

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEMKAPASİTÖR DEVRE ELEMANININ TASARIMI
VE UYGULAMALARI

Ahmet Hüdai KAYA

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2022

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEMKAPASİTÖR DEVRE ELEMANININ TASARIMI
VE UYGULAMALARI

Ahmet Hüdai KAYA

DANIŞMAN
Doç. Dr. Abdullah YEŞİL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2022

ONAY

Ahmet Hüdai KAYA tarafından hazırlanan “**Memkapasitör Devre Elemanının Tasarımı ve Uygulamaları**” adlı tez çalışması 23/08/2022 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr., Abdullah YEŞİL
(Danışman)

Doç. Dr., Yunus BABACAN
(Üye)

Dr. Öğr. Üye., Abdullah GÖKYILDIRIM
(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Abdullah YEŞİL

Enstitü Müdürü

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Memkapasitör Devre Elemanının Tasarımı ve Uygulamaları**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 28 / 09 / 2022

Ahmet Hüdai KAYA

İmza

ÖNSÖZ

Elektronik alandaki gelişmeler, pasif devre elemanlarını çoğalmasına sebebiyet vermiştir. Bunun üzerine ortaya çıkan pasif devre elemanlarının (memristör, memkapasitör ve memindüktör) her koşulda efektif şekilde çalışabilecek şekilde üretilmesi problemi ortaya çıkmıştır. Bu amaçla pasif ve aktif devre elemanları kullanılarak farklı memkapasitör devreleri üretilmeye başlanmıştır. Ayrıca üretilen bu devrelerin çalışabilir olduğuna dair kanıtlar sunulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında üç farklı memkapasitör devre elemanı üretilmiş olup frekans bağıllık ve sıcaklık bağıllık gibi testler uygulanmış ve ayrıyeten filtre devresi yapılarak kullanılabilirliği test edilmiştir. Ayrıca bu devreler, literatürde hazırlanmış olan diğer memkapasitör devreleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması ve projelerin her aşamasında desteklerini, bilgi birikimini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Abdullah YEŞİL'e şükranlarımı sunarım. Ayrıca projelerin yapılmasında desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Yunus BABACAN'a şükranlarımı sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan annem Meva, babam Fikret'e, varlıkları ile birer motivasyon kaynağı olan ablam Kübra, kardeşim Ceylin'e ve dualarını benden esirgemeyen babaannem Lemiye'ye teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasında BAP-20-1010-003 numaralı projesi kapsamında verdikleri desteklerden dolayı Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne ve 119E458 numaralı proje kapsamında destek verdikleri için de Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEMKAPASİTÖR DEVRE ELEMANININ TASARIMI VE UYGULAMALARI

Ahmet Hüdai KAYA

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdullah YEŞİL

Ağustos 2022, 62 sayfa

L. Chua'nın memristör elemanını keşfetmesi, memindüktör ve memkapasitör isimli devrelerin varlığını öngörmesi üzerine bu devre elemanlarından memristör nanometreler seviyesinde üretilmiştir. Bunun üzerine, farklı çalışma şartlarında çalışabilen ve farklı özelliklere sahip birçok mem-eleman tasarlanmıştır ve bu elemanlar farklı uygulamalarda kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında üç farklı iki ucu kullanılabilir memkapasitör devresi üretilmiştir. Bu üç devre de elektronik kontrol edilebilir ve çarpma devreleri haricinde kullanılan aktif devre elemanları yerine bütünleyici metal oksit yarıiletken (CMOS) devreleri kullanılmıştır gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan devrelerin farklı koşullar altında çalışabildiğini göstermek amacıyla çalışma frekansı, besleme gerilim değerleri ve sıcaklık gibi parametreleri değiştirilerek simülasyon sonuçları verilmiştir. Ayrıca iki ucu kullanılabilir olduğunu göstermek için paralel ve seri bağlanarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bunların yanında üçüncü memkapasitör devresinin deneysel sonuçları elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Memristör, Memristif, Memkapasitör, Memkapasitif, DDCC, CCII, OTA, CMOS

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

MEMCAPACITOR CIRCUIT ELEMENT DESIGN AND ITS APPLICATIONS

Ahmet Hüdai Kaya

**Bandırma Onyedi Eylül University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdullah YEŞİL

August 2022, 62 pages

Hewlett Packard manufactured memristor circuit elements at the nanoscale level following Chua L.'s discovery of the memristor element and his prediction of the existence of circuits termed Meminductor and Memcapacitor. Based on them, memelements with diverse capabilities and the capacity to perform in various working circumstances are constructed.

In this study, three different floating memcapacitor circuits are proposed. These circuits have electronically controllable property and these circuit's active elements except voltage multiplier circuit are employed as CMOS circuits.

In order to show that proposed memcapacitor circuits can work under different conditions, the simulation results which worked with varied frequencies, different supply voltages, different ambient temperatures and Monte-Carlo analysis are contained. Moreover, due to these memcapacitor circuits are floating, this research examined serial and parallel linked memcapacitor characters. Additionally, memory simulation results and the experimental investigation of third memcapacitor circuit that was previously prepared in a research publication is presented in this study.

Keywords: Memristor, Memristive, Memcapacitor, Memcapacitive, DDCC, OTA, CCII, CMOS

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİL LİSTESİ	V
TABLO LİSTESİ.....	VIII
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1 Bağlantı Ucu Sayısı.....	8
2.2 Mutatör Tasarımı	8
2.3 Çalışma Frekans Aralığı	8
2.4 Elektronik Olarak Kontrol Edilebilirlik	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM	10
3.1 Devre Elemanları.....	10
3.1.1 Pasif Devre Elemanları	10
3.1.2 Aktif Devre Elemanları.....	12
3.1.2.1 Metal Oksit Yarıiletken Transistör (MOS).....	12
3.1.2.2 Diferansiyel Fark Akım Taşıyıcı (DDCC)	14
3.1.2.3 İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (OTA)	15
3.1.2.4 İkinci Dereceden Akım Taşıyıcı (CCII).....	15
3.1.2.5 İkinci Kuşak Akım Kontrollü Akım Taşıyıcı (CCCII)	16
3.2 Memkapasitör	17
3.2.1 Yük Kontrollü Memkapasitör.....	18
3.2.2 Gerilim Kontrollü Memkapasitör.....	18

4. HAZIRLANAN MEMKAPASİTÖR DEVRELERİ	20
4.1 Devre-1	20
4.2 Devre-2	22
4.3 Devre-3	23
5. BULGULAR.....	26
5.1 Simülasyon Sonuçları.....	26
5.1.1 Frekansa Bağımlılık Özelliği	31
5.1.2 Elektronik Olarak Kontrol Edilebilirlik Özelliği	33
5.1.3 Seri ve Paralel Bağlanma Performansı	36
5.1.4 Ortam Sıcaklığı Etkisi.....	37
5.1.5 Mutlak Çalışma Aralığı	39
5.1.6 Monte-Carlo Analizi	41
5.1.7 Hafıza Özelliği	43
5.1.8 MC-R ve C-R Karşılaştırılması	43
6. DENEYSEL SONUÇLAR	46
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	51
8. KAYNAKLAR	54
9. EKLER	59
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil

Sayfa

Şekil 1 Yıllara göre memristörler hakkında yapılan yayın sayıları (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memristor) OR (TS=memristive) anahtar kelimesi kullanılarak yayın sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022)	1
Şekil 2 Memristörler hakkında yapılan yayınların yıllara göre atıf sayıları (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memristor) OR (TS=memristive) anahtar kelimesi kullanılarak atıf sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022)	2
Şekil 3 Memkapasitörlerle ilgili yıllara göre yayın sayısı (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memcapacitor) OR (TS=memcapacitive) anahtar kelimesi kullanılarak yayın sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022).....	3
Şekil 4 Memkapasitörler hakkında yapılan yayınların yıllara göre atıf sayıları (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memcapacitor) OR (TS=memcapacitive) anahtar kelimesi kullanılarak atıf sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022)	3
Şekil 5 Pasif devre elemanları matematiksel ilişkiler tablosu	10
Şekil 6 Pasif devre elemanları tablosu	11
Şekil 7 CMOS iç yapısı.....	12
Şekil 8 CMOS akım-gerilim ilişkisi.....	13
Şekil 9 DDCC devre elemanı blok gösterimi.....	14
Şekil 10 OTA elemanı blok görünümü	15
Şekil 11 CCII devre elemanı blok gösterimi	16
Şekil 12 CCCII Blok gösterimi.....	16
Şekil 13 Memkapasitörün fiziksel yapısı	17
Şekil 14 DDCC-OTA memkapasitör devresi	20
Şekil 15 DDCC-CCII memkapasitör devresi	22
Şekil 16 Devre-3 memkapasitörü şematik gösterimi.....	24
Şekil 17 CCII CMOS Devresi.....	26
Şekil 18 DDCC CMOS Devresi	27
Şekil 19 OTA CMOS Devresi	28

Şekil 20 CCCII CMOS Devresi	28
Şekil 21 Devre-1'in histerisiz eğrisi	29
Şekil 22 Devre-2 histerisiz eğrisi.....	30
Şekil 23 Devre-3 histerisiz eğrisi.....	30
Şekil 24 Devre-1'nin frekansa bağlı olarak cevabındaki değişimi	31
Şekil 25 Devre-2'nin frekansa bağlı eğri değişimi	32
Şekil 26 Devre-3'ün frekans bağlı eğri değişimi	32
Şekil 27 Devre-1 OTA geçiş iletkenliğine bağlı elektronik olarak kontrol edilebilirlik özelliği	33
Şekil 28 Devre-1 V_{B1} ayar gerilimine bağlı elektronik kontrol edilebilirlik	34
Şekil 29 Devre-2 V_{B2} 'ye bağlı elektronik kontrol edilebilirlik.....	34
Şekil 30 Devre-2 V_{B1} 'e bağlı elektronik kontrol edilebilirlik	35
Şekil 31 Devre-3 elektronik kontrol edilebilirlik özelliği	35
Şekil 32 Devre-1'in bağlantı şekillerine bağlılığı	36
Şekil 33 Devre-2'nin paralel/seri bağlantı sonuçları	36
Şekil 34 Devre-3'ün paralel/seri bağlantı sonuçları	37
Şekil 35 Devre-1'in sıcaklığa bağlı çalışması.....	38
Şekil 36 Devre 2'nin sıcaklığa bağlı çalışması.....	38
Şekil 37 Devre-3'ün sıcaklığa bağlı çalışması.....	39
Şekil 38 Devre-1'in mutlak çalışma aralığı	40
Şekil 39 Devre-2'nin mutlak çalışma aralığı	40
Şekil 40 Devre-3'ün mutlak çalışma aralığı	41
Şekil 41 Devre-1 Monte-Carlo analizi.....	42
Şekil 42 Devre-2 Monte-Carlo analizi.....	42
Şekil 43 Devre-3 hafıza özelliği.....	43
Şekil 44 a) MC-R ve b) C-R devrelerinin blok gösterimi.....	44
Şekil 45 Devre-1 için MC-R ve M-R devrelerinin simülasyon sonuçları	44
Şekil 46 Devre-2 için MC-R ve M-R devrelerinin simülasyon sonuçları	45
Şekil 47 Devre-3 için MC-R ve M-R devrelerinin simülasyon sonuçları	45
Şekil 48 AD844A DDCC Devresi.....	46
Şekil 49 Hazır devre elemanlarıyla hazırlanan memkapasitör devresi.....	47
Şekil 50 (a) Azalan ve (b) artan memkapasitör devreleri zamana göre giriş gerilimi ve yük eğrileri.....	48

Şekil 51 (a) 20Hz, (b) 25Hz, (c) 40Hz ve (d) 50Hz giriş gerilimi frekans değerleri için azalan memkapasitans gerilim-yük eğrileri	48
Şekil 52 Giriş gerilimlerinin genlikleri sırasıyla (a) 5 V _{P-P} , (b) 6 V _{P-P} ve (c) 7 V _{P-P} için	49
Şekil 53 CCII devre elemanının X terminal direnç değerleri R (a) 330Ω, (b) 560Ω ve (c) 680Ω	50



TABLO LİSTESİ

Tablo

Sayfa

Tablo 1 CCII CMOS devresi W/L değerleri.....	27
--	----



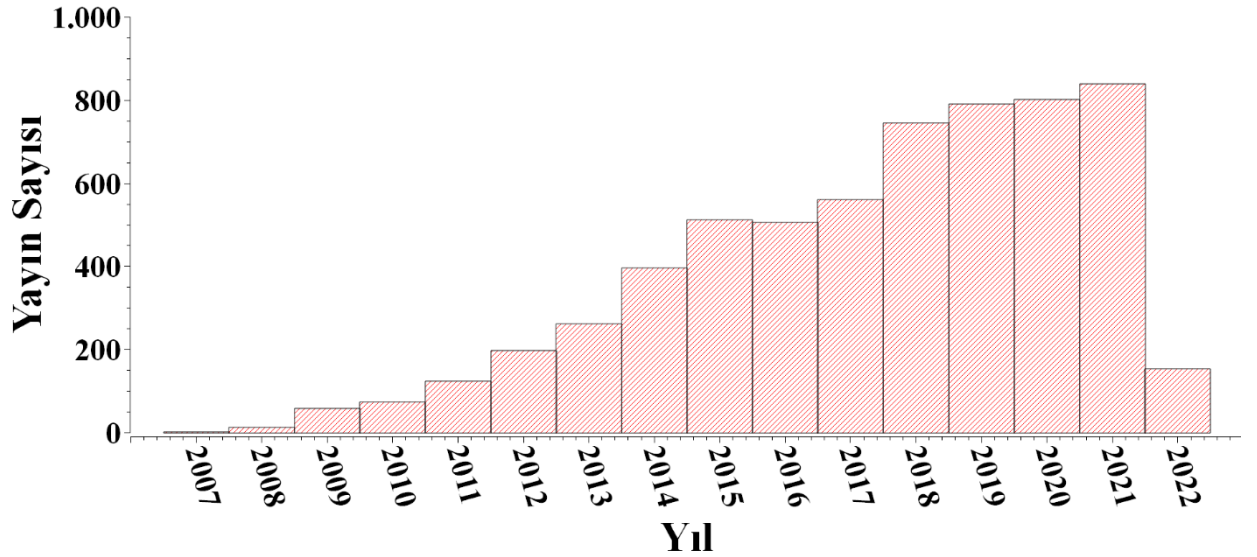
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
Φ	: Akı
I	: Akım
V	: Gerilim
q	: Yük
σ	: Yükün integrali
ρ	: Akımın integrali

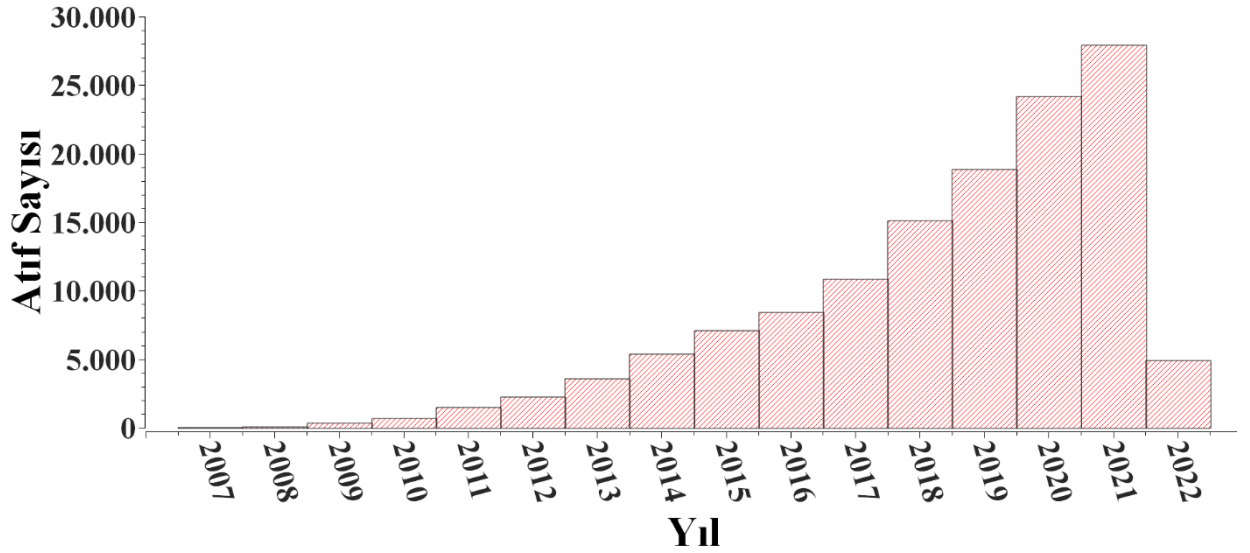
Kısaltmalar	Açıklama
DDCC	: Diferansiyel fark akım taşıyıcı
CCII	: İkinci kuşak akım taşıyıcı
CCCII	: Akım kontrollü ikinci kuşak akım taşıyıcı
OTA	: İşlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi
LDR	: Işık bağımlı direnç
CMOS	: Bütünleyici metal oksit yarıiletken
NMOS	: N tipi metal oksit yarıiletken
PMOS	: P tipi metal oksit yarıiletken

1. GİRİŞ

Memristör pasif devre elemanının L. Chua tarafından keşfedilmesine kadar pasif eleman olarak direnç, kapasitör ve indüktör elemanı bilinmekteydi. Bilinen bu pasif elemanlardan direnç, akım (i) ile gerilim (v) arasındaki; kapasitör, akımın integrali yani yük (q) ile gerilim arasındaki ve indüktör ise gerilimin integrali yani elektriksel akı (ϕ) ile akım arasındaki bağıntıyı kurmaktadır. L. Chua 1971 yılında doğadaki simetriyi öne sürerek akı (ϕ) ile yük (q) arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi veren memristör elemanını keşfetmiştir[1]. İlerleyen zamanlarda L. Chua 1976 yılında memristif sistemlerin denklemlerini çıkarmış ve denklemlerin cevaplarını gözlemlemiştir[2]. Bu çalışmada memristörlerin hafıza özelliği gösterdiği ve giriş gerilimi ve akımı arasında bir histerisiz eğrisi gözlemlenmiştir. Bunların yanında frekans arttıkça elde edilen histerisiz eğrisinin doğrusal hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu dönemde teknolojik yetersizliklerden dolayı çalışmalar duraklamıştır. Bu duraklama 2008 yılında Hewlett Packard (HP) şirketinin memristör elemanını nanometreler seviyesinde üretmesine kadar sürmüştür[3]. HP şirketinin çalışması memristör elemanı için dönüm noktası olmuştur ve yapılan çalışmalarda büyük bir artış gözlemlenmiştir. Gözlemlenen artış Şekil 1’de sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmalara yapılan atıflardaki artış Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 1 Yıllara göre memristörler hakkında yapılan yayın sayıları (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memristor) OR (TS=memristive) anahtar kelimesi kullanılarak yayın sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022)



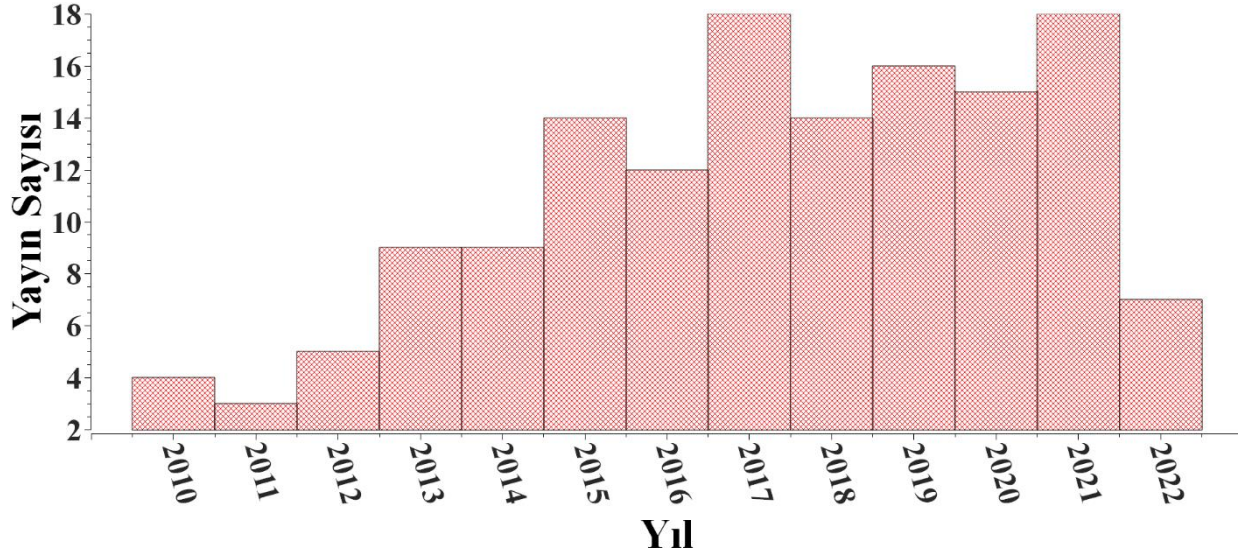
Şekil 2 Memristörler hakkında yapılan yayınların yıllara göre atıf sayıları (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memristor) OR (TS=memristive) anahtar kelimesi kullanılarak atıf sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022)

Memristörler frekansa bağıllık, doğrusal olmayan karakteristik, düşük güç tüketimi ve hafıza özelliği gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler bize birçok kullanım alanı sağlamaktadır. Kısaca sıralanırsa bu kullanım alanları; analog devreler[4]–[6], nöromorfik devreler[7], [8], kaotik sistemlerin gerçekleştirilmesi[9], [10] ve dijital devre elemanı tasarımı[11] gibi özetlenebilir.

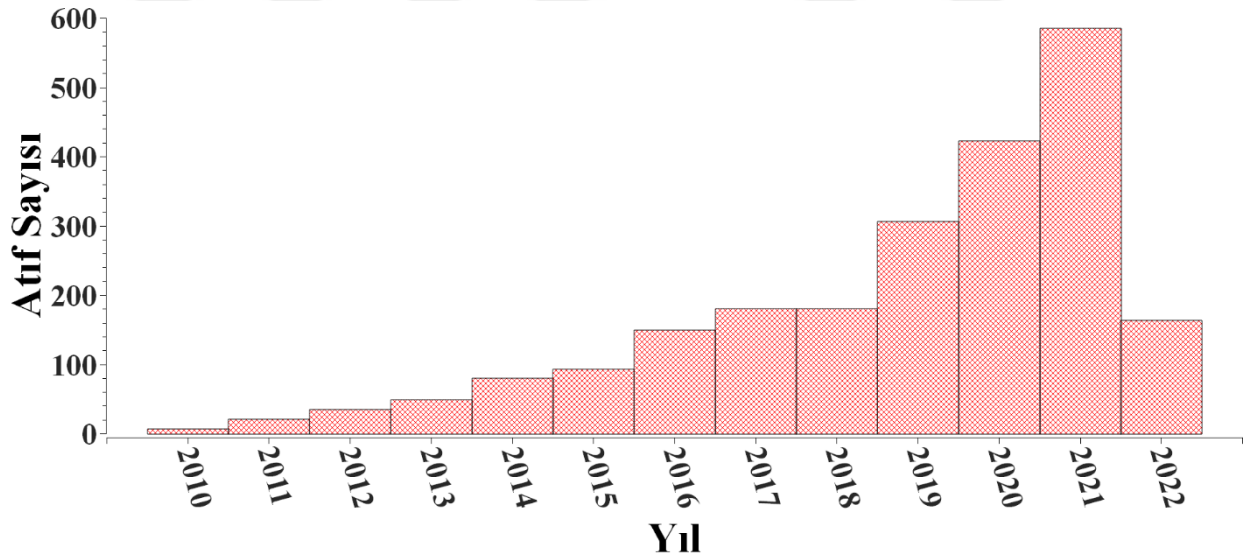
L. Chua memristörlerin yanında kapasitif ve indüktif özellikler gösteren ve memristörlerin genişletilmiş versiyonları olan yüksek dereceli pasif elemanlar olarak memkapasitör ve memindüktör elemanlarının varlığını önermiştir[12]. Önerilen bu elemanlardan memkapasitör, yükün zamana göre integrali (σ , *sigma*) ile elektriksel akı (ϕ , *fi*) arasındaki ilişkiyi ve memindüktör ise elektriksel akının zamana göre integrali (ρ , *rho*) ile yük (q) arasındaki doğrusal olmayan elektriksel ilişkiyi vermektedir. Bu elemanlar da memristörlere benzer şekilde doğrusal olmayan karakteristik, hafıza özellikleri göstermesi, histerisiz eğrisi verme ve düşük güç tüketme gibi özellikler göstermektedir. Bu özelliklerden dolayı literatürde memristörlerle benzer alanlarda kullanıldığı görülmektedir. Örneğin doğrusal olmayan cevap verme özelliği, kaotik uygulamalarda bulunan kesinlikle lineer olmama şartının sağlanması için biçilmiş kaftandır bu nedenle kaotik uygulamalar için memkapasitör kullanılan çalışmalar bulunmaktadır[13]–[21]. Sinir hücrelerindeki hafıza özelliği, düşük güç tüketimi ve doğrusal olmama özellikleri sinaptik devre çalışmalarının yapılmasına yol açmıştır. Literatürde nöromorfik uygulamalarda kullanılmıştır[22], [23].

Memkapasitörler üzerine yapılan çalışmalar L. Chua'nın memristörden üst seviyede olan pasif devre elemanları olan memkapasitör ve memindüktörü önermesinden [24] sonra yıllar içinde

memkapasitörler üzerine yapılan çalışmalarla yapılan atıf sayısında memristöre göre az fakat yine de benzer şekilde bir artış görülmüştür. Bu artış Şekil 3 ve 4'teki grafikte açıkça gösterilmiştir. Bu durumda memkapasitörler hakkındaki çalışmalarda artışın süreceği öngörülmektedir.



Şekil 3 Memkapasitörlerle ilgili yıllara göre yayın sayısı (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memcapacitor) OR (TS=memcapacitive) anahtar kelimesi kullanılarak yayın sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022)



Şekil 4 Memkapasitörler hakkında yapılan yayınların yıllara göre atıf sayıları (Kullanılan veriler Web of Science internet sitesinin arama bölümünde başlıklara göre (TS=memcapacitor) OR (TS=memcapacitive) anahtar kelimesi kullanılarak atıf sayılarına bakılarak elde edilmiştir) (04.04.2022)

Bu tez kapsamında öncelikle literatürdeki memkapasitör devreleri, tiplerine göre incelenmiştir. Ayrıca üç farklı memkapasitör devresi hazırlanmıştır. Bu devrelerden birincisi

diferansiyel fark akım taşıyıcı (DDCC, Differential Difference Current Conveyor) ve işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendiricisi (OTA, Operational Transconductance Amplifier) aktif devre elemanlarıyla tasarlanmıştır. İkinci devre DDCC ve ikinci kuşak akım taşıyıcı (CCII, Second Generation Current Conveyor) devre elemanlarıyla tasarlanmıştır. Üçüncü devre[25] de DDCC ve akım kontrollü ikinci kuşak akım taşıyıcı (CCCII, Second Generation Current Controlled Current Conveyor) ile tasarlanmıştır. Üç devre de iki ucu yüzen olarak tasarlanmıştır. Ayrıca hazırlanan devrelerin hepsinde çarpma devreleri haricinde kullanılan aktif devre elemanları CMOS tabanlı devrelerdir. Bunların haricinde üç devre de elektronik kontrol edilebilir olarak tasarlanmıştır. İlk devrede OTA devre elemanının geçiş iletkenliği, kutuplama akımı ile ayarlanabilir. İkinci devre için de X terminaline direnç yerine iki tane PMOS transistör ile gerçekleştirilmiş bir direnç eklenmiştir. Üçüncü devrede de[25] CCCII devre elemanının X terminalindeki parazitik direnç, gerilim değeriyle değiştirilmiş ve elektronik olarak kontrol edilebilirlik elde edilmiştir. Ayrıca ilk iki devrede DDCC devre elemanının Y_2 terminaline bağlı olan gerilim kaynağının gerilim değeri değiştirilerek memkapasitörün sabit kapasitans değeri değiştirilebilir. Böylece devrenin memkapasitans değeri elektronik olarak kontrol edilebilirdir olmuştur. Ayrıca bu memkapasitans devreleri kullanılarak frekansa bağlılık, elektronik kontrol edilebilirlik, seri-paralel çalışabilirlik, sıcaklığa bağlılık, mutlak çalışma aralığı, hafıza özelliği ve Monte-Carlo analizi simülasyonları yapılarak, bu devrelerin çalışma aralığı belirlenmiştir. Ayrıca Devre-3 [25] için hazır devre elemanları kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Memkapasitörler öncelikle SPICE modelleriyle tasarlanmıştır[26], [27]. Daha sonra yapılan SPICE modelleri gerçek devre elemanlarıyla gerçekleştirilmesi için yol göstermiştir. Bu doğrultuda devre elemanlarıyla memkapasitör devreleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen devre elemanları benzetim devresi olarak adlandırılmaktadır. Literatürde birçok memkapasitör benzetim devresi bulunmaktadır. Benzetim devrelerinin özellikleri kullanım için uygunluğunu belirlemektedir. Bu özellikler; bir ucu topraklı kullanılma kısıtlaması veya iki ucu yüzen pasif eleman olarak kullanılabilmesi, düşük güç tüketimi, histerisiz eğrisi orta noktasının simetriyi sağlaması, memkapasitansın sabit veya değişken kısmının elektronik kontrol edilebilmesi, çalışma frekans aralığı ve mutator devreleri kullanılarak gerçeklenip gerçekleştirilmediğidir. Mem-elemanlar hafıza, düşük enerji tüketimi, lineer olmayan sonuç vermesi ve frekansa bağlılık gibi özelliklere sahiptir. Bu nedenle birçok alanda kullanımı irdelenmektedir. Bu bölümde söz konusu kullanım alanları irdelenecektir.

Biolek ve arkadaşları 2010 yılında memkapasitörlerle bağlantılı olan üç farklı sistem tasarımı yayınlamışlardır. Bu çalışmalardan biri memkapasitörlerin SPICE ile modellenmesidir. Sunulan sistem blok diyagramlarıyla gerçekleştirilmiş olan iki ucu yüzen (floating) bir yapıdır[26]. Aynı zamanda simülasyon sadece 1Hz frekans değerinde çalıştırılmıştır. Ayrıca, memristörden memindüktöre veya memkapasitöre çevrim yapan mutator tasarımlarını irdeleyip bir memristör kullanılarak memkapasitör benzetim devresi oluşturulmuştur[28]. Hazırlanan devre topraklı çalışma kısıtlaması olmayan fakat seri bağlı memkapasitör sonuçları verilmemiş olan ve sadece simülasyon sonuçları bulunan bir sistemdir. Pasif devre elemanı olarak bir ucu topraklı bir kapasitör ve memristör kullanılırken; aktif devre elemanı olarak bir CCII ve OTA kullanılmıştır. Diğer bir çalışmada [29] iki ucu bağlı şekilde kullanılabilen bir mutator sistemi tasarlamıştır. Tasarlanan sistem sadece simülasyon sonuçları verilmiştir. Tasarlanan devrede topraklı bir kapasitör, iki ucu yüzen bir direnç ve bir memristör vardır. Ayrıca aktif eleman olarak da iki tane CCII kullanılmıştır. Yapılan sistemin güç harcaması verilmemiştir ve 1.5V ve 1Hz'lik sinüsoidal giriş gerilimindeki sonuçları verilmiştir. Aynı yılda Pershin ve Ventra, topraklı kullanılabilen mikrokontrolcü kontrollü memkapasitör benzetim devresi oluşturmuştur[30]. Yapılan bu devre mutator devresi olup sadece simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Çalışma frekans aralığı 4-8Hz aralığı olarak belirlenmiştir. Wang ve arkadaşları 2012 yılında içinde ışık bağımlı direnç (LDR, Light dependent resistor) tabanlı memristör barındıran memkapasitör devresi yayınlamışlardır[31]. Yapılan devrenin deneysel sonuçları verilmiştir ve histerisiz eğrisi

gözlemlenmiştir. Hazırlanan devrede kullanılan integral alıcı devre gibi devreler işlemsel kuvvetlendirici (OPAMP, operational amplifier) yardımıyla oluşturulmuştur. Bu nedenle çok fazla devre elemanı kullanıldığı söylenebilir. Fouda ve Radwan 2012 yılında yük kontrollü mutator yapısı kullanılmayan ve iki ucu yüzen memkapasitör benzetim devresi oluşturmuştur[32]. Bu çalışmada sadece simülasyon sonuçları verilmiştir. Aynı zamanda çalışma frekansı olarak 1-100Hz aralığındaki değerler verilmiştir. Bu çalışmada aktif eleman olarak; bir akım kontrollü akım kaynağı, iki gerilim katlayıcı, bir analog gerilim çarpıcı ve iki OPAMP kullanılırken pasif eleman olarak; bir ucu topraklı bir kapasitör, iki ucu yüzen iki direnç ve iki kapasitör kullanılmıştır. Yani aktif eleman sayılarının fazlalığı güç tüketiminin fazla olmasını sağlamaktadır. Yu ve arkadaşları bir memristif sistem ve bu memristif sistemi kullanarak bir memkapasitör devresi tasarlamıştır[33]. Bu çalışmada iki ucu yüzen pasif eleman ve aktif eleman sayısı mutator devre olmasından dolayı fazladır. Aynı zamanda yapılan deneyde devrenin 12.1-86.6Hz frekans aralığında çalıştığı görülmüştür. Sah ve arkadaşları 2013 yılında piyasada bulunan hazır devre elemanlarıyla iki ucu yüzen memkapasitör benzetim devresi tasarımı hazırlamıştır[34]. Yapılan çalışmanın deneysel sonuçları, devrenin gerilim-yük eğrisinden 1-25Hz arasında frekansa bağlı histerisiz eğrisi alındığı gözlemlenmiştir. Sah ve arkadaşları 2013 yılında mutator devresi kullanılarak memristör tabanlı memkapasitör tasarlamıştır[35]. Aynı zamanda bu devrenin farklı bağlantı şekillerinde çalıştığını gözlemlemiştir. Yapılan devre iki ucu yüzen bir benzetim devresi olup 100-900Hz ve 1V değerlerinde simülasyon üzerinde çalıştırılmıştır. Yu ve arkadaşları 2014 yılında mem-elemanların her birini birbirine çeviren genel bir mutator devresi yayınlamışlardır[36]. Yapılan devre iki ucu yüzen bir benzetim devresidir. Yapılan çalışmada memristörden memkapasitöre ve memkapasitörden memristöre çevrildiği devreler deneysel olarak gösterilmiştir. Bu devrelerin çalışma frekans aralığı sırasıyla 27.5-52.9Hz ve 15.9-63.6Hz gibi gösterilmiştir. Babacan 2018 yılında OTA tabanlı iki ucu yüzen bir memkapasitör benzetim devresi bir de memindüktör devresi tasarlanmıştır[37]. Yapılan çalışmada sadece simülasyon sonuçları bulunmaktadır. Memkapasitör devresinin çalışma frekans aralığı 100-300Hz olarak belirlemiştir. Romero ve arkadaşları 2019 yılında Miller etkisi tabanlı memkapasitör benzetim devresi hazırlamıştır[38]. Hazırlanan devre mutator devresidir ve iki ucu yüzen şekilde tasarlanmıştır. Önerilen devrenin deney sonuçları yoktur ve 50Hz frekans değerinde simülasyonu verilmiştir. Aynı zamanda hazırlanan memkapasitör devresinin sinaptik simülasyon sonuçları verilmiştir. Vista ve Ranjan, 2019 yılında topraklı olarak kullanma sınırlaması olan; iki ucu yüzen pasif eleman kullanılmayan memkapasitör benzetim devresi tasarlamıştır[39]. Yapılan benzetim devresi CMOS ile hazırlanmış diferansiyel gerilim akım taşıyıcı iletkenlik kuvvetlendiricisi

(DVCCTA, Differential Voltage Current Conveyor Transconductance Amplifier) devresi tabanlıdır. Bu çalışmada 600kHz'deki simülasyon sonuçları vardır ve 2.3mW güç harcadığı rapor edilmiştir. Setoudeh ve Dezhdar 2020 yılında iki ucu yüzen ve yük kontrollü memkapasitör benzetim devresi tasarlayıp yayınlamıştır[40]. Yapılan çalışma mutator devre değildir ve deneysel sonuçlarında 10-260Hz arasında çalıştığı gözlemlenmiştir. Madsar ve arkadaşları 2020 yılında CMOS ile hazırlanmış iki ucu yüzen akım kaynağı (FCS, floating current source) devresi tabanlı, yük kontrollü ve bir ucu topraklı kullanılabilen memkapasitör benzetim devresi hazırlamıştır[41]. Yapılan çalışmanın sadece simülasyon sonucunda 1-7Hz'de çalıştığı görülmüştür. Konal ve Kaçar 2020 yılında OTA tabanlı elektronik olarak ayarlanabilir memkapasitör benzetim devresi hazırlamıştır[42]. Yapılan bu devre bir ucu topraklı olarak kullanılabilir bu nedenle yapılan simülasyonlarda paralel bağlı olarak çalıştırıldığında elde edilen sonuçlar da gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan çok çıkışlı OTA (MO-OTA) devrelerinin CMOS benzetimleri kullanılmıştır. Vista ve Ranjan 2020 yılında DXCCDITA (Dual X Current Conveyor Differential Input Transconductance Amplifier) tabanlı, iki ucu da kullanılabilen ve yük kontrollü olan bir memkapasitör benzetim devresi hazırlamışlardır[43]. Hazırlanan simülasyonda DXCCDITA'nın CMOS benzetim devresi kullanılmıştır ve 500kHz-1MHz aralıkta çalıştığı gösterilmiştir. Ayrıca bir adaptif öğrenme devresi hazırlanıp sonuçları elde edilmiştir. Yeşil ve Babacan 2020 yılında elektronik kontrol edilebilir iki farklı yük kontrollü memkapasitör devresi yayınlamıştır[44]. İki bir ucu topraklı memkapasitör devresi tasarlanmıştır. Yapılan devrelerden sadece ilk devrenin simülasyon ve deneysel sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda 500 Hz ile 2 kHz arasında çalıştığı gözlemlenmiştir. Yapılan ikinci devrenin OTA elemanı sayesinde bir elektronik kontrol edilebilirliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sharma ve arkadaşları yük kontrollü bir anahtarlama elemanı ile değiştirilebilen iki farklı mem-eleman benzetim devresi yayınlamıştır[21]. Ayrıca bu devrenin memristör durumu kullanılarak Chua'nın kaotik devresi gerçekleştirilmiştir. Yapılan devrede kullanılan aktif elemanların CMOS benzetim devreleri kullanılmamıştır ve elektronik olarak kontrol edilebilir değildir. Bu devrelerin iki devrenin iki durumu için de deneysel ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Memkapasitör simülasyonlarının ikisinde de 16-20kHz frekans aralığında çalıştığı gösterilmiştir. Kaya ve arkadaşları iki ucu yüzen, CCCII ve DDCC tabanlı memkapasitör devresi tasarlamıştır[25]. Hazırlanan bu devre elektronik kontrol edilebilirlik özelliğine sahiptir. Ayrıca çalışmanın simülasyon sonuçlarında, bu devredeki aktif devre elemanlarından CCCII ve DDCC elemanlarının CMOS devreleri kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, devrenin 125kHz-200kHz frekansı aralığında çalışabildiğini göstermiştir. Ayrıca farklı çalışma koşullarında (sıcaklık, besleme gerilimi) çalışabildiği gösterilmiştir. Bunların

yanında hazırlanan memkapasitör devresiyle MC-R devresi yapılmış olup, memkapasitörün ortalama kapasitör değerindeki bir kapasitörün C-R devresiyle karşılaştırılmış ve devreler arasında çok az fark olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmalar; bağlantı ucu sayısı, mutator tasarımıyla mı gerçekleştirildi, çalışma frekans aralığı ve elektronik olarak kontrol edilebilir olma durumuna göre sınıflandırılabilir.

2.1 Bağlantı Ucu Sayısı

Mem-eleman tasarımlarında iki ucu yüzen tasarım yapılması tasarım zorluğu ve devre tutarlılığının sağlanması konusunda zorluk oluşmaktadır. Bu nedenle bir ucu topraklı (grounded) mem-eleman tasarlanması daha kolay olmaktadır.

Literatürde hem iki ucu yüzen [21], [25], [26], [28], [29], [32]–[38] hem de bir ucu topraklı kısıtlaması olan [30], [39], [41], [42] birçok memkapasitör devresi çalışması bulunmaktadır. İki ucu yüzen devrelerini çoğunun mutator tabanlı memkapasitör devresi olduğu gözlemlenmiştir.

2.2 Mutator Tasarımı

Mutator devreleri, var olan bir mem-elemanın başka bir mem-elemanla çevrilmesi için tasarlanmış olan devrelerdir. Bu nedenle hazırlanan devrelerde çok fazla aktif ve pasif devre elemanları kullanılmaktadır.

Özellikle memkapasitör ve memindüktör devrelerinin tasarlanmaya başlandığı ilk zamanlarda zaten tasarlanmış olan memristör devreleri, hazırlanan mutator devreleriyle memkapasitör ve memindüktörlere çevrilmiştir. Bu yüzden literatürde birçok mutator çalışması yer almıştır [28], [29], [33], [35], [36], [38].

2.3 Çalışma Frekans Aralığı

Memkapasitörlerin lineer olmayan bir davranış göstermesi istenmektedir. Aynı zamanda çalışma frekansı arttığında memkapasitör sisteminin değiştirilebilir kapasite tarafı artacağı için sistemin doğrusal hale geleceği gözlemlenmiştir. Bir memkapasitörün kullanım alanlarının kısıtlı olmaması için frekans aralığının fazla olması istenmektedir. Ayrıca frekansın artmasıyla memkapasitörden elde edilen sonucun doğrusal hale gelmesi beklenmektedir. Bu nedenle memkapasitörlerin değişken ve sabit kısımlarının yüksek frekansa göre çalışması için ayarlanması

gerekmektedir. Literatürde yüksek frekansta çalışan memkapasitör devresi sayısı son yıllarda artmıştır.

2.4 Elektronik Olarak Kontrol Edilebilirlik

Elektronik olarak kontrol edilebilirlik, mem-elemanların sabit veya değişken parçasının bir gerilim veya akım değeri ile kontrol edilebilmesidir. Literatürde elektronik olarak kontrol edilebilir olan çalışmalar çoğunlukla; memkapasitör devresinin sabit veya değişken kısmının değerinin aktif elemanda bulunan ayar gerilimin değeriyle, aktif elemanın direnç değerinin kontrol edilmesi şeklinde yapılır.

Literatürde az sayıda elektronik kontrol edilebilir memkapasitör devresi bulunmaktadır[25], [39], [42], [44].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

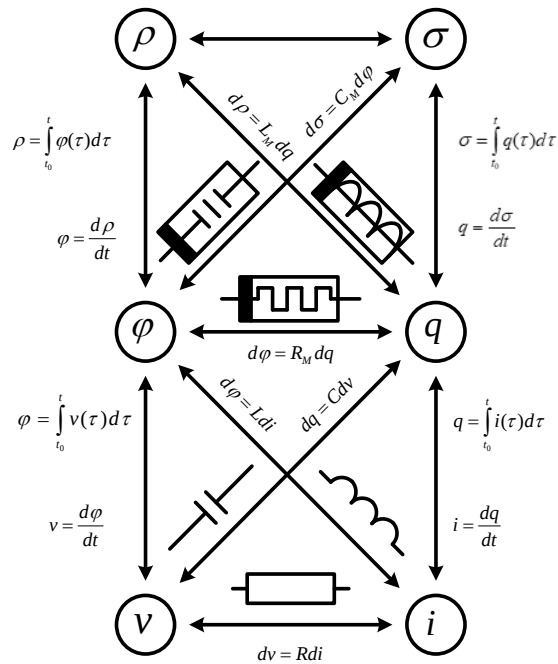
Memkapasitör devre tasarımı yapılırken öncelikle devrede kullanılacak olan devre elemanlarını ve yüksek dereceli pasif devre elemanlarını tanımak gerekmektedir. Daha sonra memkapasitör devre elemanı daha detaylı şekilde incelenecektir.

3.1 Devre Elemanları

3.1.1 Pasif Devre Elemanları

Pasif devre elemanları, çalışmak için devre elemanına uygulanmış olan gerilimden başka bir gerilime ihtiyaç duymayan devre elemanlarıdır. Şimdiye kadar keşfedilmiş olan pasif devre elemanları şu şekildedir;

- Direnç,
- İndüktör,
- Kapasitör,
- Memristör,
- Memindüktör,
- Memkapasitör.

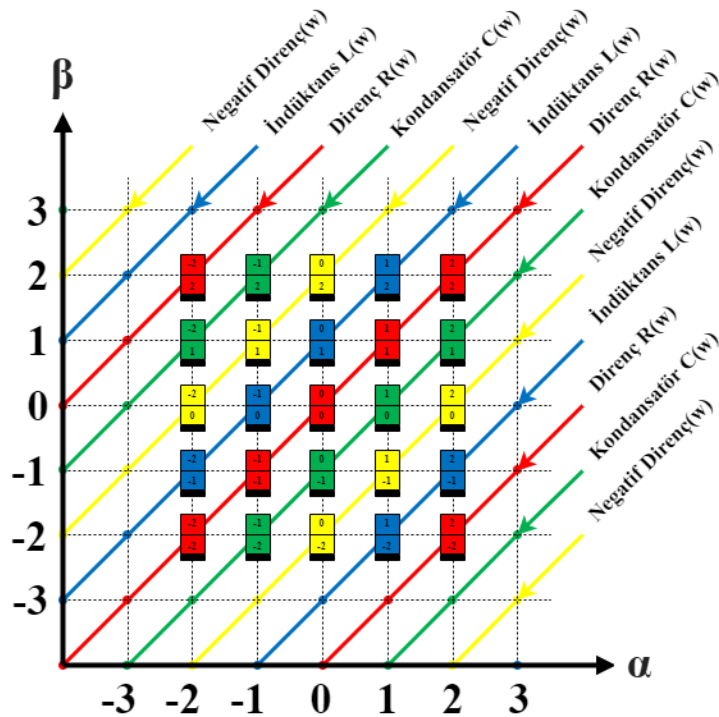


Şekil 5 Pasif devre elemanları matematiksel ilişkiler tablosu[27]

Bilinen pasif devre elemanlarının matematiksel eşitlikleri Şekil 5'teki gibidir. Şekil 5'te bulunan eşitlikler incelenirse;

- Dirençler, kendisine uygulanan gerilimin; üzerinden geçen akıma göre değişimini veren devre elemanlarıdır. Direnç devre elemanı, gerilimle akım arasında doğrusal bir ilişki kurmaktadır.
- Elektriksel yük ifadesi, akımın zamana göre integrali olarak tanımlanabilir. Kapasitörler, üzerindeki elektriksel yükün; uygulanan gerilime göre değişimini veren devre elemanlarıdır.
- Elektriksel akı ifadesi, gerilimin zamana göre integrali olarak tanımlanabilir. İndüktörler, üzerinde biriken elektriksel akının; akıma göre değişimini veren pasif devre elemanlarıdır.
- Memristans ifadesi, elektriksel akımın; elektriksel yüke göre değişimiyle ifade edilmektedir.
- ρ ifadesi, elektriksel akımın integrali olarak tanımlanabilir. Memindüktans ifadesi, ρ 'nun; elektriksel yüke göre değişimini vermektedir.
- σ ifadesi, elektriksel yükün integrali olarak tanımlanabilir. Memkapasitans ifadesi, σ 'nun; elektriksel akıya göre değişimini vermektedir.

Bunların haricinde ileride karşımıza çıkması beklenen pasif devre elemanlarını ifade eden tablo Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6 Pasif devre elemanları tablosu[12]

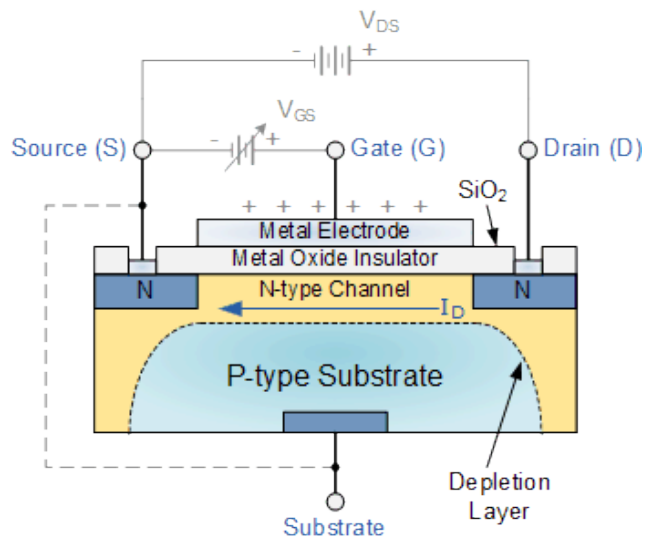
Pasif elemanların aralarındaki ilişki Şekil 6’da verildiği gibidir. Bu tablo okunmak istenirse α ve β katsayıları sırasıyla gerilim ve akımın türevsel denklemdeki diferansiyel üslerini temsil etmektedir. Bu tabloda (α, β) için (0,0) noktası direnci, (-1,0) noktası indüktörü, (0,-1) noktası kapasitörü, (-1,-1) noktası memristörü, (-2,-1) noktası memindüktörü ve (-1,-2) noktası ise memkapasitörü ifade etmektedir. Buradan hareketle ileride birçok pasif devre elemanının ortaya çıkacağı öngörülmektedir.

3.1.2 Aktif Devre Elemanları

Aktif eleman, içinden geçen bir sinyalin enerji seviyesini artırabilen devre bileşeni olarak tanımlanır. Bu tez kapsamında hazırlanan memkapasitör devrelerinde MOS, DDCC, OTA, CCII ve CCCII gibi aktif devre elemanları kullanılmıştır.

3.1.2.1 Metal Oksit Yarıiletken Transistör (MOS)

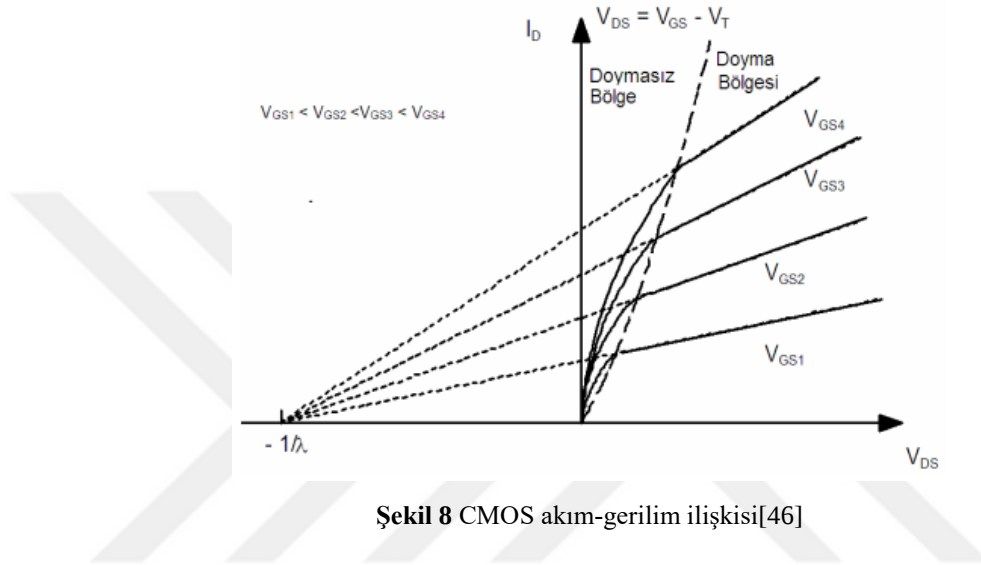
MOS (Metal Oxide Semiconductor) devre elemanı bir transistör elemanıdır. Bu elemanın iç yapısı Şekil 7’de verildiği gibidir. Açıklamak gerekirse iki P/N yarıiletken arasında bir N/P yarıiletken yapı olduğu düşünölsün. Ortada bulunan yarıiletkenin üstünde yalıtkan bir tabaka ve onun üstünde de bağılı gate (geçit) elektrodu bağılı olsun. Yanlarda bulunan yarıiletkenlere de source (kaynak) ve drain (savak) elektrotları bağılanmış olsun. Kaynak ve savak elektrotlarına bir gerilim uygulandığında; geçit elektrotuna uygulanan gerilimin büyüklüğüne bağılı olarak kaynak ile savak kapıları arasında akım geçişi oluşmaktadır.



Şekil 7 CMOS iç yapısı[45]

PMOS ve NMOS olmak üzere iki tip MOS vardır. MOS tipinin başında bulunan harfini yanlara yerleştirilen yarı iletkenin tipi belirlemektedir. Yani P tipi yarıiletkenin üstüne N tipi yarıiletkenler yerleştirilmişse bu MOS elemanının tipi NMOS olarak düşünülebilir. Buna bağlı olarak NMOS'ta akım savaktan kaynağa doğru akarken, PMOS'ta tam tersi yönde akmaktadır.

MOS devre elemanının geçit-kaynak (V_{GS}) gerilim farkı arttıkça savak-kaynak arasındaki gerilim farkı ve MOS üzerinden geçen akım Şekil 8'deki gibi değişmektedir.



Şekil 8 CMOS akım-gerilim ilişkisi[46]

Bu grafiğin açıklaması şu şekildedir;

- $V_{GS} < V_{TH}$ durumunda MOS devre elemanının üzerinden akım geçişi olmaz ($I_D = 0$).
- $V_{GS} - V_{TH} > V_{DS}$ olduğu durum lineer durumdur ve geçite uygulanan gerilim en çok bu durumda akımı etkiler. Akım – gerilim eşitliği şu şekildedir:

$$I_D = \beta[(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2] \quad (1)$$

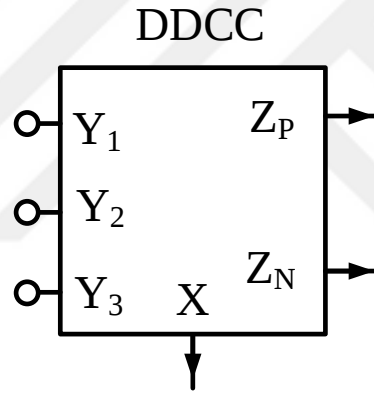
- $V_{GS} - V_{TH} < V_{DS}$ olduğu durum doyma durumdur ve geçite uygulanan gerilim arttıkça akım daha az bir ivmeyle artmaya devam eder. Doymalı durumda D-S arasından geçen akımın eşitliği şu şekildedir: $I_D = \frac{1}{2}\beta(V_{GS} - V_{TH})^2$

MOS devre elemanının avantajları şu şekildedir;

- Düşük güç tüketimine sahiptir.
- Kapladıkları hacim çok düşüktür.
- Isıya bağlı karakteristik değişimi, diğer yarı iletkenlere göre düşüktür.
- Band genişliği fazladır.
- Düşük gürültü seviyesine sahiptir.

3.1.2.2 Diferansiyel Fark Akım Taşıyıcı (DDCC)

DDCC devre elemanı 6 terminali olan bir akım taşıyıcı devre elemanıdır. Bu devre elemanının 3 tane yüksek empedanslı giriş terminali (Y_1, Y_2, Y_3), 1 tane düşük empedanslı terminali X ve 2 tane de yüksek empedansa sahip olan çıkış terminali (Z_P, Z_N) bulunmaktadır. DDCC devre elemanının blok gösterimi Şekil 9’de verilmiştir.



Şekil 9 DDCC devre elemanı blok gösterimi

Ayrıca DDCC aktif devre elemanının ideal matematiksel eşitliğini ifade eden matris eşitliği Denklem (2)’de gösterilmiştir.

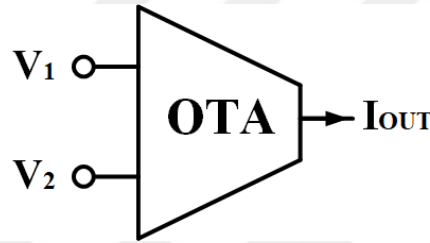
$$\begin{bmatrix} V_X \\ I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_{Y3} \\ I_{ZP} \\ I_{ZN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Y1} \\ V_{Y2} \\ V_{Y3} \\ I_X \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.1.2.3 İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (OTA)

OTA devre elemanı iki giriş terminaline (V_1 , V_2) ve bir çıkış terminali (I_{out}) olan aktif devre elemanıdır. OTA devre elemanının literatürde birçok çalışma alanında kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu devre elemanının giriş/çıkış bağıntısı şu şekildedir; çıkış akımının değerinin (I_{out}), giriş gerilimlerinin farkına ($V_1 - V_2$) oranı OTA devre elemanının geçiş iletkenliği kazancını (g_m) vermektedir. Yani ideal OTA devre elemanının giriş-çıkış ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$I_{OUT} = g_m (V_1 - V_2) \quad (3)$$

Ayrıyeten OTA devre elemanının blok gösterimi Şekil 10'daki gibidir.



Şekil 10 OTA elemanı blok görünümü

3.1.2.4 İkinci Dereceden Akım Taşıyıcı (CCII)

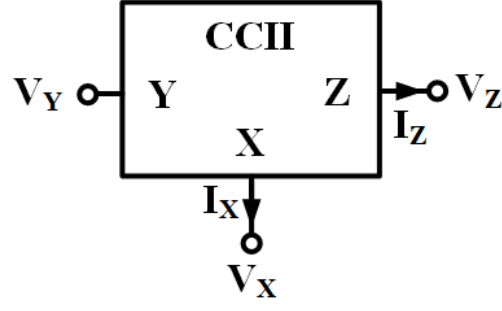
CCII devre elemanı iki giriş terminaline (X ve Y) ve bir çıkış terminaline (Z) sahiptir. CCII devre elemanının ideal giriş/çıkış ilişkisi (4)'teki gibidir.

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu eşitliklerden;

- Y terminalinin akım değerinin sıfıra eşit olduğunu,
- X terminalinin gerilim değerinin Y terminalinin gerilim değerine eşit olduğunu ve
- Z terminalinin akım değerinin büyüklüğünün X terminalinin akım değerinin büyüklüğüne eşit olduğunu anlayabiliriz.

Ayrıyeten CCII devre elemanının blok gösterimi Şekil 11'deki gibidir.



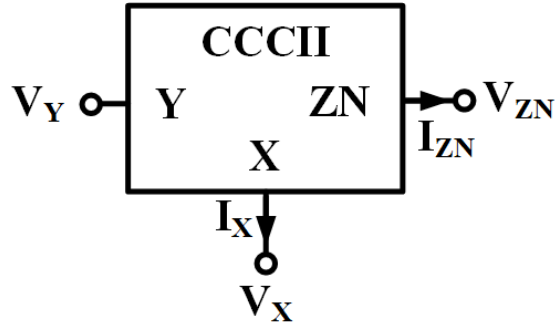
Şekil 11 CCII devre elemanı blok gösterimi

3.1.2.5 İkinci Kuşak Akım Kontrollü Akım Taşıyıcı (CCCII)

CCCII devre elemanı, X ve Y olmak üzere iki giriş ve Z çıkışına sahip parazitik direnci kontrol edilebilen bir akım kontrollü akım taşıyıcıdır. CCCII devre elemanının matematiksel eşitliği (5)'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_{ZN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \beta & R_X & 0 \\ 0 & -\alpha_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

CCCII devre elemanının blok gösterimi aşağıdaki gibidir.



Şekil 12 CCCII Blok gösterimi

devre modelinin memkapasitör olarak çalışabileceği değerleri bulmak kalır. Bu değerler pasif devre elemanı değerleri, bu devre özelinde kullanılan CMOS devre elemanlarının parametre değerleri, kutuplama gerilim ve akımları, besleme gerilimleri, giriş gerilim ve frekans değeri gibi düşünülebilir. Bu durumda LTSPICE gibi simülasyon programları önemli rol almaktadır.

3.2.1 Yük Kontrollü Memkapasitör

Yük kontrollü memkapasitörler, memkapasitörün geriliminin, üzerindeki yük miktarına göre değiştiği elemanlar olarak tanımlanabilir. Yük kontrollü memkapasitif ifade (6) ve (7)'te verildiği gibidir[24].

$$V_C(t) = C^{-1}(x, q, t)q(t) \quad (6)$$

$$\dot{x} = f(x, q, t) \quad (7)$$

Bu eşitliklerde verilen C^{-1} ifadesi ters memkapasitansı ifade etmektedir ve D_M simgesiyle kullanılmaktadır. Ayrıca (6) ve (7) denklemleri birleştirilip (7) denklemi açılırsa (8) denklemi elde edilir.

$$V_C(t) = C^{-1} \left[\int_{t_0}^t q(\tau) d\tau \right] q(t) \quad (8)$$

Bu ifadeden memkapasitans ifadesinin devrenin gerilim değerinin, devre üzerindeki yük ve bu yükün zamana göre integraline bağlı bir devreyle ifade edildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan memkapasitör devreleri yük kontrollü memkapasitör devreleridir.

3.2.2 Gerilim Kontrollü Memkapasitör

Gerilim kontrollü memkapasitörün devredeki etkisinin matematiksel ifadesi $q = C_M(\varphi)V$ 'deki gibidir. Belirtilen denklemde, q elektriksel yükü; C_M ifadesi akıya bağlı olarak değişen memkapasitansı ve V ise memkapasitörün gerilim değerini ifade etmektedir. Burada, bir memkapasitörün gerilim ifadesinin akıya bağlı olarak memkapasitans ifadesiyle, gerilimin çarpımından elde edildiği görülmektedir. Gerilim kontrollü memkapasitör devresi açıklanırsa,

$$q(t) = C(x, V_C, t)V_C(t) \quad (9)$$

$$\dot{x} = f(x, V_C, t) \quad (10)$$

(9) denkleminde verilen C ifadesi memkapasitörün kapasitans değerinin fonksiyonudur yani memkapasitansı ifade etmektedir. (9) ve (10) denklemleri birleştirilip açılırsa (11) denklemi elde edilir.

$$q(t) = C \left[\int_{t_0}^t V_C(\tau) d\tau \right] V_C(t) \quad (11)$$

$$V_{IN} = \frac{q(t)}{C_{IN}} + V_X \quad (13)$$

Ayrıca OTA devre elemanının V_1 ve V_2 portlarının akım değerleri sıfırdır. Dolayısıyla DDCC devre elemanının Z_P portunun akım değeri C_1 devre elemanının akımına eşittir. Bunların haricinde (2) denklemi ele alınırsa (14) dolayısıyla (15) elde edilir.

$$V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int_0^t I_{ZP} dt = -\frac{1}{C_1} \int_0^t I_{IN} dt \quad (14)$$

$$V_{C1} = -\frac{q(t)}{C_1} \quad (15)$$

Bunların haricinde OTA devre elemanının giriş-çıkış eşitlikleri ve hazırlanan devre göz önüne alınırsa çıkış akımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$I_{OP} = g_m V_{C1} = -g_m \frac{q(t)}{C_1} \quad (16)$$

Ayrıca I_{OP} akımı paralel direnç ve kapasitörün akımlarının toplamına eşittir,

$$I_{OP} = C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} + \frac{V_{C2}}{R_1} \quad (17)$$

Denklem(16) ve (17)'deki ifadeler ele alınır ve V_{C2} eşitliği (18)'deki gibi bulunur.

$$V_{C2} = q(t) \frac{R_1 g_m}{C_1} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}) \quad (18)$$

(15) ve (18) eşitlikleri ile devredeki analog çarpma devresinin girişine uygulanır ve DDCC'nin Y_1 terminalindeki gerilim (19)'deki gibi elde edilir.

$$V_{Y1} = V_{C1} \times V_{C2} = -q(t)^2 \frac{R_1 g_m}{C_1^2} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}) \quad (19)$$

İdeal DDCC eşitliğinden $V_X = V_{Y1} - V_{Y2} + V_{Y3}$ eşitliğini elde edebiliriz. Tek başına kullanılan memkapasitörün bir ucunu topraklı olarak kullanılır. Yani eşitlikteki V_{Y3} geriliminin topraklı olduğunu ve ideal olarak V_2 'ye bağlı olan gerilimin de 0 olduğunu düşünürsek DDCC devre elemanının X terminalinin gerilim değeri V_X (20)'deki gibidir.

$$V_X = -\frac{R_1 g_m q(t)^2}{C_1^2} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}) \quad (20)$$

Denklem (20) da bulunan V_X gerilim Denklem (13)de yerine konursa denklem (21) elde edilir. Denklem (21) düzenlendiğinde ise devrenin ters memkapasitans ifadesi (22) elde edilebilir.

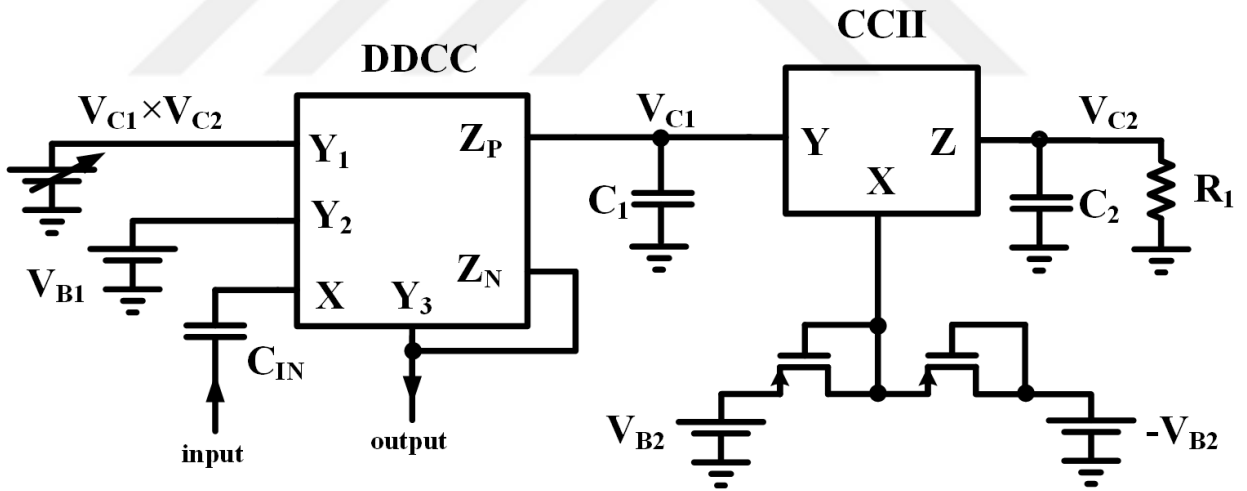
$$C_M^{-1} = D_M = \frac{V_{IN}}{q(t)} = \frac{1}{C_{IN}} + \frac{V_X}{q(t)} \quad (21)$$

$$D_M = \frac{1}{C_{IN}} - \frac{R_1 g_m q(t)}{C_1^2} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}) \quad (22)$$

Denklem (22) de görülebileceği gibi devrenin ters memkapasitansı g_m yardımıyla elektronik olarak ayarlanabileceği açıkça görülmektedir.

4.2 Devre-2

Hazırlanan bu devre iki ucu kullanılabilir bir memkapasitör devresidir. Aktif devre elemanı olarak bir tane DDCC, bir tane CCII, bir tane gerilim çarpıcı ve iki tane de PMOS transistör kullanılmıştır. Hazırlanan memkapasitör devresi elektronik olarak kontrol edilebilir olarak tasarlanmıştır. Memkapasitörün elektronik olarak kontrol edilebilir olmasına CCII devre elemanının X terminaline bağlı olan ve PMOS devresiyle oluşturulmuş olan direnç devresi sebep olmuştur. Ayrıca bu devrede pasif devre elemanı olarak üç kapasitör ve bir direnç kullanılmıştır. Hazırlanan devre Şekil 15'teki gibidir.



Şekil 15 DDCC-CCII memkapasitör devresi

Hazırlanan bu Devre-1 ile benzer olan tarafı yani DDCC'nin olduğu taraf Devre 1'le aynı eşitliklere sahiptir. Yani (12), (13), (14) ve (15) eşitlikleri bu devrede de geçerlidir. CCII devre elemanının X ve Y terminallerinin gerilim değerlerinin eşit olduğunu (4)'ten biliyoruz. Ayrıca CCII devresinin ideal eşitliğinden I_X ve I_Z çıkış akımlarının büyüklüklerinin eşit olduğu bilinmektedir. Bundan hareketle eğer PMOS devre elemanlarıyla oluşturulmuş olan direnci $R_{EŞ}$ kabul edilirse, X terminalinden akan akımın eşitliği (23)'teki gibi bulunur.

$$I_X = I_{ZP} = g_m V_{C1} = -q(t) \frac{1}{R_{E\mathcal{S}} C_1} \quad (23)$$

Burada $R_{E\mathcal{S}}$ değeri hesaplanmak istenirse (24)'deki gibi bulunur[47].

$$R_{E\mathcal{S}} = \frac{L}{2\mu_p C_{OX} W(V_{B2} - V_{TH})} \quad (24)$$

Ayrıca Z terminalinin akımı, bu terminale bağlı olan C_2 ve R_1 dirençlerinin akımları toplamı olan (25)'deki gibidir.

$$I_{ZP} = C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} + \frac{V_{C2}}{R_1} \quad (25)$$

(23) ve (25) denklemlerinden V_{C2} çekilirse (26) eşitliği elde edilir.

$$V_{C2} = -q(t) \frac{R_1}{R_{E\mathcal{S}} C_1} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}) \quad (26)$$

İdeal durumda ve tek başına kullanılan memkapasitör devresinde DDCC devre elemanının Y_2 ve Y_3 terminalleri topraklıdır. DDCC devre elemanının matematiksel eşitlikleri göz önüne alındığında $V_X = V_{Y1}$ eşitliği elde edilir. Eğer (26) ve Y_1 terminaline bağlı olan gerilim çarpıcı göz önüne alınırsa (27) elde edilir.

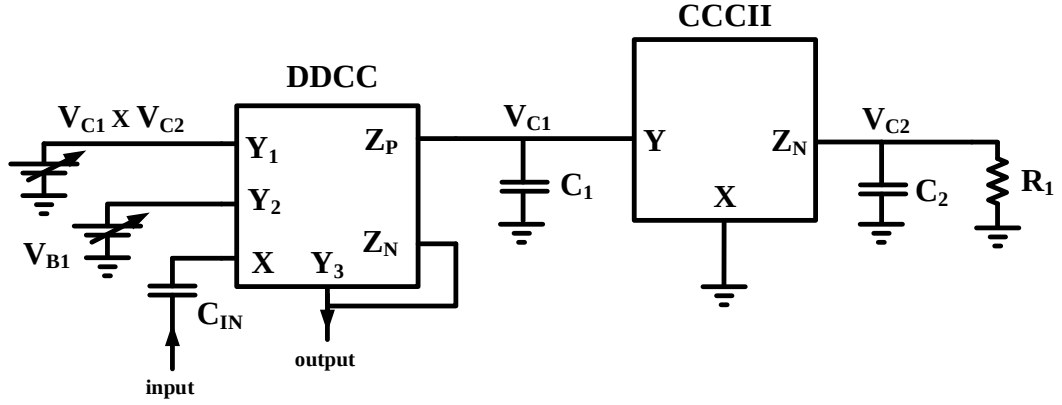
$$V_X = V_{C1} \times V_{C2} = q(t)^2 \frac{R_1}{R_{E\mathcal{S}} C_1^2} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}) \quad (27)$$

Denklem (13) iki devrede de ortak bir eşitliktir. Bu nedenle ters memkapasitans değeri (28)'deki gibi bulunur.

$$C_M^{-1} = D_M = \frac{V_{IN}}{q(t)} = \frac{1}{C_{IN}} + q(t) \frac{R_1}{R_{E\mathcal{S}} C_1^2} (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}}) \quad (28)$$

4.3 Devre-3

Devre-3, bu tez kapsamında yazılmış olan araştırma makalesinde[25] hazırlanmıştır. Hazırlanan devre DDCC ve CCCII tabanlı iki ucu yüzen bir devredir. Hazırlanan devrenin değişken memkapasitansı CCCII devre elemanının parazitik değerini ayarlayabildiğimiz gerilim değeriyle sağlanmaktadır. Aktif devre elemanı olarak ayrıca bir tane gerilim çarpıcı kullanılmıştır. Pasif devre elemanı olarak ta bir tane iki ucu yüzen kapasitör, iki tane bir ucu topraklı kapasitör ve bir tane bir ucu topraklı direnç kullanılmıştır. Hazırlanan devre aşağıdaki gibidir.



Şekil 16 Devre-3 memkapasitörü şematik gösterimi[25]

Giriş akım ifadesi, kapasitörden elde edilebilir (29).

$$I_{IN} = I_{OUT} = C_{IN} \frac{d(V_{IN} - V_X)}{dt} \quad (29)$$

Aynı zamanda giriş gerilimi eşitliği de (30)'daki gibi bulunabilir.

$$V_{IN} = \frac{q(t)}{C_{IN}} + V_X \quad (30)$$

DDCC'nin Z_P terminal gerilim eşitliği yani V_{C1} gerilimi de DDCC denklemi göz önüne alınarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int_0^t I_{ZP} dt = -\frac{1}{C_1} \int_0^t I_{IN} dt \quad (31)$$

$$V_{C1} = -\frac{q(t)}{C_1}$$

CCCI devre elemanının X terminalinin topraklı olduğu, ideal (α_{n2} ve $\beta_4 = 1$ için) CCCII matematiksel eşitliği (5) ve ideal DDCC eşitliği (2) düşünülürse (32) elde edilir

$$V_{Y1} = V_{C1} = -R_X I_X \quad (32)$$

CCCI devre elemanının X ve Z_N terminal akımları aşağıda verilmiştir.

$$I_{ZN} = -I_X = \frac{V_{C1}}{R_X} = -\frac{q(t)}{R_X C_1} \quad (33)$$

Paralel kapasitör ve direnç göz önüne alındığında CCCII'nin Z_N terminal akımı ayrıyeten (34)'teki gibi bulunur.

$$I_{ZN} = C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} + \frac{V_{C2}}{R_1} \quad (34)$$

Denklem (33) ve (34) birbirine eşitlenip sadeleştirildiğinde V_{C2} eşitliği (35)'teki gibi elde edilir.

$$V_{C2}(t) = \frac{R_1 q(t)}{R_X C_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right) \quad (35)$$

Daha sonra çarpma devresinin sonucu yani DDCC devre elemanın Y_1 terminal gerilimi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$V_{Y1} = V_{C1} \times V_{C2} = -\frac{R_1 q^2(t)}{R_X C_1^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right) \quad (36)$$

Hazırlanan devrenin topraklı olduğu ve DDCC'nin ayar gerilimi Y_2 terminalinin topraklandığı düşünülürse (37) elde edilir.

$$V_X = V_{Y1} = -\frac{R_1 q^2(t)}{R_X C_1^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right) \quad (37)$$

Buradan ters memkapasitans değeri D_M aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$C_M^{-1} = D_M = \frac{V_{IN}}{q(t)} = \frac{1}{C_{IN}} + \frac{V_X}{q(t)} = \frac{1}{C_{IN}} - \frac{R_1 q(t)}{R_X C_1^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_2}} \right) \quad (38)$$

5. BULGULAR

Bu çalışmada bulgu olarak hazırlanan memkapasitör devrelerinin tutarlı olarak çalıştığını ve memkapasitör devre elemanı olarak kullanılabilir olduğunu göstermek amacıyla,

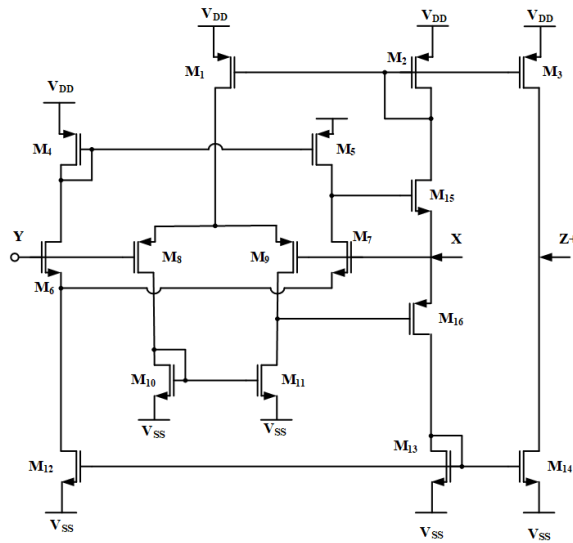
- CMOS devreleriyle hazırlanmış olan aktif elemanlar kullanılarak elde edilen frekans aralıklarında, sıcaklık koşullarına göre şekillenen, birden fazla memkapasitörün paralel/seri bağlanmasıyla elde edilen, uç noktadaki çalışma sınırını gösteren (besleme gerilimi ve sıcaklık uç noktaları), hafıza özelliğini gösteren ve hazırlanan memkapasitör devresinin MC-R devresinden elde edilen sonuçların simülasyon sonuçları,
- Piyasada bulunan hazır devre elemanları kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir.

5.1 Simülasyon Sonuçları

Bu çalışmada hazırlanan devrelerin simülasyon sonuçları verilmiştir. Bu simülasyon sonuçları LTSPICE programı kullanılarak elde edilmiştir.

Simülasyonlarda CCII, DDCC, OTA ve CCCII devre elemanlarının CMOS iç yapı devreleri kullanılmıştır. Bu CMOS iç yapıları sırasıyla CCII, DDCC, OTA ve CCCII devreleri [48], [49], [42] ve [50] çalışmalarından alınmıştır.

CCII devresinin alındığı çalışmada CCII tabanlı kayıpsız bir indüktör simülatör yapılmıştır. Alınan CCII devresi Şekil 17'deki gibidir.



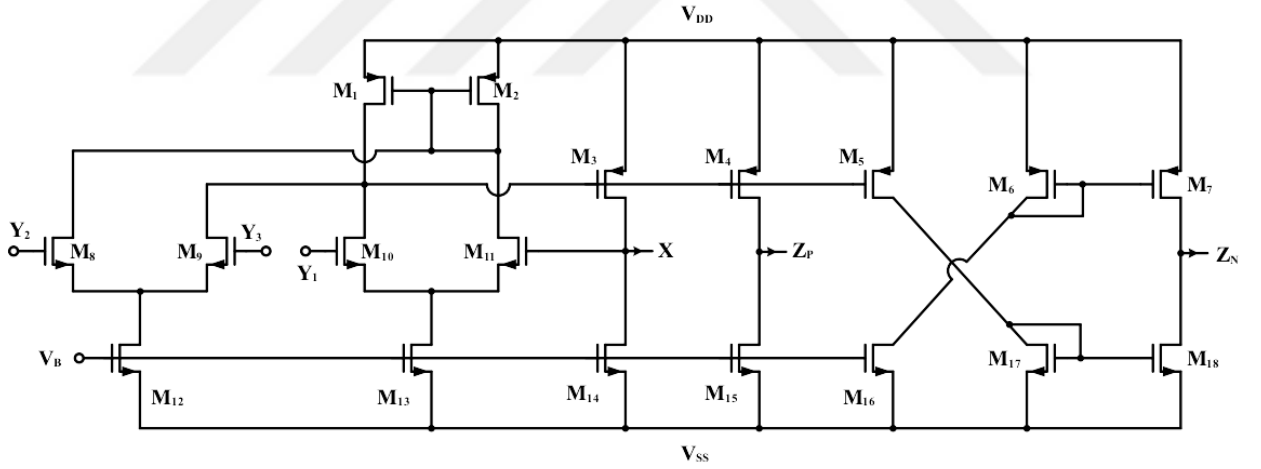
Şekil 17 CCII CMOS Devresi[48]

Bu CCII devresinde kullanılan CMOS elemanlarının TSMC 0.18 μm standartlarına uygun olarak W/L oranları tablosu Tablo 1’deki gibidir.

Tablo 1 CCII CMOS devresi W/L değerleri

MOS transistörler	W (μm)	L (μm)
M ₁ , M ₂ , M ₃	9	0.36
M ₄ , M ₅	45	0.36
M ₆ , M ₇	10	0.36
M ₈ , M ₉	30	0.36
M ₁₀ , M ₁₁	15	0.36
M ₁₂ , M ₁₃ , M ₁₄	3	0.36

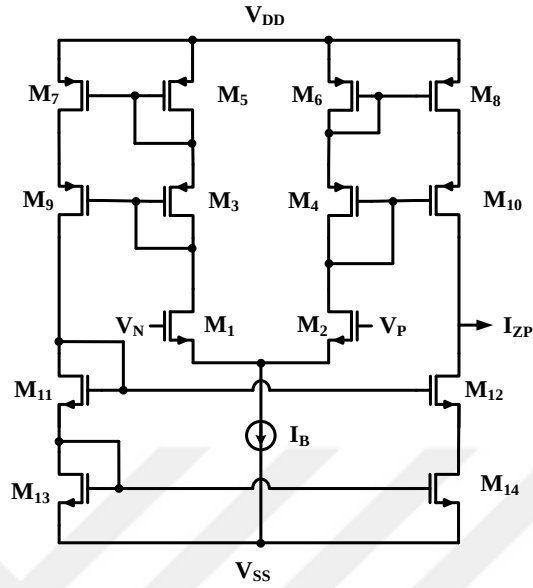
DDCC devresinin alındığı çalışmada diferansiyel gerilim akım taşıyıcı (DVCC, differential voltage current conveyor) tasarımı bulunmaktadır. Bu devrede M₉ transistörünün topraklı gate terminali Y₃ gerilim terminal olarak kabul edildiğinde, DDCC devre elemanı elde edilmiştir. Kullanılan DDCC devre elemanının iç yapısı şekil 18’deki gibidir.



Şekil 18 DDCC CMOS Devresi[49]

Elde edilen tüm simülasyon sonuçlarında DDCC devre elemanında kullanılan MOS devre elemanları 0.18 μm TSMC standartlarına uygun ve NMOS transistörlerin genişlikleri ve uzunlukları (W/L) oranı söz konusu makalede verildiği gibi 3 μm /0.72 μm olarak seçilmiştir. Ayrıca aynı şekilde PMOS transistörlerin genişlikleri ve uzunlukları W/L oranı ise 14 μm /0.72 μm olarak seçilmiştir.

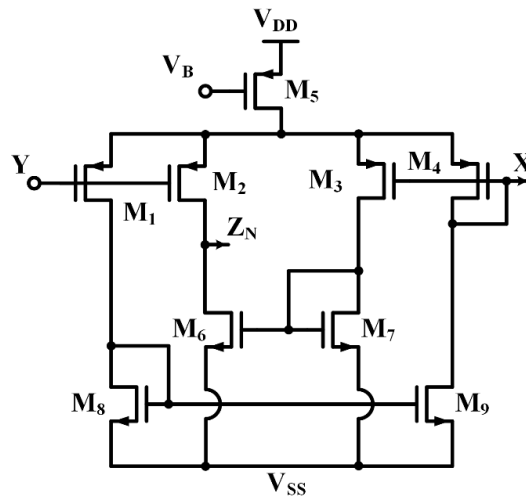
OTA'nın iç yapısı olarak Referans [42] deki iç yapı kullanılmıştır. Referans [42] den farklı olarak MO-OTA 'da tek çıkışlı OTA ya indirgenmiştir. Kullanılan OTA devre elemanının iç yapısı şekil 19'daki gibidir. Burada I_B akımı OTA devre elemanının geçiş iletkenliğini belirlemektedir.



Şekil 19 OTA CMOS Devresi[42]

Bu devre elemanında da MOS devre elemanları TSMC 0.18 μ m standartlarına uygun olarak PMOS transistörlerin genişlikleri ve uzunlukları (W/L) oranı 40 μ m/0.36 μ m seçilmişken, NMOS transistörlerin genişlikleri ve uzunlukları için ise (W/L) oranı 20 μ m/0.36 μ m olarak seçilmiştir.

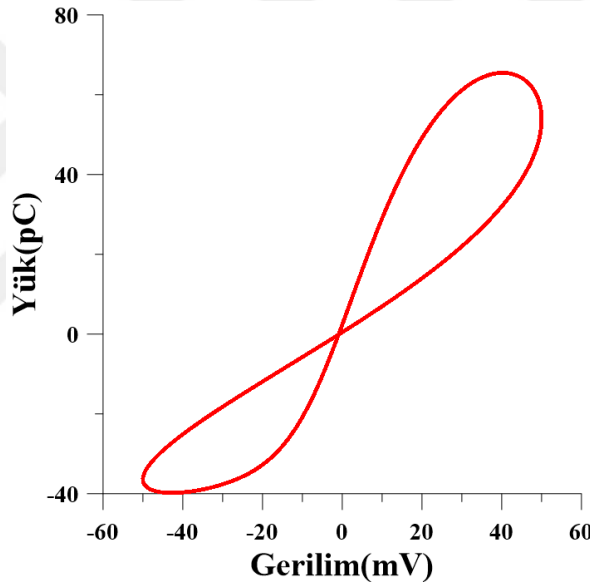
Devre 3'te bir tane CCCII devre elemanı kullanılmıştır. Bu devrenin simülasyon sonuçlarında CCCII devre elemanı CMOS'larla hazırlanmış CCCII devredir. Bu CCCII devresi Yeşil tarafından hazırlanmış olan memristör çalışmasından[50] elde edilmiştir. CCCII iç yapısı aşağıdaki gibidir.



Şekil 20 CCCII CMOS Devresi[50]

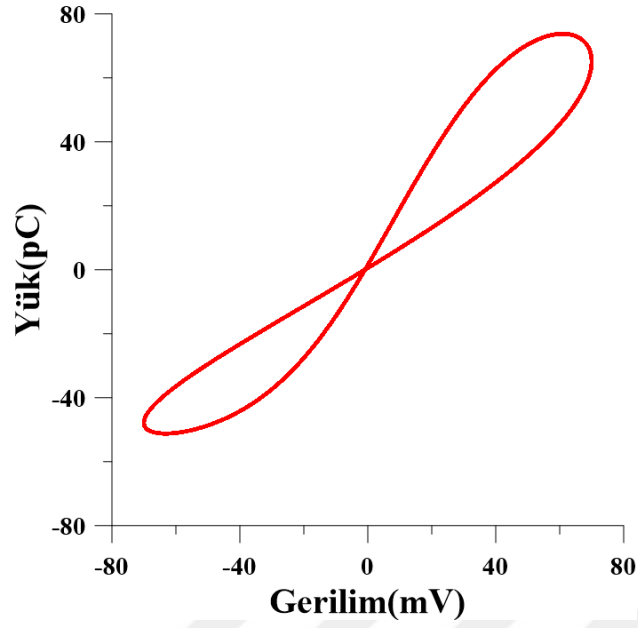
Bu devrede kullanılan PMOS ve NMOS'lar için genişlik ve uzunluk parametreleri M_1 - M_4 transistörleri için $60\mu\text{m}/0.72\mu\text{m}$, M_5 transistörü için $50\mu\text{m}/0.72\mu\text{m}$ ve M_6 - M_9 için de bu değerler $10\mu\text{m}/0.72\mu\text{m}$ olarak seçilmiştir.

Devre-1'de kullanılan pasif elemanlar R_1 , C_{IN} , C_1 ve C_2 sırasıyla $15\text{k}\Omega$, 1nF , 500pF ve 200pF değerlerinde seçilmiştir. DDCC ve OTA devre elemanlarının ideal besleme gerilimi değerleri $V_{DD}=-V_{SS}=1.25\text{V}$ 'dir. Ayrıca DDCC CMOS gerçeklemesindeki kutuplama gerilim değeri V_B , -0.4V seçilmiştir. OTA CMOS gerçeklemesindeki kutuplama akımı ise I_B , $40\mu\text{A}$ seçilmiştir. Buna karşı OTA devre elemanının geçiş iletkenliği ortalama $410\mu\text{S}$ değerinde olmuştur. Memkapasitör devresinin girişine, giriş gerilimi olarak 50mV ve 100kHz 'lik bir sinüsoidal işaret uygulanmıştır. Tüm bu seçilen değerler kullanılarak elde edilen devrenin yük-gerilim eğrisi Şekil 21'de verilmiştir.



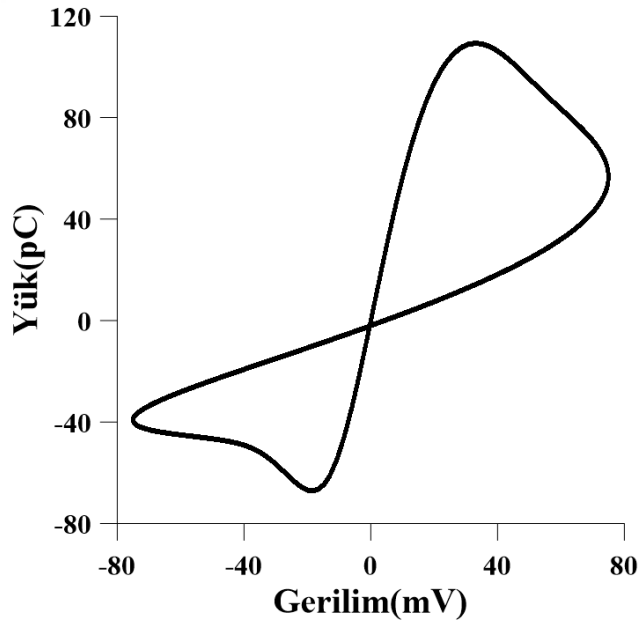
Şekil 21 Devre-1'in histerisiz eğrisi

Ayrıca Devre-2'de kullanılan pasif elemanlar simülasyon için R_1 , C_{IN} , C_1 , C_2 değerleri sırasıyla $5\text{k}\Omega$, 1nF , 500pF , 500pF olarak seçilmiştir. Bunların yanında DDCC ve CCII devreleri için DC besleme gerilimi $V_{DD}=-V_{SS}=1.25\text{V}$ olarak seçilmiştir. DDCC CMOS gerçeklemesindeki kutuplama gerilimi V_{B1} , diğer devrede olduğu gibi -0.4V olarak ayarlanmıştır. Ayrıca bu devrede elektronik kontrol edilebilirliği sağlayan PMOS transistörlerinin ($W/L=60\mu\text{m}/2\mu\text{m}$) kontrol gerilimi olan V_{B2} 'nin 0.8V olarak ayarlanmıştır ve bunun karşılığında eş değer direnç değeri (24) denkleminden 800Ω hesaplanmıştır. Memkapasitör devresine 70mV ve 120kHz değerindeki sinüsoidal işaret uygulanmıştır. Bu durumda yük-gerilim ifadesini gösteren histerisiz eğrisi aşağıdaki gibidir.



Şekil 22 Devre-2 histerisiz eğrisi

Devre-3 [25] için elde edilen simülasyon sonuçlarında pasif devre elemanları $C_{IN}=1\text{nF}$, $R_1=15\text{k}$, $C_1=650\text{pF}$, $C_2=250\text{pF}$ değerlerinde seçilmiştir. DDCC ve CCCII aktif elemanların DC besleme gerilimleri $V_{DD}=-V_{SS}=1.25\text{V}$ seçilmiştir. Ayar gerilimleri olan V_{B1} ve V_{B2} sırasıyla durumda -30mV ve 0V seçilmiştir. Tüm bu parametreler kullanıldığında elde edilen histerisiz eğrisi aşağıdaki gibidir.



Şekil 23 Devre-3 histerisiz eğrisi[25]

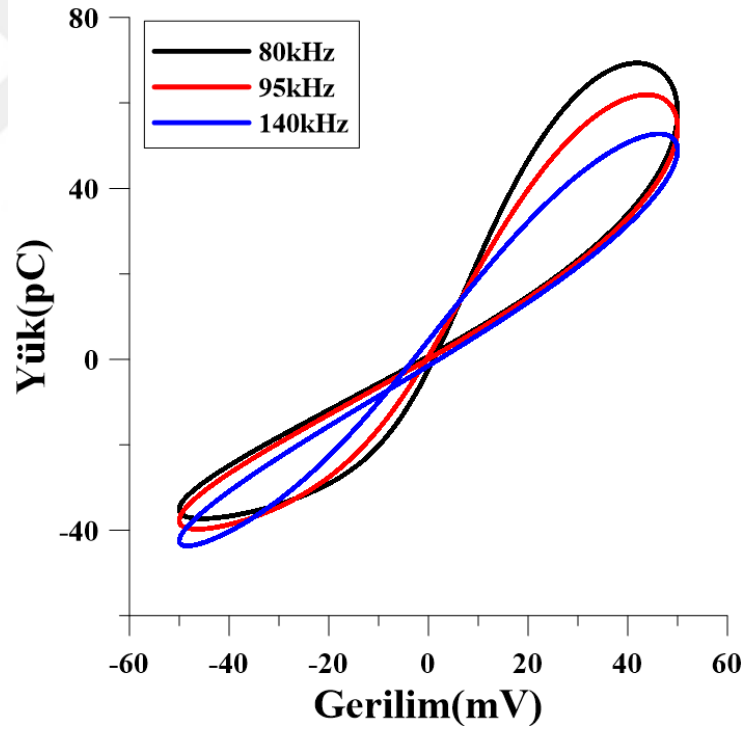
Bu sonuçlardan, hazırlanan memkapasitör devrelerinin çalışma aralığında yük-gerilim eğrisinde “pinched hysteresis” eğrisi olarak adlandırılan, belli bir noktada kesişim gösteren bir

histerisiz eğrisi sağladığı gözlemlenmiştir. Bu eğri, memkapasitörün uygulanan gerilime göre üzerindeki yükün değişimini ifade etmektedir.

5.1.1 Frekansa Bağımlılık Özelliği

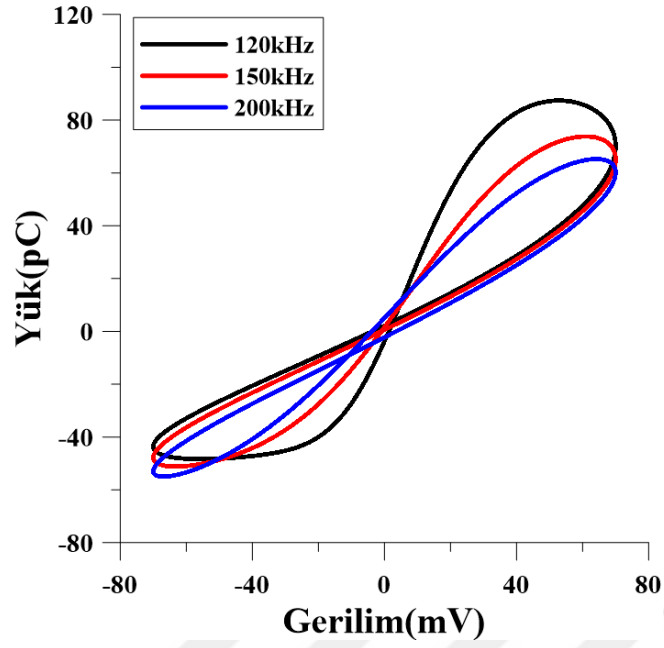
Piyasada kullanılabilirlik düşünülürse, memkapasitörlerin geniş frekans aralığında çalışması istenen bir özelliktir. Memkapasitör devreleri frekansa bağlı olarak karakteristik özellikler göstermektedir. Memkapasitörlere uygulanan işaretin frekans değeri arttıkça memkapasitörden elde edilen histerisiz eğrisinin daha lineer bir hale gelmesi beklenmektedir.

Devre-1'e uygulanan frekans değerindeki artışın histerisiz eğrisine etkisi Şekil 24'te gösterilmiştir. Bu benzetimde giriş gerilimi değeri uygulanmıştır ve kullanılan devre elemanları yukarıda verilen varsayılan değerlerdir. Bunların haricinde uygulanan giriş geriliminin frekans değerleri 80kHz-140kHz aralığındadır.



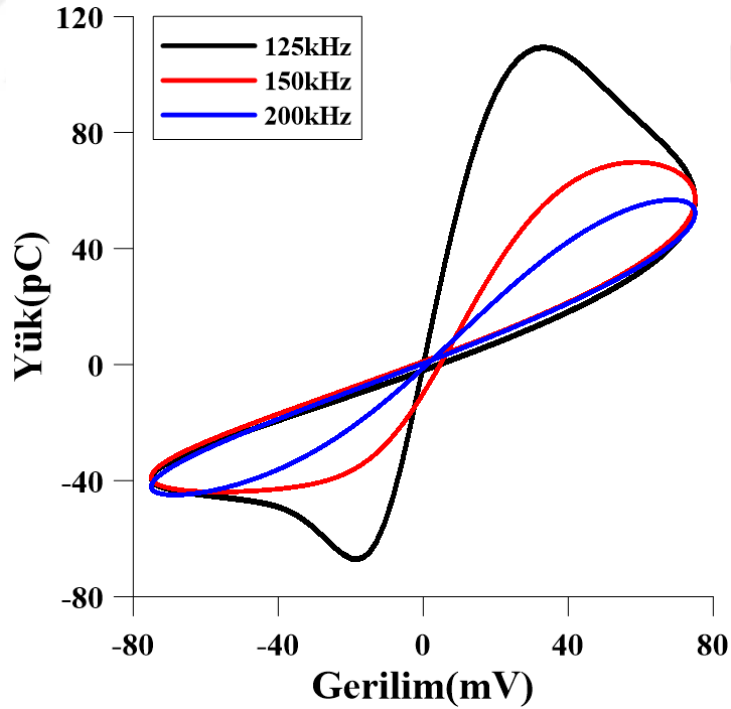
Şekil 24 Devre-1'nin frekansa bağlı olarak cevabındaki değişimi

Devre-2'ye uygulanan frekans değerinin değiştirilmesine göre elde edilen eğriler incelendiğinde bu devrenin 120kHz-200kHz arasında stabil olarak çalıştığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 25 Devre-2'nin frekansa bağlı eğri değişimi

Devre-3'e[25] uygulanan giriş gerilimin frekans değeri değiştirilerek simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlardan Devre-3'ün 125kHz-200kHz arasında çalıştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 26 Devre-3'ün frekans bağlı eğri değişimi[25]

Bu sonuçtan frekans değeri arttıkça doğrusallığın arttığını ve aynı gerilim değeri için kapasite değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yani devrenin fiziksel yapıyla uygun olarak çalıştığı gözlemlenmiştir. Bunların yanında frekansın artmasının histerisiz eğrisinin orta noktasında

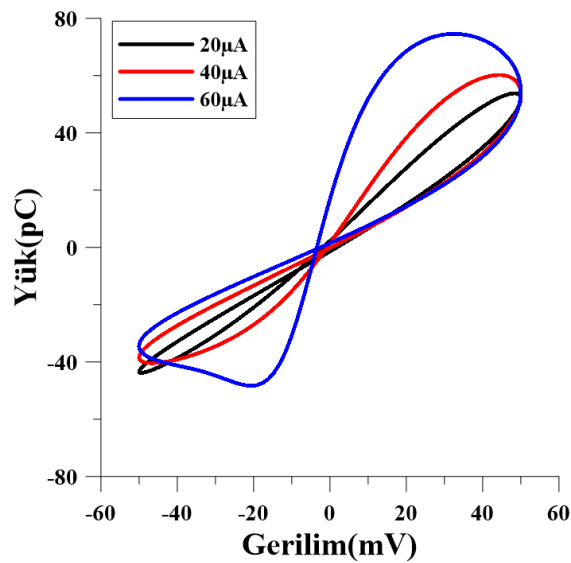
kaymaya neden olması daha yüksek veya düşük frekans değerlerinde çalışmasında stabilitten uzaklaştığını göstermiştir.

5.1.2 Elektronik Olarak Kontrol Edilebilirlik Özelliği

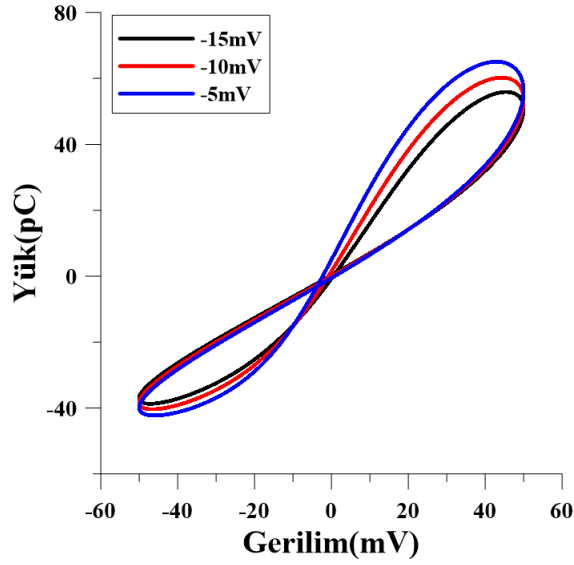
Elektronik olarak kontrol edilebilirlik özelliği, Devre-1'deki memkapasitör devresinin içinde bulunan OTA'nın geçiş iletkenliğini bir gerilim veya akım yardımıyla değiştirilmesidir. Bu özelliğin en büyük katkısı, memkapasitörün daha farklı koşullarda doğru şekilde çalışmasının mümkün olmasıdır.

Bu çalışmada hazırlanan memkapasitör devresinde kullanılan OTA'nın geçiş iletkenliği, Şekil 19'da görülen I_B akımıyla ayarlanabilir. Bu geçiş iletkenliği, devrenin yük-gerilim denkleminde (22) görüldüğü gibi hazırlanan devrenin değişken kısmını etkilemektedir. Bu sayede hazırlanan memkapasitör devresinde memkapasitans değeri elektronik olarak kontrol edilebileceği görülmüştür. Elde edilen simülasyon sonuçları da bu düşüncenin gerçekleştirilebileceğini göstermiş ve elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 27'de verilmiştir.

Ayrıca birinci devrenin DDCC aktif devre elemanının Y_2 portuna bağlı olan gerilim değeri ayarlanarak memkapasitörün sabit kısmının direnç değeri ayarlanabilir. Bu şekilde elektronik kontrol edilebilirlik özelliğinin elde edildiği simülasyonda gözlemlenmiştir. Memkapasitörün en tutarlı durumunda -10mV olarak seçilen gerilim değeri $\pm\%50$ artırılıp azaltılarak çalışabilirliği gözlemlenmiştir. Bu simülasyon sonucu aşağıda verilmiştir.

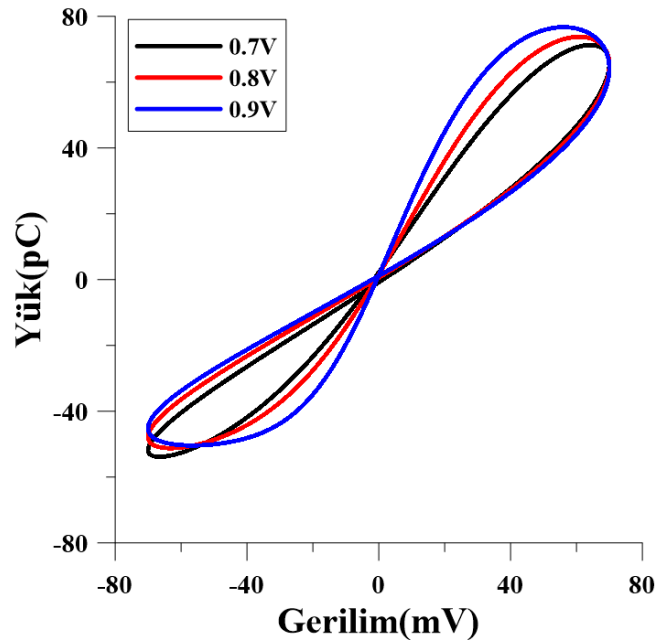


Şekil 27 Devre-1 OTA geçiş iletkenliğine bağlı elektronik olarak kontrol edilebilirlik özelliği



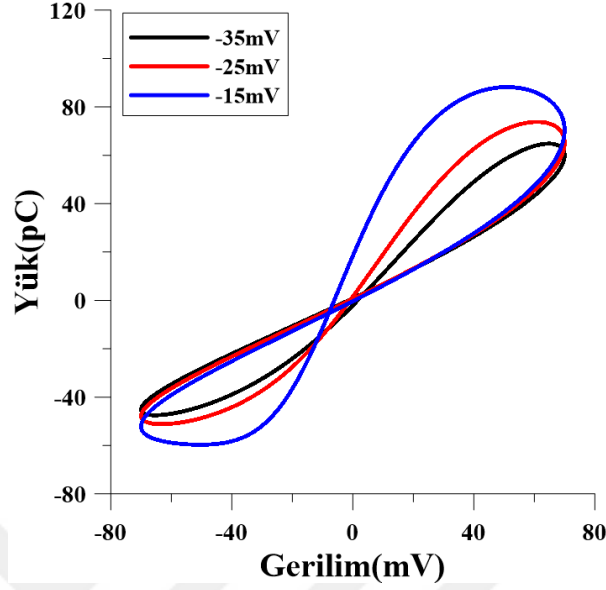
Şekil 28 Devre-1 V_{B1} ayar gerilimine bağlı elektronik kontrol edilebilirlik

Hazırlanan ikinci devrede elektronik kontrol edilebilirlik özelliğinin sağlandığı iki farklı gerilim vardır. Bunlardan birisi memkapasitörün değişken kısmında bulunan PMOS devre elemanının geçirgenliğini etkileyen V_{B2} gerilimidir. Öncelikle PMOS transistörlerden oluşan eşdeğer direnç gerilimle ters olarak olarak artmaktadır. V_{B2} 0.7V-0.9V değişirken eşdeğer direnç ise 1.09k Ω -0.7k Ω arasında değişmektedir. Denklem (28) göz önünde bulundurularak direnç azaltıkça (yani V_{B2} arttıkça) değişken partın değerinin artması beklenmektedir. Devre 2 için bu ayarlanabilirlik özelliği Şekil 29’da verilmiştir. Şekil 29 ‘dan görüldüğü gibi V_{B2} kutuplama gerilimi arttıkça nonlineerlik artmıştır ki bu da teoriyi doğrulamaktadır.



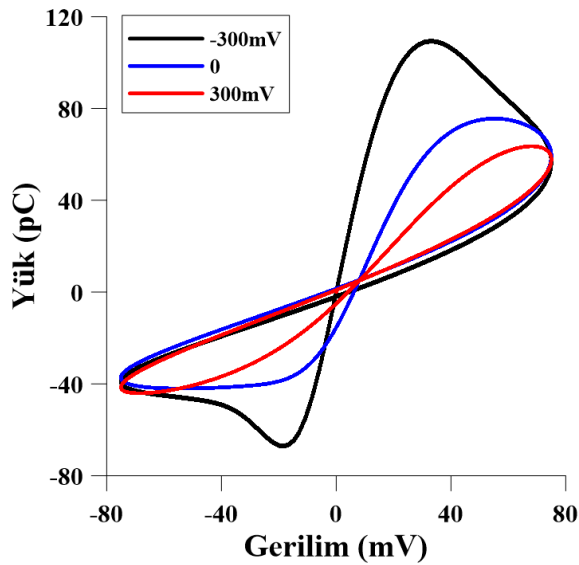
Şekil 29 Devre-2 V_{B2} ’ye bağlı elektronik kontrol edilebilirlik

Aynı zamanda ikinci devrenin ilk kısmında bulunan DDCC'nin Y_2 terminalindeki gerilim değeri değiştirilerek memkapasitör devresinin sabit kapasitansının büyüklüğü ayarlanabilir. Bu ayarlanabilirlik özelliğinin etkisi Şekil 30'te gösterilmiştir.



Şekil 30 Devre-2 V_{B1} 'e bağlı elektronik kontrol edilebilirlik

Devre-3[25] için sadece devrenin değişken kısmının kontrol edilebilirlik sonuçları verilmiştir. Bu kontrol edilebilirlik CCCII'nın parazitik X terminal direnci değiştirilerek elde edilmiştir. Nominal gerilim değeri 0V seçilip ± 300 mV gerilim artışı/azalışı ile direnç değeri 573Ω ($V_B = -300$ mV) - 913Ω ($V_B = 300$ mV) arasında ayarlanarak sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 31'de verilmiştir. Buradan X parazitik direnci arttıkça doğrusallığın arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 31'deki sonuç ile denklem (38) uyum içindedir.

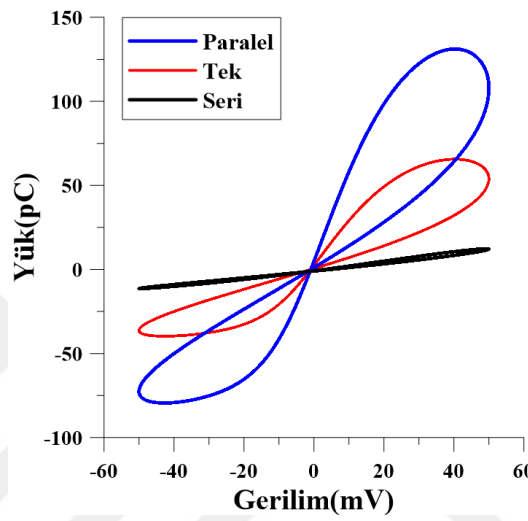


Şekil 31 Devre-3 elektronik kontrol edilebilirlik özelliği[25]

5.1.3 Seri ve Paralel Bağlanma Performansı

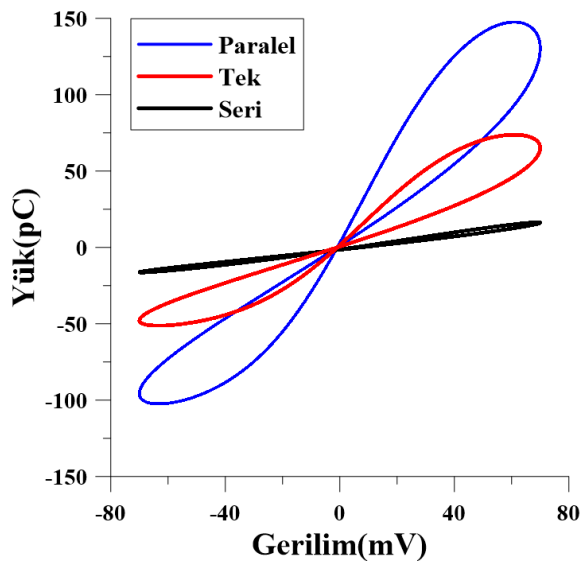
Bir pasif devre elemanının devre içinde paralel veya seri bağlanması, devre içinde kullanım açısından beklenen bir özelliktir. Hazırlanan memkapasitör devre elemanı ise topraklı kullanma kısıtlaması olmayan bir devre elemanıdır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında hazırlanan memkapasitör devrelerinin seri ve paralel bağlanma performansları da verilmiştir.

Devre-1'in devresinin seri-paralel ve tek olarak devre simülasyon sonucu Şekil 32'de verilmiştir.

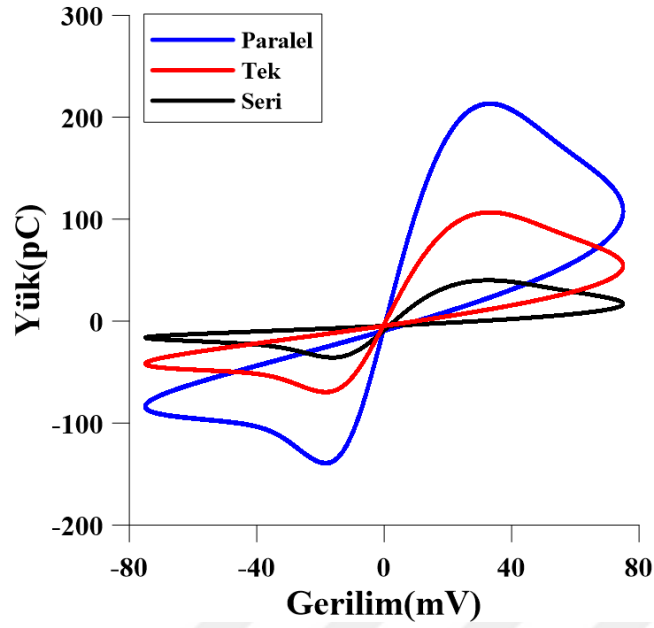


Şekil 32 Devre-1'in bağlantı şekillerine bağlılığı

Aynı şekilde Devre-2 için söz konusu seri-paralel ve tek olarak çalıştırılan memkapasitör sonuçları Şekil 33'te verilmiştir.



Şekil 33 Devre-2'nin paralel/seri bağlantı sonuçları



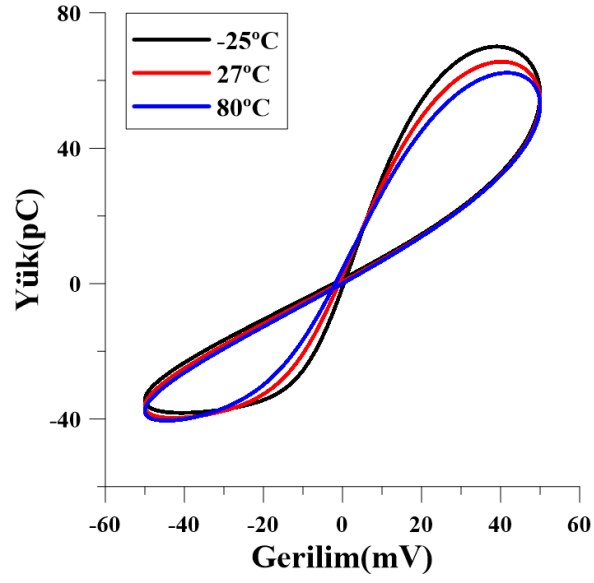
Şekil 34 Devre-3'ün paralel/seri bağlantı sonuçları[25]

Devre-3[25] için paralel ve seri bağlandığında elde edilen sonuçlar Şekil 34'te verilmiştir. Bu simülasyon sonuçlarından, memkapasitörün paralel bağlanmasıyla aynı gerilim değeri için devrenin yük değerinin yükseldiği (yani eşdeğer memkapasitansın arttığı) ve seri bağlandığında ise bu yükün azaldığı (yani eşdeğer memkapasitansın azaldığı) görülmektedir.

5.1.4 Ortam Sıcaklığı Etkisi

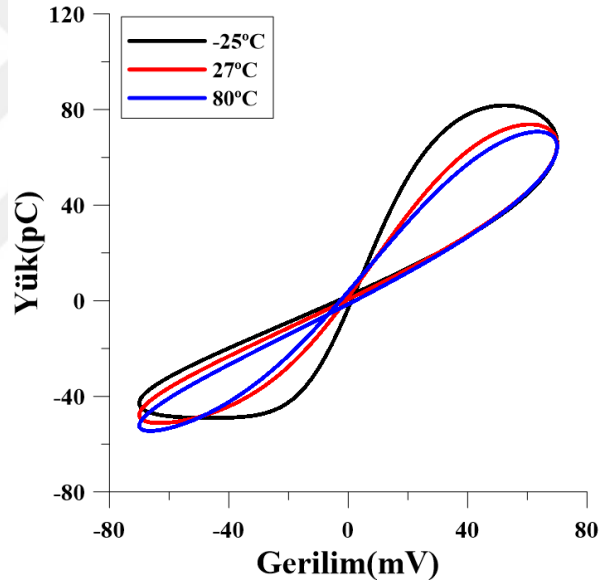
Bir devre elemanının elektronik olarak çalışma koşullarının haricinde çalıştığı fiziksel koşullar da önemlidir. Bunlardan en önemlilerinden biri, devrenin çalışma ortamının sıcaklığıdır. Bu nedenle bu çalışmada hazırlanan devrelerin, çalışma ortamının sıcaklığına göre verdiği tepki de simüle edilmiştir. Sıcaklığa bağlılıkta sonuçlarda bozulma olup olmadığını gözlemek için ilk iki devrede negatif sıcaklık değeri olan -25°C , ideal oda sıcaklığı olan 27°C ve yüksek sıcaklık değeri olarak seçilen 80°C değerlerinde devrelerin çalışabilirliği gözlemlenmiştir.

Devre-1'nin ideal çalışma değerlerinde belirlenen sıcaklık değerleri için bu sonuç Şekil 35'te verilmiştir.



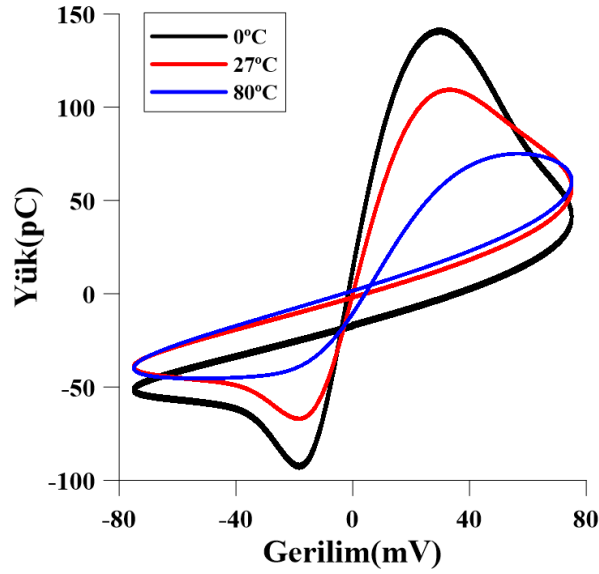
Şekil 35 Devre-1'in sıcaklığa bağlı çalışması

Devre-2 için belirlenen bu sıcaklık değerlerde elde edilen eğriler Şekil 36'daki gibidir.



Şekil 36 Devre 2'nin sıcaklığa bağlı çalışması

Devre-3[25] için devre negatif sıcaklıklara doğru gittikçe orta noktada kayma gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışma sıcaklığı olarak düşük sıcaklık sınırı 0°C kabul edilmiştir.



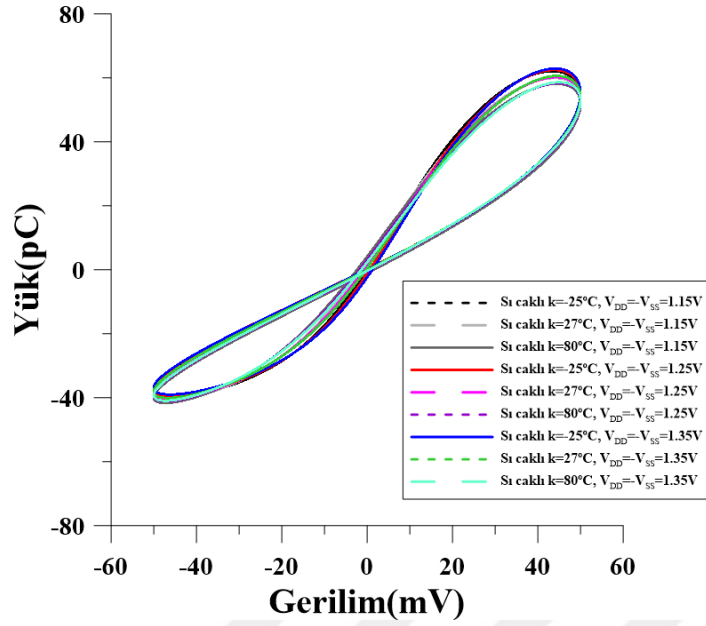
Şekil 37 Devre-3'ün sıcaklığa bağlı çalışması[25]

Devrelerin çalışma sıcaklığındaki artışın, devreden elde edilen gerilim-yük eğrisinin daha doğrusal olmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Devre-2 ve Devre-3 için elde edilen sonuçta sıcaklıkla beraber histerisiz eğrisinin orta noktasında kayma olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak Devre-3'te sıcaklık artışıyla sert anahtarlama özelliğinden yumuşak-anahtarlama özelliğine geçiş gözlemlenmiştir.

5.1.5 Mutlak Çalışma Aralığı

Hazırlanan devrenin çalışma koşullarını zorlamak amacıyla devre elemanında kullanılan besleme gerilimleri ve sıcaklık değerleri düşük, orta ve yüksek olarak üçer değerle kombine edilip memkapasitör devresinin en iyi şekilde tasarlanması için ayarlamalar yapılmıştır.

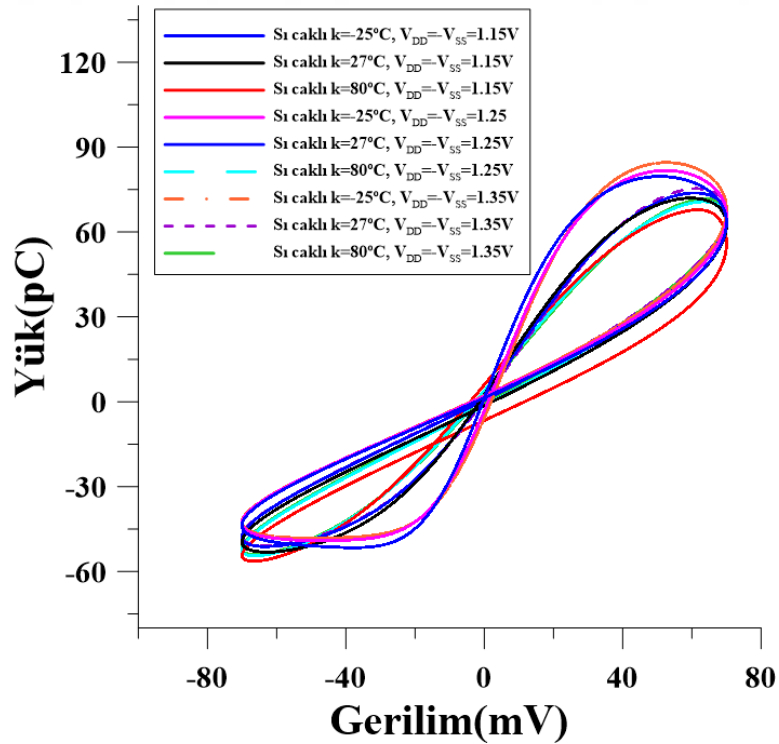
Bu devrede besleme gerilimleri $V_{DD} = -V_{SS} = 1.15V, 1.25V$ ve $1.35V$ değerleri olarak ve ortam sıcaklıkları da $-25^{\circ}C, 27^{\circ}C, 80^{\circ}C$ değerleri olarak belirlenmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 38'de verilmiştir.



Şekil 38 Devre-1'in mutlak çalışma aralığı

Bu simülasyon sonuçlarından besleme gerilimlerindeki değişimlerin çok etkilemediği fakat sıcaklıktaki değişimlerin memkapasitördeki doğrusallığı etkilediği gözlemlenmiştir.

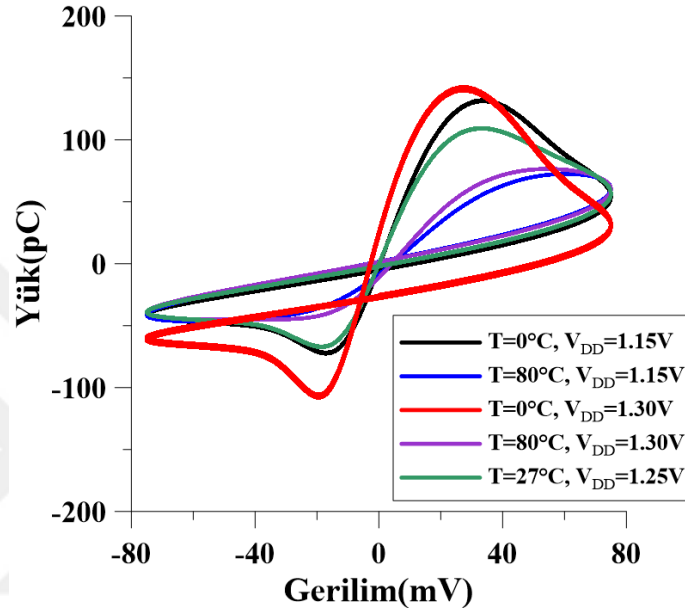
Devre-2 için belirlenen besleme gerilim değerleri 1.25, 1.35 ve 1.45V olarak belirlenmiştir. Ayrıca sıcaklık değerleri olarak sıcaklık bağımlılığının ölçüldüğü testlerde olduğu gibi -25°C, 27°C ve 80°C'deki sonuçlar gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 39'de verildiği gibidir.



Şekil 39 Devre-2'nin mutlak çalışma aralığı

Elde edilen bu simülasyon sonucundan, besleme gerilimi ve çalışma ortamı sıcaklığının devrenin orta noktasında kaymaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık ve düşük besleme gerilimi değerlerinde bu kaymanın en üst noktaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Devre-3 için mutlak çalışma noktaları Şekil 40'taki gibi belirlenmiştir. Düşük ve yüksek (0°C ve 80°C) sıcaklıkları için düşük ve yüksek besleme gerilim değerlerindeki (1.15V ve 1.3V) performans verilmiştir.



Şekil 40 Devre-3'ün[25] mutlak çalışma aralığı

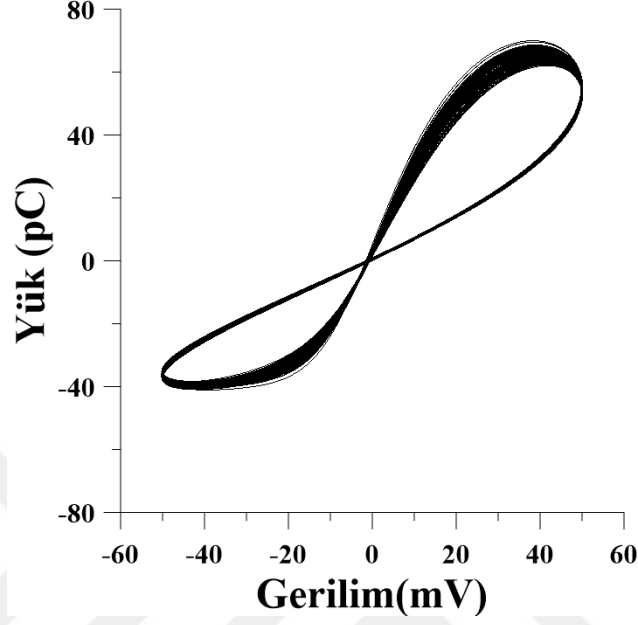
Devre-3'te[25] düşük sıcaklık ve yüksek besleme geriliminde histerisiz eğrisinin orta noktasındaki kaymanın çok fazla olduğu gözlemlenmiştir.

5.1.6 Monte-Carlo Analizi

Pasif devre elemanları, üretim aşamasında ideal olarak belirlenen değerde üretilmemektedir. Bunun yanında üretilen pasif devre elemanının yüzde olarak belirli bir değer aralığında olduğu, üretici tarafından belirtilmektedir. Bu durumda hazırlanan memkapasitör devresinde kullanılan pasif devre elemanlarının yüzde olarak hangi aralıkta değiştiğinde memkapasitör özelliğinin bozulmayacağı belirlenmelidir.

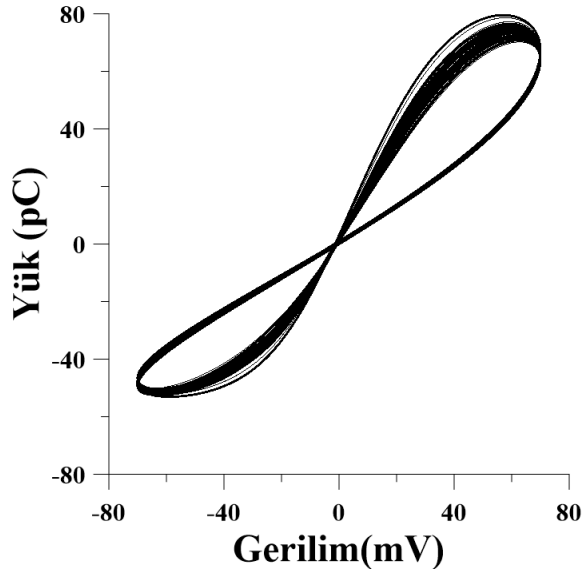
Monte-Carlo analizinde, belirlenen bir değer belli bir aralıktaki değişimini incelemek için o aralıktaki rastgele değerler belirlenerek o değerlerdeki çalışabilirliği incelenmektedir. Bu çalışmada hazırlanan memkapasitör devrelerinin ikisi için de en ideal durum için monte-carlo analizi uygulanmıştır.

Örneğin Devre-1 için pasif devre elemanları için $\pm 5\%$ değerlerinde rastgele üretilmiş 100 tane değer seçilmiştir. Tüm bu değerlerin cevaplar incelenmiştir. Tüm bu değerler için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Elde edilen cevapta histerisiz eğrisinde değişim ve bazı eğrilerinin orta noktalarında kayma çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 41 Devre-1 Monte-Carlo analizi

Monte-Carlo analizi Devre-2 için de uygulanmıştır. Kullanılan tüm pasif devre elemanları için $\pm 5\%$ değer aralığında 100 farklı rastgele değer seçilip ölçüm alınmıştır. Buna karşılık elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir.



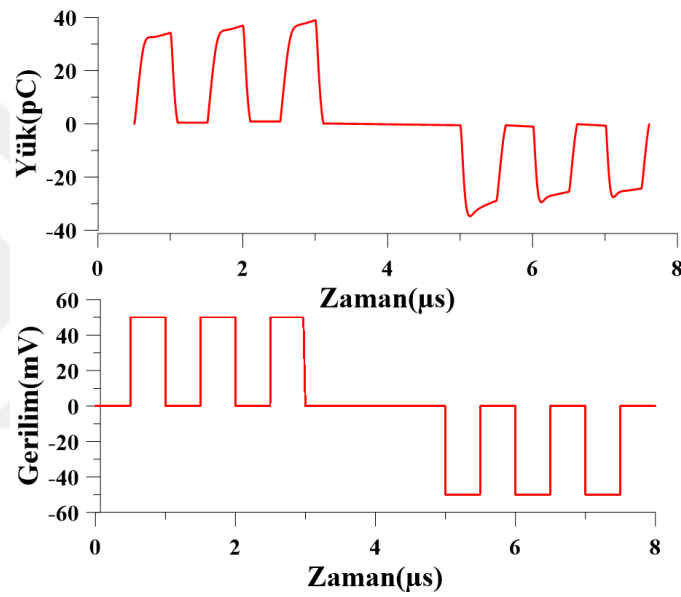
Şekil 42 Devre-2 Monte-Carlo analizi

Elde edilen bu cevaplardan devrenin orta noktasında kayma olmadığı, sadece memkapasitör devresinin lineerliğinde değişim olduğu gözlemlenmiştir.

5.1.7 Hafıza Özelliği

Memkapasitörlerde hafıza özelliği gerekli bir özelliktir. Bu özellik Devre-3'te[25] incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarında bu özelliği gözlemlemek için öncelikle 3 tane pozitif darbe gerilimi verilmiştir. Ardından negatif darbe gerilimleri verilmiştir.

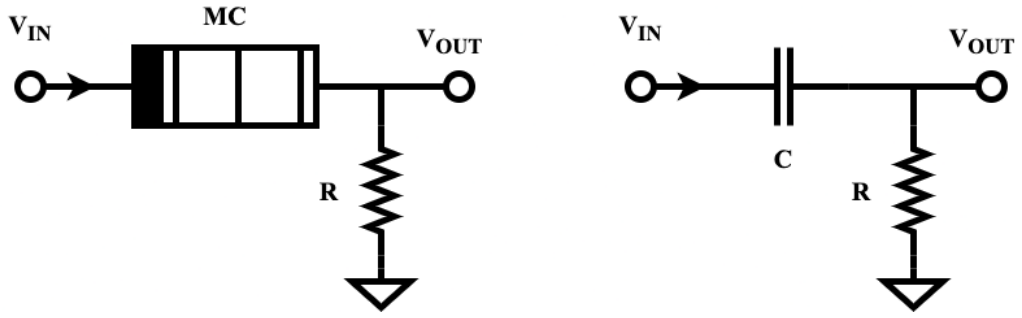
Her $0.5\mu s$ 'lik darbe geriliminin ardında $0.5\mu s$ boyunca 0V genlikli gerilim uygulanmıştır. Buna rağmen memkapasitörün yükü sabit kalıp artışına devam etmiştir.



Şekil 43 Devre-3[25] hafıza özelliği

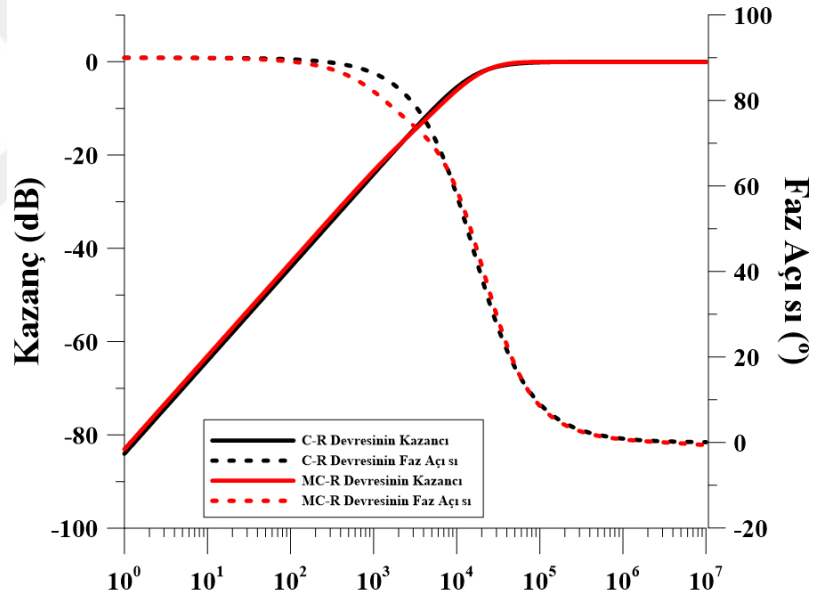
5.1.8 MC-R ve C-R Karşılaştırılması

Hazırlanan memkapasitör devreleri iki ucu kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle iki ucu yüzen şekilde kullanılabilirliğini göstermek amacıyla memkapasitörle ve kapasitörle yapılan iki farklı yüksek geçiren filtre karşılaştırılmıştır. Hazırlanan devrelerin blok gösterimi Şekil 44-a ve Şekil 44-b'de gösterilmiştir.



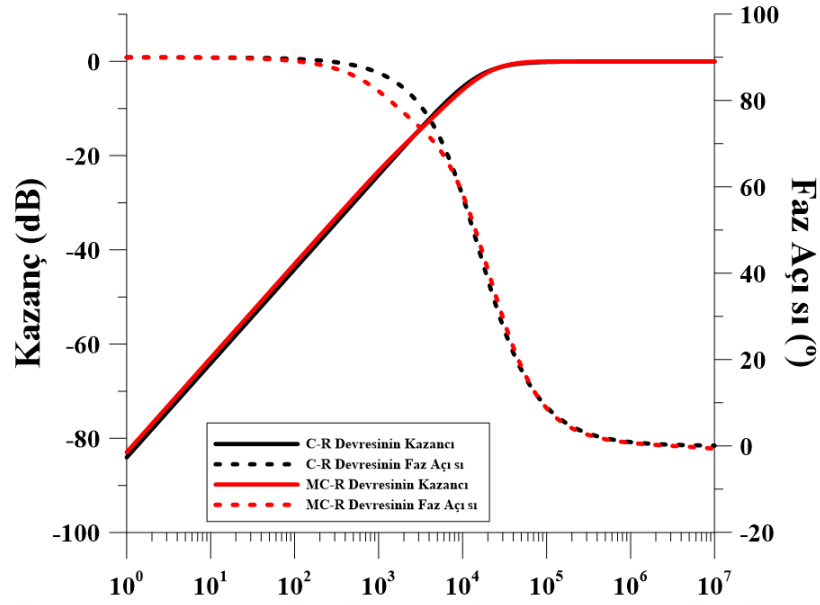
Şekil 44 a) MC-R ve b) C-R devrelerinin blok gösterimi

Hazırlanan devreler için direnç değerleri $R=10k\Omega$ seçilmiştir. İki devre için de kıyaslanan devredeki kapasitans değeri, hazırlanan devrelerin ortalama kapasitans değeri olan $1nF$ olarak seçilmiştir. Devre-1 için seçilen bu devreler için AC analizlerinin karşılaştırılması Şekil 45’te verilmiştir.



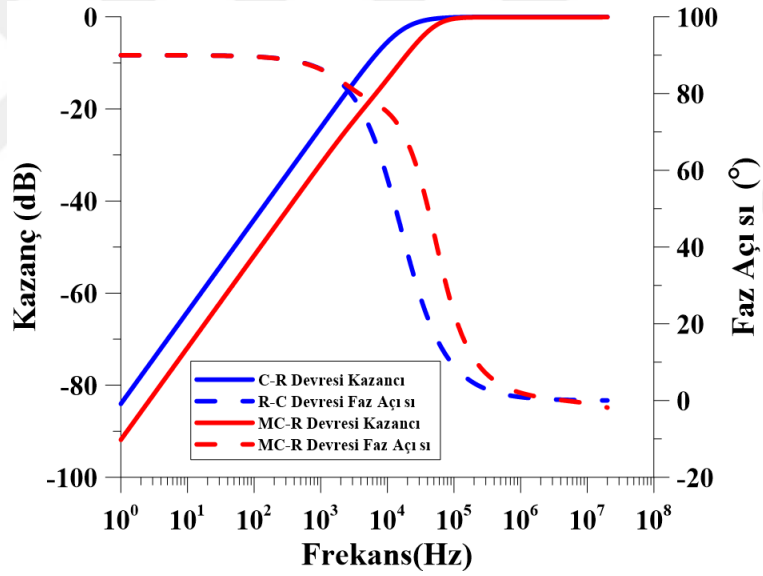
Şekil 45 Devre-1 için MC-R ve M-R devrelerinin simülasyon sonuçları

Devre-2 için seçilen değerlerde elde edilen sonuçlar Şekil 46’daki gibidir.



Şekil 46 Devre-2 için MC-R ve M-R devrelerinin simülasyon sonuçları

Devre-3[25] için seçilen değerlerde elde edilen sonuçlar Şekil 47’de verilmiştir.



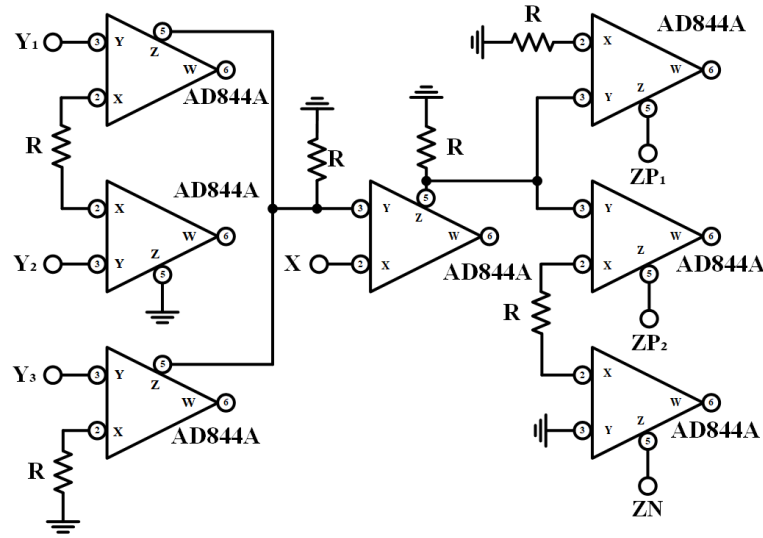
Şekil 47 Devre-3[25] için MC-R ve M-R devrelerinin simülasyon sonuçları

Simülasyon sonuçlarından MC-R devrelerinin C-R devrelerine çok yakın bir cevap verdiği gözlemlenmiştir. Yani hazırlanan memkapasitör devrelerinin kapasitif etki gösterdiği gözlemlenmiştir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

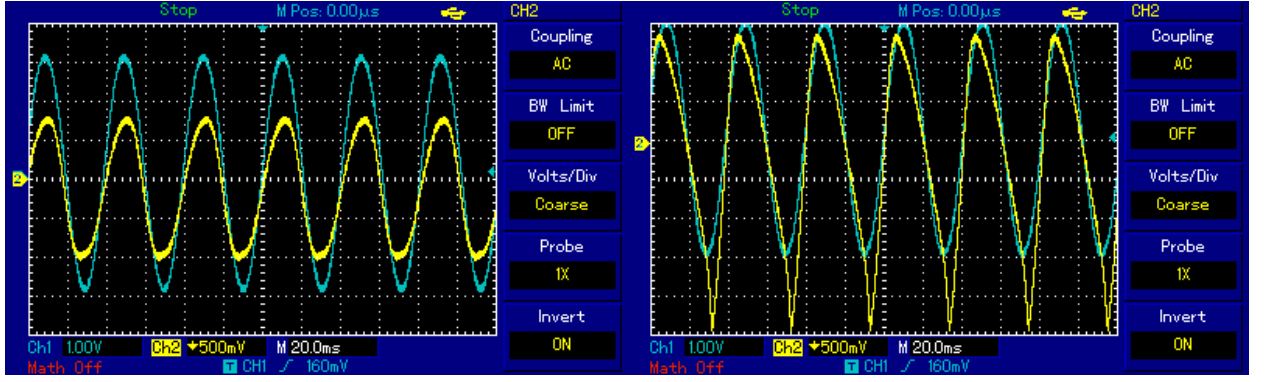
Bu tez kapsamında hazırlanan Devre-3, piyasada bulunan hazır devre elemanları kullanılarak hazırlanmış ve deneysel sonuçları gözlemlenmiştir.

Memkapasitör devresinde kullanılan DDCC devre elemanı ayırık eleman olarak piyasada satılmamaktadır. Bu nedenle AD844A devre elemanlarıyla DDCC devre elemanını taklit eden bir devre hazırlanmıştır. Bu devre aşağıdaki gibidir. Bu devrede kullanılan direnç değerleri $10k\Omega$ 'dur.



Şekil 48 AD844A DDCC Devresi

Deneyde aktif eleman olarak CCCII devre elemanı ve bir yükselteç olarak çalışan AD844A devre elemanı kullanılmıştır. Ayrıca analog çarpma devresi olan AD633 devre elemanı kullanılmıştır. Pasif devre elemanları olarak ta direnç ve kapasitörler kullanılmıştır. Hazırlanan devre aşağıdaki gibidir.

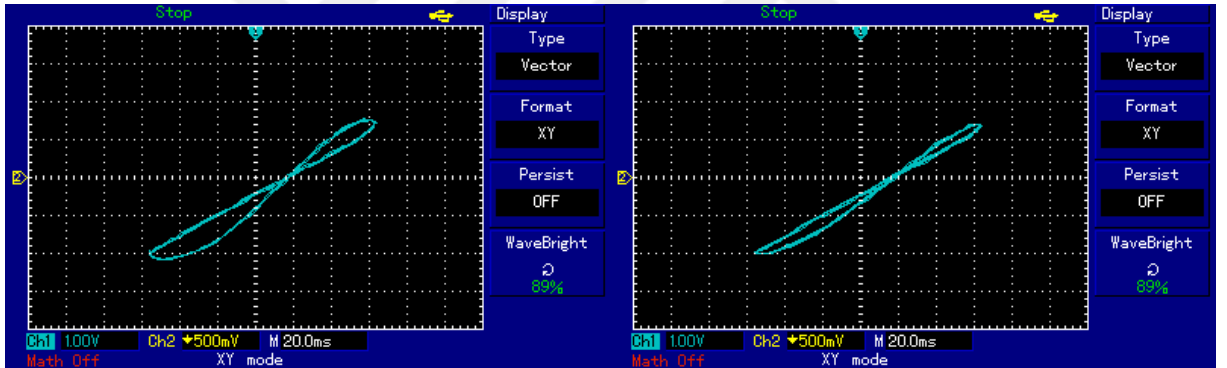


(a)

(b)

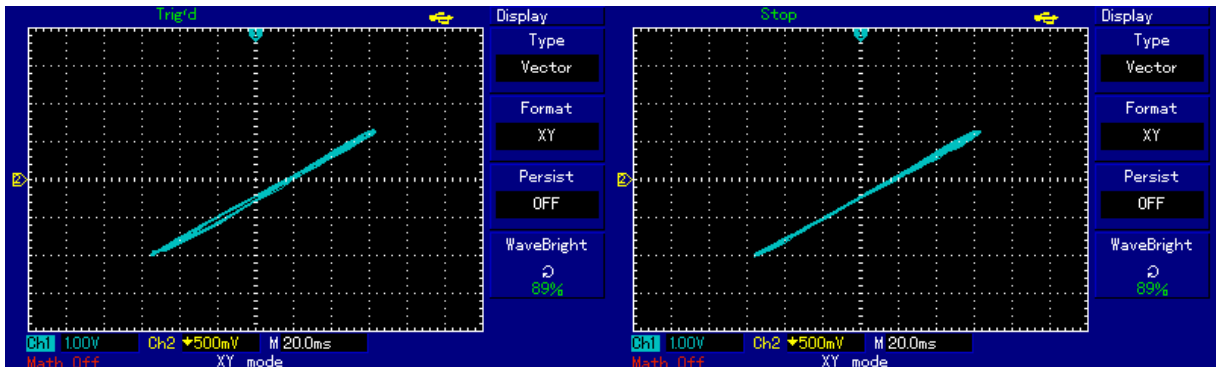
Şekil 50 (a) Azalan ve (b) artan memkapasitör devreleri zamana göre giriş gerilimi ve yük eğrileri

Devreye uygulanan giriş geriliminin frekans değeri, devrenin çalışma aralığının belirlenmesi için önemli bir parametredir. Hazırlanan devreye uygulanan giriş geriliminin frekansının devreye etkisi gözlemlenmiştir. Bu etki aşağıdaki gibidir.



(a)

(b)

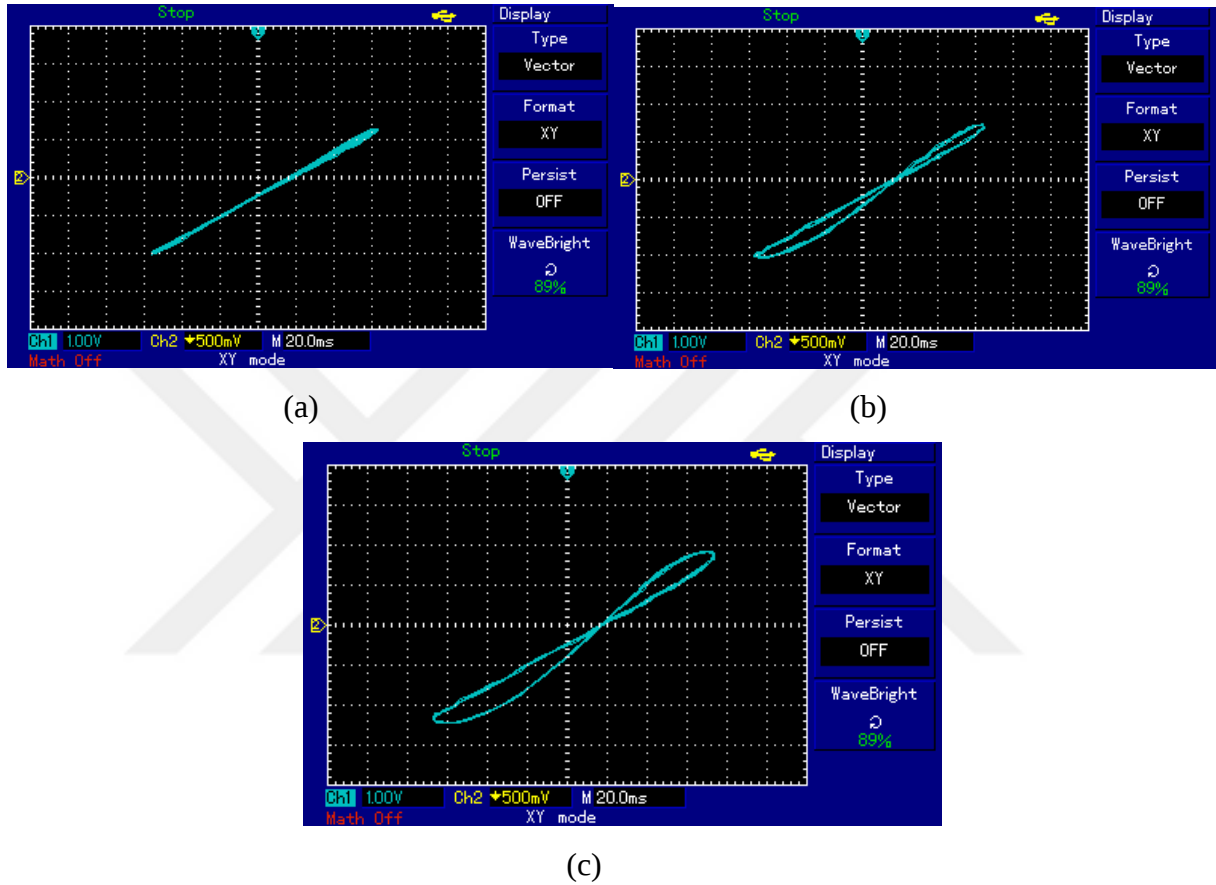


Şekil 51 (a) 20Hz, (b) 25Hz, (c) 40Hz ve (d) 50Hz giriş gerilimi frekans değerleri için azalan memkapasitans gerilim-yük eğrileri

Elde edilen sonuçlardan frekans arttıkça daha doğrusal cevap elde edildiği gözlemlenmiştir. Fakat memkapasitör özelliğinin kaybedilmediği de gözlemlenmiştir. Ayrıca

memkapasitör devresinin 20-40Hz aralığında sağlıklı şekilde çalıştığı ve 50Hz’de tam anlamıyla doğrusal bir cevap verdiği gözlemlenmiştir.

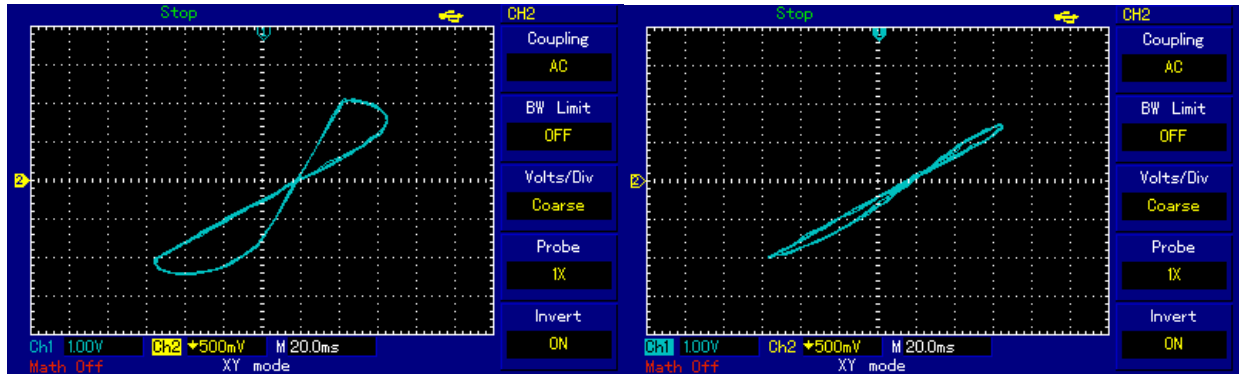
Bu çalışmada giriş geriliminin genliğinin etkisi de incelenmiştir. Bu parametre de frekans gibi memkapasitör devresinin çalışma aralığını belirleyen bir parametredir. Elde edilen sonuçlar Şekil 52’de verilmiştir.



Şekil 52 Giriş gerilimlerinin genlikleri sırasıyla (a) 5 V_{P-P}, (b) 6 V_{P-P} ve (c) 7 V_{P-P} için

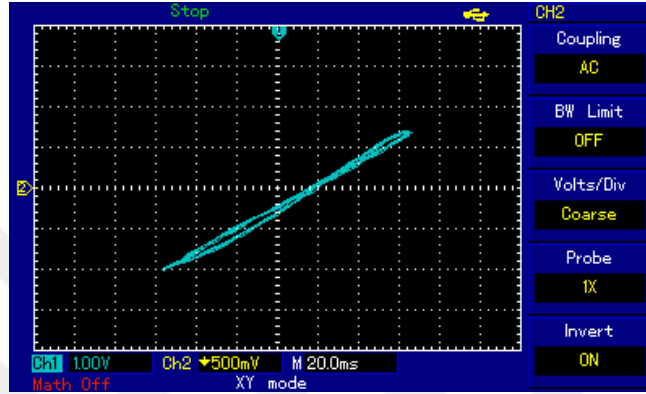
Memkapasitans değeri, bu devre için giriş geriliminin genliğiyle doğru orantılıdır. Giriş geriliminin genliği azaltıldığında yükte azalma gözlemlenmiştir.

Hazırlanan devrenin CCII elemanının X terminaline bağlı olan direnç değeri değiştirilerek sonuçlar elde edilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 53 CCII devre elemanının X terminal direnç değerleri R (a) 330Ω , (b) 560Ω ve (c) 680Ω

Hazırlanan devre azalan memkapasitör devresidir ve direnç değeri arttıkça memkapasitör devresinin değişken kısmı azalmaktadır. Direnç değeri artınca memkapasitans değeri azalmaktadır yani histerisiz eğrisi daha doğrusal hale gelmektedir.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

L. Chua'nın hafıza, nonlineerlik ve frekansa bağıllık gibi özelliklere sahip yeni pasif devre elemanı olan memristörü öne sürmesi ve kapasitif ve indüktif olan memelemanların varlığını öne sürmesi kaotik sistemler ve nöromorfik devreler gibi kullanım alanlarından dolayı dikkat çekmiştir. Teknolojik yetersizliklerden dolayı duraklayan çalışmalar HP şirketinin nanometreler seviyesinde memristör devre elemanını üretmesi ile beraber literatürde bu alanda yapılan çalışmalarda büyük bir yol açılmasına sebebiyet vermiştir.

Bunların üstüne kapasitif ve indüktif mem-elemanlar olan memkapasitör ve memindüktör devre elemanlarını tanıtip önerdikten sonra memkapasitör çalışma sayılarında da de memristörlere benzer ama daha az bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışlar tezin ilk bölümünde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde detaylı bir biçimde literatür taraması yapılmıştır. Memkapasitörler ayrıık eleman olarak satılmamaktadır. Bu nedenle literatürde genel olarak öncekilerden daha kullanışlı ve verimli memkapasitör devresi yapılmak için uğraşılmıştır. Bir memkapasitör devresinin kullanışlılığı çalışma frekans aralığı, farklı sıcaklarda çalışabilir olması, devre bünyesinde kullanılan pasif devre elemanlarının toleranslarını kaldırabiliyor olması, çeşitli uygulamalarda kullanılabilir olması, kullanım aralığının fazla olması için elektronik olarak kontrol edilebilir olması ve besleme gerilimlerindeki değişiklikleri tolere edebiliyor oluşuyla gözlemlenebilir. Ayrıca hazırlanan memkapasitör devresinin simülasyon haricinde deneysel sonuçlarının verilmesi de memkapasitör devresinin kullanışlılığını göstermektedir. Bunların yanında hazırlanan memkapasitör devresinin en azından iki tanesinin paralel veya seri şekilde çalışabiliyor olması memkapasitörlerin farklı devrelerde rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Literatür taramasının özet tablosu EK-1'deki gibidir.

Üçüncü bölümde bu tezde kullanılan devre elemanlarının matematiksel modelleri ve yapıları incelenmiştir. Ayrıca memkapasitör devre elemanının matematiksel ve fiziksel yapısı incelenmiştir.

Dördüncü bölümde hazırlanan memkapasitör devreleri incelenmiştir. Bu tez kapsamında üç tane iki ucu yüzen memkapasitör devresi hazırlanmıştır. Hazırlanan devrelerin simülasyonlarında kullanılan gerilim çarpıcı devre elemanları dışındaki tüm aktif devre elemanları CMOS devreleri şeklinde kullanılmıştır. Ayrıca hazırlanan iki memkapasitör devresinin de hem sabit hem değişken kısımları elektronik olarak kontrol edilebilir tasarlanmıştır üçüncü devrenin ise sadece değişken kapasitansının elektronik olarak kontrol edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.

İlk devre DDCC ve OTA tabanlı bir devredir. Aktif eleman olarak ayrıca bir tane gerilim çarpıcı kullanılmıştır. Pasif devre elemanı olarak ise 1 tane iki ucu yüzen kapasitör, 2 tane topraklı kapasitör ve bir tane topraklı direnç kullanılmıştır. Bu devrenin sabit kısmındaki elektronik kontrol edilebilirlik özelliğini Y_2 terminaline bağlı olan ayar gerilimiyle sağlayabiliyoruz. Değişken kısmındaki elektronik kontrol edilebilirlik özelliğini ise OTA devre elemanının geçiş iletkenliğini ayarlayabildiğimiz akımla sağlayabiliyoruz.

İkinci devre DDCC ve CCII tabanlı bir devredir. Aktif eleman olarak bir gerilim çarpıcı devre ve CCII devre elemanının X terminaline bağlı olan direnç olarak çalışan iki PMOS devre elemanı vardır. Pasif devre elemanı olarak 1 tane iki ucu yüzen kapasitör, 2 tane topraklı kapasitör ve 1 tane bir ucu topraklı direnç kullanılmıştır. Bu devrenin sabit kısmındaki elektronik kontrol edilebilirlik özelliği ilk devredeki gibi DDCC devre elemanının Y_2 terminalinin gerilimiyle ayarlanmaktadır. Değişken kısmındaki elektronik kontrol edilebilirlik özelliği ise CCII devre elemanının X terminaline bağlı olan PMOS devre elemanlarına bağlı ayar gerilimleri ile geçiş iletkenliği değiştirilerek sağlanmaktadır.

Üçüncü devre ise DDCC ve CCCII tabanlı bir devredir. Aktif eleman olarak bir gerilim çarpıcı devre kullanılmıştır. Pasif devre elemanı olarak ise 1 tane iki ucu yüzen kapasitör, 2 tane topraklı kapasitör ve bir tane topraklı direnç kullanılmıştır. Bu devrenin elektronik kontrol edilebilirlik özelliği sadece memkapasitörün değişken kapasitansında gözlemlenmiştir. Bu özellik CCCII devre elemanının X terminalinin parazitik direnci ayarlanarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada beşinci bölümde hazırlanan üç memkapasitör devresinin de simülasyon sonuçları gözlemlenmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları frekansa bağımlık özellikleri, elektronik olarak kontrol edilebilirlik özelliği, seri ve paralel bağlanma davranışları, ortam sıcaklığına toleransları, devrelerin mutlak çalışma aralıkları, Monte Carlo analizleri, hafıza özelliği ve MC-R ile C-R karşılaştırmaları şeklinde verilmiştir.

İlk devrenin 80kHz-140kHz aralığında çalıştığı gözlemlenmiştir. İkinci devrenin 120kHz-200kHz arasında çalıştığı gözlemlenmiştir. Üçüncü devrenin ise 125kHz-200kHz arasında çalıştığı gözlemlenmiştir. İlk iki devrenin de sabit ve değişken kısımlarındaki elektronik kontrol edilebilirlik özelliğinin devre yapısını bozmadığı gözlemlenmiştir. Üçüncü devrenin de elektronik kontrol edilebilirlik özelliğinin doğru şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Üç devre de iki ucu yüzen şekilde tasarlanmıştır bu nedenle seri ve paralel bağlantıda tepkileri gözlemlenmiştir. Seri bağlandıkları zaman fazla doğrusal cevap alınmıştır. İlk iki devre için negatif, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık (-25°C, 27°C ve 80°C) koşullarında davranışları incelenmiştir. Üçüncü devrede ise negatif sıcaklıklar sağlıklı sonuç vermediği için alt sıcaklık değeri -25°C yerine 0°C seçilmiştir.

İkinci devrenin histerisiz eğrisinin orta noktasında yüksek sıcaklık durumunda kayma olduğu gözlemlenmiştir. Üçüncü devrede ise düşük sıcaklık orta noktada kaymaya neden olmuştur. Mutlak çalışma sınırlarını belirlemek amacıyla ilk iki devre için $\pm 8\%$ değerlerinde besleme gerilimi kullanılarak -25°C , 27°C ve 80°C sıcaklıklarındaki tepkisi gözlemlenmiştir. İkinci devrede yüksek sıcaklık ve düşük gerilim değerlerinde orta noktada kayma gözlemlenmiştir. Üçüncü devrenin mutlak çalışma aralığını belirlemek için düşük ve yüksek (0°C ve 80°C) sıcaklıklarda ve düşük ve yüksek besleme gerilimlerindeki (1.15V ve 1.30V) sonuçlar karşılaştırılmıştır. Düşük sıcaklık ve yüksek gerilim değerinin beraber uygulandığı durumda orta noktada kayma gözlemlenmiştir. Ek olarak devrede kullanılan pasif devre elemanlarının toleransını belirlemek amacıyla Monte Carlo analizi yapılmıştır. Monte Carlo analizinde sadece ikinci devrenin histerisiz eğrisinde kayma gözlemlenmiştir. Bunların yanında üç devre için de ortalama kapasitör değeri hesaplanmıştır. Bu ortalama kapasitör değerleriyle birer C-R filtre devresi kurulmuştur. Bu devrelerle MC-R devreleri karşılaştırılıp memkapasitörlerin kapasitif davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Devre-3 için bunların haricinde uygulanan darbe gerilimine karşı elde edilen hafıza özelliği ve bu devrenin devrenin deneysel sonuçları gösterilmiştir. Deneysel sonuç olarak artan-azalan memkapasitör etkisi, frekans etkisi, giriş geriliminin genlik değerinin etkisi ve CCCII devre elemanının yerine kullanılan AD844 devre elemanının X terminaline bağlı olan direncin etkisi gözlemlenmiştir.

Sonraki çalışmalarda, devrede çarpma devresi kullanılmaması veya çarpma devresinin CMOS ile tasarlanıp memkapasitörün entegre devre olarak üretilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca devrede iyi bir hafıza özelliği elde edilip nöromorfik devrelere zemin açılması planlanmaktadır.

8. KAYNAKLAR

- [1] L. Chua, “Memristor-The missing circuit element,” *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 5, pp. 507–519, 1971, doi: 10.1109/TCT.1971.1083337.
- [2] L. O. Chua and Sung Mo Kang, “Memristive devices and systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, no. 2, pp. 209–223, 1976, doi: 10.1109/PROC.1976.10092.
- [3] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “The missing memristor found,” *Nature*, vol. 453, no. 7191, pp. 80–83, May 2008, doi: 10.1038/nature06932.
- [4] T. Driscoll *et al.*, “Memristive adaptive filters,” *Appl Phys Lett*, vol. 97, no. 9, p. 093502, Aug. 2010, doi: 10.1063/1.3485060.
- [5] A. Talukdar, A. G. Radwan, and K. N. Salama, “Non linear dynamics of memristor based 3rd order oscillatory system,” *Microelectronics J*, vol. 43, no. 3, pp. 169–175, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.mejo.2011.12.012.
- [6] L. Li and Z. J. Chew, “Printed circuit board based memristor in adaptive lowpass filter,” *Electron Lett*, vol. 48, no. 25, pp. 1610–1611, Dec. 2012, doi: 10.1049/el.2012.2918.
- [7] Y. V. Pershin, S. La Fontaine, and M. Di Ventra, “Memristive model of amoeba learning,” *Phys Rev E*, vol. 80, no. 2, p. 021926, Aug. 2009, doi: 10.1103/PhysRevE.80.021926.
- [8] P. Yao *et al.*, “Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network,” *Nature*, vol. 577, no. 7792, pp. 641–646, Jan. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-1942-4.
- [9] M. Itoh and L. O. Chua, “Memristor Oscillators,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 18, no. 11, pp. 3183–3206, Nov. 2008, doi: 10.1142/S0218127408022354.
- [10] B. Muthuswamy and L. O. Chua, “Simplest Chaotic Circuit,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 20, no. 05, pp. 1567–1580, May 2010, doi: 10.1142/S0218127410027076.
- [11] J. Borghetti, G. S. Snider, P. J. Kuekes, J. J. Yang, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “‘Memristive’ switches enable ‘stateful’ logic operations via material implication,” *Nature*, vol. 464, no. 7290, pp. 873–876, Apr. 2010, doi: 10.1038/nature08940.
- [12] L. O. Chua, “Nonlinear circuit foundations for nanodevices, part I: the four-element torus,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 9, no. 11, pp. 1830–1859, Nov. 2003, doi: 10.1109/JPROC.2003.818319.
- [13] Zhiheng Hu, Yingxiang Li, Li Jia, and Juebang Yu, “Chaotic oscillator based on voltage-controlled memcapacitor,” in *2010 International Conference on Communications, Circuits*

- and Systems (ICCCAS), Jul. 2010, no. 5, pp. 824–827. doi: 10.1109/ICCCAS.2010.5581863.
- [14] K. Rajagopal, S. Jafari, A. Karthikeyan, A. Srinivasan, and B. Ayele, “Hyperchaotic Memcapacitor Oscillator with Infinite Equilibria and Coexisting Attractors,” *Circuits Syst Signal Process*, vol. 37, no. 9, pp. 3702–3724, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00034-018-0750-7.
 - [15] G. Wang, S. Jiang, X. Wang, Y. Shen, and F. Yuan, “A Novel Memcapacitor Model and Its Application for Generating Chaos,” *Math Probl Eng*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/3173696.
 - [16] F. Yuan, G. Wang, Y. Shen, and X. Wang, “Coexisting attractors in a memcapacitor-based chaotic oscillator,” *Nonlinear Dyn*, vol. 86, no. 1, pp. 37–50, Oct. 2016, doi: 10.1007/s11071-016-2870-6.
 - [17] J. Martinez-Rincon and Y. V. Pershin, “Bistable Nonvolatile Elastic-Membrane Memcapacitor Exhibiting a Chaotic Behavior,” *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 58, no. 6, pp. 1809–1812, Jun. 2011, doi: 10.1109/TED.2011.2126022.
 - [18] K. Rajagopal, A. Akgul, S. Jafari, and B. Aricioglu, “A chaotic memcapacitor oscillator with two unstable equilibriums and its fractional form with engineering applications,” *Nonlinear Dyn*, vol. 91, no. 2, pp. 957–974, 2018, doi: 10.1007/s11071-017-3921-3.
 - [19] Zhiheng Hu, Yingxiang Li, Li Jia, and Juebang Yu, “Chaos in a charge-controlled memcapacitor circuit,” in *2010 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, Jul. 2010, pp. 828–831. doi: 10.1109/ICCCAS.2010.5581864.
 - [20] A. L. Fitch, H. H. C. Iu, and D. S. Yu, “Chaos in a memcapacitor based circuit,” *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, no. 3, pp. 482–485, 2014, doi: 10.1109/ISCAS.2014.6865177.
 - [21] P. K. Sharma, R. K. Ranjan, F. Khateb, and M. Kumngern, “Charged Controlled Mem-Element Emulator and Its Application in a Chaotic System,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 171397–171407, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024769.
 - [22] M. Di Ventra and Y. V. Pershin, “Memcapacitive neural networks,” *Electron Lett*, vol. 50, no. 3, pp. 141–143, Jan. 2014, doi: 10.1049/el.2013.2463.
 - [23] C. Li, C. Li, T. Huang, and H. Wang, “Synaptic memcapacitor bridge synapses,” *Neurocomputing*, vol. 122, pp. 370–374, 2013, doi: 10.1016/j.neucom.2013.05.036.

- [24] M. Di Ventra, Y. V. Pershin, and L. O. Chua, "Circuit Elements With Memory: Memristors, Memcapacitors, and Meminductors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 10, pp. 1717–1724, Oct. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2021077.
- [25] A. H. Kaya, A. Yeşil, and Y. Babacan, "A floating CCCII and DDCC based memcapacitor circuit with electronically controllable behavior," *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 15, no. 1, pp. 93–105, Mar. 2022, doi: 10.18185/erzifbed.989494.
- [26] D. Biolek, Z. Biolek, and V. Biolkova, "SPICE modelling of memcapacitor," *Electron Lett*, vol. 46, no. 7, p. 520, 2010, doi: 10.1049/el.2010.0358.
- [27] D. Biolek, Z. Biolek, and V. Biolkova, "SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems," in *2009 European Conference on Circuit Theory and Design*, Aug. 2009, pp. 249–252. doi: 10.1109/ECCTD.2009.5274934.
- [28] D. Biolek, V. Biolkova, and Z. Kolka, "Mutators simulating memcapacitors and meminductors," in *2010 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*, Dec. 2010, pp. 800–803. doi: 10.1109/APCCAS.2010.5774993.
- [29] D. Biolek and V. Biolkova, "Mutator for transforming memristor into memcapacitor," *Electron Lett*, vol. 46, no. 21, p. 1428, 2010, doi: 10.1049/el.2010.2309.
- [30] Y. V. Pershin and M. Di Ventra, "Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors," *Electron Lett*, vol. 46, no. 7, p. 517, 2010, doi: 10.1049/el.2010.2830.
- [31] X. Y. Wang, A. L. Fitch, H. H. C. Iu, and W. G. Qi, "Design of a memcapacitor emulator based on a memristor," *Phys Lett A*, vol. 376, no. 4, pp. 394–399, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.physleta.2011.11.012.
- [32] M. E. Fouda and A. G. Radwan, "Charge controlled memristor-less memcapacitor emulator," *Electron Lett*, vol. 48, no. 23, p. 1454, 2012, doi: 10.1049/el.2012.3151.
- [33] D. S. Yu, Y. Liang, H. Chen, and H. H. C. Iu, "Design of a Practical Memcapacitor Emulator Without Grounded Restriction," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 60, no. 4, pp. 207–211, Apr. 2013, doi: 10.1109/TCSII.2013.2240879.
- [34] M. P. Sah, C. Yang, R. K. Budhathoki, H. Kim, and H. J. Yoo, "Implementation of a memcapacitor emulator with off-the-shelf devices," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 8, pp. 54–58, 2013, doi: 10.5755/j01.eee.19.8.2673.
- [35] M. P. D. Sah, R. K. Budhathoki, C. Yang, and H. Kim, "Expandable Circuits of Mutator-Based Memcapacitor Emulator," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 23, no. 05, p. 1330017, May 2013, doi: 10.1142/S0218127413300176.

- [36] D. Yu, Y. Liang, H. H. C. Iu, and L. O. Chua, "A Universal Mutator for Transformations Among Memristor, Memcapacitor, and Meminductor," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 61, no. 10, pp. 758–762, Oct. 2014, doi: 10.1109/TCSII.2014.2345305.
- [37] Y. Babacan, "An Operational Transconductance Amplifier-based Memcapacitor and Meminductor," *Istanbul University - Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 36–38, 2018, doi: 10.5152/iujeee.2018.1806.
- [38] F. J. Romero *et al.*, "Memcapacitor emulator based on the Miller effect," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 47, no. 4, pp. 572–579, Apr. 2019, doi: 10.1002/cta.2604.
- [39] J. Vista and A. Ranjan, "Design of Memcapacitor Emulator using DVCCTA," *J Phys Conf Ser*, vol. 1172, p. 012104, Mar. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1172/1/012104.
- [40] M. M. Setoudeh, F., & Dezhdar, "A New Design and Implementation of the Floating-Type Charge-Controlled Memcapacitor Emulator," *Majlesi Journal of Telecommunication Devices*, vol. 9, no. 2, pp. 71–80, 2020.
- [41] M. Madsar, Y. Babacan, and K. Çiçek, "FCS Based Memcapacitor Emulator Circuit," *Journal of the Institute of Science and Technology*, pp. 112–117, Mar. 2020, doi: 10.21597/jist.670900.
- [42] M. Konal and F. Kacar, "Electronically Tunable Memcapacitor Emulator Based on Operational Transconductance Amplifiers," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 30, no. 05, p. 2150082, Apr. 2021, doi: 10.1142/S0218126621500821.
- [43] J. Vista and A. Ranjan, "Simple charge controlled floating memcapacitor emulator using DXCCDITA," *Analog Integr Circuits Signal Process*, vol. 104, no. 1, pp. 37–46, Jul. 2020, doi: 10.1007/s10470-020-01650-9.
- [44] A. Yesil and Y. Babacan, "Electronically Controllable Memcapacitor Circuit With Experimental Results," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 68, no. 4, pp. 1443–1447, Apr. 2021, doi: 10.1109/TCSII.2020.3030114.
- [45] Ravi, "Power MOSFET: Construction, Operation, and I-V characteristic," Jan. 29, 2019. <http://electricalarticle.com/power-mosfet-construction-operation-iv-characteristic> (accessed Apr. 26, 2022).
- [46] Hakan Kuntman, "Analog MOS Tümdrevre Tekniđi," 2016. https://web.itu.edu.tr/~kuntman/Y_lisans/ele512/kitap/ele512-B1.pdf (accessed Apr. 30, 2022).

- [47] M. A. Ibrahim, S. Minaei, and H. Kuntman, "A 22.5MHz current-mode KHN-biquad using differential voltage current conveyor and grounded passive elements," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 59, no. 5, pp. 311–318, Jul. 2005, doi: 10.1016/j.aeue.2004.11.027.
- [48] A. Yesil, E. Yuce, and S. Minaei, "Inverting voltage buffer based lossless grounded inductor simulators," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 83, pp. 131–137, 2018, doi: 10.1016/j.aeue.2017.08.026.
- [49] A. Yesil, Y. Babacan, and F. Kacar, "An electronically controllable, fully floating memristor based on active elements: DO-OTA and DVCC," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 123, p. 153315, 2020, doi: 10.1016/j.aeue.2020.153315.
- [50] A. Yesil and Y. Babacan, "Design of memristor with hard-switching behavior employing only one CCCII and one capacitor," *Journal of Circuits, Systems and Computers*, p. S0218126621501516, Nov. 2020, doi: 10.1142/S0218126621501516.

9. EKLER

EK 1. Literatür taramasının özet tablosu

Kaynakça	Aktif Devre Elemanlar	Pasif Devre Elemanlar	İki Ucu Yüzen / Bir Ucu Topraklı	Çalışma Frekansı	Mutatör	Sabit Kısım Kontrol Edilebilirliği	Değişken Kısım Kontrol Edilebilirliği
(J. Vista & A. Ranjan 2019)	1xDVCCTA	1xBir ucu topraklı direnç, 2x bir ucu topraklı kapasitör	Bir ucu topraklı	600kHz-900kHz	Hayır	Hayır	Hayır
(F Setoudeh & M. Dezhdar 2020)	2xLM324, 1xdiyot, 3xbjt transitör	2xİki ucu yüzen direnç, 3xiki ucu yüzen kapasitör, 1xiki ucu yüzen	Bir ucu topraklı	10-260Hz	Hayır	Hayır	Hayır

		indüktör, 5xbir ucu topraklı direnç, 2xbir ucu topraklı kapasitör					
(Eyyüp Demir ve diğerleri 2021)	1xMO-OTA, 1xPMOS, 1xGerilim çarpıcı	2xTopraklı direnç, 1xTopraklı kapasitör	Bir ucu topraklı	1-6kHz	Hayır	Evet	Hayır
(A. Yeşil, Y. Babacan 2020)	1-2xCCII, 1xÇarpma devresi 2-1xCCII, 1xOTA, 1xÇarpma devresi	2xTopraklı kapasitör, 1xİki ucu yüzen kapasitör	Bir ucu topraklı	500Hz-2kHz	Hayır	Hayır	Evet
(A. Kaya, A. Yeşil & Y. Babacan 2022)	1xDDCC, 1xCCCII, 1xGerilim çarpıcı	2xTopraklı kapasitör, 1xİki ucu yüzen	İki ucu yüzen	125kHz-200kHz	Hayır	Hayır	Evet

		kapasitör, 1x topraklı direnç					
Devre-1	1xDDCC, 1xOTA, 1xGerilim çarpma devresi	2xTopraklı kapasitör, 1xİki ucu yüzen kapasitör, 1x Bir ucu topraklı direnç	İki ucu yüzen	80-120kHz	Hayır	Evet	Evet
Devre-2	1xDDCC, 1xCCII, 1xGerilim çarpma devresi, 2xPMOS	2xTopraklı kapasitör, 1xİki ucu yüzen kapasitör,1x Bir ucu topraklı direnç	İki ucu yüzen	120-200kHz	Hayır	Evet	Evet

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Fotoğraf

	Eğitim Bilgileri
	Lisans
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

	Yüksek Lisans
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

Makale ve Bildiriler
Kaya, A. H., Yeşil, A., & Babacan, Y. A floating CCCII and DDCC based memcapacitor circuit with electronically controllable behavior. <i>Erzincan University Journal of Science and Technology</i> , 15(1), 93-105.
Kaya, A. H., & Yeşil, A. (2021). <i>Memkapasitör Devrelerin İncelenmesi ve Sınıflandırılması</i> (M. N. Seyman, C. Közkurt, & A. Dalcalı, Eds.; pp. 176–178). ISSRIS. https://www.issris.org/_files/ugd/1dd905_284ad2cd33824c29b491987c223a4395.pdf