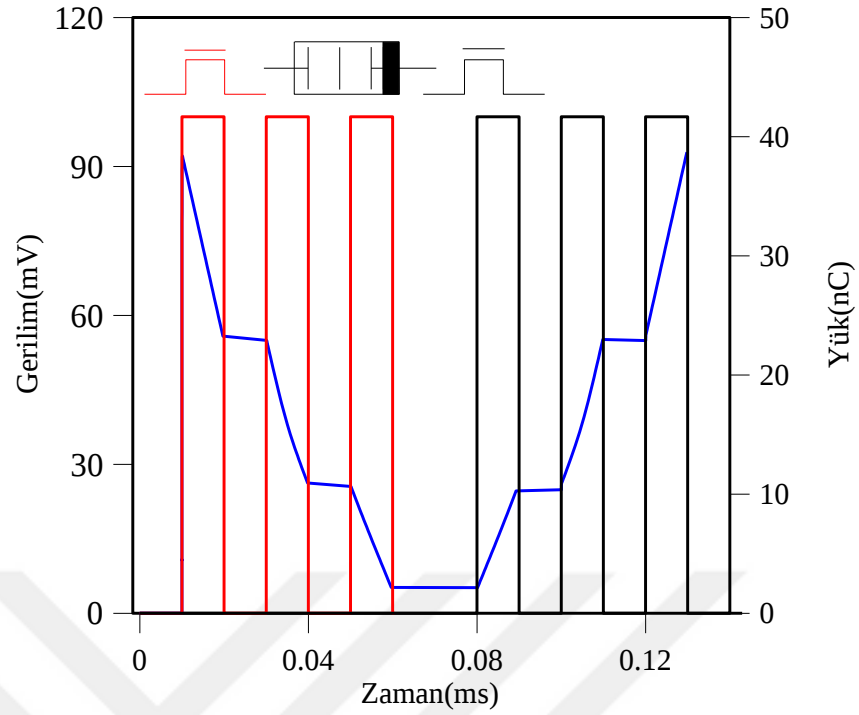
Şekil 4.6. Tasarlanan memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.

İncelenmesi gereken diğer bir özellik ise aynı sinüzoidal gerilim değeri altında farklı frekans değerlerinde oluşan histerezis eğrileridir. Devrenin farklı frekans değerlerinde çalışması devreye bir avantaj katmaktadır. Tasarlanan memkapasitör emülatör devresinin farklı frekans aralıklarına sahip devrelerde uygun olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 4.7’de üç farklı frekans değerinde devrenin yük-gerilim arasındaki grafiğin ideal bir histerezis eğrisi olduğu görülmektedir.



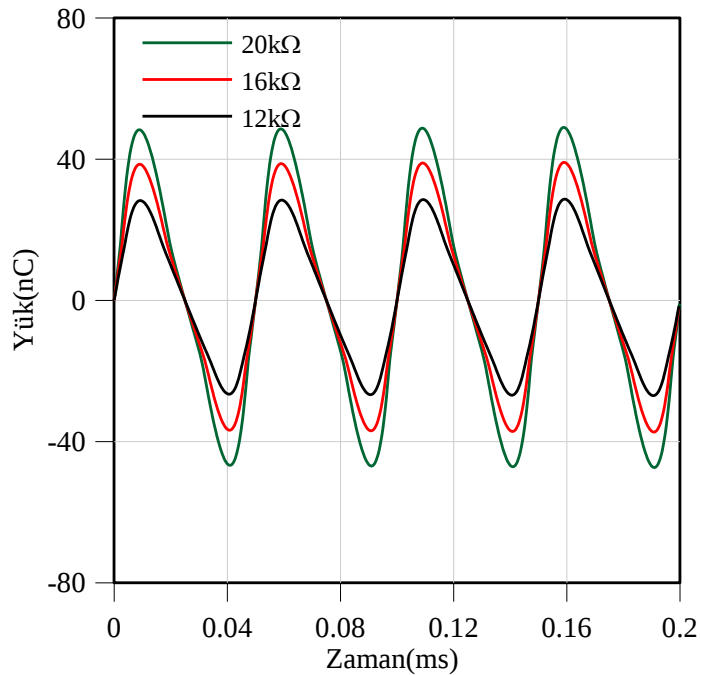
Şekil 4.7.Farklı frekans değerlerinde memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.

Tasarlanan memkapasitör emülatör devresinde incelenmesi gereken en önemli özelliklerinden biriside gerilim değişimine bağlı olarak yükün hafızada tutulmasıdır. Uygulanan gerilim süresince belli bir değerde olan yükün gerilim kesilmesi durumunda mevcut durumunu koruması ve gerilim tekrar uygulandığında mevcut durumu tekrar devam ettirmesi gerekmektedir. Bunu analiz etmek için tasarlanan memkapasitör emülatör devresine her iki uçtan darbe gerilimi uygulandı ve yük değişimi gözlemlenmektedir. Emülatör devresi tam yüzer uçlu (floating) olduğundan uygulanan darbe gerilimlerine bağlı olarak bir taraftan artan diğer taraftan azalan olması gerekmektedir. Uygulanan darbe gerilimine bağlı olarak yük değerinin bir taraftan arttığı diğer taraftan azaldığı Şekil 4.8’de görülmektedir.



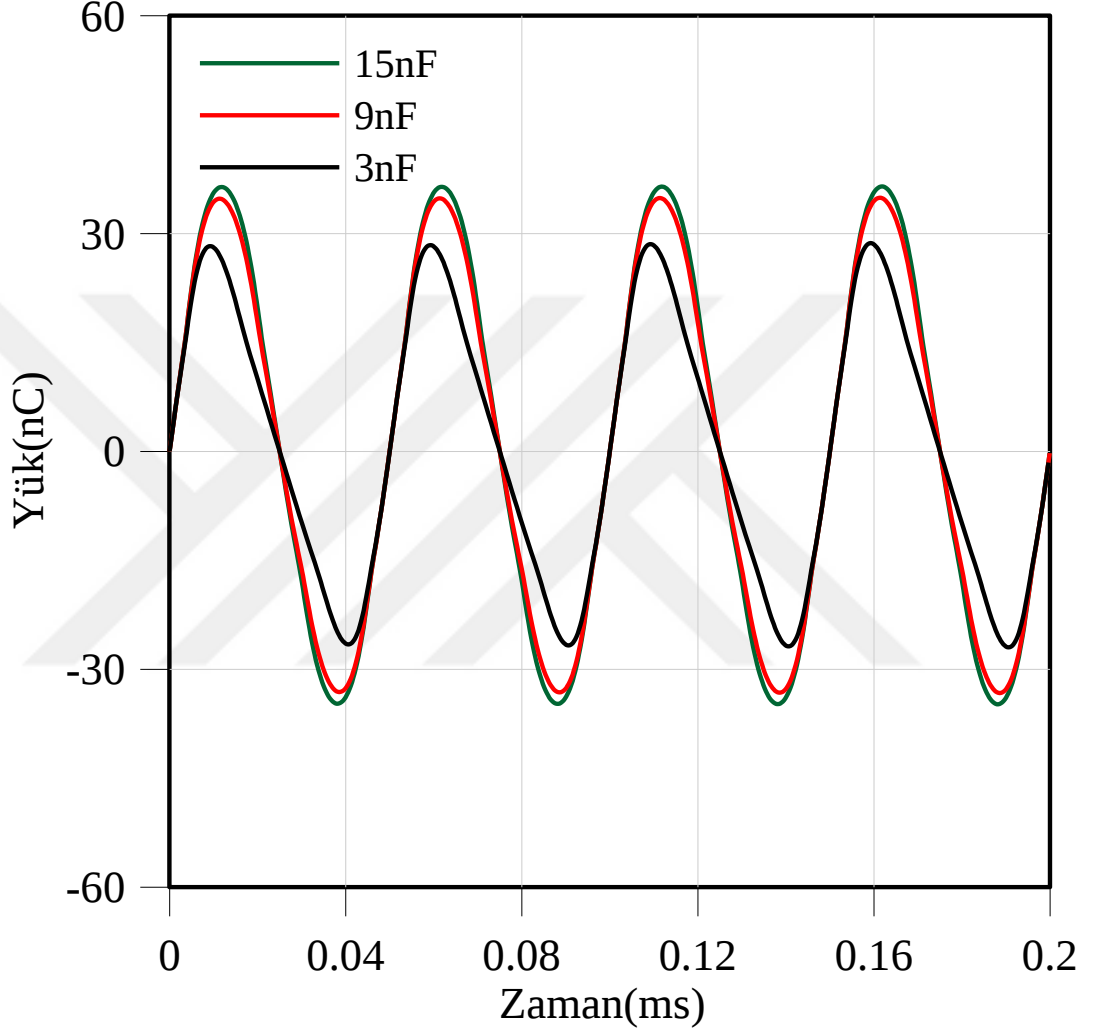
Şekil 4.8. Tasarlanan memkapasitörün her iki taraftan uygulanan darbe çiftine göre hafıza testi.

Memkapasitör emülatör devresinde kullanılan pasif devre elemanı direnç değerinin değiştirilmesi ile yük değerinin değiştiği Şekil 4.9’da görülmektedir. Bu özellik tasarlanan memkapasitör elemanın kullanılacağı devrenin yük ve hafıza ihtiyacına göre direnç değerinin değiştirilmesi ile ona uygun değer seçilmesini sağlamaktadır.



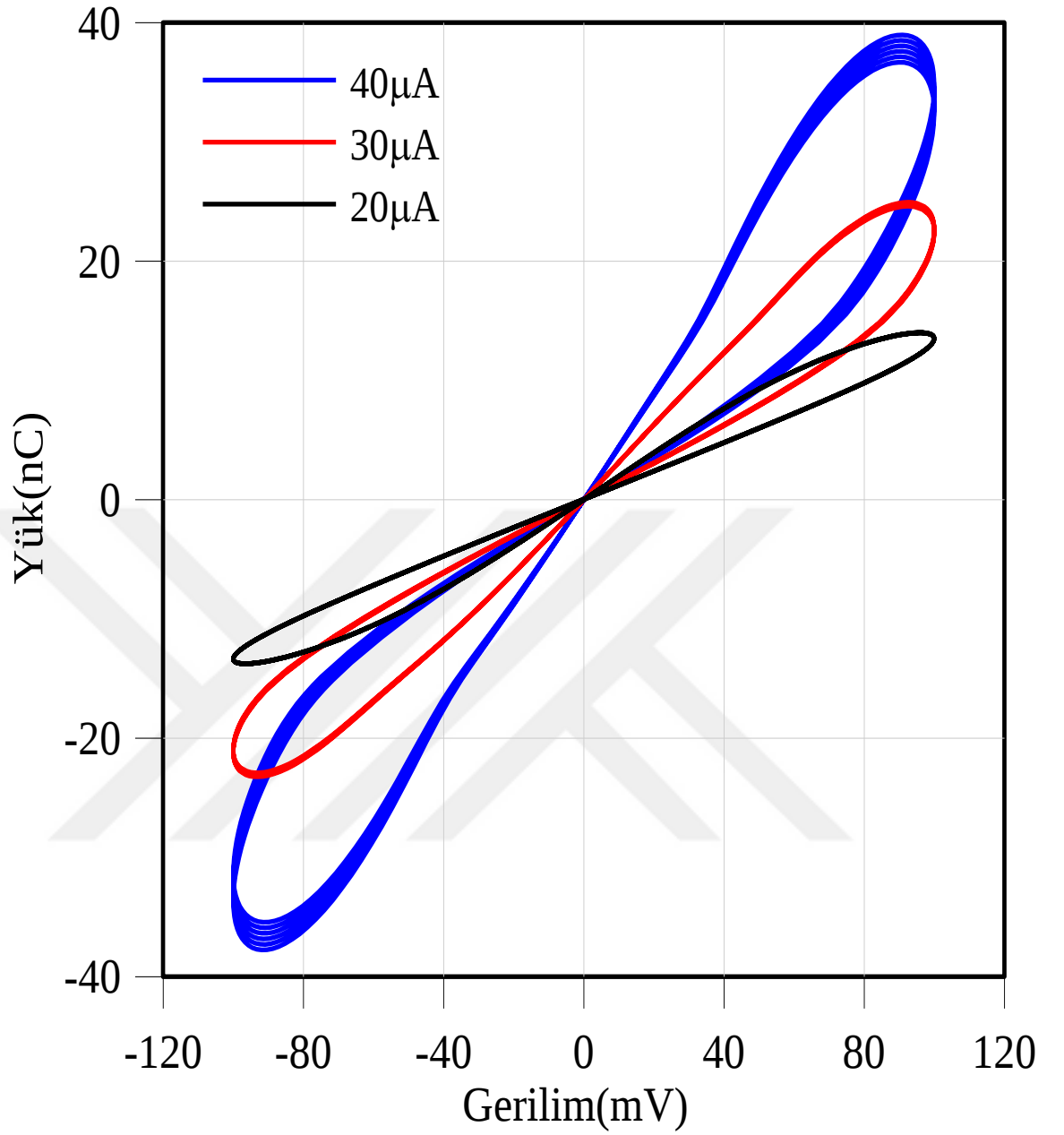
Şekil 4.9. Farklı R (direnç) değerleri kullanıldığında yükün zamana göre değişimi.

Devreye farklı bir özellik kazandıran diğer pasif devre elemanı kapasitörün değerinin değiştirilmesi ile yük değerinin değiştiği Şekil 4.10’da görülmektedir. Tasarlanan devre elemanının kullanılacağı devrelerde kapasitör değerinin değiştirilmesi ile uygun yük değeri sağlanabilmektedir.



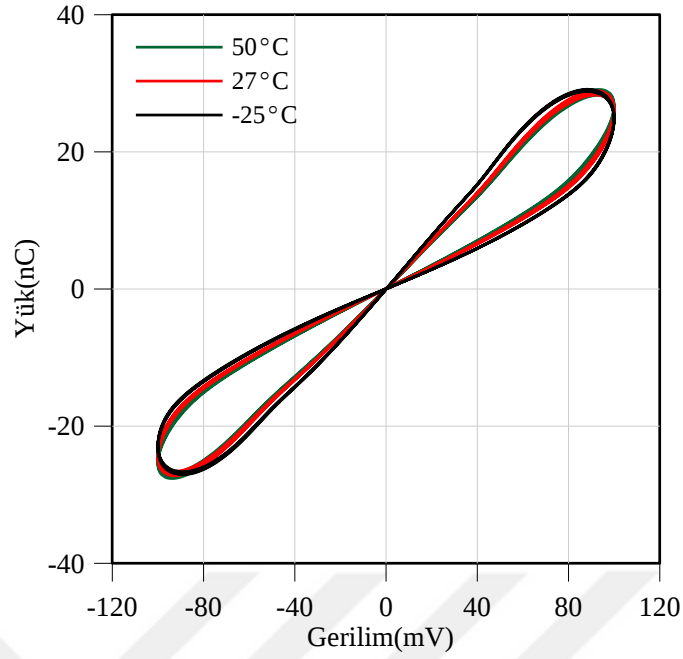
Şekil 4.10. Farklı C (kapasitans) değerleri kullanıldığında yükün zamana göre değişimi.

Memkapasitör emülatör devresinin OTA akımının değiştirilmesi ile rahatlıkla elektronik olarak kontrol edilebilmektedir. Uygulanan OTA akım değerlerinin devreye nasıl etki ettiği ve buna bağlı yük değişiminin nasıl değiştiği Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Şekil 4.11’den de anlaşılacağı üzere farklı akım değerlerinde tasarlanan elemanın farklı tepkiler sergilediği görülmektedir.



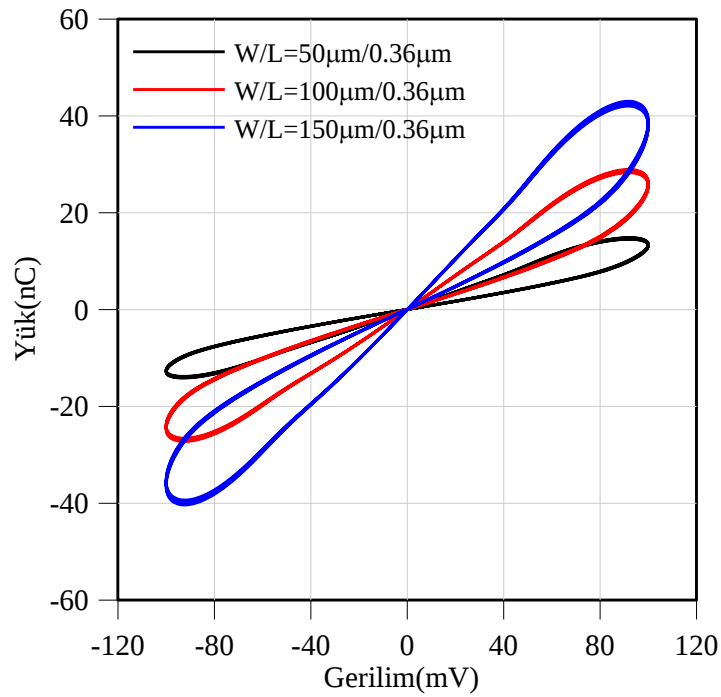
Şekil 4.11. Farklı OTA akımları uygulandığında memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.

Sıcaklık devre elemanlarının çalışmasını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bundan dolayı aktif ve pasif devre elemanlarının farklı sıcaklık değerlerinde çalışabilmesi ve kullanılacak devrelerde belli sıcaklık değerlerinde istikrarlı çalışması devreye artı bir özellik kazandırır. Tasarlanan memkapasitör emülatör devre elemanının farklı sıcaklık değerlerinde çalışmasını analiz edilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı tasarlanan elemanın farklı sıcaklık değerlerinde ideal memkapasitör histerezis eğrisine sahip olduğu Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



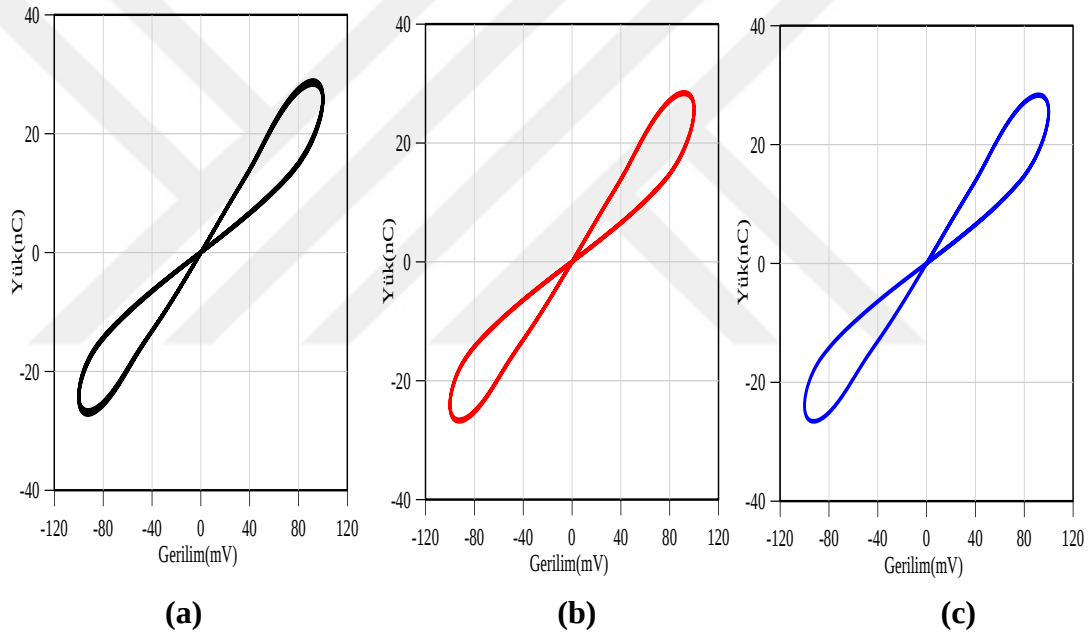
Şekil 4.12. Farklı sıcaklıklarda memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.

Tasarlanan emülatör devresinde kapasitör olarak kullanılan MOS'ların genişlik ve uzunluk boyutları değiştirilerek üzerinden geçen yük kontrol edilebilmektedir. Bu özelliği sayesinde tasarlanan devre elemanı kullanılacak devrelere uygun MOS boyutları tercih edilebilir. Farklı MOS boyutlarında ideal memkapasitör histerezis eğrisinin değişimi Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



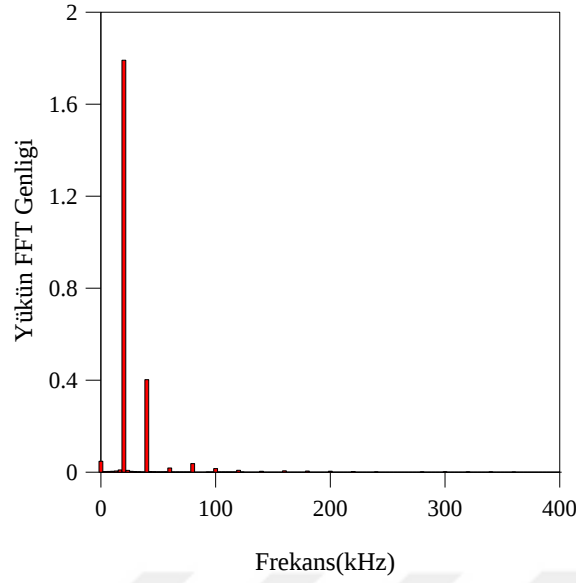
Şekil 4.13. Farklı MOS boyutlarında (W/L) memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi.

Memkapasitörde kullanılan pasif devre elemanı kapasitörün değerinin değiştirilmesi ile yük değişimi kontrol edilebilmektedir. Kullanılan kapasitör değerine göre devrenin çalışma frekansı ayarlanabilmektedir. Bu özelliği sayesinde memkapasitör elemanının kullanılacağı devrelerin frekans aralığına göre sadece pasif devre elemanı kapasitörün değeri değiştirilerek çalışma frekansı ayarlanabilir. Farklı kapasitör değerlerine karşılık gelen frekans değerleri Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Burada kapasitörün değişime paralel olarak frekans değiştiği ve ideal memkapasitörün histerezis eğrisinin değişmediği görülmektedir. Bütün bu elektrisel özellikleri sayılan tam yüzer uçlu (floating) memkapsitör devresinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılıp avantaj ve dezavantajları Tablo 4.3'te gösterilmektedir.



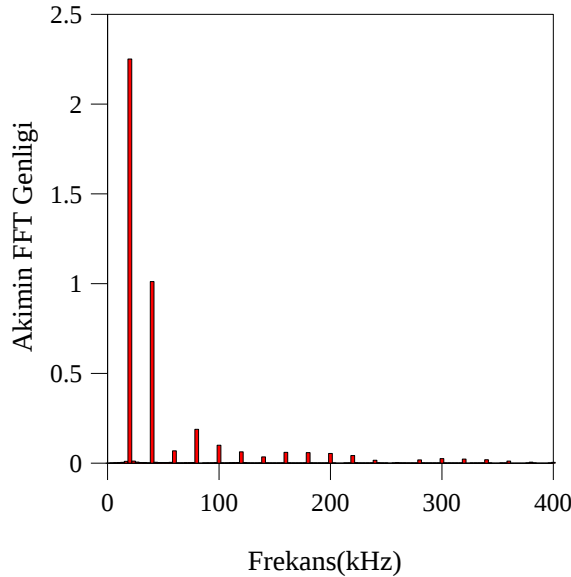
Şekil 4.14. Farklı kapasitans ve frekans değerlerinde memkapasitörün yük-gerilim ilişkisi. **(a)** $C=3\text{nF}$, $f=20\text{kHz}$ **(b)** $C=6\text{nF}$, $f=10\text{kHz}$ **(c)** $C=12\text{nF}$, $f=5\text{KHz}$

Memkapasitör emulatör devresinin elektrisel analizleri yapıldıktan sonra harmoniklerin incelenmesi için fourier analizleri SPICE programı yardımıyla gerçekleştirildi. İlk fourier analizi yük için gerçekleştirildi. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi 20kHz'de en büyük harmonik elde edilirken ikinci harmonik 40 kHz değerinde görüldü. Sonrasında ise, düşük genliklere sahiptir harmonikler görülmüştür. Histerezis özelliği yumuşak anahtarlama olduğu için zaten beklendiği gibi yüksek dereceden harmonikler bulunmamaktadır.



Şekil 4.15. Memkapasitörün fourier transfer formu yük genliği.

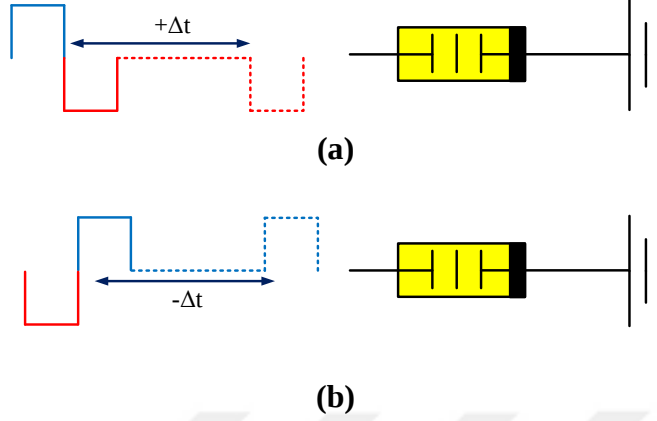
Fourier analizi akım için gerçekleştirildi. Şekil 4.16’da görüldüğü gibi 20kHz’de en büyük harmonik elde edilirken ikinci harmonik 40 kHz değerinde görüldü. Sonrasında ise düşük genliklere sahiptir olsa da yüke nazaran daha fazla harmonikler görülmüştür. Histerezis özelliği yumuşak anahtarlama olduğu için burada da beklendiği gibi yüksek dereceden harmonikler bulunmamaktadır.



Şekil 4.16. Memkapasitörün fourier transfer formu akım genliği.

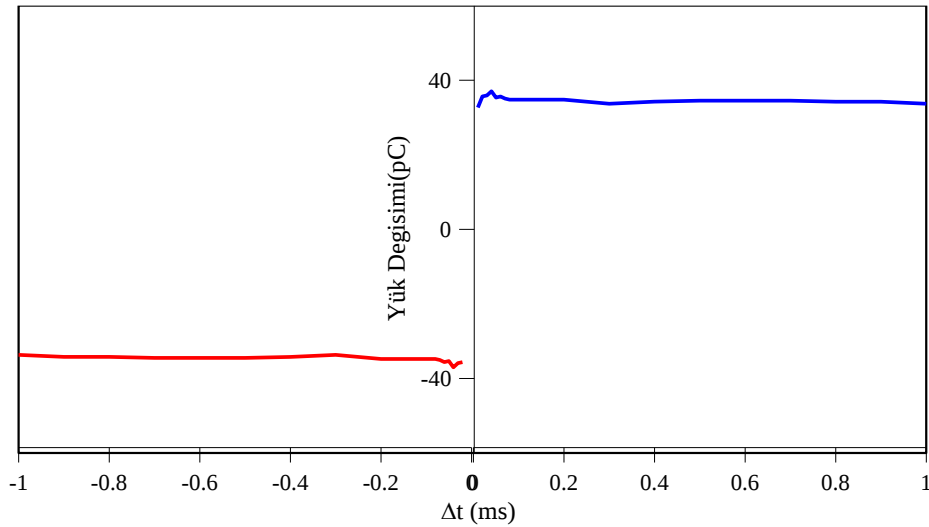
Memkapasitör devresinin STDP özelliğinin olup olmadığı SPICE benzetim programında 30 adet darbe çifti Şekil 4.17’de görüldüğü gibi uygulanarak incelendi. Şekil 4.17a’da görüldüğü gibi önce pozitif ve sonrasında negatif darbe çifti uygulanarak pozitif Δt , Şekil

4.17b’de görüldüğü gibi önce negatif sonrasında ise pozitif darbe çifti uygulandığında negatif Δt elde edilir



Şekil 4.17. (a) Önce pozitif sonra negatif gerilimin uygulanması **(b)** Önce negatif sonra pozitif gerilimin uygulanması.

Uygulanan darbe çifti genliği sabit kalması şartı ile zaman farkı sıfırdan başlayarak belli aralıklarla artırılmak suretiyle uygulandı ve net yük değişiminin yaklaşık sabit kaldığı görüldü. Aynı işlemler zaman farkı sıfırdan negatif yönde artacak şekilde uygulandı ve burada da net yük değişiminin yaklaşık sabit olduğu görüldü. Uygulanan darbe çiftlerine bağlı olarak net yük zamanla değişiyorsa bu elemanda STDP özelliğinin olduğu anlaşılır. Ancak hem pozitif hem de negatif darbe çiftlerinin uygulanması sonucu net yük değerlerinin yaklaşık sabit kaldığı Şekil 4.18’de görülmektedir. Bu yüzden kullanılan memkapasitör devresinin STDP özelliğinin zayıf olduğu ve nöromorfik devre uygulamalarında kullanımının çokta avantajlı olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.18. Memkapasitör devresine ait STDP değişimi.

Tablo 4.3.Tasarlanan Memkapasitör devresinin önceki çalışmalarla karşılaştırılması

Literatürdeki Mevcut Çalışmalar	Aktif Bileşen Sayısı	Pasif Bileşen Sayısı	Bütün Pasif Elemanların Topraklı Olma Durumu	Memkapasitör Yüzen/Topraklı	Frekans (Hz)	Mutator Kullanımı	Elektronik Olarak Kontrol Edilebilme
(Demir vd., 2021)	1+1 Tranzistör	3	Evet	Topraklı	1 kHz	Hayır	Evet
(Fouda and Radwan 2012)	4	5	Hayır	Topraklı	10 Hz	Hayır	Evet
(Yesil and Babacan 2020)	2	4	Hayır	Topraklı	500 Hz	Hayır	Evet
(Vista and Ranjan 2019)	1	3	Evet	Topraklı	500 kHz	Hayır	Hayır
(Yuan, L., vd., 2019)	5	13	Hayır	Topraklı	50 Hz	Hayır	Hayır
(Cam Taskiran vd.,2020)	1	2	Evet	Yüzen	80 kHz	Evet	Evet
(Yu V Pershin and Di Ventra 2011)	4	2	Hayır	Yüzen	NA	Evet	Hayır
Tasarlanan Memkapasitör Devresi	2+4 Tranzistör	2	Evet	Yüzen	20 kHz	Hayır	Evet

5.SONUÇ

Bu tez kapsamında, fiziksel olarak gerçekleştirilse de henüz piyasada kolay ulaşılamayan memkapasitörün araştırmacılar tarafından tanınabilmesi ve farklı devre uygulamalarında kullanılabilmesi için yüksek dereceli lineer olmayan yüzer uçlu (floating) memkapasitör emülatör devresi tasarlanmıştır. Memkapasitör emülatör devresini tasarlamak için basit bir yapıya sahip olan aktif devre elemanı MO-OTA, MOS tranzistörler ve pasif devre elemanları kullanılmıştır. MO-OTA kullanılmasının bir avantajı tasarlanan emülatör devresinin elektronik olarak kontrol edilebilirliğini sağlamaktır.

Tasarlanan memkapasitör emülatör devresinin benzetimleri yapılmıştır. Benzetimler; zamana bağlı olarak akım-gerilim ve yük-gerilim değişimleri, farklı frekans değerlerinde yük-gerilim karakteristiği, MO-OTA'nın kutuplanma akımına bağlı olarak yük-gerilim karakteristiği, farklı sıcaklık değerlerinde yük-gerilim karakteristiği, pasif devre elemanı olarak kullanılan direnç ve kapasitörün farklı değerlerinde yük-gerilim karakteristiği, farklı MOS boyutlarında yük-gerilim karakteristiği ve her iki taraftan uygulanan darbe çiftlerine karşılık gelen memkapasitör emülatör devresinin hafıza özelliğine sahip olduğu gösterilmiştir. Teorik olarak memkapasitör analizleri incelenmiştir. İdeal memkapasitör çalışma şekillerine ve temel denklemlerine bakılmıştır. Tasarlanan memkapasitörde yapılan benzetim sonuçları teorik olarak memkapasitör ile karşılaştırılmış olup ideal memkapasitör özelliği gösterdiği görülmüştür. Fiziksel olarak memkapasitör üretilmesi yaygınlaştığında emülatör devreleri ve analizleri literatüre olumlu katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Memkapasitörlerin yüksek hafıza özelliği gerektiren uygulamalarda ve nöromorfik devre uygulamalarında kullanılabileceği öngörülmektedir. Memkapasitörler herhangi bir harici güç kaynağına ihtiyaç duymadan depolama gerektiren devrelerde kullanılabileceklerdir. Lineer olmayan pasif devre elemanları olan memristörler, memkapasitörler ve memindüktörler sayesinde analog ve dijital elektroniğin çalışma alanları genişleyebileceği öngörülmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte bu devre elemanlarının fiziksel üretiminin artacağı düşünülmektedir. Lineer olmayan devre elemanlarına duyulan ihtiyaçtan dolayı bu devre elemanları daha çok devrelerde kullanılabilecektir.

Sonuç olarak bu çalışmada; basit bir yapıya sahip, OTA tabanlı, ayırık devre elemanları ile gerçekleştirilebilen, nonlinear özelliği yüksek ve nonvolatile karakteristiğe sahip bir memkapasitör emülatör devresi tasarlanmıştır.



KAYNAKLAR

- Arbel A.F. and Goldminz, L. (1992) “Output stage for current-mode feedback amplifiers, theory and applications”, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2: 246-255.
- Babacan, Y. (2016) “Memristör Tasarımı ve Yeni Uygulamaları”, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Babacan, Y., Kaçar, F. and Gürkan, K. (2016) “A spiking and bursting neuron circuit based on memristor”, *Neurocomputing*, 203,86–91
- Babacan, Y. (2018) “An Operational Transconductance Amplifier-based Memcapacitor and Meminductor”, *Electrica*, vol. 18, no. 1, pp. 36-38.
- 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., Biolek, Z. and Biolkova, V. (2010) “SPICE modelling of memcapacitor”, *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 7, pp. 520–522.
- Biolek, D. and Biolkova, V. (2010) “Mutator for transforming memristor into memcapacitor”, *ELECTRONICS LETTERS*, Vol. 46 No. 21
- Cam Taskiran, Z.G., Sagbas, M., Ayten, U.E. and Sedef, H. (2020) “A new universal mutator circuit for memcapacitor and meminductor Elements”, *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)* 119
- Chua, L.O. (1971) “Memristor-The Missing Circuit Element”, *IEEE Transactions On Circuit Theor*, 507-519.
- Chua, L. O. (1980). “Device modeling via nonlinear circuit elements”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 27(11); 1014-1044.
- Chua, L. O. (2003) “Nonlinear Circuit Foundations for Nanodevices”, *Part I: The Four-Element Torus*. 91(11).
- Chua, L. O. (2013) “If It’s Pinched It’s a Memristor”, *Memristors and Memristive Systems*, 17-90.
- 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. (2009) “Circuit elements with memory: Memristors, memcapacitors, and meminductors”, *Proc. IEEE*, 97(10), 1717–1724.

- Esraa, M. H., Somia, H.R., Lobna A.S., Ahmed G.R. and Ahmed, H.M. (2017) "Memcapacitor Based Charge Pump", **6th IEEE International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies**.
- Fouda, M. E. and Radwan, A. G. (2012) "Charge controlled memristor-less memcapacitor emulator", **Electron. Lett.** 48 (23) 1454–1455.
- Fouda, M. E., Khatib, M. A. and Radwan, A. G. (2013) "On the mathematical modeling of series and parallel memcapacitors,". **25th International Conference on Microelectronics**, (ICM) pp. 1–4.
- Kang, S.M. and Chua, L.O. (1976) "Memristive devices and system", **Proceedings of the IEEE**, 209-223.
- 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.
- Li, Y., Yang, C. and Yu, Y. (2017) "Research on low pass filter based on Memristor and Memcapacitor", **Chinese Control Conference (CCC), 36th International Conference on. IEEE**, 5110-5113.
- Madsar, M., Babacan, Y. and Cicek, K. (2020) "FCS Based Memcapacitor Emulator Circuit", **Journal of the Institute of Science and Technology**, 10(1): 112-117.
- Nithya, N. and Paramasivam, K. (2020). "A Comprehensive Study on the Characteristics, Complex Materials and Applications of Memristor", **2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS) (s. 171-176). Coimbatore, India: IEEE**.
- Pershin, Yu V. and Di Ventra, M. (2011) "Emulation of floating memcapacitors and meminductors using current conveyors", **Electronics Letters**, 47(4), 243–244.
- Raj, A., Kumar, K. and Kumar, P. (2021) "CMOS realization of OTA based tunable grounded meminductor", **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**, December 2020.
- Ruxin, L., Ruixin, D., Shuchao, Q. and Xunling, Y. (2020) "A new type artificial synapse based on the organic copolymer memcapacitor", **Organic Electronics** 81 105680
- Sah, M. P., Yang, C., Budhathoki, R. K., Kim, H. and Yoo, H.J. (2013) "Implementation of a memcapacitor emulator with off-the-shelf devices", **Elektronika ir Elektrotechnika**, 19(8), 54–58.
- 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.

- Sharma, P.K., Ranjan, R.K. and Kumngern, M. (2020) “Charged Controlled Mem Element Emulator and Its Application in a Chaotic System”, *IEEE*, Volume 8, 171397-171407
- Snider, G.S., Steward, D.R., Williams, S.R. and Strukov, D.B. (2008) “The missing memristor found”, *Nature*, 80-83.
- Sozen, H. and Cam, U. (2013) "On the realization of memristor based RC high pass filter", *8th IEEE International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, pp. 45-48,
- Strukov, D. B., Snider, G. S., Stewart, D. R. and Williams, R. S. (2008) “The missing memristor found”, *Nature*, 453 (7191), 80-83.
- Tiebout, M. (2003) Voltage-controlled capacitor.
- Vista, J. and Ranjan, A. (2019) “Design of memcapacitor emulator using DVCCTA.”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1172(012104), 1–8.
- Vista, J. and Ranjan, A. (2020) “Simple charge controlled floating memcapacitor emulator using DXCCDITA”, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 104:37–46
- Yener, S. C., Mutlu, R. and Kuntman, H. (2014) “A new memristor-based high-pass filter/amplifier: Its analytical and dynamical models”, *Radioelektronika, 2014 24th International Conference*, 1-4.
- 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.
- Yu, D. S., Liang, Y., Chen, H. and Iu, H. H. C. (2013). “Design of a practical memcapacitor emulator without grounded restriction”, *IEEE Transactions on Circuits and System II*, 60(4), 207–211.
- Yu, D. S., Liang, Y., Iu, H. H. C. and Chua, L. O. (2014). “A universal mutator for transformations among memristor, memcapacitor, and meminductors”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, 61(10), 758–762.
- Yuan, F., Wang, G.Y. and Wang, X.W. (2017) “Chaotic oscillator containing memcapacitor and meminductor and its dimensionality reduction analysis”, *Chaos* 27, 033103
- Yuan, F., Li, Y., Wang, G., Dou, G., and Chen, G. (2019) “Complex dynamics in a memcapacitor-based circuit”, *Entropy*, 21(2), 188.
- Wang, D., Hu, Z., Yu, X. and Yu, J. (2009) “A PWL model of memristor and its application example, Communications, Circuits and Systems”, *2009. ICCAS 2009. International Conference on*, 932-934.
- 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 A*, 376, 394–399

Wang, G.Y., Cai, B. Z. and Jin, P.P. (2016) “Memcapacitor model and its application in a chaotic oscillator”, *Chinese Physics B*, 25(1):489-500.

