



**İŞİĞA BAĞLI DİRENÇ VE LED
KULLANILARAK YAPILMIŞ BİR
MEMRİSTÖR EMULATÖR DEVRESİ**

Fatih TULUMBACI

Yüksek Lisans Tezi

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Reşat MUTLU

2017

T.C.
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**IŞIĞA BAĞLI DİRENÇ VE LED KULLANILARAK
YAPILMIŞ BİR MEMRİSTÖR EMULATÖR DEVRESİ**

FATİH TULUMBACI

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: YRD. DOÇ. DR. REŞAT MUTLU

TEKİRDAĞ – 2017

©Her Hakkı Saklıdır

Yrd. Doç. Dr. Reşat MUTLU danışmanlığında, Fatih TULUMBACI tarafından hazırlanan “İşığa Bağlı Direnç ve LED Kullanılarak Yapılmış Bir Memristör Emulator Devresi” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Hafız ALİSOY

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Reşat MUTLU

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan ERDEM

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

IŞIĞA BAĞLI DİRENÇ VE LED KULLANILARAK YAPILMIŞ BİR MEMRİSTÖR EMULATÖR DEVRESİ

Fatih TULUMBACI

Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Reşat MUTLU

Memristör yeni bulunan iki uçlu bir devre elemanıdır. 1971’de teorik olarak varlığı ortaya atılan, memristör gibi davranan bir sistemin bulunması 2008’de mümkün olmuştur. Memristörün kontrol, sinyal işleme, programlanabilir mantık filtreleme ve haberleşme elektroniği sistemleri vb. alanlarda yenilikler getirmesi beklenmektedir. Memristör, “hafıza” özelliğinden dolayı, yeni bellek yongalarının yapımında kullanılabilmektedir. Bu bellek yongalarının, çok az güç harcayacağı ve çok daha az yer kaplayacağı düşünülmektedir. Önemli bir diğer özelliği ise, sadece 1 ve 0 değerlerini taşıyan şu anki belleklerin aksine, ara değerlere de sahip olabilmesi ve buna bağlı olarak çoklu mantığa izin verebilecek olmasıdır. Günümüzde memristör ya da memristör gibi davranan iki uçlu devre elemanları sadece az sayıdaki üniversite ya da firmaların laboratuvarlarında bulunmaktadır. Bu elemanlar nano boyutta yapıldıklarından prototipini geliştirmek oldukça pahalıya mal olmaktadır. Bundan dolayı memristör emulatörleri günümüzde yaygınca kullanılmaktadır ve aktif araştırma sahasıdır. Çok farklı türde memristör emulatörleri literatürde mevcuttur. Bazıları analog bazıları mikrodenetleyici tabanlıdır. Literatürde ışık yayan tipte bir memristif sistemin bulunduğu da rapor edilmiştir. Bu yüksek lisans çalışmasında literatürde bir ilk olarak opapmlarla birlikte ışık yayan diyotlar ve ışıığa bağlı direnç kullanarak analog bir memristör emulatörü yapılması amaçlanmıştır. Tasarlanan devrenin benzetimi ve deneyleri yapılarak iyi bir performans sergilediği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Memristör, Emulatör, LED, LDR, Işık

2017, 77 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

A MEMRISTOR EMULATOR CIRCUIT MADE USING LED AND LDR

Fatih TULUMBACI

Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics and Communications Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Resat MUTLU

Memristor is a newly discovered bipolar circuit element. It was possible in 2008 to find a system that acted as a memristor, which was theoretically revealed in 1971. Memristors are expected to bring innovations in areas such as control, signal processing, programmable logic, filtering and communication electronic systems, exc. Due to its "memory" feature, the Memristor can be used to create new memory chips. It is thought that these memory chips will use very little power and occupy much less space. Another important feature is that, it does not only have only 1 and 0 values unlike current memories, it is possible to have intermediate values and to allow multiple variables depending on them. Bipolar circuit elements acting as memristors or memristors are only found in the laboratories of a few universities or companies. Since these elements are made in nano size, developing the prototype is costly. Therefore, memristor emulators are now widely available and actively investigating. There are many different memristor emulators in the literature. Some are analog, others are microcontroller based. It has also been reported that there is a light-emitting type of memristif system in the literature. In this work, as a first in the literature, it is aimed to make an analogue memristor emulator using opapms, light emitting diodes and light dependent resistor. It has been demonstrated that the designed unit performs well by performing simulations and experiments.

Keywords : Memristor, Emulator, LED, LDR, Light

2017, 77 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	iv
ŞEKİL DİZİNİ.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
TEŞEKKÜR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. MEMRİSTÖR EMULATÖRLERİ	13
3. MATERYAL ve YÖNTEM	16
3.1. Memristör Taklitçi Devresi (Emulatorü).....	16
3.2. LED ve LDR Akım-Gerilim Karakteristiği	22
3.3. Memristör Taklitçi Devre MATLAB™ Simulink® Modeli.....	28
4. DENEYSEL SONUÇLAR	39
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	69
EK1 MEMRİSTÖR EMULATÖRÜ MATLAB™ SIMULINK® BLOK DİYAGRAMI ..	73
EK2 MEMRİSTANS VE ŞEBEKE DENKLEMLERİ.....	74
EK3 MATLAB KODLARI.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	77

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1: Literatürdeki Mevcut Emulatorlerin Frekans Değerleri.....	15
Çizelge 3.1.1: Taklitçi Devre Elemanlarının Değerleri.....	17
Çizelge 3.2.1: LDR direnci denkleminde kullanılan katsayılar.....	24
Çizelge 3.3.1: Simulink® Blok Katsayıları.....	30



ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1: Temel Pasif Öğeler Sistemi.....	1
Şekil 1.2: Memristör Sembolü.....	2
Şekil 1.3: Memristörden Sonra Temel Pasif Öğeler Sistemi.....	4
Şekil 1.4: Chua'nın Tahmini Histerisis Eğrisi (Chua ve Kang, 1976).	5
Şekil 1.5: Chua ve Kang'e göre mümkün olan memristör histerisis eğrisi.	5
Şekil 1.6: Titanyum Dioksit (TiO ₂) Memristörün HP Laboratuvarlarında R.Stanley Williams Tarafından Alınan Fotoğrafi (Williams ve ark., 2008).....	5
Şekil 1.7: Williams'ın Deneysel Histerisis (Lyscaous) Eğrisi (Williams ve ark., 2008).	6
Şekil 1.8: TiO ₂ Memristörün (a) iç yapısı, (b) gerilim uygulandığı durumdaki iç yapısının değişimi.	7
Şekil 1.9: TiO ₂ Memristör Modeli.....	8
Şekil 1.10: TiO ₂ Memristör Eşdeğer Devresi.....	9
Şekil 3.1.1: Memristör Taklitçi Devre Şeması.	16
Şekil 3.1.2: U ₁ opampli farksal yükselteç.....	17
Şekil 3.1.3: Memristör emulatörü optokuplör devresi ve düzeneği.	20
Şekil 3.1.4: Deney düzeneği (a) dış görünümü ve devre (b) iç görünümü.....	21
Şekil 3.2.1: LED ve LDR Akım-Gerilim Karakteristiği Deney Düzeneği.....	22
Şekil 3.2.2: LED akımına bağlı olarak LDR akımı.	23
Şekil 3.2.3: LED akımına bağlı olarak LDR direnci.	23
Şekil 3.2.4: U ₂ opampli integral alıcı.	27
Şekil 3.3.1: Memristör Taklitçi Devre MATLAB Simulink Blok Diyagramı.	29
Şekil 3.3.2: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki akım - gerilim karakteristiği.	32
Şekil 3.3.3: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki akım ve geriliminin zamana göre değişimi.	32
Şekil 3.3.4: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki yük-zaman eğrisi.....	32
Şekil 3.3.5: Simulink Modeli 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki memristans-zaman Eğrisi.....	33
Şekil 3.3.6: Simulink modelinin 5Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	33
Şekil 3.3.7: Simulink modelinin 5Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	34
Şekil 3.3.8: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	34

Şekil 3.3.9: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	34
Şekil 3.3.10: Simulink modelinin 54Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	35
Şekil 3.3.11: Simulink modelinin 54Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	35
Şekil 3.3.12: Simulink modelinin 100Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	36
Şekil 3.3.13: Simulink modelinin 100Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	36
Şekil 3.3.14: Simulink modelinin 150Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	37
Şekil 3.3.15: Simulink modelinin 150Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.....	37
Şekil 4.1: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	40
Şekil 4.2: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	40
Şekil 4.3: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	41
Şekil 4.4: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	41
Şekil 4.5: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	41
Şekil 4.6: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	42
Şekil 4.7: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	42
Şekil 4.8: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	43
Şekil 4.9: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	43

Şekil 4.10: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	43
Şekil 4.11: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	44
Şekil 4.12: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	44
Şekil 4.13: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	45
Şekil 4.14: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	45
Şekil 4.15: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	46
Şekil 4.16: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	46
Şekil 4.17: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	46
Şekil 4.18: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	47
Şekil 4.19: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	47
Şekil 4.20: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	48
Şekil 4.21: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	48
Şekil 4.22: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	49
Şekil 4.23: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	49
Şekil 4.24: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	50
Şekil 4.25: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	50
Şekil 4.26: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	51
Şekil 4.27: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	51
Şekil 4.28: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	51
Şekil 4.29: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	52

Şekil 4.30: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	52
Şekil 4.31: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	53
Şekil 4.32: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	53
Şekil 4.33: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	53
Şekil 4.34: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	54
Şekil 4.35: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	54
Şekil 4.36: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	55
Şekil 4.37: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	55
Şekil 4.38: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	55
Şekil 4.39: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	56
Şekil 4.40: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	56
Şekil 4.41: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	56
Şekil 4.42: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	57
Şekil 4.43: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	58
Şekil 4.44: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	58
Şekil 4.45: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	58
Şekil 4.46: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	59
Şekil 4.47: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	59
Şekil 4.48: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	59
Şekil 4.49: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	60

Şekil 4.50: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	60
Şekil 4.51: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	60
Şekil 4.52: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	61
Şekil 4.53: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	61
Şekil 4.54: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	61
Şekil 4.55: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	62
Şekil 4.56: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.	62
Şekil 4.57: Tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 1 kHz ve (b) 3 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.	63
Şekil 4.58: Tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 5 kHz ve (b) 20 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.	63
Şekil 4.59: Tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 1 kHz ve (b) 3 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.	63
Şekil 4.60: Tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 5 kHz ve (b) 20 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.	64
Şekil 4.61: Tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 1 kHz ve (b) 3 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.	64
Şekil 4.62: Tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 5 kHz ve (b) 20 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
ADC	: Analog Dijital Çevirici (Analog to Digital Convertor)
DAC	: Dijital Analog Çevirici (Digital to Analog Convertor)
DDCC	: Diferansiyel Fark Akım Taşıyıcı (Differential Difference Current Conveyor)
CCII	: İkinci Nesil Akım Taşıyıcı (Second Generation Current Conveyor)
Hz	: Hertz
JFET	: Birleşim Yüzeyli Alan Etkili Transistör (Junction Field Effect Transistor)
MOS	: Metal Oksit Yarı İletken (Metal Oxide Semiconductor)
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
RAM	: Rastgele Erişimli Bellek (Random Access Memory)
DRAM	: Dinamik Rastgele Erişimli Bellek (Dynamic Random Access Memory)
q	: Elektrik Yüğü
TiO ₂	: Titanyumdioksit
TiO _{2-x}	: Katkılı Titanyumdioksit
V	: Gerilim (Volt)
V _{pp}	: Tepeden Tepeye Gerilim (Volt Peak to Peak)
i	: Akım
φ	: Akı

ÖNSÖZ

Üç temel devre elemanı direnç, bobin ve kondansatör, dört temel devre değişkeni olan gerilim, akım, yük ve akı değişkenlerinden ikisi arasındaki ilişkiden yararlanılarak tanımlanmaktadır. Ancak, bu temel devre değişkenlerinden yük ve akı arasındaki ilişki kendisine yer bulamamıştır. 1971 yılında Leon Chua bu eksikliği fark ederek dördüncü temel devre elemanının var olması gerekliliğini ileri sürmüş ve yük ile akı arasındaki ilişkiyi açıklayarak o güne kadar varlığından hiç söz edilmemiş olan dördüncü temel devre elemanı memristörün varlığını ortaya koymuştur.

Memristör (memory resistor/ hafızalı direnç), hafıza özelliği bulunan doğrusal olmayan bir dirençtir. Uzun yıllar memristörün gerçekte var olamayacağı düşünülse de 1 Mayıs 2008'de Stanley Williams ve ekibi HP araştırma ve geliştirme timi iki ucu olan memristörü fiziksel olarak titanyum dioksit kullanarak üretmeyi başarmışlardır. Buna bağlı olarak hafızalı direnç kavramı, hafızalı kapasitif ve indüktif sistemlerin de önünü açarak diğer hafızalı elemanlar olan memkapasitör ile memindüktör elemanlarının geliştirilmesine vesile olmuştur.

Memristör Chua tarafından ortaya atıldığı ilk yıllarda, bilim insanları memristöre karşı mesafeli durmuşlardır. Memristörün uzun yıllar sadece teorik ve matematiksel estetikten kaynaklanan bir eleman olduğu ve gerçekte mevcut olmadığı düşünülmüştür. Fiziksel olarak memristörün üretilmesiyle birlikte, araştırmacıların bakış açısı değişmeye başlamıştır. Araştırmalarında, memristörün elektronik devrelerdeki uygulamalarına odaklanmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda memristörü, kalıcı hafızalar, mantık devreleri, kaos devreleri, değişken kazançlı yükselteçler, sayısal kapılar, yeniden yapılandırılabilir mantık devreleri, osilatörler vb. devrelerde kullanmışlardır.

Fiziksel olarak üretilmesinden sonra memristöre olan ilgi artmış olmasına rağmen memristör henüz çok yeni bir elemandır. Yüksek maliyetinden dolayı sayılı kurum ve firmaların laboratuvarlarında mevcuttur. Bu yüzden akademik çalışmalarını yürüten araştırmacılar tarafından memristörün davranışlarını analiz edebilmek için literatüre birçok emulatör (taklit devresi) kazandırılmıştır. O dönemde Chua da memristöre sahip olmadığından nispeten karmaşık ve hantal yapıdaki ilk emulatör devresini önermiştir. Tasarlanan emulatör devrelerinin çoğu, akış kontrollü memristans elde etmek için analog çarpıcı kullanarak gerçekleştirilmektedir. Literatürde opamp, analog çarpıcı, dijital potansiyometre, mikroişlemci, JFET, MOS, CMOS, ADC vb. kullanılarak yapılmış programlanabilme özelliği taşıyan farklı topolojileri olan emulatör devreleri bulunmaktadır.

Zakhidov ve ark. tarafından 2010 yılında ışık yayan tipte yeni bir memristörün de bulunduğu rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasında keşfedilen tip memristörü taklit edebilen, piyasada rahatlıkla bulunabilen, ekonomik elemanlar kullanılarak, uygulaması kolay bir ışık yayan memristör emulatörü yapılması amaçlanmıştır.

Ekim, 2017

Fatih TULUMBACI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm, sarf ettiği her kelimenin hayatıma kattığı önemi asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Reşat MUTLU'ya teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

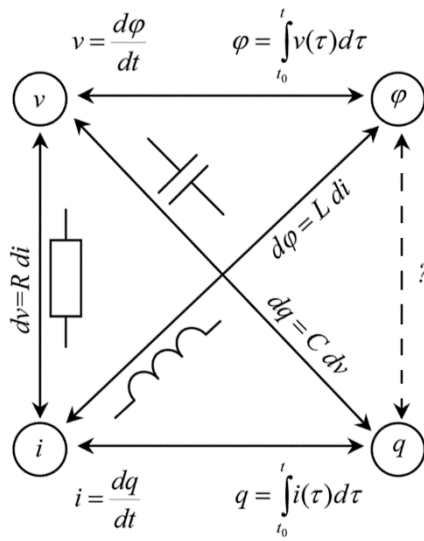
Teşekkürlerin az kalacağı diğer hocalarıma bana lisans ve yüksek lisans eğitimlerim boyunca kazandırdıkları her şey için ve beni gelecekte söz sahibi yapacak bilgilerle donattıkları için hepsine teker teker teşekkürlerimi sunuyorum. Son olarak tez çalışması süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan, beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen bu hayattaki en büyük şansım olan aileme sonsuz teşekkürler.

Ekim, 2017

Fatih TULUMBACI

1. GİRİŞ

Temel düzeyde elektronik bilgisi olan bir kişinin direnç, kondansatör ve bobin devre elemanları hakkında muhakkak bilgisi vardır. Bu üç temel devre elemanı, dört temel devre değişkeni olan gerilim, akım, yük ve akı değişkenleri arasındaki ilişkiden yararlanılarak tanımlanmaktadır. Fakat, bu temel devre değişkenlerinden yük ve akı arasında herhangi bir ilişki bulunmamaktadır. Şekil 1.1’de temel pasif devre elemanları ve devre değişkenleri ile ilişkileri verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere akı (φ) ve elektrik yükü (q) arasındaki ilişkiyi temsil eden herhangi bir eleman bulunmamaktadır.



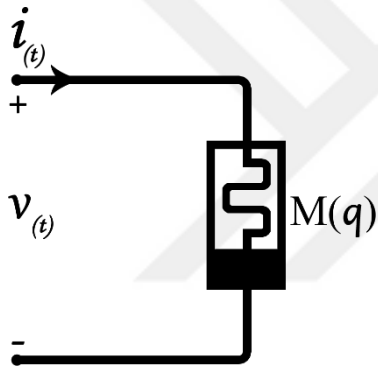
Şekil 1.1: Temel Pasif Öğeler Sistemi.

1971 yılında Dr. Leon Ong Chua bu eksikliğin farkına varmış ve direnç, kondansatör ve bobinden sonra dördüncü temel devre elemanı olarak memristör yani hafızalı direnç (memory resistor) kavramını ortaya atmıştır. Chua rezistansının değeri elektrik yüküne bağlı, gerilimin akıma oranı ile temsil edilebilen, hafıza özelliği gösteren dördüncü bir temel devre elemanının var olması gerektiğini öne sürmüştür. Ayrıca bu elemanın rezistansını memristans olarak isimlendirmiştir (Chua, 1971). Bu devre elemanının iletkenliğinin akı bağımlı olarak modellenebileceğini de göstermiştir.

Memristör Chua tarafından ortaya atıldığı ilk yıllarda, bilim insanları memristöre karşı mesafeli durmuşlardır. Memristörün uzun yıllar sadece teorik ve matematiksel estetikten kaynaklanan bir eleman olduğu ve gerçekte mevcut olmadığı düşünülmüştür. Bundan dolayı çok az sayıda araştırmacı memristör üzerine çalışmalar yapmış ve literatüre az sayıda yayın kazandırmıştır (Chua ve ark., 1974).

Teorik olarak ortaya atılmasından yaklaşık 40 yıl sonra, fiziki olarak ilk memristör, Stanley Williams ve ekibi HP (Hewlett-Packard) araştırma ve geliştirme timi tarafından 2008 yılında nano boyutta platinyum kontaklar arasına sandviçlenmiş titanyum dioksit (Titanya, TiO_2) tabanlı memristör gibi davranan bir malzeme üretilebilmiştir (Williams, 2008)(Williams ve ark., 2008). Memristör gibi davranan memristif bir sistemin fiziksel olarak var olabileceğinin kanıtlanmasının ardından bilim dünyasında memristöre olan ilgi artmaya başlamıştır.

Memristörün sahip olduğu elektriksel rezistans özelliğini memristans (rezistansa benzer şekilde) olarak adlandıran Chua, bu rezistansı M veya $M(q)$ ile göstermiştir. $M(q)$ ifadesi memristörün memristansının elektrik yüküne bağlılığını ifade etmektedir. Chua memristörü Şekil 1.2'deki devre sembolü ile göstermiştir. Memristör direnç gibi güç harcayan bir elemandır. Memristörün memristans değeri, elektrik yüküne ($i(t) = dq(t)/dt$ olduğundan dolayı akımına) bağlı olduğundan, memristör akımı ile kontrol edilebilmektedir.



Şekil 1.2: Memristör Sembolü.

Memristans matematiksel olarak şu formülle ifade edilmektedir;

$$M(q) = \frac{d\phi}{dq} = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (1.1)$$

Burada $v(t)$ memristörün gerilimi, $i(t)$ ise akımıdır. ϕ akı ya da memristör geriliminin zamana integrali, q memristör yükü ya da memristör akımının zamana göre integralidir.

Memristör yükü;

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (1.2)$$

ve memristör akısı;

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (1.3)$$

formülleri ile hesaplanabilir. Burada τ integral ara değişkenidir (dummy variable).

Memristans, manyetik akı ve elektriksel yük cinsinden $M(q) = d\varphi/dq$ şeklinde tanımlanmaktadır. Böylece dört temel devre elemanı, dört temel elektriksel büyüklük ile tanımlanarak simetrik bir biçimde ilişkilendirmiş olur. Bu ilişkiyi içeren yeni pasif öğeler sistemi Şekil 1.3'te verilmiştir. Faraday kanunundan ve akımın tanımından yararlanarak memristansın tanımı aşağıdaki hale getirilebilir. Böylece, memristansın değeri yüke bağlı bir direnç olduğu gösterilmiş olur.

$$M(q) = \frac{d\varphi}{dq} = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{dq}{dt}} \quad (1.4)$$

Böylece, memristör şebeke (iki uç) denklemi:

$$v(t) = M(q)i(t) \quad (1.5)$$

olarak yazılabilir.

Bu ilişkiye göre, akım sıfırdan farklı olduğu sürece memristans değişken olacağından, memristör doğrusal özellik göstermemektedir. Yani memristör nonlinear bir devre elemanıdır. Ancak memristöre alternatif akım uygulandığında ve frekans arttırıldığında, net yük hareketi olmayacağından (yani yükün ortalama değeri sabit kalacağından) dolayı, memristör memristansı sabit kalacağından doğrusala yakın özellik göstererek bir direnç gibi davranmaktadır.

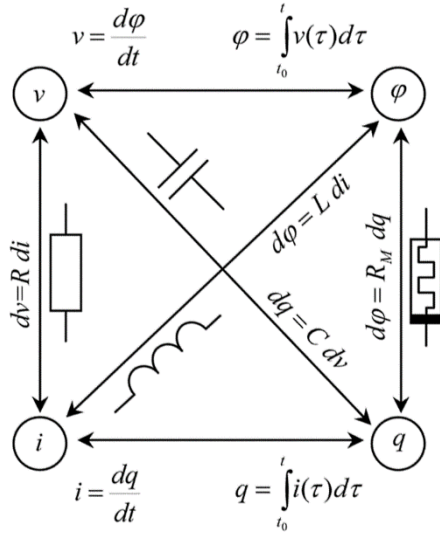
Akım uygulanmadığında, memristans değeri $M(q)$ sabit kalır. Memristörün bellek özelliği göstermesi de memristansın yüke bağımlılığından kaynaklanmaktadır.

Memristör pasif bir elemandır ve direnç gibi güç harcamaktadır. Memristörün harcadığı güç,

$$P(t) = v(t)i(t) \quad (1.6)$$

$$P(t) = M(t)i^2(t) \quad (1.7)$$

ile ifade edilir.



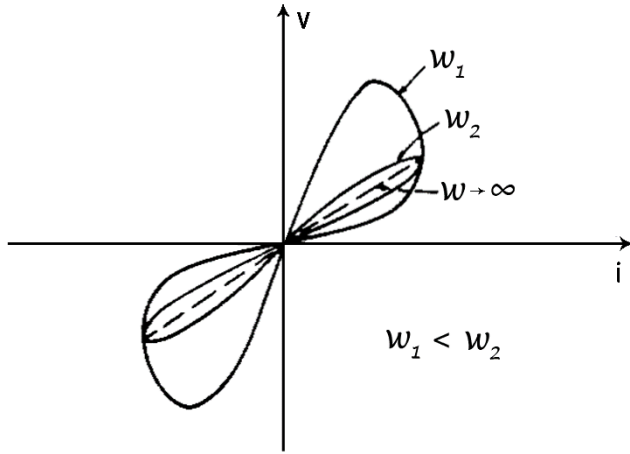
Şekil 1.3: Memristörden Sonra Temel Pasif Öğeler Sistemi.

Chua ve Kang memristöre benzeyen iki uçlu sistemleri memristif sistemler olarak adlandırmışlardır. AC akım kaynağı ile beslenen memristörlerin veya memristif sistemlerin gerilim ve akımının, başlangıç noktasından geçen bir histerisis eğrisine sahip olması gerektiğini göstermişlerdir (Chua ve Kang, 1976). Onların tahmini histerisis eğrisi Şekil 1.4'te gösterilmiştir (Chua ve Kang, 1976). Ayrıca Chua ve Kang'a göre her sıfırdan geçen çimdiklenmiş histerisis eğrisi mümkün değildir. Mümkün olan bir memristör histerisis eğrisi Şekil 1.5'te görülmektedir (Chua ve Kang, 1976).

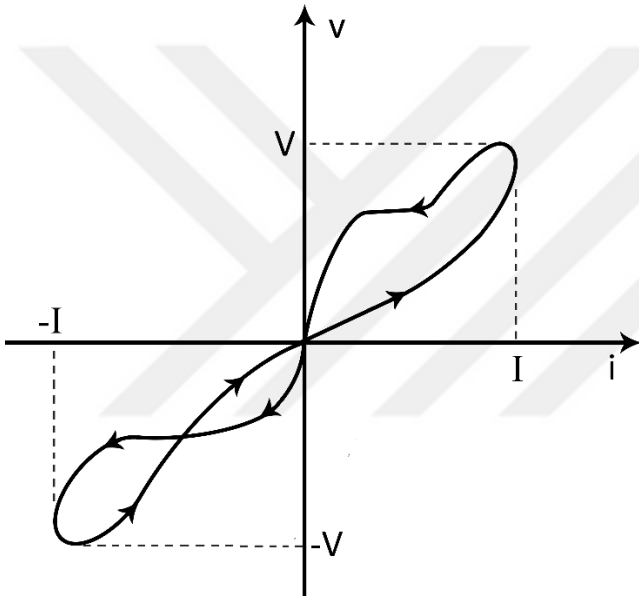
Chua ve Kang çalışmalarında frekans arttıkça memristörün direnç gibi davranmaya başladığını vurgulamışlardır. Hodgkin-Huxley sinir sistemi, termistörler ve gaz deşarj lambaları gibi pek çok sistemin memristör kullanarak uygulanabileceğini iddia eden Chua ve Kang, memristif sistemlerin nasıl modellenebileceğini çalışmalarında göstererek memristif sistemleri tanımlayan diferansiyel denklemleri vermişlerdir (Chua ve Kang, 1976).

Platinyum kontaktarı arasında titanyum dioksit (TiO_2) yerleştirilerek üretilen memristörün HP laboratuvarlarında alınan fotoğrafı Şekil 1.6'da görülmektedir. Williams ve ekibi ürettikleri memristörün fiziksel mekanizmasını açıklayarak literatürdeki ilk memristans denklemini oluşturmuşlardır.

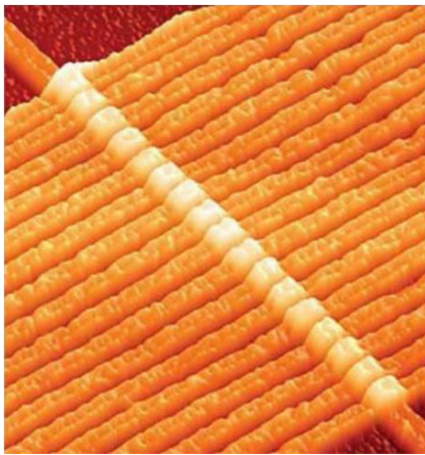
Ayrıca buldukları tip memristörün Chua'nın teoride öngöremediği bir doyma yapısına sahip olduğunu, belirli bir yük değerinde memristörün yüke bağımlılığını kaybederek direnç gibi davrandığını keşfetmişlerdir. Williams ve ekibinin buldukları TiO_2 memristörün deneysel histerisis eğrisi Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



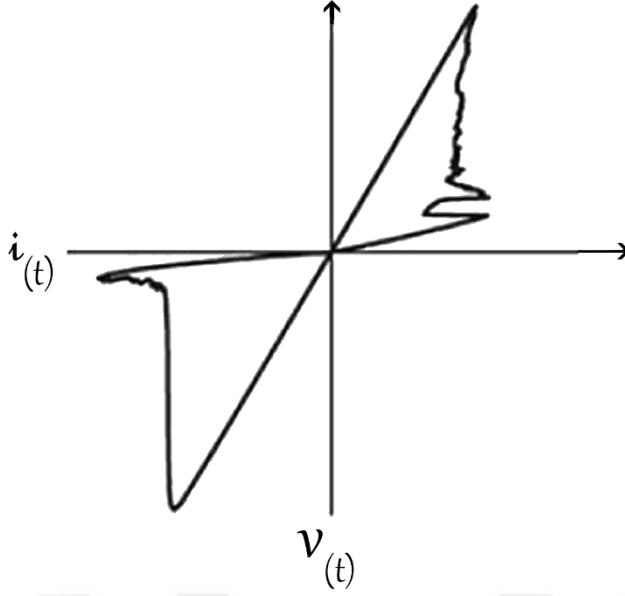
Şekil 1.4: Chua'nın Tahmini Histerisis Eğrisi (Chua ve Kang, 1976).



Şekil 1.5: Chua ve Kang'e göre mümkün olan memristör histerisis eğrisi.



Şekil 1.6: Titanyum Dioksit (TiO_2) Memristörün HP Laboratuvarlarında R.Stanley Williams Tarafından Alınan Fotoğrafi (Williams ve ark., 2008).



Şekil 1.7: Williams'ın Deneysel Histerisis (Lyscaous) Eğrisi (Williams ve ark., 2008).

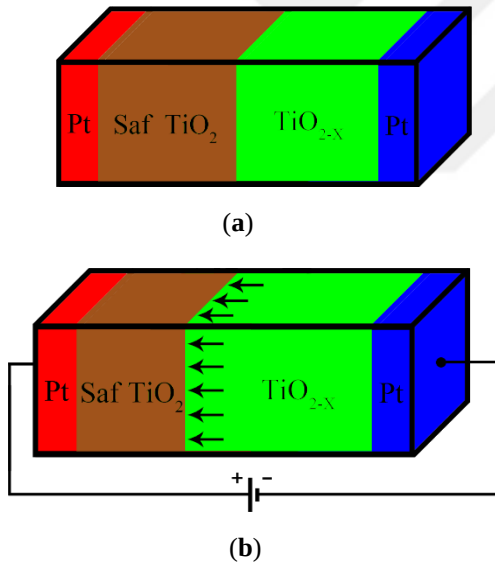
Memristörün gelecekte, transistörün yerini alması beklenmektedir. Memristörün en önemli avantajı transistöre oranla çok daha az yer kaplamasıdır. Memristör, hatırlama yani “bellek” özelliğinden dolayı, yeni bellek yongalarının yapımında kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu bellek yongaları, günümüzde bilgisayarlarda kullanılan DRAM’den çok daha az güç harcadığı gibi, çok daha az yer kaplaması ve bilgi saklama kapasitesinin 100 gigabit/cm² olması beklenmektedir. Memristör tabanlı bellekler, sadece DRAM’lerin değil, hard-disklerin, yani non-volatile belleklerin de yerini alabilirler. Memristörün önemli bir özelliği de , sadece 1 ve 0 değerlerini taşıyan şu anki belleklerin aksine, ara değerleri de taşıyabilmesidir. Memristör bu bakımdan, sinirsel sinapsların özelliğini taşımakta, görme, konuşulanı anlama gibi pek çok yapay zeka uygulamasının ve sinirsel ağ tasarımının gerçekleşmesinin önünü açmaktadır. Günümüzde, tek hücreli canlıların öğrenme mekanizmasını modelleyen memristörlü bir devre yapılmış durumdadır (Pershin ve ark., 2008). Memristörün kontrol, sinyal işleme, programlanabilir mantık, filtreleme ve haberleşme sistemleri gibi alanlarda da yenilikler getirmesi beklenmektedir.

Emulatorler bir elemanın ya da sistemin işleyişini taklit ederek, taklit ettiği sistemin özelliklerini gösteren taklitçi devrelerdir. 1971’de Chua da memristöre sahip olmadığından, taklitçi devre (emulator) vasıtasıyla memristörün davranış özelliklerini gösterebilmiştir (Chua, 1971).

Williams ve ekibinin verdiği lineer sürüklenme hızlı TiO₂ memristör modeline literatürde çok sık rastlanmaktadır (Wey ve Benderli, 2009) (Shin ve ark., 2010) (Jo ve ark.,

2010) (Niu ve ark., 2010). Bu kadar sık TiO_2 memristör lineer modelin literatürde kullanılması lineer sürüklenme hızlı memristör emulatörünün önemini, bilimsel araştırma ve akademik amaçlı kullanılabilirliğini giderek arttırmaktadır. Böyle bir emulatör Mutlu ve Karakulak tarafından verilmiştir (Mutlu ve Karakulak, 2009).

TiO_2 memristörün iç yapısı ve gerilim uygulandığı durumdaki değişimi Şekil 1.8’de görülmektedir. HP laboratuvarlarında üretilen memristör 40-50 nm genişliğinde ve 2-3 nm kalınlığında iki platinyum telin (kontakın) arasına yerleştirilmiş/sandviçlenmiş yaklaşık uzunluğu 3-30 nm olan titanyum dioksitten yapılmış bir rezistif anahtarlama elemanından oluşmaktadır. Bu rezistif anahtarlama elemanı iki eşit parça titanyum dioksit tabakadan oluşmaktadır. Şekil 1.9’da gösterilen soldaki platinyum tele bağlanan tabaka başlangıçta mükemmel bir TiO_2 tabakasıdır ve diğer parça ise oksijen fakirleştirilmiş titanyum dioksit tabakasıdır. Bu oksijence fakirleştirilmiş tabaka TiO_{2-x} olarak gösterilmektedir. Burada x oksijen boşluklarının ya da eksikliklerinin miktarını temsil etmektedir. Tüm devre ya da mekanizma gözle görülemez ancak bir taramalı tünelleme mikroskobu ile gözlenebilir.



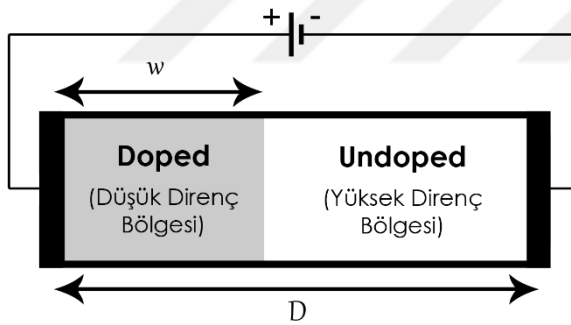
Şekil 1.8: TiO_2 Memristörün (a) iç yapısı, (b) gerilim uygulandığı durumdaki iç yapısının değişimi.

Williams ve ekibinin geliştirdiği platinyum kontakları arasında titanyum dioksit(TiO_2) kullanarak yapılan memristör modeli Şekil 1.9’da görülmektedir. Şekil 1.9’da verilen ince-film memristörün çalışması şu şekilde açıklanabilir:

Daha önce açıklandığı üzere, başlangıçta elektrotlar arası bölge iki titanyum dioksit bölgesinin karışımıdır. Bu elektrotlar arası bölgenin başlangıç durumu iletken ve yarı-iletken arasındadır. Bu iki platinyum konta vasıtasıyla akım bu bölgeye pozitif ya da negatif yönde uygulanabilir. Bu titanyum dioksit ara bölgesine akım uygulandığında, atom seviyesinde yer

alan bir süreç oluşmakta ve bu süreç bu ara bölgenin rezistans değişimine neden olmaktadır. Bu ara bölge başlangıçta nötraldir. Bunun manası yarısının saf titanyum dioksitten yarısının ise oksijen kıtlığı çeken titanyum dioksitten oluşmaktadır. TiO_{2-x} 'in başlangıç değeri yüzde 5 civarındadır. Soldaki platinyum kontağa pozitif bir gerilim uygulanınca pozitif yüklü oksijen boşlukları kendilerini saf TiO_2 parçası içine iterek bu materyalin direncinin düşmesine yani daha iyi bir iletken olmasına neden olmaktadır. Gerilimin yönü değiştiğinde yani negatif bir akım uygulandığında, oksijen boşlukları saf TiO_2 parçasından geri çekilir ve TiO_{2-x} yarı tabakasında yoğunlaşırlar. Bu ise materyalin iç direncinin artmasına ve yani daha kötü bir iletken olmasına, aralığın yarı iletken özelliğinin artmasına neden olur.

Memristör içinden geçen akımın zamana göre integralini hatırlayan yani içinden geçen yüke bağlı bir dirençtir. Buna bağlı olarak devreye uygulanan akım kesildiğinde oksijen boşlukları son bulundukları konumda kalmaktadırlar. Dolayısıyla tabaka yeniden bir akım ya da güç uygulanana kadar sahip olduğu rezistansı hep bu değerde tutmaya devam edecektir. Bu durum memristansın yani yüke bağımlı direncin gerçek açıklamasıdır. Eğer pozitif voltajın devrenin direncini arttırması isteniliyorsa boşluklu yani fakirleştirilmiş titanyum dioksit tabakası solda olmalıdır. Yani bu yarı tabakaların yerleri tersine çevrilmelidir.



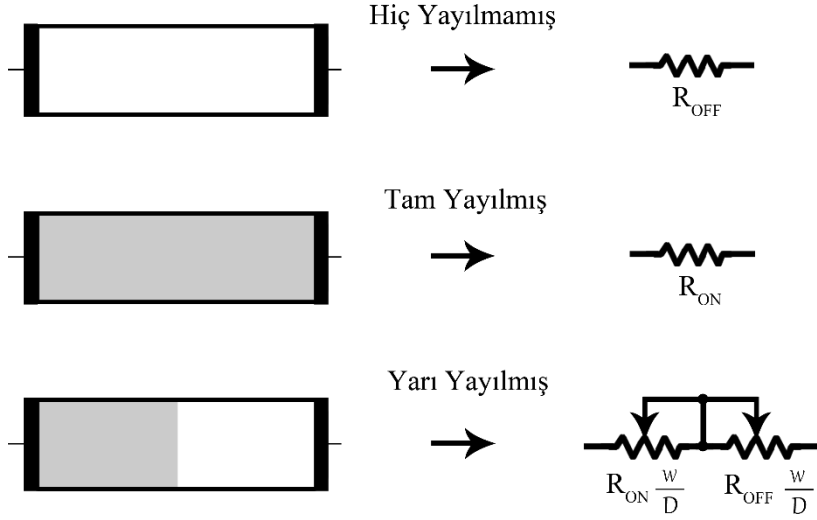
Şekil 1.9: TiO_2 Memristör Modeli.

Williams'ın ilk verdiği modele göre, memristör sabit bir kesite sahipse yayılan yük değeri difüzyon uzunluğu ile doğru orantılıdır (Williams, ve ark. 2008).

HP'nin akım kontrollü memristörünün matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi verilmiştir;

$$v(t) = R(w)i(t) \quad (1.8)$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = i(t) \quad (1.9)$$



Şekil 1.10: TiO₂ Memristör Eşdeğer Devresi.

Eğer iyonların yayıldığı bölge uzunluğu w ise, memristans $M(q)$ Şekil 1.10'daki memristör eşdeğer devresinde de görüldüğü gibi, iyonların yayıldığı ve yayılmadığı bölgelerin toplam direncine eşit olur. Böylece toplam memristans;

$$R(w) = R_{ON} \left(\frac{w(t)}{D} \right) + R_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \quad (1.10)$$

olarak yazılabilir.

Burada;

R_{OFF} Oksijen iyonlarının hiç yayılmadığı durumdaki direnç değeri, R_{ON} ise Oksijen iyonlarının tamamen yayıldığı durumdaki direnç değeri, w oksijen iyonları ile katılanmış bölge genişliği ve D platinyum kontaklar arasında kalan bölgenin uzunluğudur.

Oksijen iyonlarının TiO₂ içinde tümüyle yayıldığı durumda, memristörün doyumunu göz önüne alırsak, $w = D$ veya $q = q_{sat}$ olduğunda memristans değeri minimum rezistans değeri olan R_{ON} değerine eşit olur. Burada q_{sat} maksimum oksijen iyon yükü ya da maksimum memristör yüküdür. Oksijen iyonlarının TiO₂ içinde hiç yayılmadığı durumda ($w = 0$ yani $q = 0$ iken) memristans değeri maksimum rezistans değeri olan R_{OFF} değerine eşit olur. Bu durumu basit olarak ifade edersek toplam direnç;

$$R(w) = R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \text{ ya da} \quad (1.11)$$

$$R(w) = R_{ON} x(t) + R_{OFF} (1 - x(t)) \quad (1.12)$$

olarak verilebilir. Burada $x(t)$ değeri $[0,1]$ aralığında değişmektedir. $x(t)=0$ olduğu durumda $R(w)=R_{OFF}$ ve $x(t)=1$ olduğu durumda $R(w)=R_{ON}$ olmaktadır.

Zamana bağlı $x(t)$ 'nin türevi olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{R_{ON}}{\beta} i(t) \quad (1.13)$$

Burada β manyetik akıyı temsil etmektedir ve $\beta = D^2/\mu_v$ dir ve μ_v (m^2/V_s) memristör içindeki oksijen atomlarının mobilite değeridir.

1.13 denklemini aşağıdaki biçimde yazmak mümkündür;

$$\frac{1}{D} \frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} i(t) \quad (1.14)$$

Buradan hareketle;

$$\frac{w(t)}{D} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D^2} q(t) \quad (1.15)$$

elde edilir.

$R_{ON} \ll R_{OFF}$ olduğundan 1.11 denklemindeki R_{ON} 'a bağlı olan ilk ifade ihmal edilebilir.

Böylece toplam direnç;

$$R(w) = R_{OFF} \left(1 - \mu_v \frac{R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (1.16)$$

olarak bulunur.

Ayrıca $x = \frac{w}{D} = \frac{q}{q_{sat}}$ olarak alındığında toplam direnç $R(w)$,

$$R(w) = R_{ON} \frac{q}{q_{sat}} + R_{OFF} \left(1 - \frac{q}{q_{sat}} \right) \quad (1.17)$$

olarak da ifade edilebilmektedir.

İyonların yayıldığı bölge uzunluğu w 'nin zamana göre değişimi;

$$w(t) = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (1.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Memristörün doyumunu göz önüne alırsak, $q = q_{sat}$ olduğunda $w(t) = D$ olur. Bu durumda R_{ON} direnci aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$R_{ON} = \frac{D^2}{\mu_v q(t)} \quad (1.19)$$

TiO₂ memristörün memristansı, memristör yüküne doğrusal olarak bağlıdır ve bu durum oksijen iyonlarının doğrusal sürüklenme hızından dolayı meydana gelmektedir (Williams, ve ark. 2008). Williams'ın ekibi memristans formülünü;

$$M(q) = R_{OFF} \left(1 - \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (1.20)$$

olarak vermiştir.

HP memristör modeli literatürdeki en basit memristör modeldir. Memristörler memristif sistemlerin alt kümesi olduğundan genel olarak;

$$v(t) = R(w, i, t) i(t) \text{ ve} \quad (1.21)$$

$$\frac{dw}{dt} = \dot{w} = f(w, i, t) \quad (1.22)$$

olduğu düşünülmektedir.

Literatürde “Three Fingerprints of Memristor (Memristörün üç parmakızı)” adı ile S. P. Adhikari ve arkadaşları tarafından yayınlanan çalışmada, memristörlerin ya da memristif sistemlerin sahip olması gereken üç karakteristik özelliği tanımlamışlardır. (Adhikari ve ark., 2013). Chua'nın da aralarında bulunduğu çalışma grubuna göre bir elemanı ya da sistemi, memristör ve ya memristif sistem olarak tanımlayabilmek için sahip olması gereken birinci parmak izi çimdiklenmiş sıfır geçiş özelliği bulunan döngüsel histerisis eğrisinin mevcut olmasıdır. Bu çimdiklenmiş sıfır geçişi sağlayan sistemlerin histerisis eğrilerinin alanlarının frekans arttıkça daralması beklenmektedir. Bu durum memristörlerin ya da memristif sistemlerin sahip olması gereken ikinci parmak izi olarak tanımlanmıştır. Çalışmalarında üçüncü parmak izini ise memristörlerin ya da memristif sistemlerin çimdiklenmiş histerisis eğrilerinin sonsuz frekansta küçülerek, tek değerli bir fonksiyona dönüşüp direnç gibi doğrusal bir forma bürünmesi olarak tanımlamışlardır.

Memristör teknolojisi henüz yolun başındadır. Hali hazırda kullanımı bir elin parmaklarını geçmemekte ve sınırlı sayıdaki üniversite ve firmanın laboratuvarlarında mevcuttur. Geleceğin teknolojisi olarak lanse edilen bu elemana talep günden güne artmaktadır. Fakat günümüzde memristör piyasada bulunmamaktadır. Kuramsal memristörleri taklit etmek yerine, yapılan deneysel çalışmalarda bazı kavramların analizi için memristör taklitçileri kullanılabilir. Bu yüzden üniversitelerin mühendislik fakültelerinde memristör taklitçisi ya da emulatör denilen devreler, elektrik ve elektronik devreler derslerinde eğitim için ve araştırma yaparken memristörlere veya memristör devrelerine ait kavramların analizi için oldukça kullanışlıdır. Literatürde ışık yayan memristörlerin de bulunduğu rapor edilmiştir (Zakhidov ve ark., 2010) Bu çalışmada ışık saçan memristörü takit edebilen piyasada rahatlıkla bulunabilen, ekonomik ve uygulaması kolay ışık yayan diyotlar kullanan memristör emulatörü yapılması planlanmıştır.

Bu tez takip eden sırayla düzenlenmiştir. İkinci bölümde literatürde mevcut olan memristör taklitçileri tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde bu çalışmada tasarlanan memristör taklitçi devresi tanıtılarak MATLAB™ Simulink® paket programı kullanılarak devrenin benzetimi yapılmıştır. LED ve LDR'nin akım-gerilim karakteristiğini anlayabilmek için taklitçi devreden bağımsız bir deney düzeneği tasarlanmış ve deney gerçekleştirilmiştir. Memristör emulatörü kurulmuş ve deneyler yapılmıştır. Dördüncü bölümde memristörün farklı gerilim ve frekanslardaki durumu incelenmiş ve deney sonuçları bu bölümde yorumlanmıştır. Son olarak sonuç ve öneriler kısmı ile bu çalışma sonlandırılmıştır.

2. MEMRİSTÖR EMULATÖRLERİ

Memristör hala ticari olarak bulunamamaktadır. Modellemesinde rastlanan güçlükler ve nasıl kullanılacağına netleşmemesi nedeniyle henüz seri üretimi yapılmamaktadır. Bu yüzden memristör elemanın dinamiklerini ve nasıl kullanılacağını deneysel olarak keşfetmek ve memristörlü devrelere ait kavramları ve iddiaları doğrulamak için emulatör devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Nitekim Chua da nispeten karmaşık ve hantal yapıdaki ilk emulatör devresini önermiştir (Chua L. O., 1971). Literatürde memristör için farklı topolojileri olan bir çok emulatör devresi bulunmaktadır. Bu bölümde literatürde yayınlanan memristör emulatör devreleri kısaca tanıtılacaktır.

Literatürdeki emulatör devrelerinin çoğu, akış kontrollü memristans elde etmek için analog çarpıcı kullanarak gerçekleştirilmektedir (Mutlu & Karakulak, 2009a) (Muthuswamy, 2010) (Bo-Cheng ve ark., 2011) (Kim ve ark., 2012) (Yu ve ark., 2013) (Lopez ve ark., 2014) (Yu ve ark., 2014) (Yesil ve ark., 2014) (Lopez ve ark., 2015).

Analog çarpıcı devresi, memristör emulatörünün akısını, emulatör devresindeki voltajla ya da memristör emulatörünün yükünü, emulatör devresindeki akımla çarpmak için kullanılır (Muthuswamy, 2010) (Bo-Cheng ve ark., 2011) (Biolek ve ark., 2011) (Valsa ve ark., 2011) (Abuema'atti & Khalifa, 2014) (Abuema'atti & Khalifa, 2015) (Elwakil ve ark., 2013) (Yesil ve ark., 2014) (Lopez ve ark., 2015) (Alharbi ve ark., 2015).

Pershin ve Ventra, dijital potansiyometre, mikroişlemci ve ADC (Analog Dijital Çevirici) kullanarak, programlanabilir analog devrelerde kullanılan bir memristör emulatörü önerdiler (Pershin & Di Ventra, 2010). Sundukları memristör emulatörü eşik tipi davranışa dayanmaktadır. Sayısal sinyal ve dijital potansiyometrenin çözünürlüğünün sınırlı olmasından dolayı bu emulatörün bazı dezavantajları bulunmaktadır. Literatürde arduino bazlı dijital potansiyometre kullanan memristör emulatörü de mevcuttur (Olumodeji ve Gottardi, 2016). Bo-Cheng ve ark. (2011) çalışmalarında doğrusal olmayan bir akı kontrollü emulatör devresi önerilmiş ve bu emulatörü bir kaotik devre de kullanmışlardır. Önerdikleri tip memristör emulatörü karmaşık ve hantaldır.

Biolek ve ark. doğrusal olmayan bir direnci bir MOSFET'i memristör'e dönüştüren bir emulatör tasarlamışlardır (Biolek ve ark., 2011). Karakulak ve Mutlu da bir MOSFET'i emulatör olarak kullanmışlardır (Mutlu ve Karakulak, 2009b).

Valsa ve ark., integratör ve kontrol edilebilir bir dirençten oluşan memristör emulatörünü geliştirmişlerdir (Valsa ve ark., 2011). Çalışmalarında JFET, tanıtilen emulatör devresinde integratör bloğunun çıkış gerilimi ile kontrol edilebilen bir direnç olarak kullanılmıştır.

Kim ve ark. artımsal/azaltımsal bir memristör emulatörü önermişlerdir (Kim ve ark., 2012). Bu emulatör birkaç entegre devre gerektirmektedir ve sınırlı çalışma frekans bandından dolayı hantaldır. Lopez ve ark. (2015) tarafından nispeten daha kullanışlı başka bir yük kontrollü artımsal/azaltımsal memristör emulatörü geliştirilmiştir.

Abuelma'atti ve Khalife, memristör emulatörlerini, akım geri beslemeli opamplar (işlemsel yükselteçler) kullanarak tasarlamışlar ve dijital devrelerde kullanmışlardır (Abuema'atti & Khalifa, 2014) (Abuema'atti & Khalifa, 2015).

Yu, Chen ve Iu, iki opamp ve tekli analog çarpıcı kullanarak kayan akı kontrollü memristör emulatörünü gerçekleştirmişlerdir (Yu ve ark., 2013a). Sunulan memristör emulatör devresini akım taşıyıcıları kullanarak memkapasitör (hafızalı kondansatör) devresine dönüştürmüşlerdir (Yu ve ark., 2013b).

Akım taşıyıcıları kullanan kayan bir akı kontrollü memristör emulatörünü Lopez ve ark. (2014) ve Yu ve ark. (2014) çalışmalarında kullanmışlardır.

Elwakil ve ark. (2013) çift döngüsel (sıfır geçiş, çimdik) histerisis davranışı üretebilen bir matematiksel model ve bu modeli tahmin edebilen akım taşıyıcıları ve analog çarpıcı kullanan bir emulatör devresi geliştirmeyi başarmışlardır.

Hussein ve Fouda (2013) MOS, akım kontrollü bir memristör emulatörünün gerçekleştirilmesini önermişlerdir. Önerdikleri memristör CCII ve voltaj kontrollü dirençten oluşmaktadır. Buradaki en büyük dezavantaj MOS'un gerçekleştirilmesinde transistörün doğrusallığının sınırlı oluşudur.

Yener ve Kuntman CMOS DDCC temelli memristör emulatörünü gerçekleyerek onu kaotik haberleşme uygulamasında kullanmışlardır (Yener ve Kuntman, 2012). Yesil ve ark.(2014) CMOS, DDCC ve analog çarpanı kullanan, topraklanmış bir yük kontrollü memristör emulatörü sunmuşlardır.

İkinci nesil akım taşıyıcıları, CCII ve analog çarpanlar kullanılarak uygulanan, hem pozitif hem de negatif memristans değerlerine sahip olabilen, serbest tutunma potansiyelli memristör emulatör devresi Cam ve Sedef (2017) tarafından tasarlanmıştır.

Abuelma'atti ve Khalifa (2016) topraklanmış kondansatörler, akım geri beslemeli işlemsel yükselteçler, diyotlar ve dirençlerden oluşan bir serbest tutunma potansiyelli memristör emulatörü sunarak bu emulatörü frekans-voltaj dönüştürücüde kullanmışlardır.

Tanıtilan yayınlanmış çalışmalardaki memristör emulatörlerinin karşılaştırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Literatürdeki Mevcut Emulatörlerin Frekans Değerleri

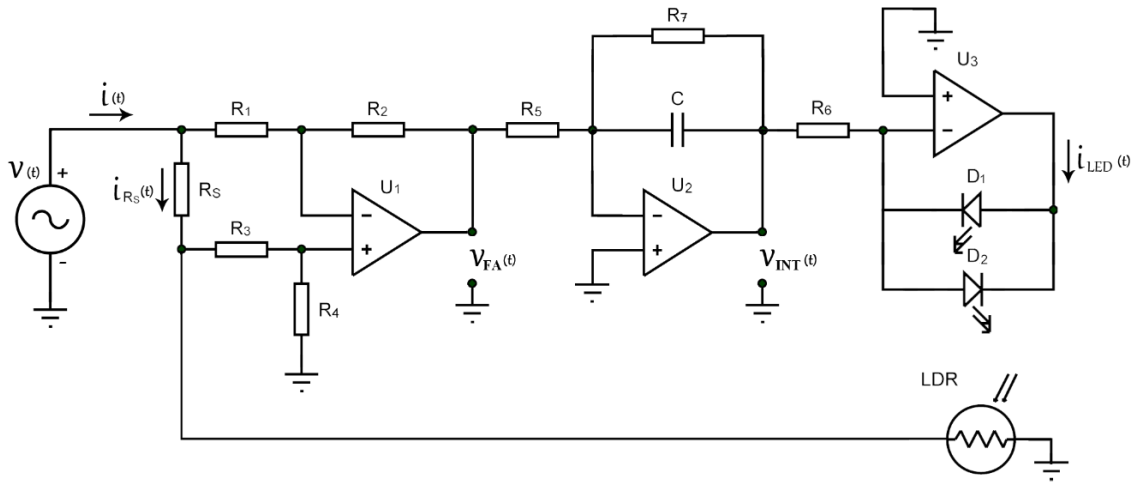
Emulatör Modeli	Maksimum Frekans
(Valsa, Biolek, & Biolek, 2011)	2 Hz
(Yu, Chen, & Lu, 2013)	16 Hz
(Mutlu & Karakulak, 2009)	17 Hz
(Pershin & Di Ventra, 2010)	50 Hz
(Biolek ve ark. , 2011)	100 Hz
(Elwakil, Fouda, & Radwan, 2013)	100 Hz
(Yu, Lu, Fitch, & Liang, 2014)	120 Hz
(Abuema'atti & Khalifa, 2014)	500 Hz
(Abuema'atti & Khalifa, 2015)	600 Hz
(Kim, Sah, Yang, & Chua, 2012)	800 Hz
(Bo-Cheng ve ark., 2011)	1 kHz
(Sozen & Cam, 2015)	5 kHz
(Sozen & Cam, 2016)	10 kHz
(Lopez ve ark., 2014)	20.2 kHz
(Yesil, Babacan, & Kacar, 2014)	1 MHz

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Memristör Taklitçi Devresi (Emulatörü)

Memristör taklitçi devresi hem memristif bir sistem hem de memristör benzeri özellik gösteren elektronik devredir. Chua'nın 1971 yılında yaptığı elektrik yükü ve akı karakteristiği üretip, bu karakteristiği işlemsel yükselteç, transistör vb. çok sayıda devre elemanları kullanarak gerçekleştirdiği emulatör devresinin uygulanması oldukça karmaşık ve zaman alıcıdır (Chua, 1971).

Bu çalışmada kolay bulunan, ucuz ve daha az elemanla kolay uygulanabilen bir taklitçi devre tasarlanacaktır. Gerçekleştirilecek memristör taklitçi devre şeması Şekil 3.1.1'de görülmektedir. Girişe uygulanan gerilim $v(t)$ memristör emulatörünün gerilimidir. Devrede bulunan R_s direncinin akımı $i_{R_s}(t)$ memristör emulatörü akımı $i(t)$ ile doğru orantılıdır. $i_{R_s}(t)$ akımı farksal yükselteç vasıtasıyla yükseltilerek, integrali alınmaktadır. $i_{R_s}(t)$ akımı, $i(t)$ memristör emulatörü akımı ile orantılı olduğundan, alınan bu integral $i(t)$ 'nin integrali ile orantılıdır. Bu integratör çıkışı ile ters paralel bağlı D_1 ve D_2 ışık saçan diyotlarının geri besleme elemanı ve R_6 direncinin giriş direnci olarak kullanıldığı eviren bağlı opamp ile beslenmektedir. İntegratör alıcı çıkış geriliminin kutuplarına bağlı olarak devreye giren LED'in (D_1 ya da D_2 diyotunun) akımı integratörün çıkış gerilimi ile doğru orantılıdır. İletimde olan LED'in yaydığı ışık LDR direncinin değerini belirlemektedir. Yani girişe uygulanan geri besleme, LED'lerin akımı ile orantılı olarak yaydıkları ışığın değişimi ile LDR direncinin değerinin değişmesi yoluyla sağlanmaktadır.



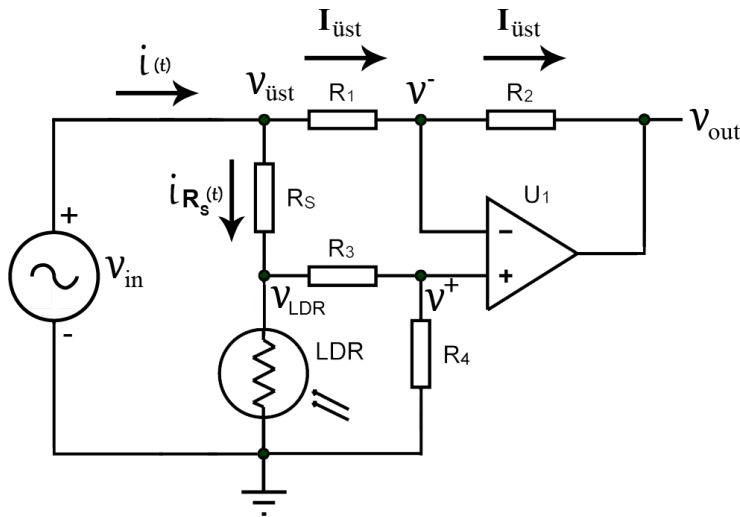
Şekil 3.1.1: Memristör Taklitçi Devre Şeması.

LDR'nin üzerine düşen gerilim, LDR direnci ve LDR akımı ile orantılı olduğundan, bu işaret girişe LED akımlarına yani $i(t)$ 'nin integraline ($q(t)$ 'ye) bağlı bir geri besleme olarak etkimektedir. Taklitçi devrede kullanılan elemanların değerleri Çizelge 3.1.1'de verilmiştir.

Memristör elektrik yüküne bağlı bir eleman olduğundan dolayı, memristör emulatrörünün elektrik yükü $q(t)$ 'nin hesaplanması gerekmektedir. Bu devrede memristans yüke bağlı ve bağlı olmayan olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. R_s direnci ve fark alıcının giriş direncinin paralel eşdeğeri yüke bağlı olmayan kısımdır.

Çizelge 3.1.1: Taklitçi Devre Elemanlarının Değerleri

ELEMAN	DEĞERİ
R_s	33 k Ω
R_1	10 k Ω
R_2	10 k Ω
R_3	10 k Ω
R_4	10 k Ω
R_5	22 k Ω
R_6	1 k Ω
R_7	150 k Ω
C	220 nF



Şekil 3.1.2: U_1 opampli farksal yükselteç.

Bu noktada Şekil 3.1.2'den yararlanarak U_1 opampının giriş gerilimi ve giriş direnci hesaplanacaktır. U_1 opampının negatif girişindeki gerilim değeri V^- , pozitif girişindeki gerilim değeri V^+ ve R_s direnci uçlarında V_{ust} ve V_{LDR} düğüm gerilimleri mevcuttur. R_1 direnci üzerinden

akan $I_{üst}$ akımının, opampın giriş direncinin çok yüksek olmasından dolayı R_2 direnci üzerinden de aktığı kabul edilebilir.

Kirchhoff'un akımlar ve gerilimler kanunları kullanılarak ve opampı ideal kabul ederek takip eden denklemler yazılabilir.

$$V_{üst} = V_{in} \quad (3.1)$$

$$V_{LDR} = V_{in} \frac{(R_3 + R_4) // R_{LDR}}{R_S + (R_3 + R_4) // R_{LDR}} = V_{in} \frac{\frac{(R_3 + R_4)R_{LDR}}{(R_3 + R_4) + R_{LDR}}}{\frac{(R_3 + R_4)R_{LDR}}{(R_3 + R_4) + R_{LDR}} + R_S} \quad (3.2)$$

Payda eşitleyerek denklem düzenlendiğinde;

$$V_{LDR} = V_{in} \frac{(R_3 + R_4)R_{LDR}}{(R_3 + R_4)R_{LDR} + R_S[(R_3 + R_4) + R_{LDR}]} \quad (3.3)$$

elde edilir.

$$V^- = V^+ = V_{LDR} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (3.4)$$

$$I_{üst} = \frac{V_{üst} - V^-}{R_1} \quad (3.5)$$

$$I_{üst} = \frac{V_{in} - V_{LDR} \frac{R_4}{R_3 + R_4}}{R_1} \quad (3.6)$$

Bu ifadedeki V_{LDR} yerine 3.3 denklemi yazılarak gerekli sadeleştirmeler yapıldığında;

$$I_{üst} = \frac{V_{in} - V_{in} \frac{R_4 R_{LDR}}{(R_3 + R_4)R_{LDR} + R_S[(R_3 + R_4) + R_{LDR}]}}{R_1} \quad (3.7)$$

$$I_{üst} = \frac{V_{in} \left[1 - \frac{R_4 R_{LDR}}{(R_3 + R_4)R_{LDR} + R_S[(R_3 + R_4) + R_{LDR}]} \right]}{R_1} \quad (3.8)$$

olarak bulunur. R_S direncinin akımı;

$$i_{R_s}(t) = \frac{V_{üst} - V_{LDR}}{R_s} \quad (3.9)$$

$$i_{R_s}(t) = \frac{V_{in} - V_{in} \frac{(R_3 + R_4)R_{LDR}}{(R_3 + R_4)R_{LDR} + R_s[(R_3 + R_4) + R_{LDR}]}}{R_s} \quad (3.10)$$

$$i_{R_s}(t) = \frac{V_{in} \left[1 - \frac{(R_3 + R_4)R_{LDR}}{(R_3 + R_4)R_{LDR} + R_s[(R_3 + R_4) + R_{LDR}]} \right]}{R_s} \quad (3.11)$$

olarak bulunur. Eğer;

$$\alpha = \frac{R_{LDR}}{(R_3 + R_4)R_{LDR} + R_s[(R_3 + R_4) + R_{LDR}]} \quad (3.12)$$

değişken değiştirmesi yapılırsa 3.8 ve 3.11 denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$I_{üst}(t) = V_{in} \frac{[1 - \alpha R_4]}{R_1} \quad (3.13)$$

$$i_{R_s}(t) = V_{in} \frac{[1 - \alpha(R_3 + R_4)]}{R_s} \quad (3.14)$$

Memristör akımı $i(t)$;

$$i(t) = i_{R_s}(t) + I_{üst}(t) \quad (3.15)$$

$$i(t) = V_{in} \frac{[1 - \alpha(R_3 + R_4)]}{R_s} + V_{in} \frac{[1 - \alpha R_4]}{R_1} \quad (3.16)$$

$$i(t) = V_{in} \left(\frac{[1 - \alpha(R_3 + R_4)]}{R_s} + \frac{[1 - \alpha R_4]}{R_1} \right) \quad (3.17)$$

$$i(t) = V_{in} \left(\frac{[1 - \alpha(R_3 + R_4)]R_1 + [1 - \alpha R_4]R_s}{R_1 R_s} \right) \quad (3.18)$$

olarak elde edilir.

3.18 denkleminde hareketle memristans giriş geriliminin giriş akımına oranından aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$M(q) = \frac{V_{in}(t)}{i(t)} = \left(\frac{R_1 R_S}{[1 - \alpha(R_3 + R_4)]R_1 + [1 - \alpha R_4]R_S} \right) \quad (3.19)$$

$$M(q) = \frac{V_{in}(t)}{i(t)} = \left(\frac{R_1 R_S}{R_1 + R_S - \alpha(R_1(R_3 + R_4) + R_4 R_S)} \right) \quad (3.20)$$

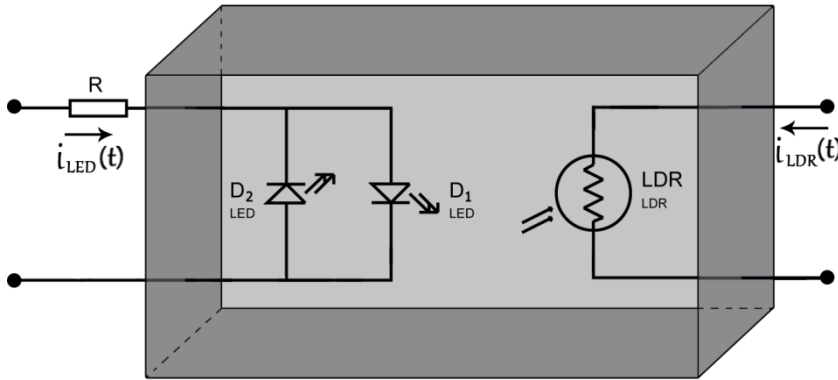
3.12 denklemindeki α değeri yerine yazılırsa $M(q)$ memristansının yani memristör emulatörünün giriş direncinin değeri;

$$M(q) = \left(\frac{R_1 R_S}{R_1 + R_S - \frac{R_{LDR}}{(R_3 + R_4)R_{LDR} + R_S((R_3 + R_4) + R_{LDR})}(R_1(R_3 + R_4) + R_4 R_S)} \right) \quad (3.21)$$

$$M(q) = \left(\frac{R_1 R_S ((R_3 + R_4)R_{LDR} + R_S((R_3 + R_4) + R_{LDR}))}{(R_1 + R_S)((R_3 + R_4)R_{LDR} + R_S((R_3 + R_4) + R_{LDR})) - (R_1(R_3 + R_4) + R_4 R_S)R_{LDR}} \right) \quad (3.22)$$

olarak elde edilir.

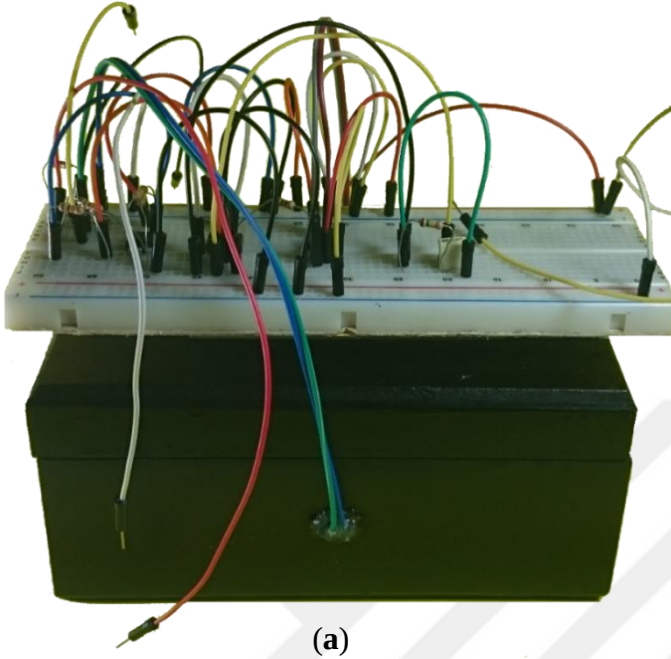
Görüldüğü üzere memristansı hesaplamak için LED'lerin akımlarına bağlı olarak LDR direncinin değerine ihtiyaç bulunmaktadır.



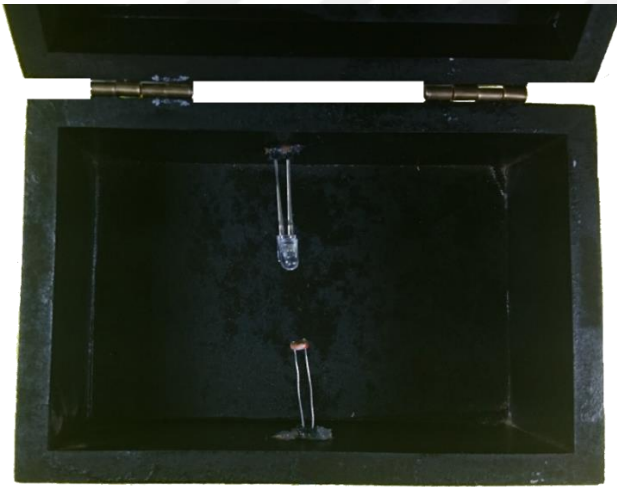
Şekil 3.1.3: Memristör emulatörü optokuplör devresi ve düzeneği.

LDR güneş ışığına oldukça duyarlı bir elemandır. Ortamdaki ışığın LDR direnci üzerinde meydana getirdiği değişimler (ışıksal gürültüler) hataya neden olmaktadır. LED-LDR sisteminin gün ışığından etkilenmesinin önüne geçebilmek için kapalı bir düzenek kullanılmıştır. Yani bir optokuplör oluşturulmuştur. Şekil 3.1.3'te memristör emulatörünün optokuplör devresi ve düzeneği görülmektedir. Tamamen kapalı olan bu düzenekte meydana gelebilecek içsel ışık yansımalarının etkisini engellemek için siyah renge boyanmıştır. Devre

şeması Şekil 3.1.1’de görülen memristör taklitçi devresi protoboard üzerine kurulmuştur. Kullanılan deney düzeneği ve kurulan devre Şekil 3.1.4’te görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.1.4: Deney düzeneği (a) dış görünümü ve devre (b) iç görünümü

Devrenin analizini yapabilmek için LDR direnci R_{LDR} ’nin, her iki LED akımının toplamı i_{LED} ’e bağlı olarak bulunması gerekmektedir.

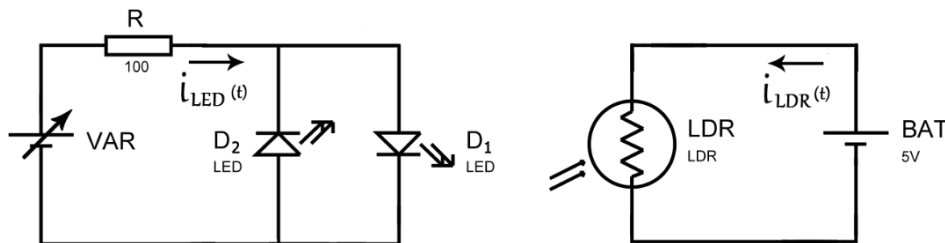
3.2. LED ve LDR Akım-Gerilim Karakteristiği

Memristör taklitçi devresindeki LED'den yayılan ışığa bağlı olarak LDR direncinin değerini ölçmek için Şekil 3.2.1'deki deney düzeneği kullanılmıştır. LDR ve LED'lere seri olarak ampermetre bağlanmıştır. LED'leri yüksek akımdan korumak için seri olarak R direnci bağlanmıştır. Deneyin ilk aşaması olarak LED'lerin bağlı bulunduğu gerilim kaynağı 0V gerilime ($I_{LED} = 0$ olması için) ayarlanmış ve ayarlı güç kaynağı yavaş yavaş artırılarak LDR akımı ve iletimdeki D_1 LED'inin akımı kaydedilmiştir. İkinci aşamada ters bağlı diyodu iletime geçirmek için LED'leri besleyen gerilim kaynağı tekrar 0V'a ayarlanmış ve ayarlı güç kaynağı negatif gerilim verecek şekilde deney yapılarak LDR ve iletimdeki D_2 LED'inin akımları kaydedilmiştir. Bu deneyle elde edilen LED-LDR akımları grafiksel olarak Şekil 3.2.2'de çizilmiştir.

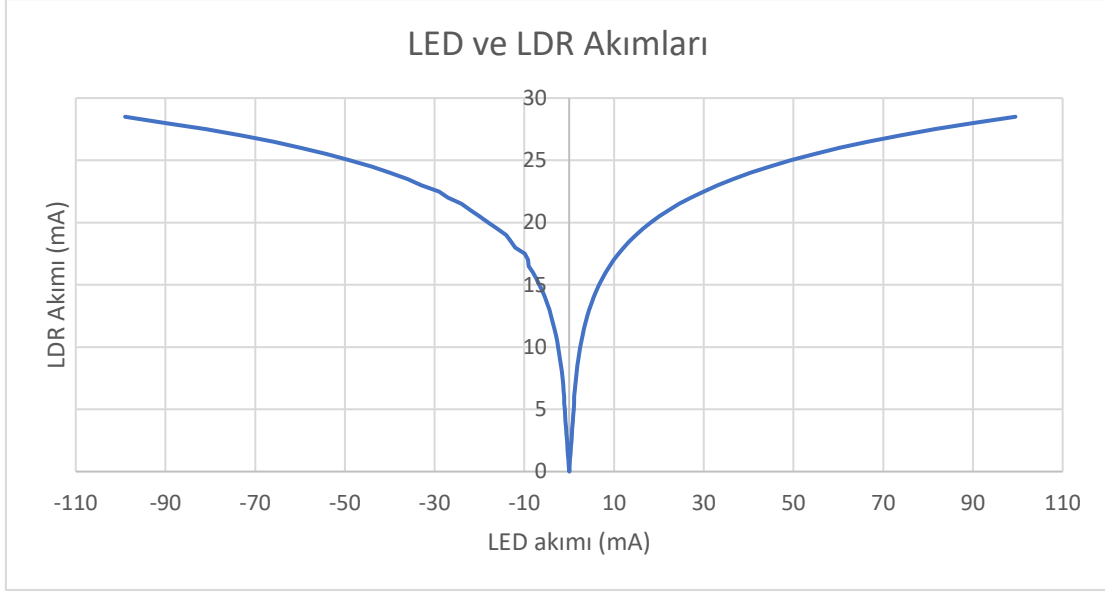
Deneyde LDR'ye sabit 5V DC gerilim uygulanmıştır. LDR direnci, deneyde ölçülen LDR akımı verileri kullanılarak matematiksel olarak;

$$R_{LDR} = \frac{V_{LDR}}{I_{LDR}} = \frac{5}{I_{LDR}} \quad (3.23)$$

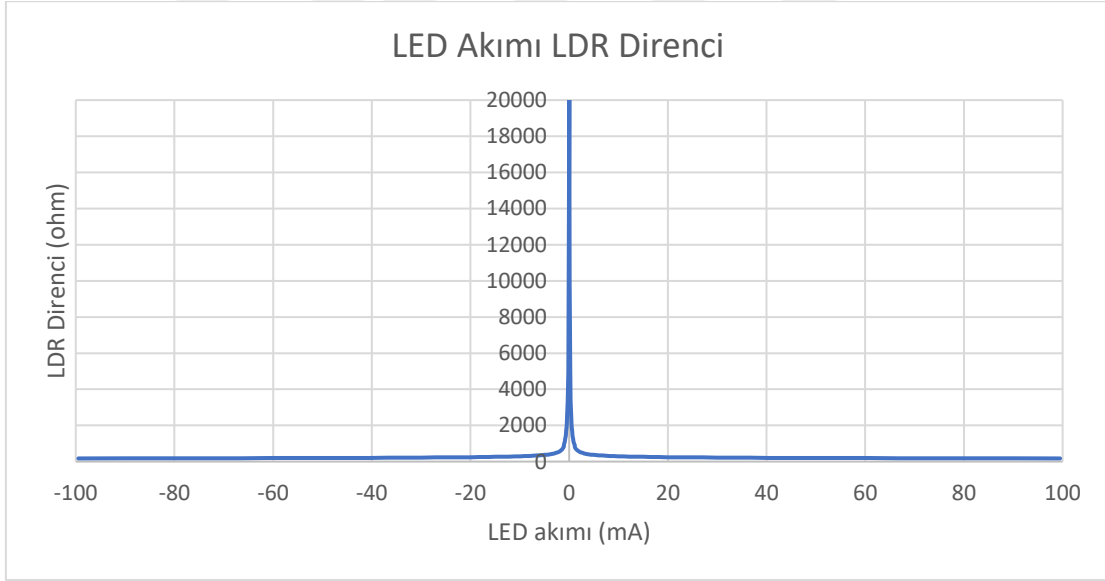
formülüyle hesaplanmıştır. 3.23 denklemi kullanılarak hesaplanan LDR direncinin LED akımına bağlı olarak değişimi Şekil 3.2.3'te grafiksel olarak çizilmiştir. Şekil 3.2.1'de görülen LDR ve LED akım ve gerilim karakteristiğini analiz edebilmek için kullanılan deney düzeneği vasıtasıyla elde edilen veriler MATLAB™ programı ile çizilmiştir. MATLAB en küçük kareler yöntemini kullanarak deneysel verilere eğri uydurmayı (Curve Fitting) kolayca yapabilmektedir. Bu işlem verilerin çizdirildiği şeklin (figürün) penceresinde bulunan *Tools* sekmesi altında *Basic Fitting* seçeneği yoluyla yapılmaktadır.



Şekil 3.2.1: LED ve LDR Akım-Gerilim Karakteristiği Deney Düzeneği.



Şekil 3.2.2: LED akımına bağlı olarak LDR akımı.



Şekil 3.2.3: LED akımına bağlı olarak LDR direnci.

MATLAB programının eğri uydurma özelliği kullanılarak elde edilen LDR direncinin LED akımına bağlı olarak değişimi 3.24 denkleminde ifade edilmiştir. 3.24 denklemindeki katsayılar Çizelge 3.2.1’de verilmiştir.

$$R_{LDR} = a_6 i_{LED}^6 + a_5 |i_{LED}|^5 + a_4 i_{LED}^4 + a_3 |i_{LED}|^3 + a_2 i_{LED}^2 + a_1 |i_{LED}| + R_0 \quad (3.24)$$

Çizelge 3.2.1: LDR direnci denkleminde kullanılan katsayılar.

KATSAYI	DEĞERİ
R_0	4142
a_1	-1349
a_2	125
a_3	-4,8
a_4	$8,8 \cdot 10^{-2}$
a_5	$-75,2 \cdot 10^{-5}$
a_6	$2,4 \cdot 10^{-6}$

Çizelge 3.2.1'deki veriler için 3.24 denkleminde verilen R_{LDR} fonksiyonu olması gerektiği gibi bir çift fonksiyondur. Yani LED akımı i_{LED} pozitif ya da negatif iken aynı sonucu vermektedir.

3.22 denklemindeki R_{LDR} direnci 3.24 denkleminde ifade edildiği gibi bulunmuştur. Memristör emulatörünün giriş direnci yani memristansı;

$$M(q) = \left(\frac{R_1 R_S ((R_3 + R_4) R_{LDR} + R_S ((R_3 + R_4) + R_{LDR}))}{(R_1 + R_S)((R_3 + R_4) R_{LDR} + R_S ((R_3 + R_4) + R_{LDR})) - (R_1(R_3 + R_4) + R_4 R_S) R_{LDR}} \right) \text{ formülü}$$

düzenlenirse;

$$M(q) = \left(= \frac{R_S (R_3 + R_4) + R_{LDR} R_S (R_1 R_3 + R_1 R_4 + 1)}{R_S (R_1 + R_S)(R_3 + R_4) + R_{LDR} [(R_1 + R_S)(R_3 + R_4 + R_S) - R_1 R_3 - R_1 R_4 - R_4 R_S]} \right) \quad (3.25)$$

3.25 formülü Çizelge 3.2.2'deki parametreler kullanılarak yazıldığında;

$$M(q) = \left(\frac{k_1 + R_{LDR} R_S (k_2 + k_3 + 1)}{R_S k_4 + R_{LDR} [k_5 - k_2 - k_3 - k_6]} \right) \quad (3.26)$$

elde edilir.

3.26 formülündeki R_{LDR} direnci değeri yerine 3.24 ifadesi yazılırsa;

$$M(q) = \left(\frac{k_1 + [a_6 i_{LED}^6 + a_5 |i_{LED}^5| + a_4 i_{LED}^4 + a_3 |i_{LED}^3| + a_2 i_{LED}^2 + a_1 |i_{LED}| + R_0] R_S (k_2 + k_3 + 1)}{R_S k_4 + [a_6 i_{LED}^6 + a_5 |i_{LED}^5| + a_4 i_{LED}^4 + a_3 |i_{LED}^3| + a_2 i_{LED}^2 + a_1 |i_{LED}| + R_0] [k_5 - k_2 - k_3 - k_6]} \right) \quad (3.27)$$

Çizelge 3.2.2: Memristans denkleminde kullanılan katsayılar.

KATSAYI	DEĞERİ
k_1	$R_S(R_3 + R_4)$
k_2	$R_1 R_3$
k_3	$R_1 R_4$
k_4	$(R_1 + R_S)(R_3 + R_4)$
k_5	$(R_1 + R_S)(R_3 + R_4 + R_S)$
k_6	$R_4 R_S$

Şekil 3.1.1'deki ilk opamp fark alıcı yükselteç olarak çalışmaktadır ve çıkış gerilimi aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$V_{FA}(t) = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{LDR} - \frac{R_2}{R_1} V_{in} \quad (3.28)$$

Eğer 3.28 denkleminde $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ seçilirse $V_{FA}(t) = V_{LDR} - V_{in}$ olur. Yani fark alıcı yükselteç çıkarıcı devre olarak çalışmaktadır. Eğer $R_1 = R_3$ ve $R_2 = R_4$ olarak seçilirse $V_{FA}(t) = (V_{LDR} - V_{in}) \frac{R_2}{R_1}$ olarak bulunur.

Şekil 3.1.1'deki memristör taklitçi devresinde $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ olduğu hatırlanırsa;

$$V_{FA}(t) = V_{LDR} - V_{in} \quad (3.29)$$

$$V_{FA}(t) = -(V_{in} - V_{LDR}) = -V_{R_S}(t) = -i_{R_S}(t) R_S = \left(-\frac{R_1}{R_1 + R_S} i(t) \right) R_S \quad (3.30)$$

elde edilir.

R_7 direnci düşük frekanslarda doyumu engellemek için kullanılmıştır. Değeri yüksek seçilen bu direncin etkisi ihmal edilirse U_2 integratör opampının çıkış gerilimi;

$$V_{INT}(t) = -\frac{1}{R_5 C} \int_{-\infty}^t V_{FA}(t) dt = -\frac{1}{R_5 C} \int_{-\infty}^t \left(-\frac{R_1}{R_1 + R_S} i(t) \right) R_S dt \quad (3.31)$$

$$V_{INT}(t) = -\frac{1}{R_5 C} \int_{-\infty}^t V_{FA}(t) dt = \frac{R_1 R_S}{(R_1 + R_S) R_5 C} \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad (3.32)$$

olur.

İntegral alıcının çıkışı R_6 direnci üzerinden LED'leri beslediğinden, LED akımı;

$$i_{LED}(t) = \frac{V_{INT}(t)}{R_6} \quad (3.33)$$

formülüyle hesaplanabilir. Böylece;

$$i_{LED}(t) = \frac{R_1 R_S}{(R_1 + R_S) R_5 R_6 C} \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad (3.34)$$

olarak bulunur. Memristör emulatörünün yükü, yani giriş akımının zamana göre integrali;

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad (3.35)$$

olduğundan;

$$\gamma = \frac{R_1 R_S}{(R_1 + R_S) R_5 R_6 C} \quad (3.36)$$

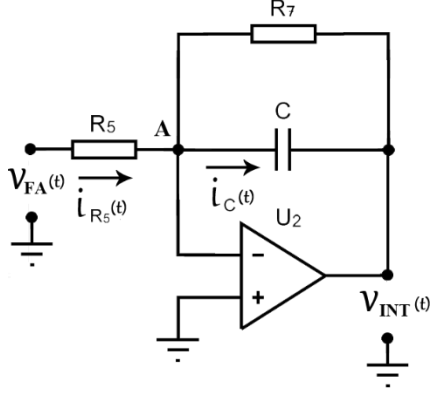
olmak üzere;

$$i_{LED}(t) = \frac{R_1 R_S}{(R_1 + R_S) R_5 R_6 C} q(t) = \gamma q(t) \quad (3.37)$$

olarak yazılabilir. Böylece 3.28'deki emulatör memristansı;

$$M(q) = \left(\frac{k_1 + [a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5^{-5} |\gamma^5 q(t)^5| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 |\gamma^3 q(t)^3| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 |\gamma q(t)| + R_0] R_S (k_2 + k_3 + 1)}{R_S k_4 + [a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5^{-5} |\gamma^5 q(t)^5| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 |\gamma^3 q(t)^3| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 |\gamma q(t)| + R_0] [k_5 - k_2 - k_3 - k_6]} \right) \quad (3.38)$$

olarak bulunur.



Şekil 3.2.4: U_2 opampli integral alıcı.

Böylece memristör emulatörü şebeke denklemleri;

$$v(t) = M(q)i(t) \quad (3.39)$$

$$v(t) = \left(\frac{k_1 + [a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5 |\gamma^5 q(t)^5| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 |\gamma^3 q(t)^3| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 |\gamma q(t)| + R_0] R_s (k_2 + k_3 + 1)}{R_s k_4 + [a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5 |\gamma^5 q(t)^5| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 |\gamma^3 q(t)^3| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 |\gamma q(t)| + R_0] [k_5 - k_2 - k_3 - k_6]} \right) i(t) \quad (3.40)$$

$$\frac{dq}{dt} = i(t) \quad (3.41)$$

olarak bulunur. 3.38 ve 3.40 numaralı denklemler EK-2’de daha büyük olarak verilmiştir.

Memristör emulatörünün U_2 opampli integral alıcı devresi Şekil 3.2.4’te görülmektedir. Burada R_7 direnci çok büyük olduğundan ihmal edilmiştir. Dolayısıyla;

$$i_{R_5}(t) = i_C(t) \quad (3.42)$$

olur. Aynı zamanda R_s direncinin akımı;

$$i_{R_s}(t) = \frac{V_{FA}(t)}{R_s} \quad (3.43)$$

değerine eşittir.

3.30 denklemindeki $V_{FA}(t)$ ifadesi 3.43’te yerine yazıldığında;

$$i_{R_s}(t) = \frac{V_{FA}(t)}{R_s} = -\frac{R_1 R_s}{(R_1 + R_s) R_s} i(t) \quad (3.44)$$

elde edilir.

İntegral alıcı kondansatörünün çıkış gerilimi;

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_c(t) dt \quad (3.45)$$

formülüyle hesaplanabilir.

$i_{R_5}(t) = i_c(t)$ olduğundan 3.45 denklemi;

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t \left(-\frac{R_1 R_s}{(R_1 + R_s) R_5} i(t) \right) dt = -\frac{R_1 R_s}{(R_1 + R_s) R_5 C} \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad (3.46)$$

olarak yazılır. Memristör emulatörü yükü;

$q(t) = \int_{-\infty}^t i(t) dt$ olduğundan kondansatör gerilimi;

$$V_c(t) = -\frac{R_1 R_s}{(R_1 + R_s) R_5 C} q(t) \quad (3.47)$$

olarak hesaplanabilir.

3.3. Memristör Taklitçi Devre MATLAB™ Simulink® Modeli

Şekil 3.1.1’de verilen memristör emulatörünün durum uzaya denklemleri;

$$v(t) = M(q)i(t) \quad (3.48)$$

$$v(t) = \left(\frac{k_1 + [a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5 |\gamma^5 q(t)^5| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 |\gamma^3 q(t)^3| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 |\gamma q(t)| + R_0] R_s (k_2 + k_3 + 1)}{R_s k_4 + [a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5 |\gamma^5 q(t)^5| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 |\gamma^3 q(t)^3| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 |\gamma q(t)| + R_0] [k_5 - k_2 - k_3 - k_6]} \right) i(t) \quad (3.49)$$

$$V_c(t) = -\frac{R_1 R_s}{(R_1 + R_s) R_5 C} q(t) \quad (3.50)$$

$$\frac{dq}{dt} = i(t) \quad (3.51)$$

olarak yazılabilir.

Burada;

Çizelge 3.3.1: Simulink Blok Katsayıları

BLOK	KATSAYI	DEĞERİ
Constant	R_0	4142
Constant1	k_1	$R_S*(R_3+R_4)$
Constant2	$R_S* k_4$	$R_S*(R_3+R_4)* (R_1+R_S)$
Gain1	a_1	-1349
Gain2	a_2	125
Gain3	a_3	-4,8
Gain4	a_4	$8,8*10^{-2}$
Gain5	a_5	$-75,2*10^{-5}$
Gain6	a_6	$2,4*10^{-6}$
Gain7	G	γ
Gain8	G^2	γ^2
Gain9	G^3	γ^3
Gain10	G^4	γ^4
Gain11	G^5	γ^5
Gain12	G^6	γ^6
Gain13	$R_S*(k_2+k_3+1)$	$R_S*(R_1R_3+ R_1R_4+1)$
Gain14	$k_5-k_2-k_3-k_6$	$(R_1+R_S)*(R_3+R_4+R_S)- R_1R_3- R_1R_4- R_4R_S$

Girişte verilen sistemin durum uzay denklemlerinden 3.49’da görüldüğü üzere LDR direncinin $a_6\gamma^6q(t)^6 + a_5|\gamma^5q(t)^5| + a_4\gamma^4q(t)^4 + a_3|\gamma^3q(t)^3| + a_2\gamma^2q(t)^2 + a_1|\gamma q(t)| + R_0$ ifadesi yer almaktadır. Görüldüğü üzere sistemi modelleyebilmek için $q(t)$ yükünün kuvvetlerine ihtiyaç vardır. Divide1, divide2, divide3, divide4 ve divide5 blokları vasıtasıyla yükün kuvvetleri alınmaktadır.

$a_6\gamma^6$, $a_5\gamma^5$, $a_4\gamma^4$, $a_3\gamma^3$, $a_2\gamma^2$, $a_1\gamma$ ifadeleri Gain1-Gain12 kazanç blokları kullanılarak elde edilmektedir. Elde edilen bu ifadeler yükün kuvvetleri ile çarpılmaktadır. Add bloğu kullanılarak tüm ifadeler ve R_0 sabiti toplanmaktadır. Böylece $a_6\gamma^6q(t)^6 + a_5|\gamma^5q(t)^5| + a_4\gamma^4q(t)^4 + a_3|\gamma^3q(t)^3| + a_2\gamma^2q(t)^2 + a_1|\gamma q(t)| + R_0$ elde edilir.

$a_6\gamma^6q(t)^6 + a_5|\gamma^5q(t)^5| + a_4\gamma^4q(t)^4 + a_3|\gamma^3q(t)^3| + a_2\gamma^2q(t)^2 + a_1|\gamma q(t)| + R_0 = \beta$ değişken değiştirmesi yapılırsa Add bloğu çıkışı β olur ve 3.49 denklemi;

$$v(t) = \left(\frac{k_1 + \beta[R_s(k_2 + k_3 + 1)]}{R_s k_4 + \beta[k_5 - k_2 - k_3 - k_6]} \right) i(t) \text{ biçiminde ifade edilir.}$$

Gain13 ve Gain14 bloklarının kazançları $R_s(k_2 + k_3 + 1)$ ve $[k_5 - k_2 - k_3 - k_6]$ 'dır. β değeri bu bloklar ile çarpılarak $\beta[R_s(k_2 + k_3 + 1)]$ ve $\beta[k_5 - k_2 - k_3 - k_6]$ ifadeleri elde edilir. k_1 değeri Add1 bloğu kullanılarak $\beta[R_s(k_2 + k_3 + 1)]$ değerine, benzer biçimde $R_s k_4$ değeri Add2 bloğu kullanılarak $\beta[k_5 - k_2 - k_3 - k_6]$ değerine eklenerek $k_1 + \beta[R_s(k_2 + k_3 + 1)]$ ve $R_s k_4 + \beta[k_5 - k_2 - k_3 - k_6]$ değerleri elde edilmektedir.

$$\text{Memristör memristans değeri } M(q) = \frac{v(t)}{i(t)} = \left(\frac{k_1 + \beta[R_s(k_2 + k_3 + 1)]}{R_s k_4 + \beta[k_5 - k_2 - k_3 - k_6]} \right) \text{ olarak}$$

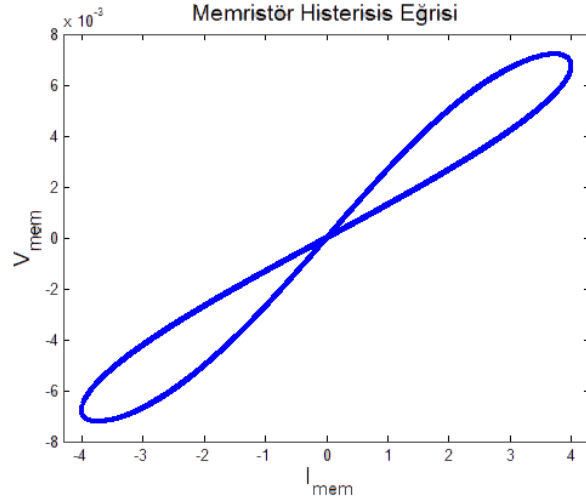
hesaplanmaktadır. Divide6 bloğu kullanılarak bölme işlemi gerçekleştirilerek memristans bulunmuş olur. Memristans değeri To Workspace4 bloğu ile kaydedilir ve girişe geri besleme olarak eklenmektedir. Böylece taklitçi devre de modellenmiş olur.

Bu Simulink modeli farklı frekans ve genlik değerleri için simule edilmiş ve elde edilen veriler kullanılarak memristans-zaman, yük-zaman, akım-gerilim karakteristiği ile memristör akım ve geriliminin zaman göre değişim eğrileri çizilmiştir. Emulatrörün Simulink modeli simülasyonu (benzetimi) yapıldığında memristör benzeri davranışlar sergilediği görülmüştür.

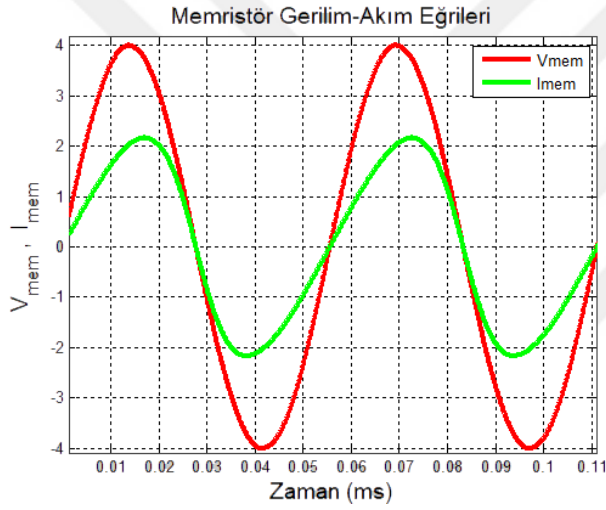
Şekil 3.3.2'de 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretli memristör emulatrörünün simulink modeli akım- gerilim karakteristiği görülmektedir. Bu eğri tipik bir memristör emulatröründe olması beklendiği gibi çimdiklenmiş sıfır geçişli çift döngüsel özelliği bulunan histerisis eğrisidir.

Şekil 3.3.3'te memristör emulatrörünün Simulink modeli kullanılarak, 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işareti ile simule edildiği durumdaki memristör akım ve gerilimin zamana göre değişimi görülmektedir. Alınan sonuçlar tıpkı sinüsoidal işaretle beslenen bir memristörün akım ve geriliminin aynı anda sıfırdan geçmesi gibi simule edilen gerilim ve frekans değerinde sıfırdan geçmektedir.

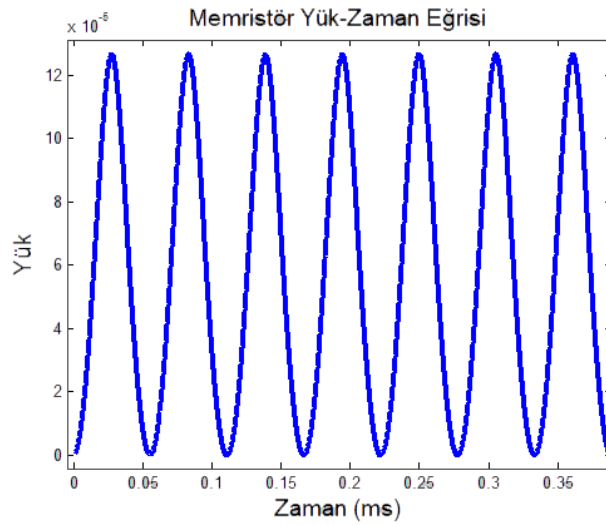
18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işareti uygulanan memristörün yük-zaman eğrisi Şekil 3.3.4'teki gibidir. Simulink modeli için memristansın zamana göre değişimi Şekil 3.3.5'te verilmiştir. Memristör emulatrörünün akım ve geriliminin değişimine bağlı olarak memristans değeri 350Ω ile 770Ω arasında değişimi görülmektedir.



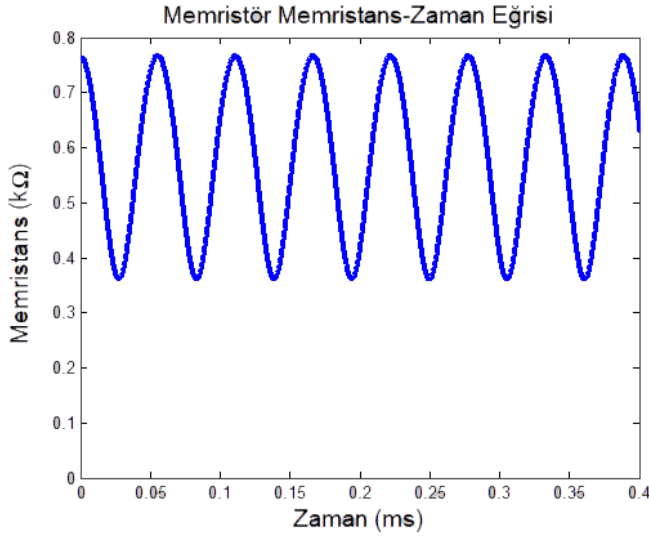
Şekil 3.3.2: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki akım - gerilim karakteristiği.



Şekil 3.3.3: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



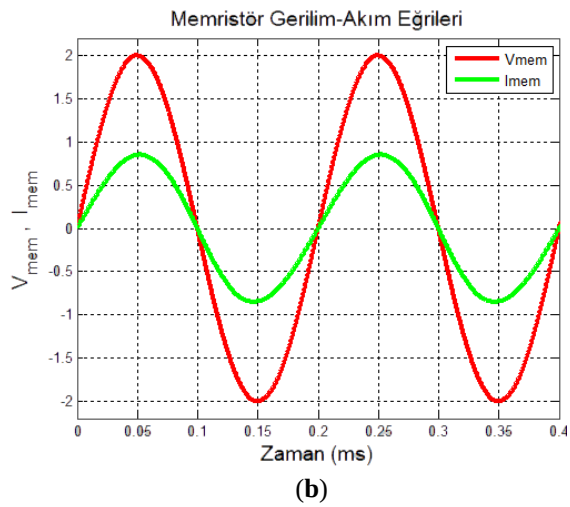
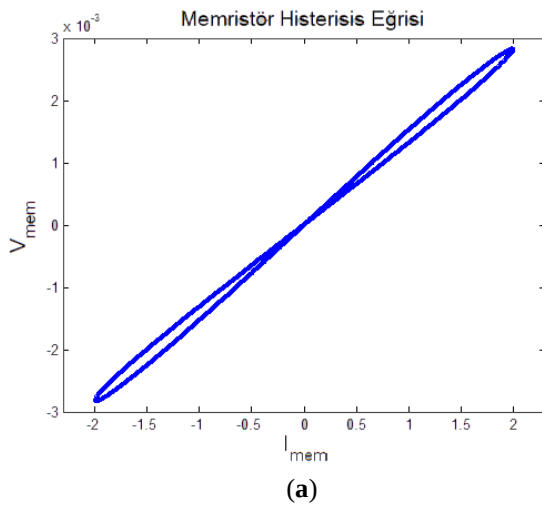
Şekil 3.3.4: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki yük-zaman eğrisi.



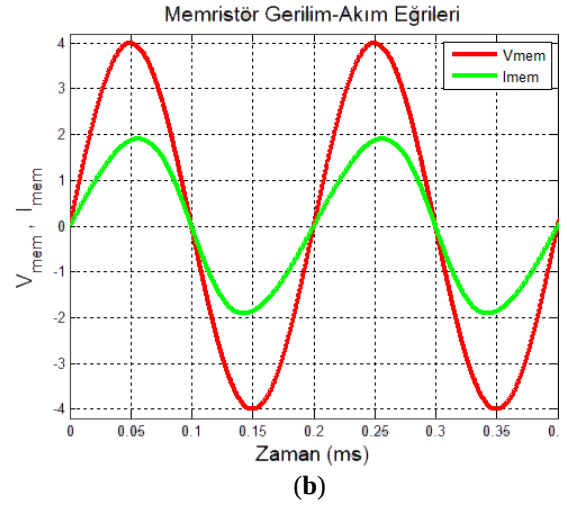
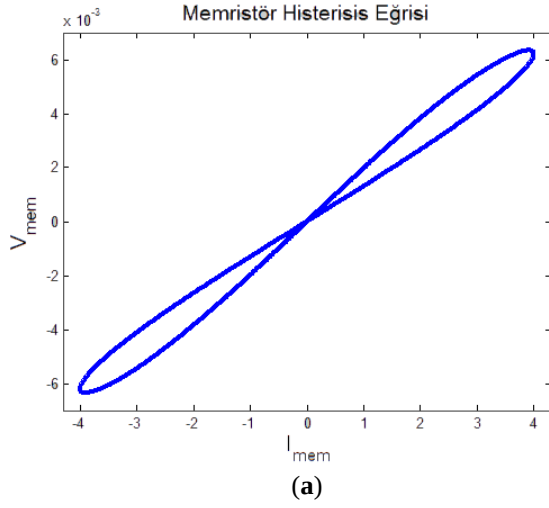
Şekil 3.3.5: Simulink Modeli 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumdaki memristans-zaman Eğrisi.

Tasarlanan memristör taklitçi devresinin Simulink modelinin beş farklı frekans değerinde ve her bir frekans değeri için iki farklı gerilim seviyesinde simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

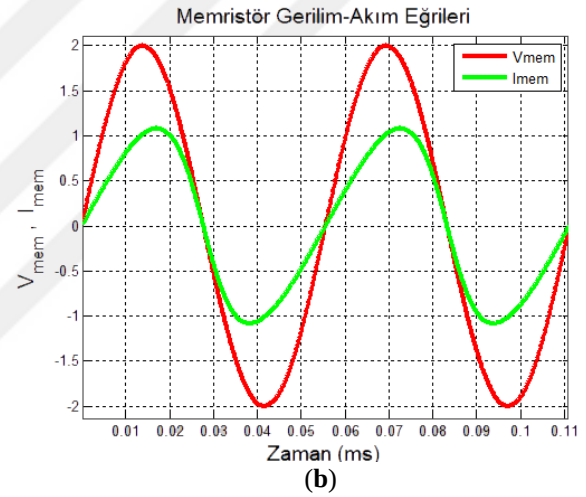
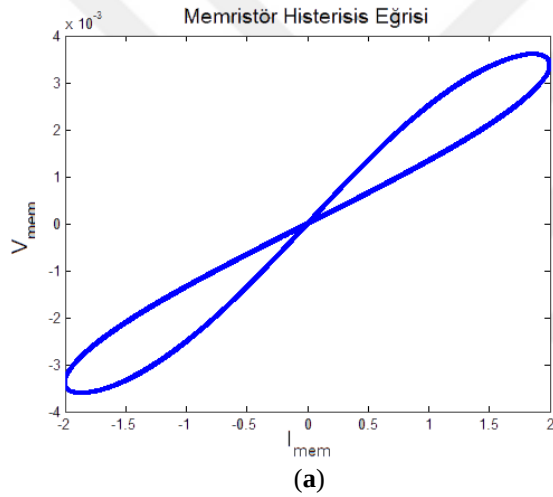
Şekil 3.3.6’da Memristör emulatörü Simulink® modeli 5Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V sinüsoidal giriş işareti ile simule edilen davranışı görülmektedir. Memristör emulatörü Simulink® modelinin 5Hz’deki tepeden tepeye 4V sinüsoidal giriş işareti ile simule edilen davranışı Şekil 3.3.7’de görülmektedir. Gerçek bir memristörün akım ve geriliminin aynı anda sıfırdan geçmesi gibi, bu frekanstaki histeresis eğrisinde de akım ve gerilim aynı anda sıfırdan geçmektedir. Simulink modeli bu frekans değerinde memristörü başarıyla taklit etmektedir.



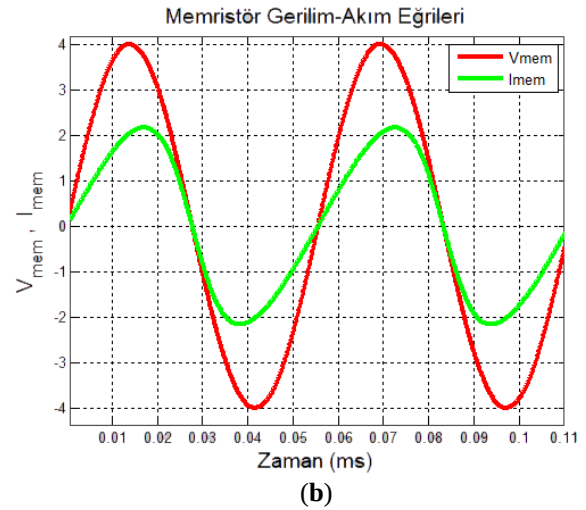
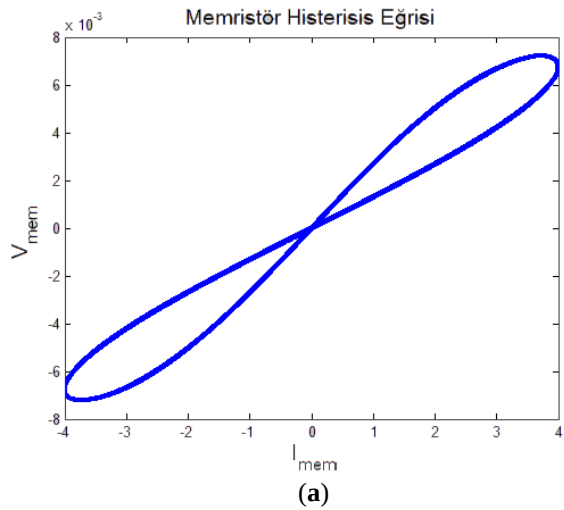
Şekil 3.3.6: Simulink modelinin 5Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda **(a)** akım - gerilim karakteristiği, **(b)** memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



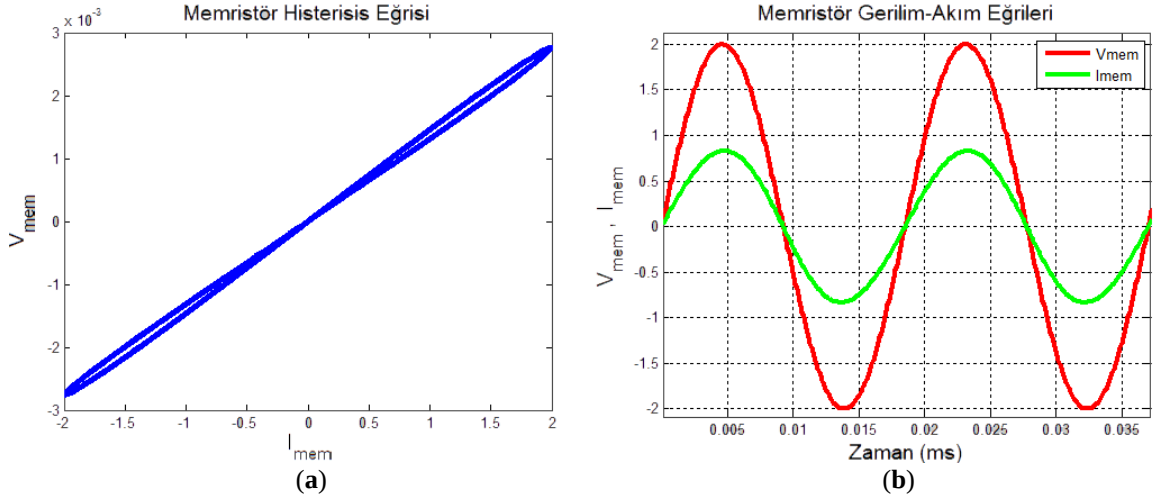
Şekil 3.3.7: Simulink modelinin 5Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simüle edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



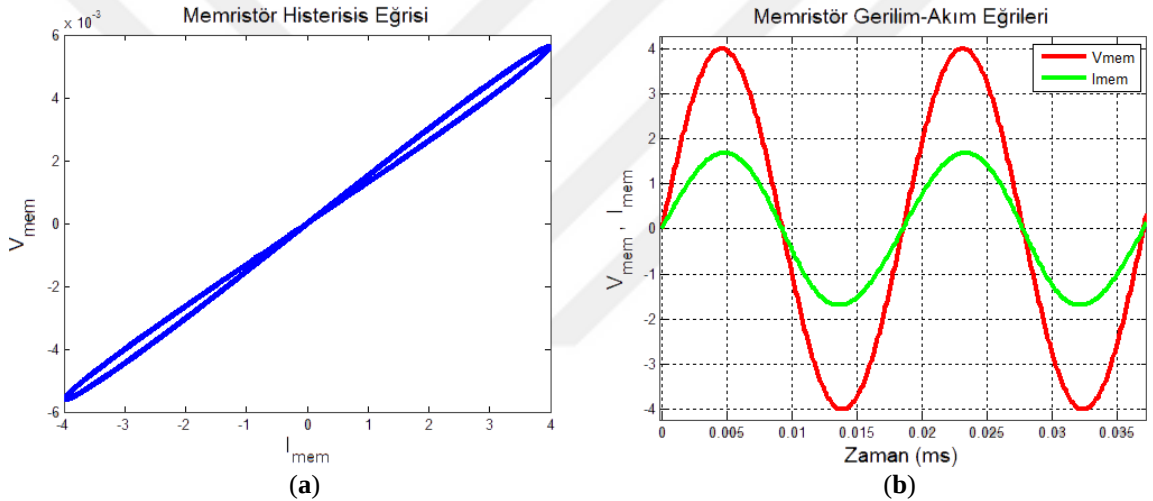
Şekil 3.3.8: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simüle edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



Şekil 3.3.9: Simulink modelinin 18Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simüle edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



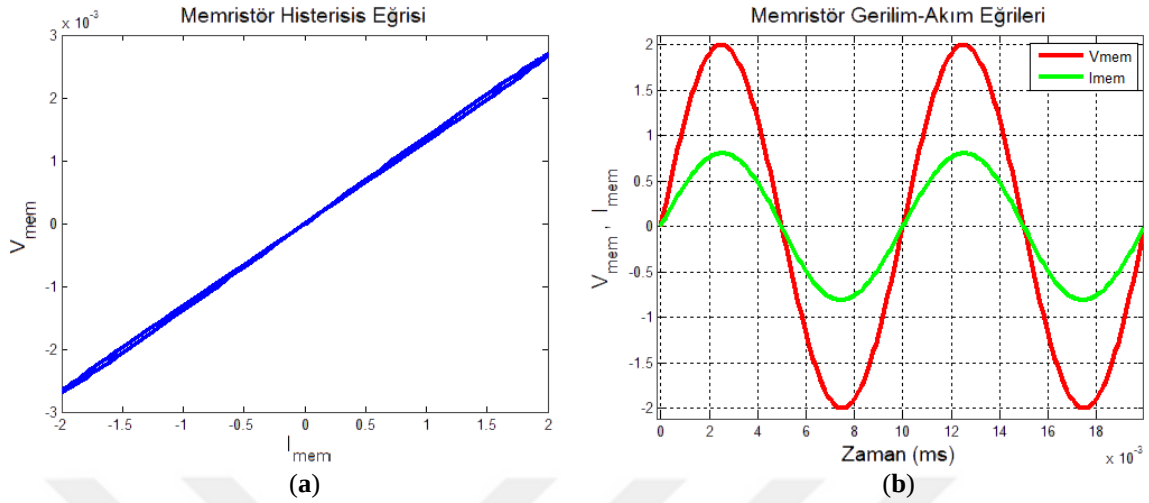
Şekil 3.3.10: Simulink modelinin 54Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



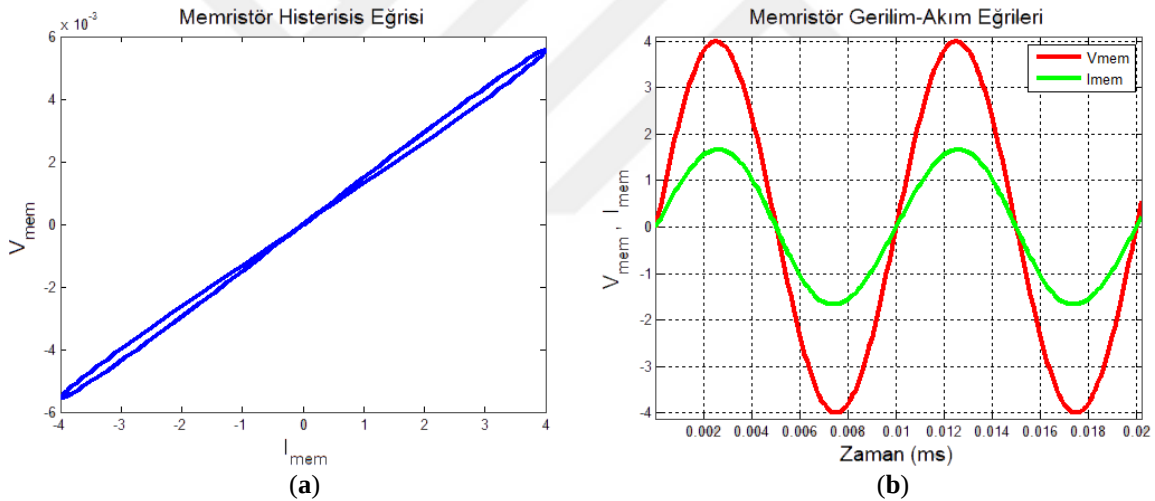
Şekil 3.3.11: Simulink modelinin 54Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.

18Hz frekans ve 2V gerilim ile simule edilen modelin davranışı Şekil 3.2.8’de verilmiştir. Eğriler incelendiğinde memristör taklitçisinin memristörmüş gibi davrandığı görülmektedir. 18Hz frekansta 4V gerilim altındaki emulätörün davranışı Şekil 3.2.9’da görülmektedir. Bu gerilim seviyesinde de açık bir şekilde görüldüğü gibi simetrik çimdiklenmiş sıfır geçişi sağlanan histerisis eğrileri ve akım-gerilim şekilleri memristif sistemlerde rastlanabilen dalga şekilleridir. 54Hz frekans ve 2V sinüsoidal giriş gerilimiyle simule edilen Simulink® modeli kullanılarak elde edilen histerisis ve akım - gerilim eğrileri Şekil 3.2.10’da verilmiştir. Histerisis eğrisinin simetrik çimdiklenmiş sıfır geçiş özellik bulunmaktadır. Memristör emulätörünün akım ve gerilim eğrileri de bir memristörün akım ve gerilimi şekillerine benzerdir. Şekil 3.3.11’de Memristör emulätörü Simulink® modeli 54Hz frekanslı

ve tepeden tepeye 4V sinüsoidal giriş işareti ile simule edilen durumu görülmektedir. Akım-gerilim karakteristiği eğrisinin simetrik çimdiklenmiş sıfır geçiş özelliği bulunmaktadır.



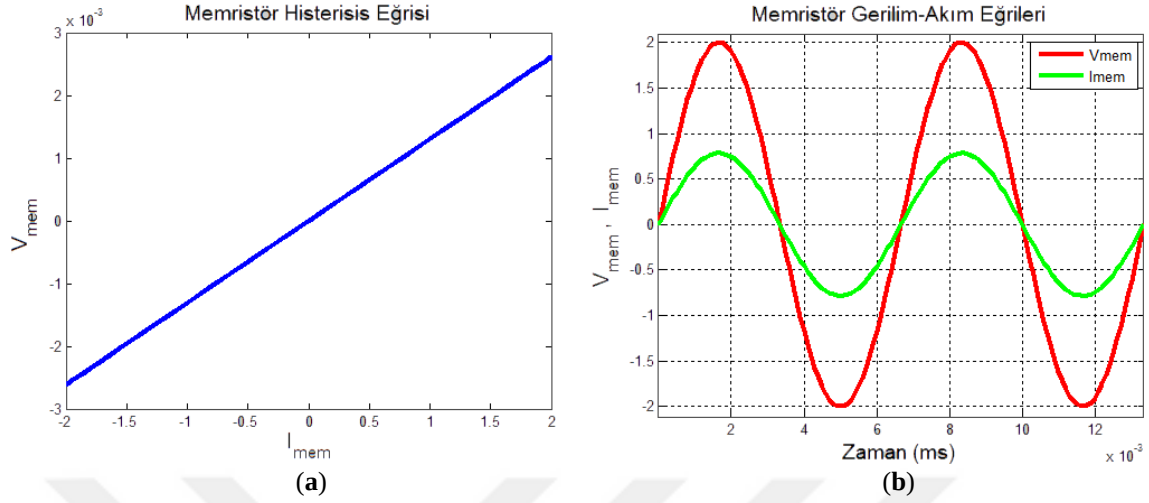
Şekil 3.3.12: Simulink modelinin 100Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



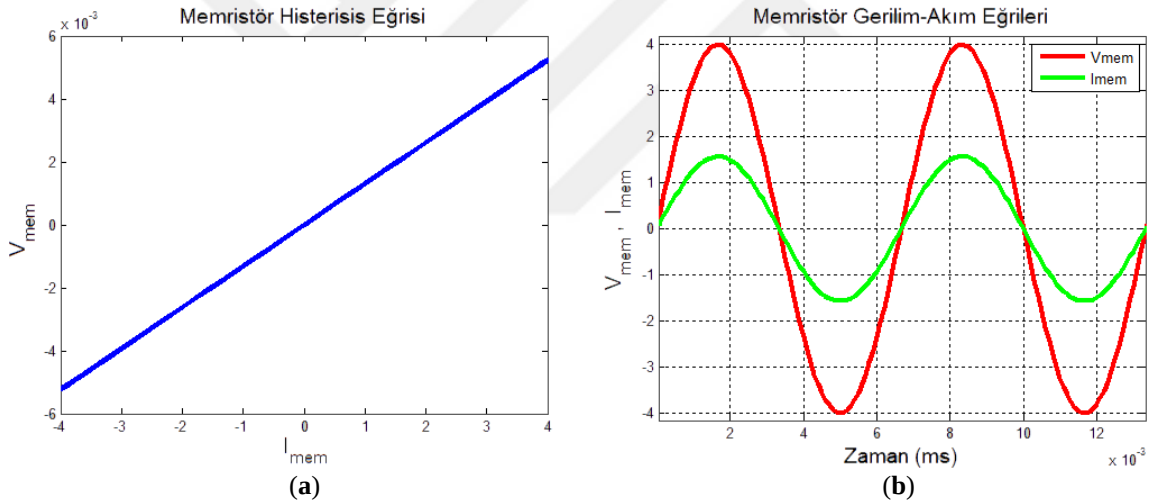
Şekil 3.3.13: Simulink modelinin 100Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.

Şekil 3.2.12’de Simulink® modelinin 100Hz frekans ve 2V gerilim ile benzetimi sonucu elde edilen eğriler görülmektedir. Bu gerilimde histerisis eğri simetri ve sıfır geçiş özelliği barındırmaktadır. Akım ve gerilim eğrileri memristif özellikler taşımaktadır. Bu da taklitçinin memristörü taklit edebildiğini göstermektedir. 100Hz frekans ve 4V gerilim altındaki durumu Şekil 3.2.13’teki gibidir. Bu gerilim seviyesinde, emulatr Simulink® modeli memristif sistem özellikleri göstererek memristörü başarıyla taklit edebildiğini göstermiştir. Chua ve Kang frekans arttıkça memristörün histerisis eğrisinin giderek daralacağını ve direnç benzeri davranış

sergileyeceğini teorik olarak tahmin etmişlerdir (Chua & Kang, 1976). Onların bahsettiği bu daralmayı 100Hz’de görmek mümkündür.



Şekil 3.3.14: Simulink modelinin 150Hz frekanslı ve tepeden tepeye 2V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.



Şekil 3.3.15: Simulink modelinin 150Hz frekanslı ve tepeden tepeye 4V genlikli sinüsoidal giriş işaretiyle simule edildiği durumda (a) akım - gerilim karakteristiği, (b) memristör akım ve geriliminin zamana göre değişimi.

Taklitçinin Simulink® modelinin 150Hz frekans ve 2V gerilim ile simule edildiği durumdaki eğriler Şekil 3.2.14’te verilmiştir. 150Hz frekansta 4V gerilim ile simule edilen Simulink® modelinin davranışı Şekil 3.2.15’te verilmiştir. Simulink® modelinin 150Hz frekansta uygulanan farklı gerilim seviyelerinde de elde edilen akım ve gerilim dalga şekillerinde görüldüğü üzere memristör akım ve gerilimleri sinüsoidaldirler. Şekillerdeki histerisis eğrileri de lineer bir direnç gibi doğrusal formdadır.

Bu Simulink® modeli kullanılarak test edilen tüm frekanslarda gerçek bir memristörün özelliklerine benzer, kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir. Giriş bölümünde açıklanan

memristörlerin ya da memristif sistemlerin sahip olması gereken üç parmak izi hatırlanırsa, yapılan Simulink® modeli Adhikari ve arkadaşlarının bahsettiği, bir memristörün ya da memristif sistemin sahip olması gereken üç temel özelliği de taşımaktadır (Adhikari ve ark., 2013). Fiziksel olarak uygulanmamış olsa da tasarlanan taklitçi devre için geliştirilen bu Simulink modeli, memristif bir sistemmiş gibi yüke bağımlılık ve histerisis gibi memristör davranışlarını göstermektedir. Buradan hareketle tasarlanan memristör taklit devresi fiziki şartlarda uygulandığında simülasyonlara benzer sonuçlar alınacağı düşünülmektedir.



4. DENEYSEL SONUÇLAR

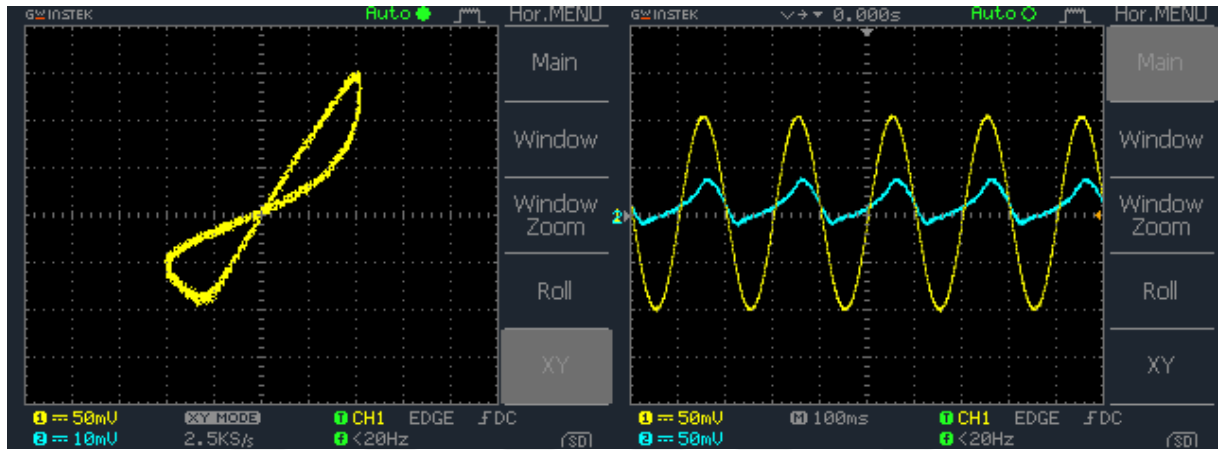
LED ve LDR kullanılarak tasarlanan ışık saçan memristörleri taklit edebilen önceki bölümde tanıtılan memristör taklitçi devresi kurulmuştur. Elektronik devre laboratuvarında bulunan DC güç kaynağı simetrik çıkış verebilecek şekilde ayarlanmış, opampların pozitif beslemeleri +15V, negatif beslemeleri -15V ile yapılarak integral alıcı U2 opampının pozitif giriş ucu bu eşlenik DC kaynak ile topraklanmıştır. Kurulan taklitçi devreye sinyal jeneratörü kullanılarak sinüsoidal gerilim uygulanmıştır. Yapılan emulatör 5Hz, 8Hz, 12Hz, 18Hz, 36Hz, 54Hz, 100Hz ve 150Hz frekanslarda, her bir frekans değeri için tepeden tepeye 0.2V, 0.4V, 0.7V, 1V, 1.2V, 2V ve 4V olan gerilim uygulanarak test edilmiştir. Memristör emulatörünün yüksek frekans davranışını incelemek için 1 kHz, 3 kHz, 5 kHz ve 20 kHz frekansta tepeden tepeye değeri 1V, 2V ve 4V sinüsoidal gerilim uygulanarak deneyler yapılmıştır. Sonuçlar GWINSTEK GDS-1062 marka sayısal osiloskop kullanılarak kaydedilmiştir. Deneyde elde edilen durumlara ilişkin akım, gerilim ve histerisis eğrileri Şekil 4.1 - Şekil 4.62 arasındaki şekillerde verilmiştir.

5Hz frekansta 0.2V gerilim ile beslenen memristör taklitçisinin durumu Şekil 4.1’de görülmektedir. Histerisis eğrisi incelendiğinde bir miktar bozulma olduğu görülmektedir. Bunun sebebi 0.2V gerilimin düşük olmasıdır. Literatürde pek çok farklı tipte memristör emulatörü bulunmaktadır. Buna bağlı olarak birbirine benzer histerisis eğrileri ve akım -gerilim şekilleri elde edilmektedir. Akım ve gerilim eğrilerine bakıldığında bu düşük gerilim seviyesinde dahi memristör akım ve geriliminin literatürdeki memristörler ile benzerliği görülmektedir. 5Hz frekansta 0.4V gerilime memristör taklitçisinin cevabı Şekil 4.2’de görülmektedir. 0.4V gerilimde 0.2V’a nazaran daha iyi bir histerisis eğrisi elde edilmiştir. Gerilim ve akım şekilleri de olması beklenen biçimdedir. Memristör taklitçisinin 5Hz frekans ve 0.7V gerilim altındaki durumu Şekil 4.3’teki gibidir. Şekil 4.4’te emulatörün 5Hz 1V gerilim altındaki davranışı verilmiştir. Memristör taklitçi devresine 5Hz frekans 1.2V gerilim uygulandığı durum Şekil 4.5’te görülmektedir. Bu üç farklı gerilim seviyesinde grafikler incelendiğinde akım - gerilim eğrileri ve histerisis eğrisinin sıfır geçişini sağlaması memristörü taklit ettiğinin göstergesidir.

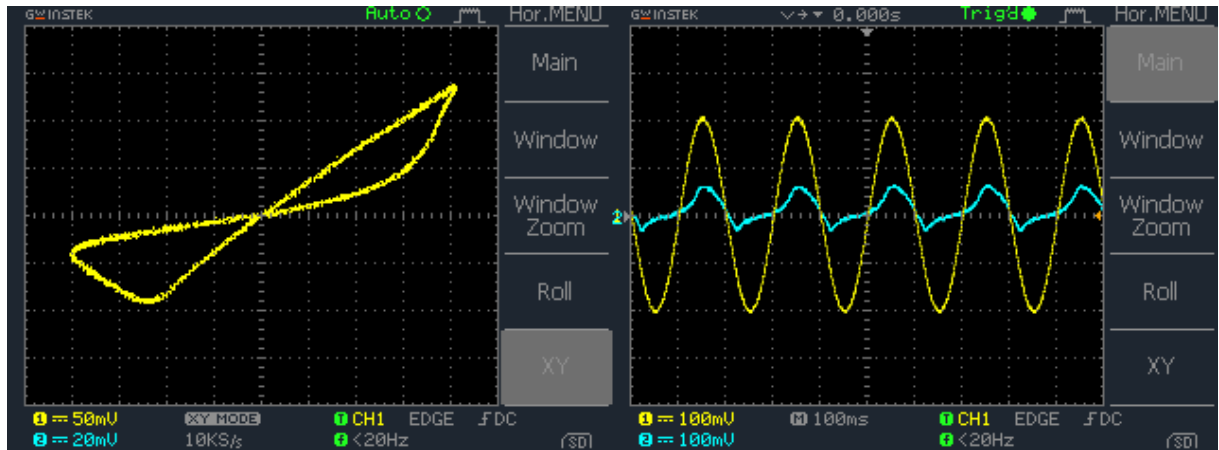
Memristör taklitçi devresinin 5Hz frekans 2V gerilim uygulandığı durumdaki davranışı Şekil 4.6’da görülmektedir. Şekil 4.7’de emulatörün 5Hz frekans ve 4V gerilim altındaki davranışı verilmiştir. İki farklı gerilim değerindeki akım ve gerilimleri göz önünde bulundurursak karakteristik olarak memristör akım-gerilim eğrileri elde edildiği görülmektedir. 2V ve 4V gerilim seviyelerindeki histerisis eğrilerinde diğer gerilimlerden farklı olarak sıfır

geçişinin yanı sıra fazladan bir halka dikkat çekmektedir. Chua ve Kang böyle bir durumun mümkün olabileceğini öngörmüşler ve bunu çalışmalarında dile getirmişlerdir (Chua ve Kang, 1976). Söz konusu bu durumdan bu çalışmanın giriş bölümünde bahsedilmiş ve muhtemel histerisis eğri Şekil 1.5’te verilmiştir. Dolayısıyla bu olması muhtemel bir durumdur.

Ölçülen tüm gerilim seviyelerinde memristör taklitçisi 5Hz frekansta sıfır geçiş histerisis davranışı sergileyerek memristörü taklit edebildiğini ispatlamıştır. Histerisis eğrileri teorik olarak beklenenin aksine simetrik değildir.



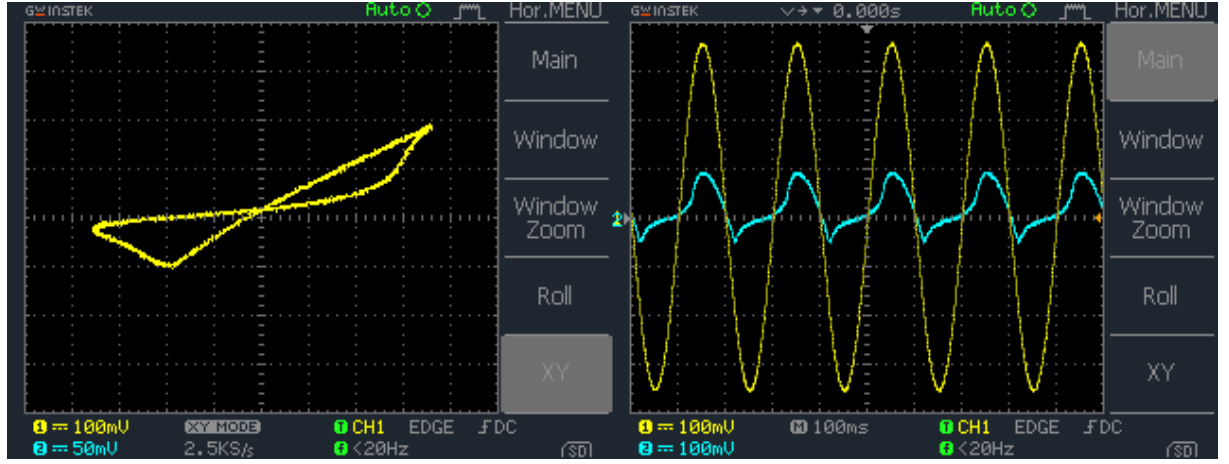
Şekil 4.1: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



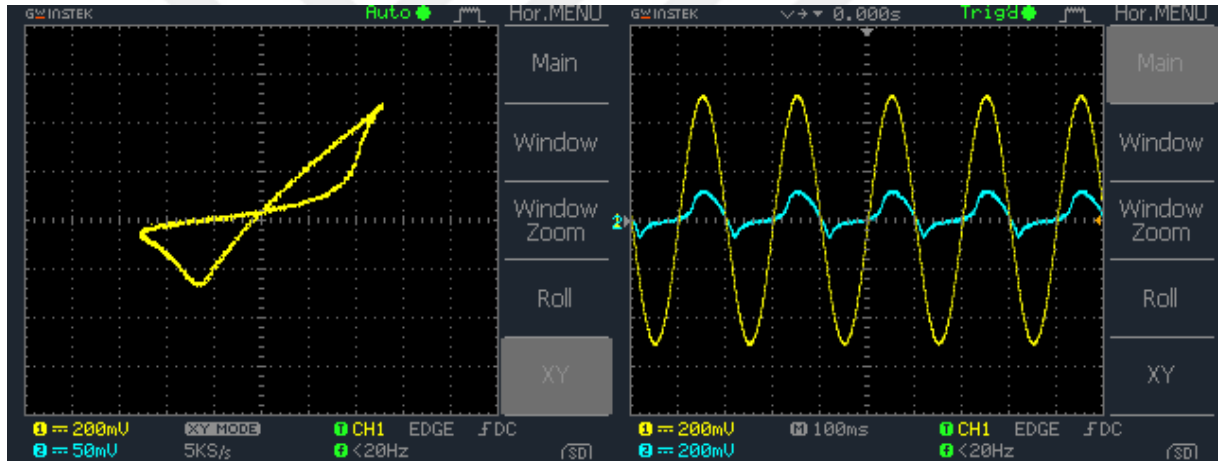
Şekil 4.2: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

Hewlett Packard (HP) Laboratuvarları araştırmacılarından Abdalla ve Pickett yayınladıkları çalışmalarında, Stanley Williams önderliğinde ürettikleri TiO_2 tabanlı memristörün denklemlerinden hareketle memristörün SPICE modelini oluşturmuşlardır (Abdalla ve Pickett, 2011). Yapılan deneylerde 5Hz frekansta, tepeden tepeye değerleri 0.4V,

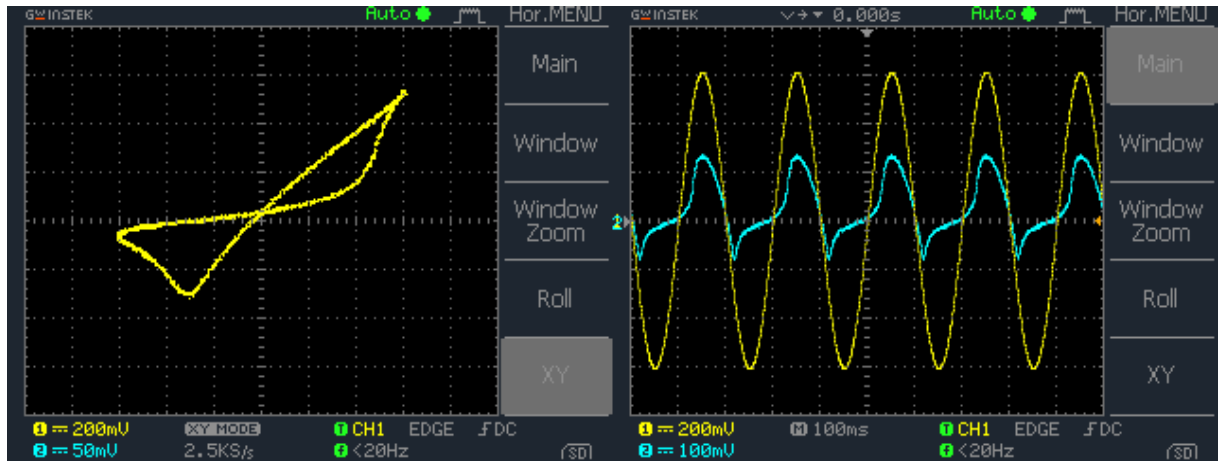
0.7V, 1V ve 1.2V olan gerilim seviyelerinde elde edilen sonuçların Abdalla ve Pickett'in histerisis eğrisi ile benzerliği son derece fazladır (Abdalla ve Pickett, 2011).



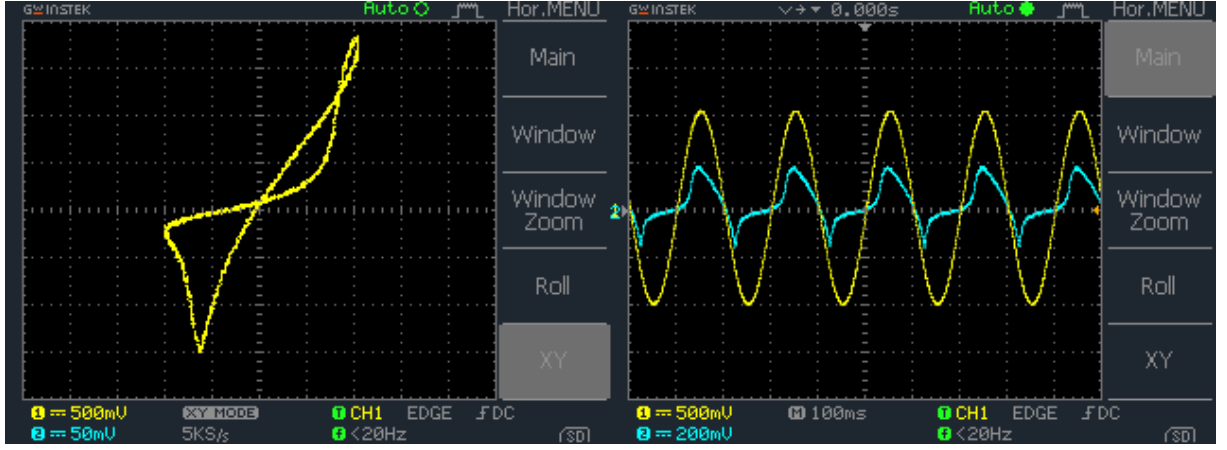
Şekil 4.3: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



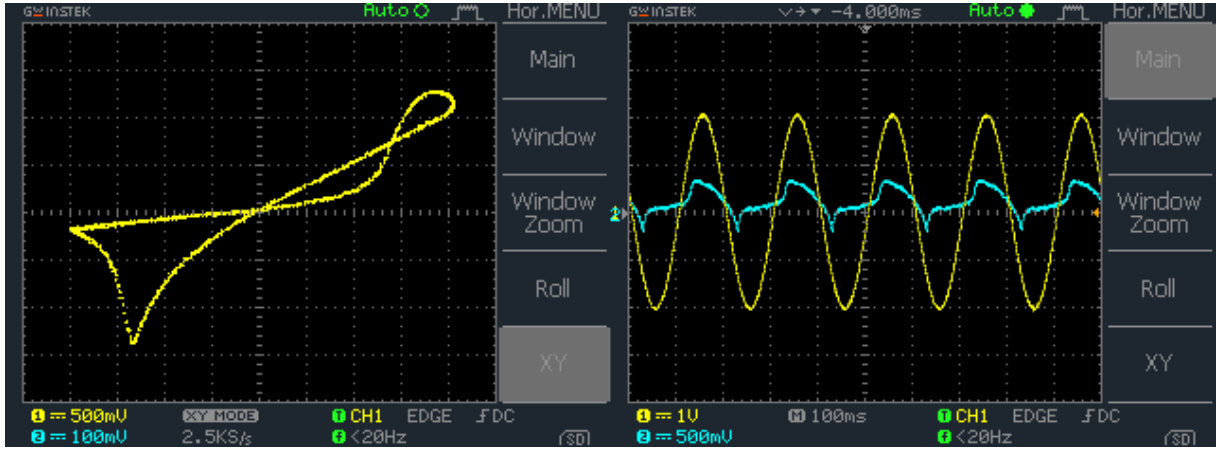
Şekil 4.4: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.5: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.6: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

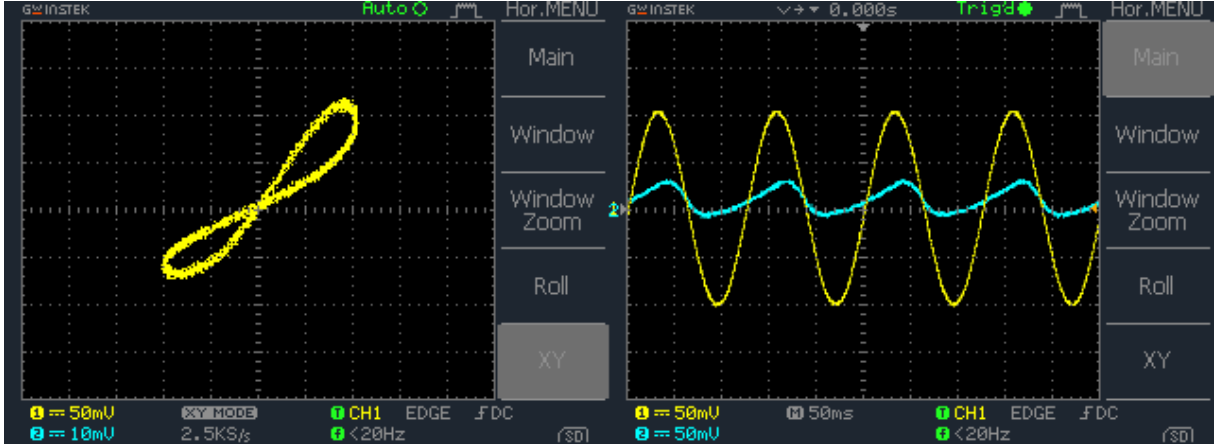


Şekil 4.7: Frekansı 5Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

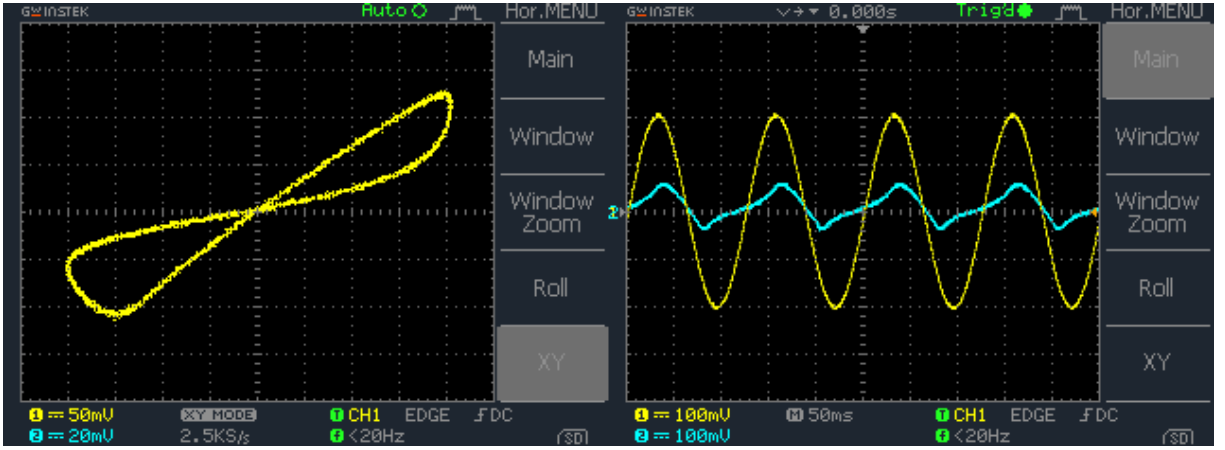
5Hz frekans değerindeki histerisis eğrileri çimdiklenmiş sıfır geçiş özelliğine sahiptir. Akım ve gerilim eğrileri de memristif sistemlerde görülen dalga şekilleri gibidir. Tasarlanan emulatrör 5Hz’de spesifik olarak oldukça iyi bir performans sergilemektedir.

8Hz’de 0.2V_{pp} gerilim uygulanan memristörün histerisis eğrisi ve akım-gerilim eğrileri Şekil 4.8’de verilmiştir. Görüldüğü üzere memristör akımı ve gerilimi beklenildiği gibidir. Histerisis eğrisi de Chua’nın öngördüğü histerisis eğrisi ile benzerdir (Chua L. O., 1971).

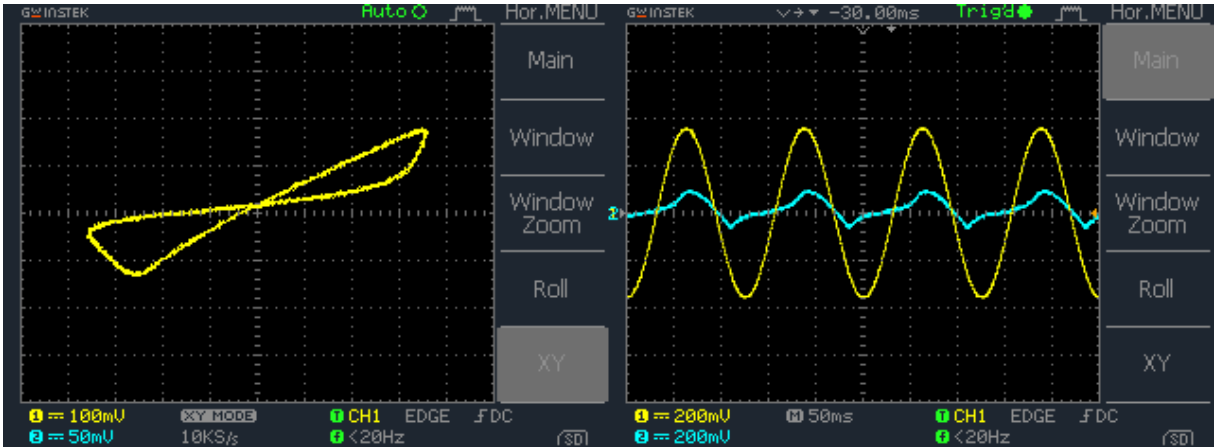
Şekil 4.9’da 8Hz frekans ve 0.4 V_{pp} gerilim seviyesinde çalışan memristörün histerisis ve akım-gerilim eğrileri yer almaktadır. Deneyde elde edilen gerek histerisis eğrisinden gerekse akım-gerilim eğrilerinden hareketle 8Hz frekanslı 0.4 V_{pp} sinüsoidal gerilim uygulandığında memristör taklitçisi memristör benzeri davranışlar sergilemektedir.



Şekil 4.8: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



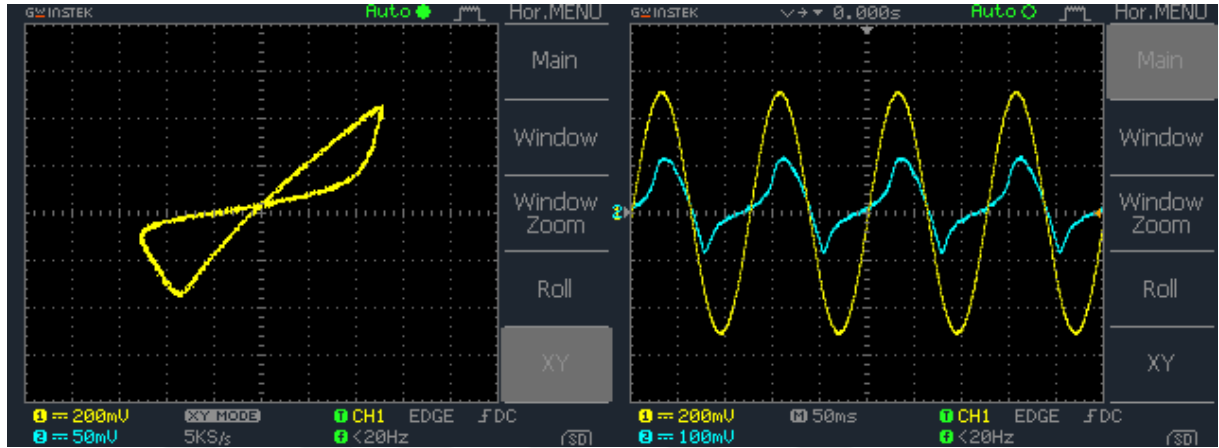
Şekil 4.9: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



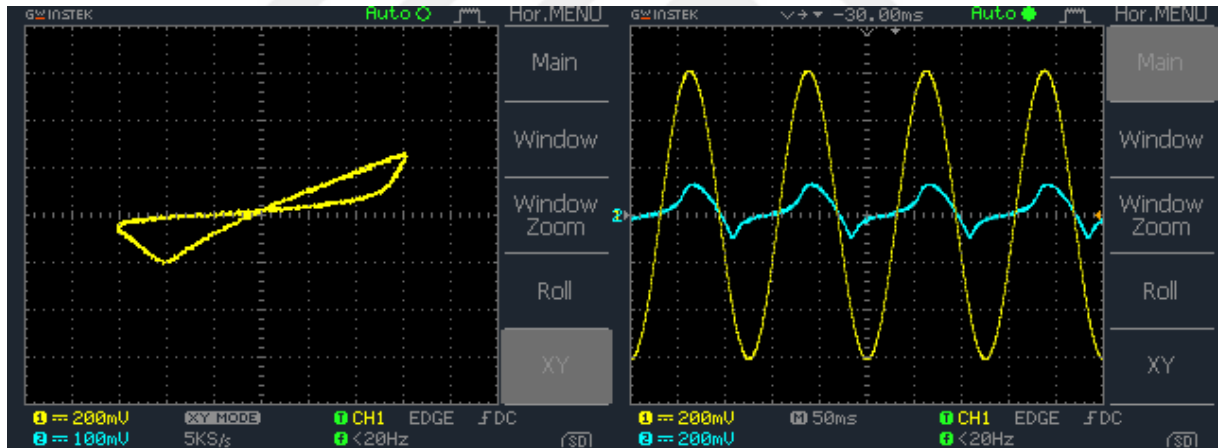
Şekil 4.10: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

Taklitçi devrenin 8Hz frekansta tepeden tepeye değerleri 0.7V, 1V, 1.2V, 2V olan gerilim seviyelerindeki davranışları sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te

verilmiştir. Dört gerilim seviyesindeki akım-gerilim eğrileri incelendiğinde memristörden beklenen akım ve gerilim şekillerinin elde edildiği görülmektedir. Keza histerisis eğrilerinden de yola çıkarak bu memristör emulatörünün literatürde verilen memristör dalga şekillerine sahip olduğu yani memristörü taklit edebildiği görülmektedir.

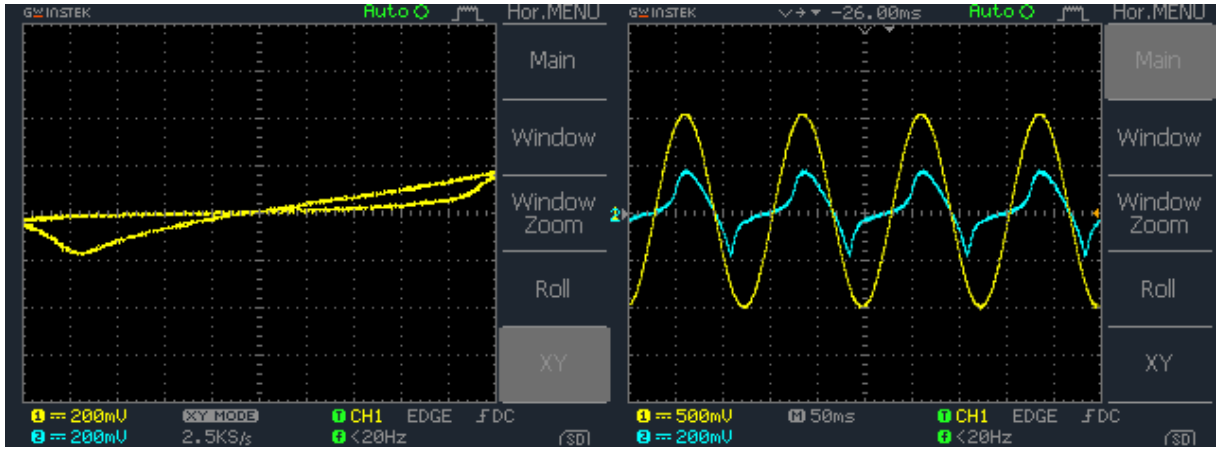


Şekil 4.11: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

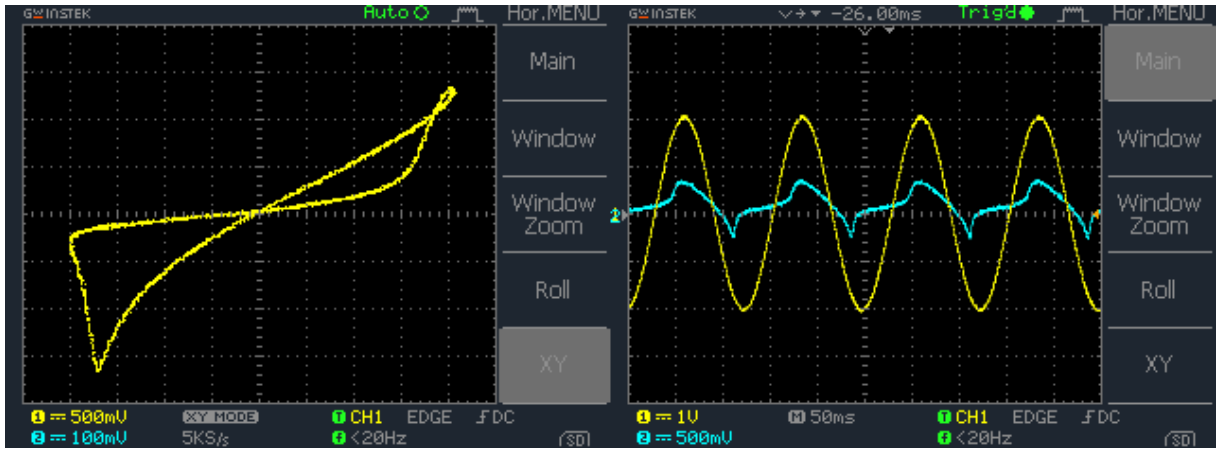


Şekil 4.12: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

Histerisis eğrilerinin beklenenin aksine simetrik olmadığı gözlemlenmiştir. Bu duruma literatürde deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalarda da oldukça yaygın olarak rastlanmaktadır (Abdalla ve Pickett, 2011)(Yang, ve ark., 2008). Memristörlerde esas olan öncül histerisis eğrisinin çimdik şeklinde sıfır noktasından geçmesi yani sıfır geçiş özelliğidir. Dolayısıyla deney sonuçlarını da göz önünde bulundurarak tasarlanan memristör taklitçi devresi bu özelliği sağlayarak memristörü taklit edebilmektedir.



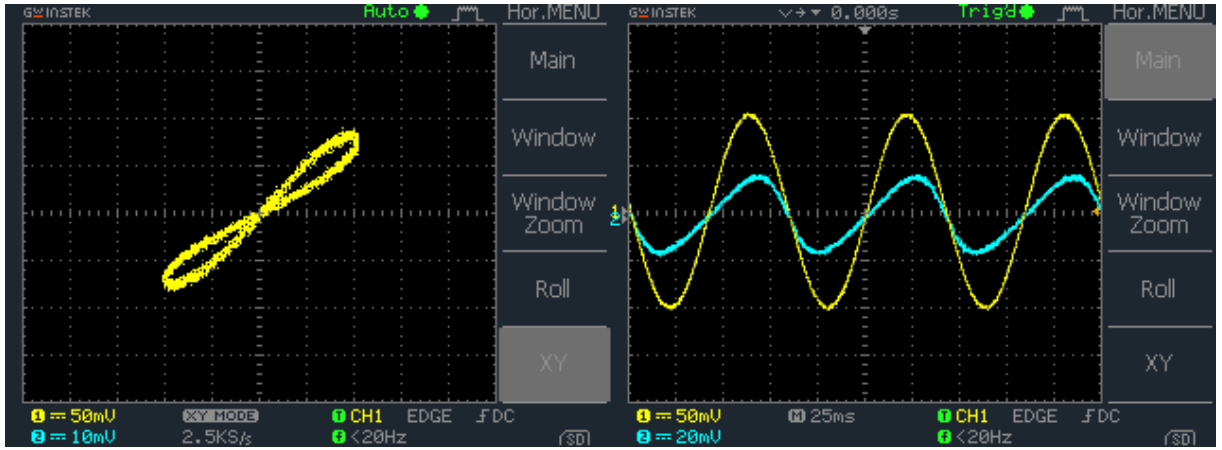
Şekil 4.13: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



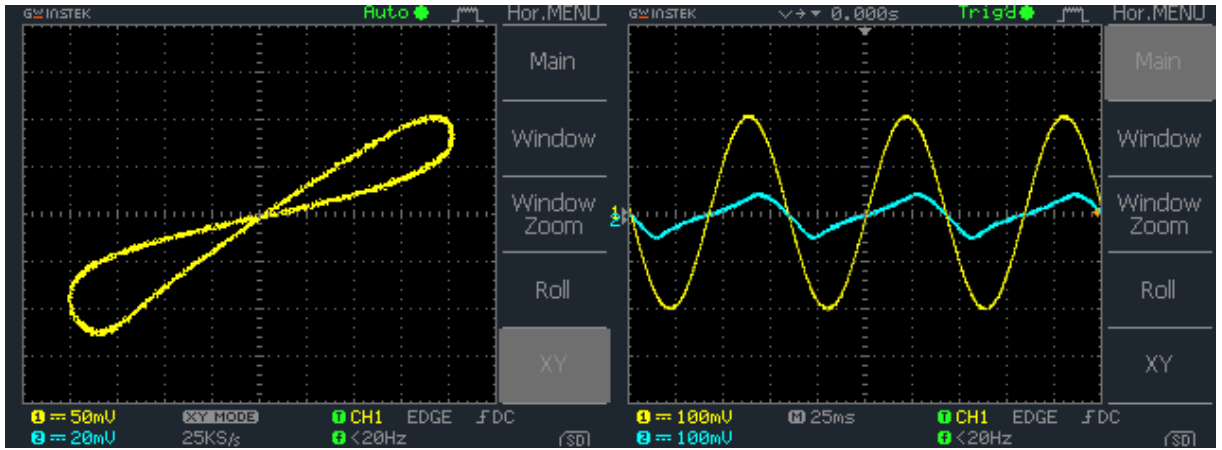
Şekil 4.14: Frekansı 8Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

8Hz'de $4V_{pp}$ sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis eğrisi ve akım-gerilim eğrileri Şekil 4.14'te verilmiştir. Görüldüğü üzere histerisis eğrisi son derece sofistike ve oldukça özel bir durum içermektedir. Abdalla ve Pickett'in çalışmalarındaki histerisis eğrisine benzerliği ile birlikte Chua ve Kang'ın olabileceğini ön gördüğü üç halkalı bir yapı yer almaktadır (Abdalla ve Pickett, 2011) (Chua ve Kang, 1976). Bu iki durumu da sağlayabiliyor oluşu ve akım-gerilim şekillerinden hareketle $4V_{pp}$ gerilimde memristör emulatörünün memristörü taklit edebildiği görülmektedir.

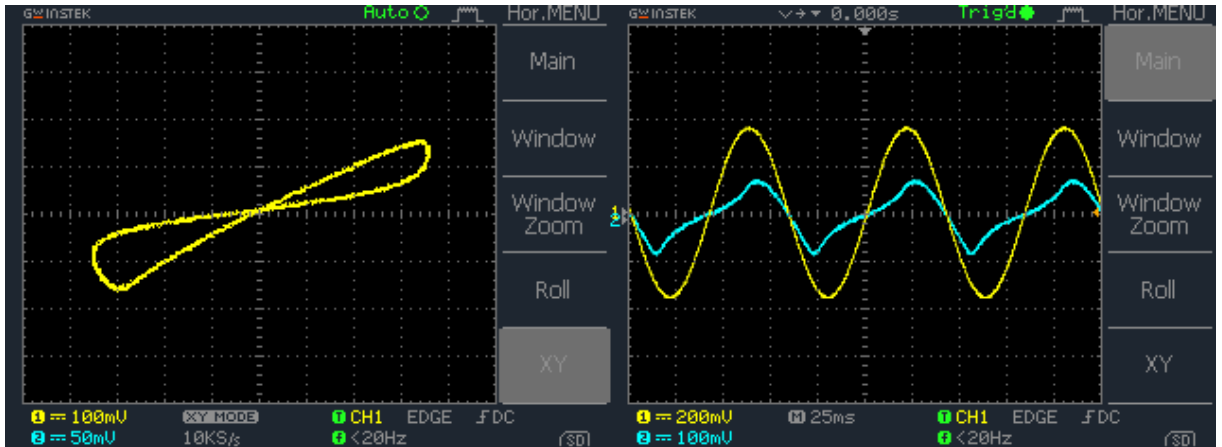
8Hz frekansta uygulanan tüm gerilimlerde test edilen memristör emulatörü başarılı bir performans sergilemiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde memristör emulatörlerinden beklenen çift döngüsel sıfır geçişi özelliğini sağlayarak bu frekansta memristörü taklit etmeyi başardığı görülmektedir.



Şekil 4.15: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.16: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

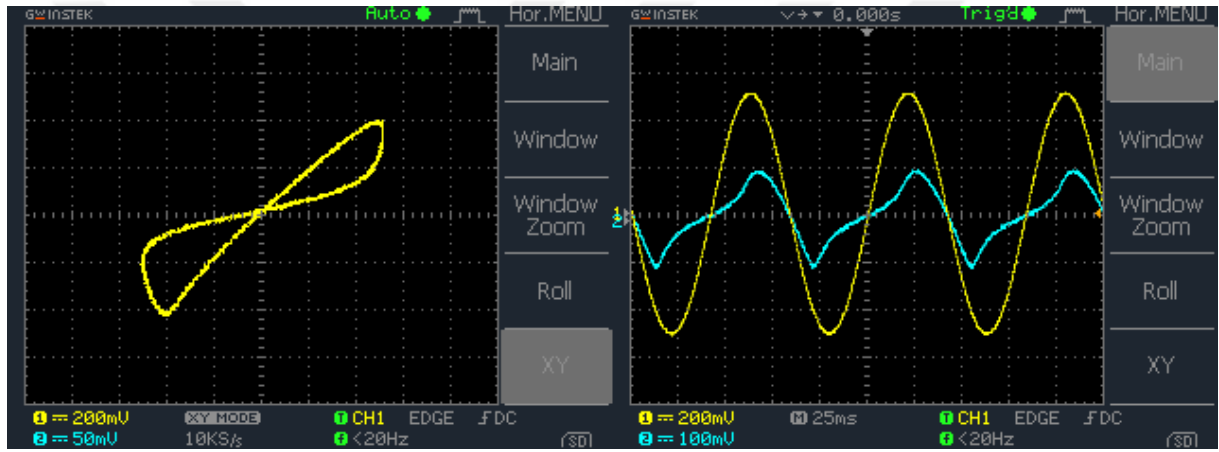


Şekil 4.17: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

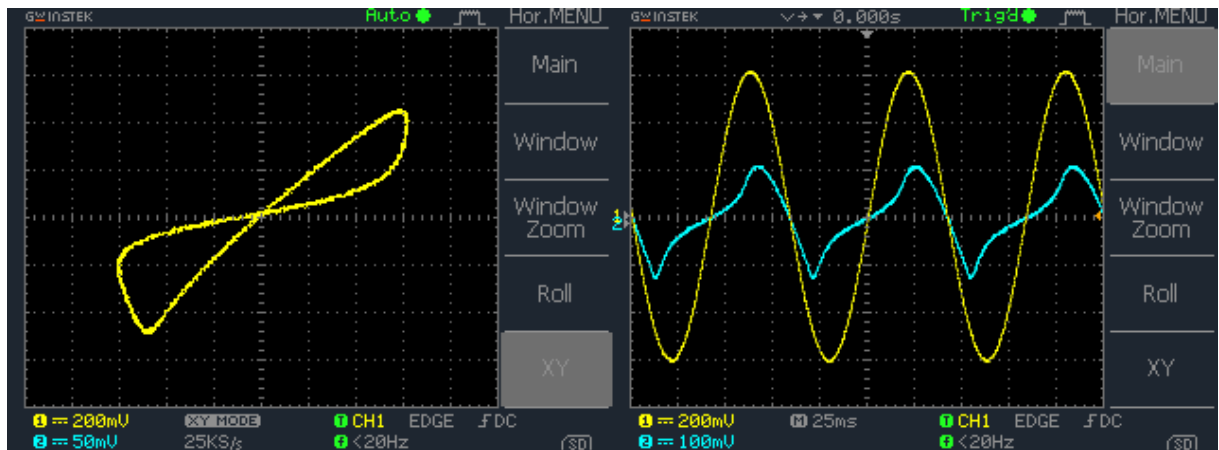
Memristör taklitçi devresinin 12Hz frekans 0.2V_{pp} gerilim cevabı Şekil 4.15'te verilmiştir. Dalga şekillerinde akım ve gerilim eğrilerinden memristif bir sistemin özelliklerini taşıdığı ve Simulink modelinin benzetimi ile elde edilen akım ve gerilim şekilleriyle benzer

oluşu görülmektedir. Gerilimin düşük olmasına bağlı olarak histerisis eğrisinin görülebilmesi için çözünürlüğün iyi ayarlanması gerekmektedir. Histerisis eğrisinin sıfır geçişli çimdiklenmiş çift döngüsel özelliğinin bulunması memristörü taklit edebildiğinin göstergesidir.

Emulatörün 12Hz frekans ve $0.4V_{pp}$ gerilim altındaki davranışı Şekil 4.16’da verilmiştir. Şekilde histerisis eğrisi, Chua’nın tahmin ettiği simetrik histerisis eğrisine benzemektedir (Chua, 1971). Akım ve gerilim şekillerinden de eğrilerin memristif bir sistemin davranışı olduğu anlaşılmaktadır. 12Hz frekansta $0.7V_{pp}$ gerilim uygulanan emulatörün davranışı Şekil 4.17’de verilmiştir. Histerisis eğrisi simetriktir ve çift döngüsel (sıfır geçiş, çimdik) özellik gösterir. Memristör emulatörünün akım ve gerilim eğrileri karakteristik bir memristörün akım ve gerilimi şekilleri gibidir.



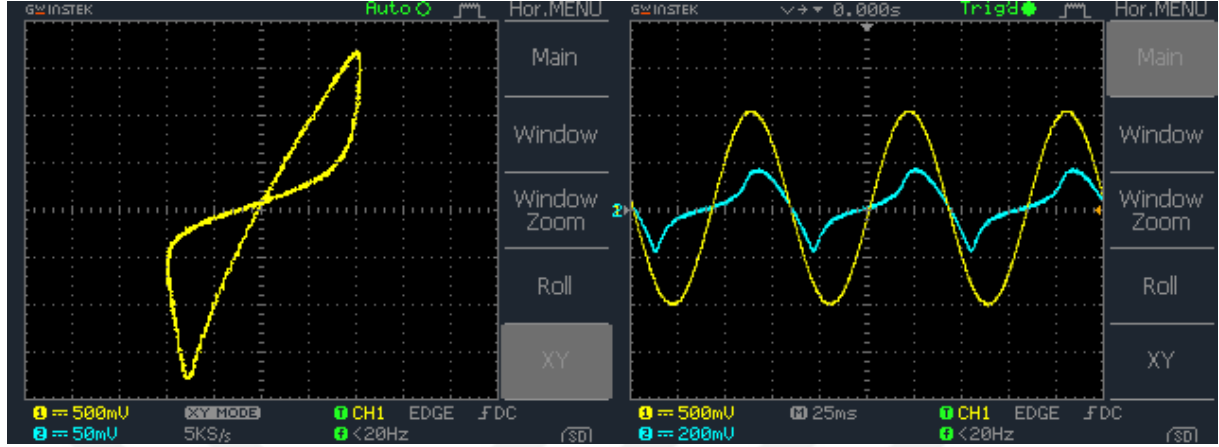
Şekil 4.18: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



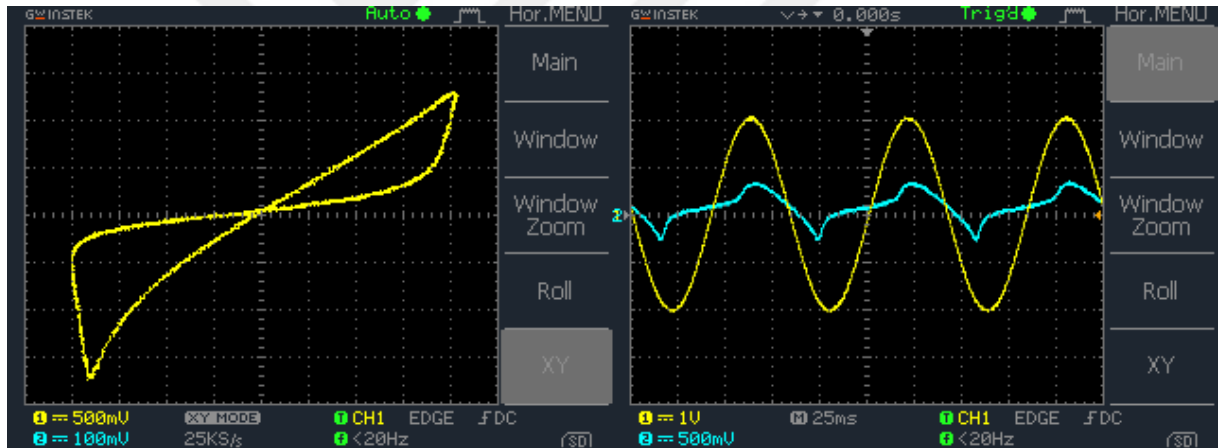
Şekil 4.19: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

Şekil 4.18’de 12Hz frekansta ve $1V_{pp}$ gerilimde çalışan memristör taklitçisinin histerisis eğrisi ve akım-gerilim şekilleri görülmektedir. Burada gerilimin artmasına bağlı olarak

simetrikliğin bozulmaya başladığı seçilmektedir. Histerisis eğrisi Abdalla ve Pickett ile Yang ile arkadaşlarının çalışmalarında elde ettikleri şekillere benzemeye başlamıştır (Abdalla ve Pickett, 2011) (Yang, ve ark., 2008).



Şekil 4.20: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

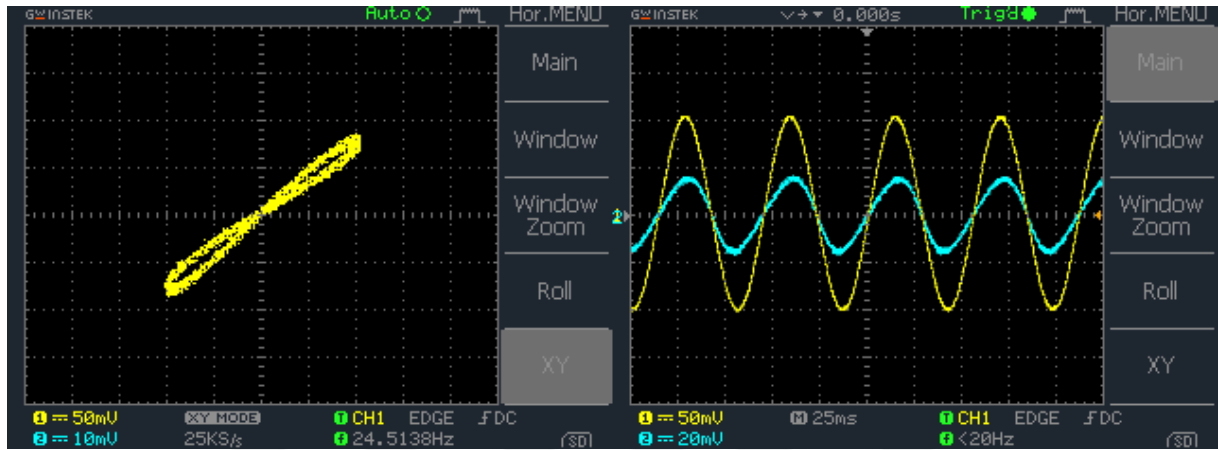


Şekil 4.21: Frekansı 12Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

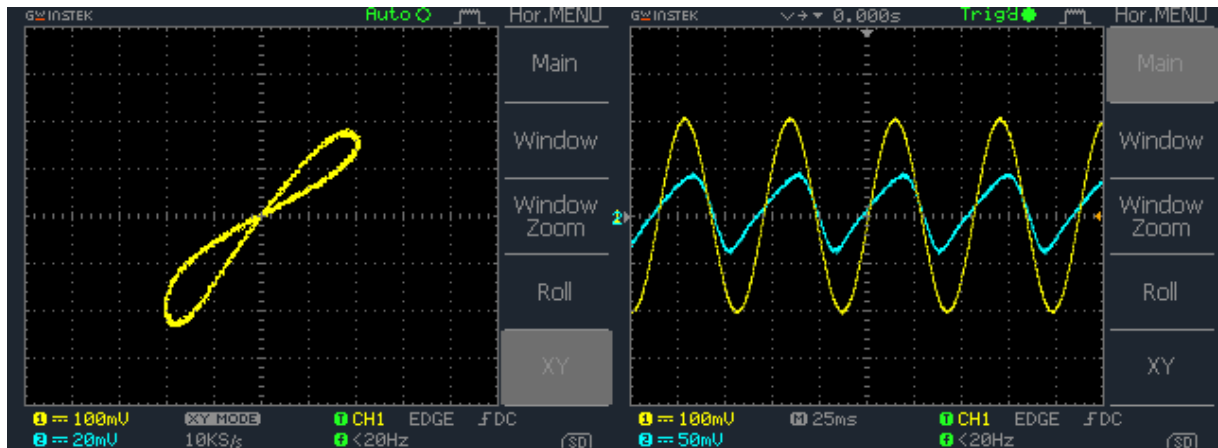
Taklitçinin 12Hz frekans ve 1.2V_{pp} gerilim uygulandığı durumdaki davranışı Şekil 4.19’da verilmiştir. Eğriler incelendiğinde memristör taklitçisinin memristörmüş gibi davrandığı görülmektedir. 12Hz frekansta 2V_{pp} gerilim uygulanan emulatörün davranışı Şekil 4.20’de görülmektedir. 12Hz’de 4V_{pp} gerilim uygulanan memristörün histerisis eğrisi ve akım-gerilim eğrileri Şekil 4.21’de verilmiştir. İki farklı gerilim seviyesinde de açık bir şekilde görüldüğü gibi asimetrik sıfır geçişi sağlanan histerisis eğrileri ve akım-gerilim şekilleri memristif sistemlerde rastlanabilen dalga şekilleridir. Ayrıca bu histerisis eğrileri dikkatle incelenirse giriş bölümünde de Şekil 1.7’de verilen Stanley Williams’ın HP laboratuvarlarında deneysel olarak elde ettiği histerisis eğrisine benzediği anlaşılmaktadır. Buradan anlaşılaçağı

üzere memristör taklitçi devre istenen biçimde davranışlar sergileyerek meristörü taklit etmektedir.

Memristör taklitçisinin farklı gerilimler altında 12 Hz’de elde edilen histerisis, akım ve gerilim eğrileri 5Hz ve 8Hz frekanslarda elde edilen eğrilere nazaran daha iyidir. Histerisis eğrileri incelendiğinde her ne kadar oval bir şekilde çimdik oluşturmuyor olsa da orijine göre büyük ölçüde simetrik oluşu dikkat çekmektedir. Bunun nedeni LEDlerin eşik gerilimi civarında çalışıyor oluşu olabilir.



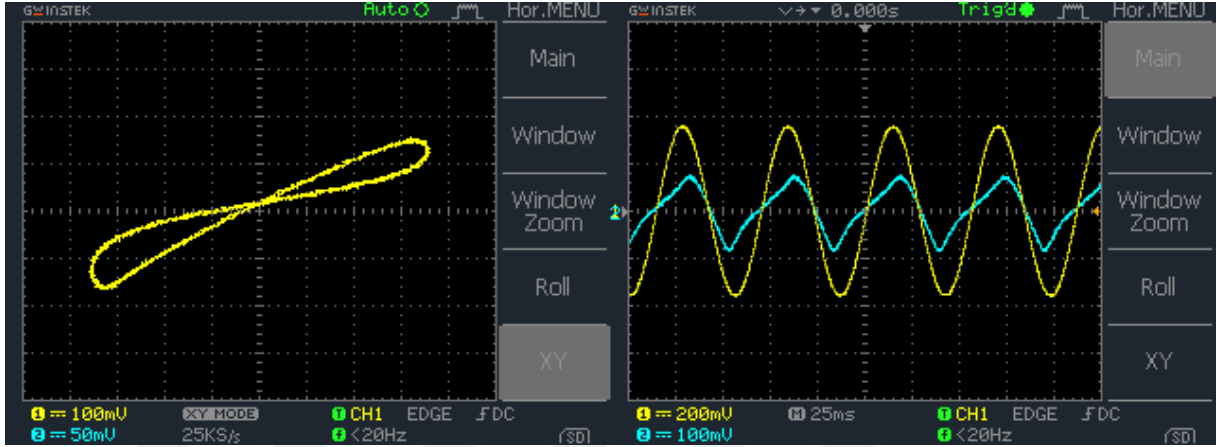
Şekil 4.22: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.23: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

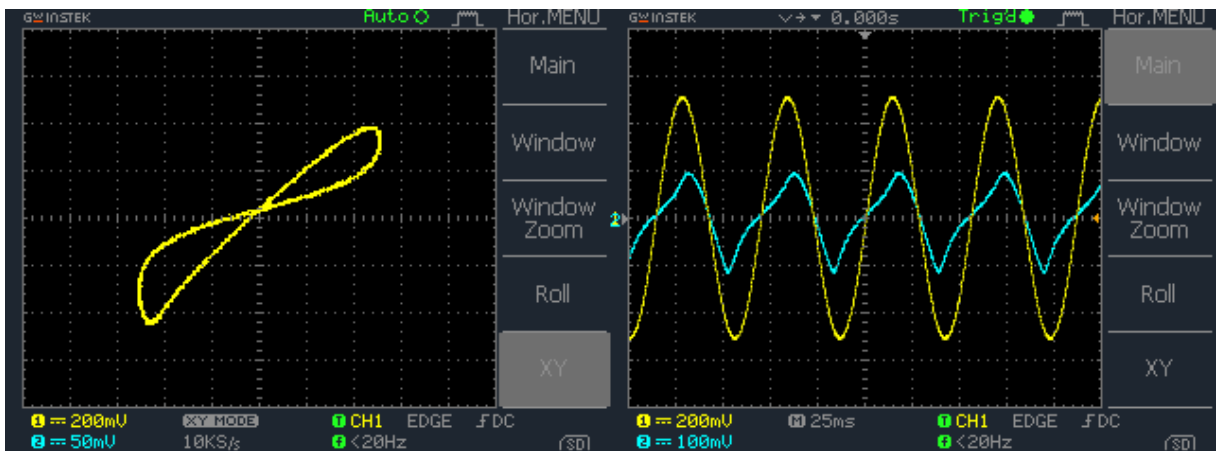
Memristör taklitçinin 18Hz frekans ve 0.2V_{pp} gerilim altındaki davranışı Şekil 4.22’de görülmektedir. Uygulanan bu düşük gerilimde dahi histerisis eğrisi simetrikliğe yakın sıfır geçişi yakalamıştır. Akım ve gerilim eğrileri incelendiğinde memristif sistemlerin sahip olduğu özellikler taşıdığı görülmektedir.

Şekil 4.23'te 18Hz frekansta ve $0.4V_{pp}$ gerilim uygulanan memristör taklitçisinin histerisis eğrisi ile akım-gerilim eğrileri görülmektedir. Akım ve gerilim eğrileri incelendiğinde akımın simülasyonlarda elde edilen akım eğrisine benzediği ve histerisis eğrisinin sıfır geçişi yakaladığını dolayısıyla memristörü taklit edebildiği anlaşılmaktadır.

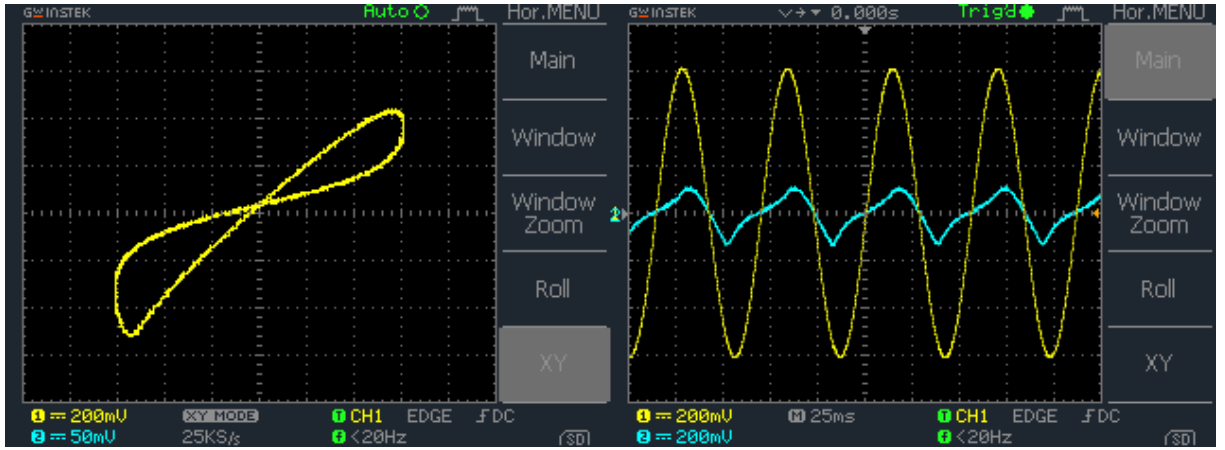


Şekil 4.24: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

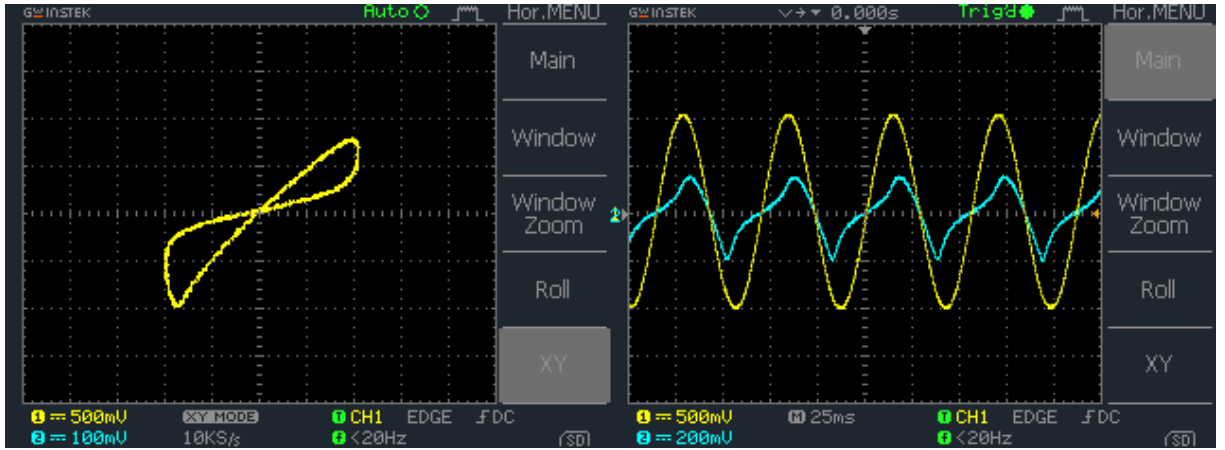
18Hz frekansta $0.7V_{pp}$ gerilim uygulanan emulatörün davranışı Şekil 4.24'te görülmektedir. 18Hz'de $1V_{pp}$ gerilim uygulanan memristörün histerisis eğrisi ve akım-gerilim eğrileri Şekil 4.25'te verilmiştir. Taklitçinin 18Hz frekans ve $1.2V_{pp}$ gerilim uygulandığı durumdaki davranışı Şekil 4.26'da verilmiştir. Üç farklı gerilim seviyesinde de memristör taklitçisi benzer davranışlar sergilemektedir. Akım ve gerilim eğrileri tıpkı tipik birer memristör akım-gerilim eğrileri benzemektedir. Histerisis eğrileri de emulatörden beklenildiği gibi sıfır geçişli formdadır.



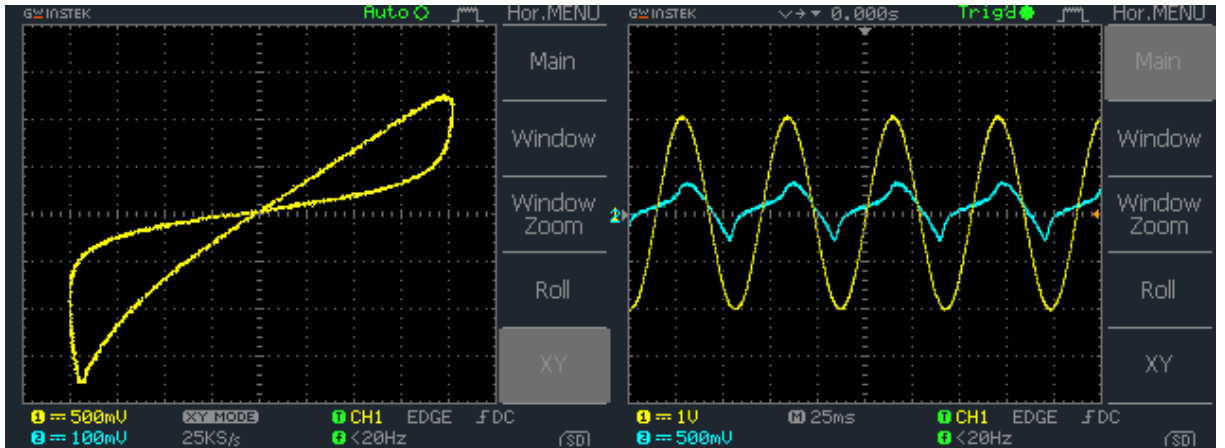
Şekil 4.25: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.26: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.27: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

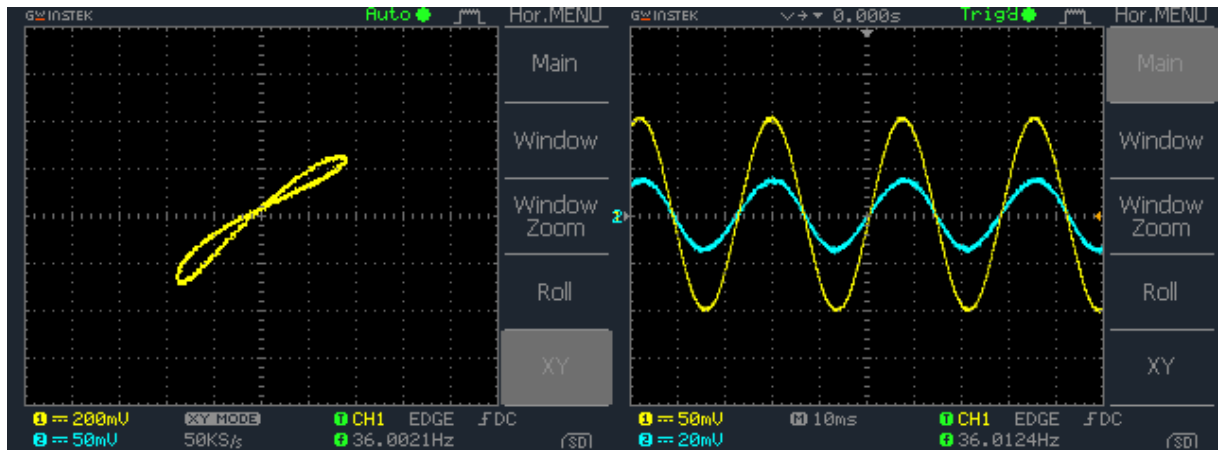


Şekil 4.28: Frekansı 18Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

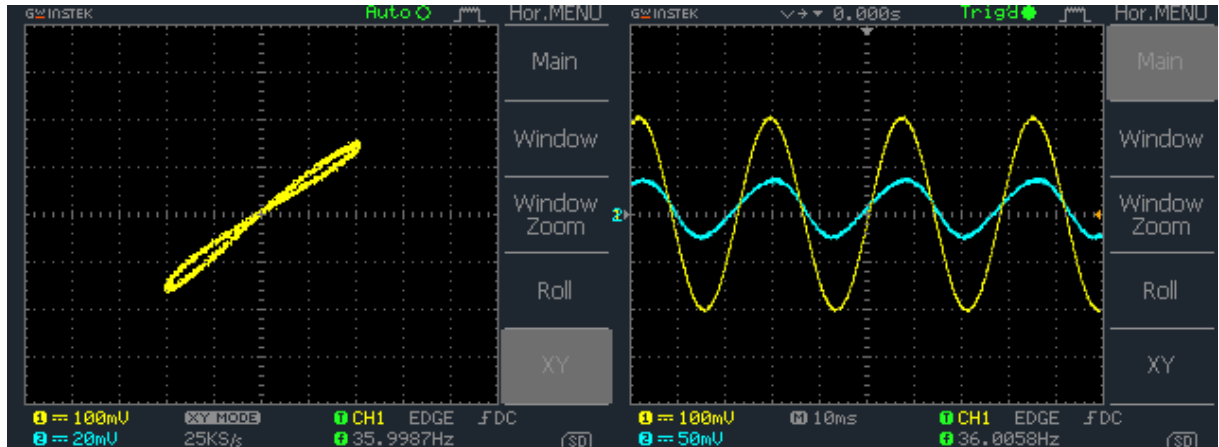
Taklitçinin 18Hz frekans ve 2V_{pp} gerilim uygulandığı durumdaki davranışı Şekil 4.27’de verilmiştir. 18Hz frekansta 4V_{pp} gerilim altındaki emulatörün davranışı Şekil 4.28’de görülmektedir. Gerilimin artmasıyla beraber histerisis eğrilerdeki değişim fark edilmektedir.

Histerisis eğrilerinin uçlarındaki ovallık yerini sivrilmeye bırakmıştır. Buna rağmen histerisis eğrileri ve akım-gerilim eğrileri memristif bir sistem gibi davrandığını ve memristör emulatörünün memristörü taklit edebildiğini göstermektedir.

18Hz frekansta farklı gerilim seviyelerinde deneysel olarak test edilmiş olan memristör taklitçi devresinin memristörü taklit etmeyi başardığı görülmüştür. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde memristör taklitçilerinden beklenen çift döngüsel sıfır geçiş özelliğini sağlamış, memristif sistemlerin sahip olduğu akım-gerilim eğrileri benzeri eğriler elde edilerek memristör emulatörünün bu frekansta istikrarlı bir şekilde memristörü taklit etmeyi başardığı deneysel olarak keşfedilmiştir.



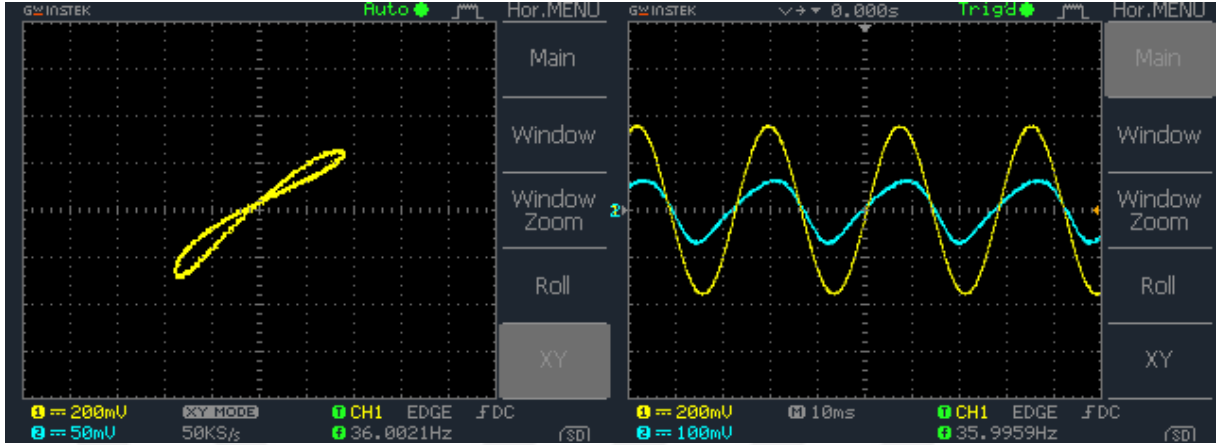
Şekil 4.29: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



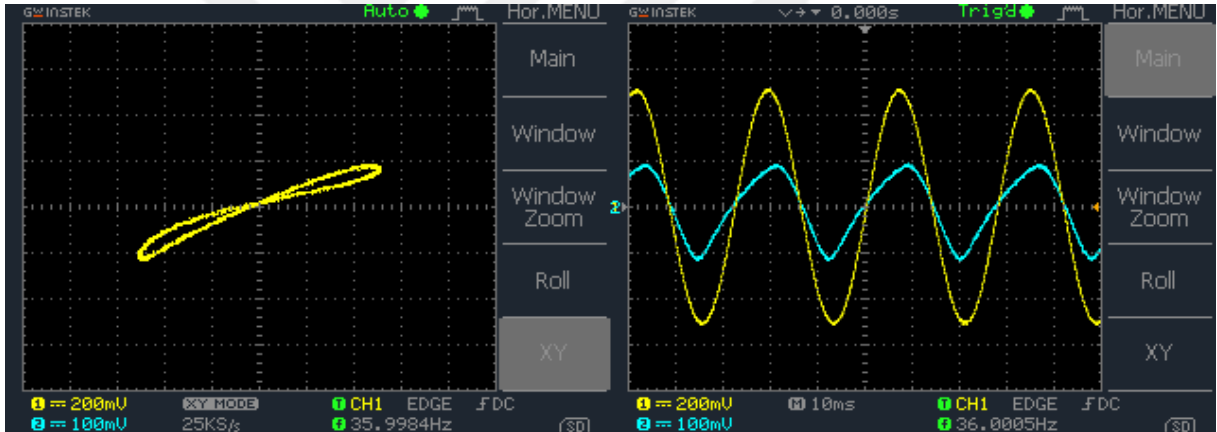
Şekil 4.30: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

Memristör taklitçisinin 36Hz frekans ve 0.2V_{pp} gerilim ile beslendiği durumu Şekil 4.29'daki gibidir. Şekil 4.30'da emulatörün 36Hz 0.4V_{pp} gerilim altındaki davranışı verilmiştir. Memristör taklitçi devresine 36Hz frekansta 0.7V_{pp} ve 1V_{pp} gerilim uygulandığı durumları

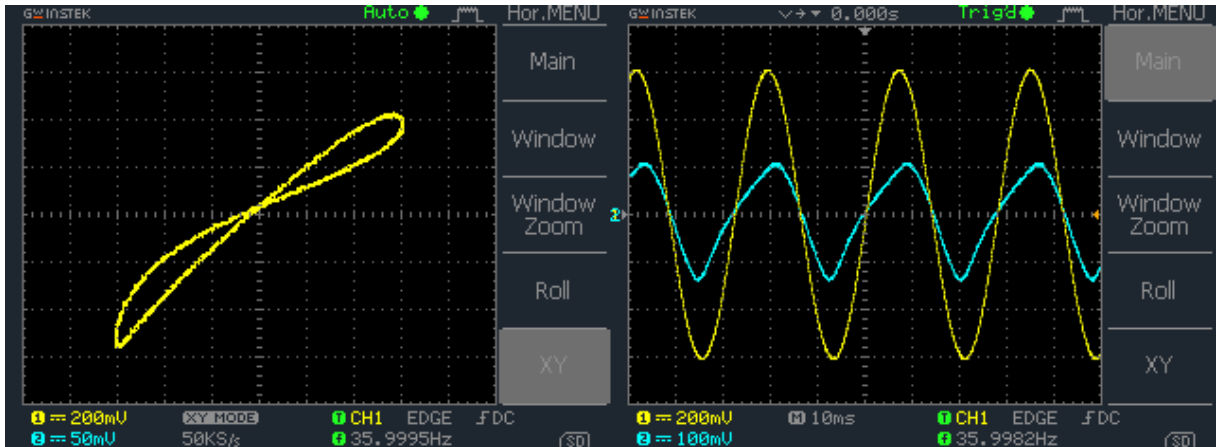
Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de görülmektedir. Bu gerilimlerde histerisis eğriler simetri ve sıfır geçiş özelliği barındırmaktadır. Akım ve gerilim eğrileri memristif özellikler taşımaktadır. Bu da taklitçinin memristörü taklit edebildiğini göstermektedir.



Şekil 4.31: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

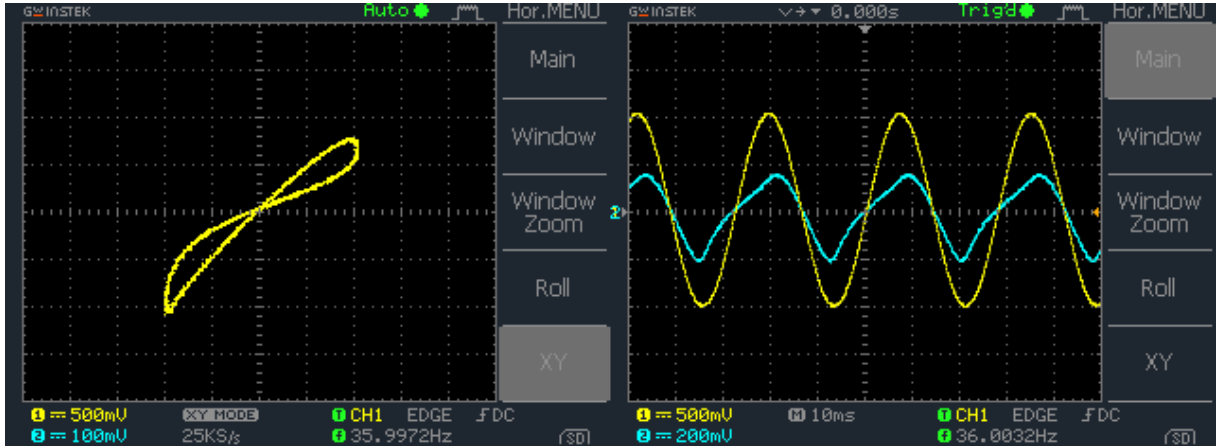


Şekil 4.32: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

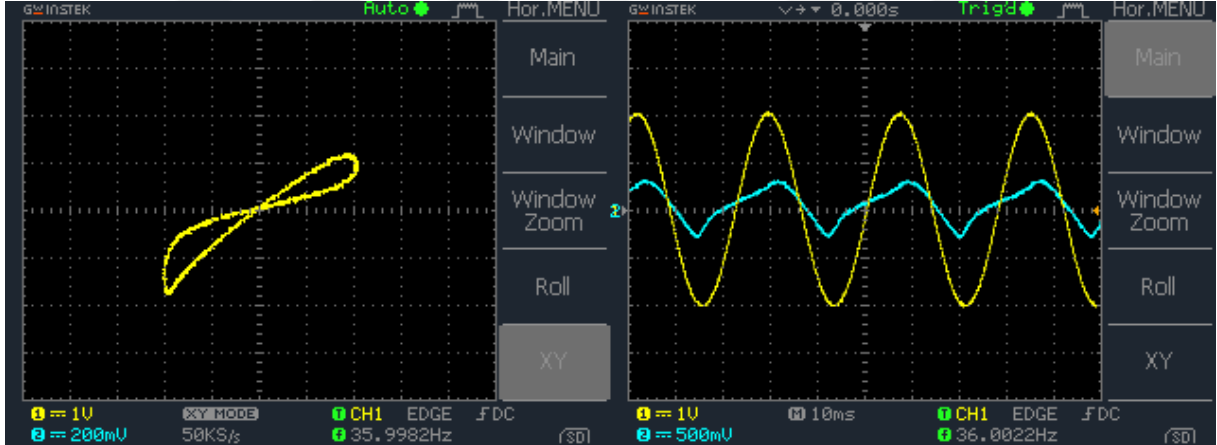


Şekil 4.33: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

Memristör taklitçisinin 36Hz frekans ve $1.2V_{pp}$ gerilim ile beslendiği durumu Şekil 4.33'teki gibidir. Şekil 4.34'te emulatörün 36Hz $2V_{pp}$ gerilim altındaki davranışı verilmiştir. Memristör taklitçi devresine 36Hz frekansta $4V_{pp}$ gerilim uygulandığı durum Şekil 4.35'te görülmektedir. Buradaki gerilim seviyelerinde gerilimin yükselmesiyle birlikte histerisis eğrilerdeki simetriklik kaybolmuş olmasına rağmen akım gerilim karakteristikleri korunmuştur. Bu seviyelerde emulatör memristörü başarıyla taklit edebilmektedir.



Şekil 4.34: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

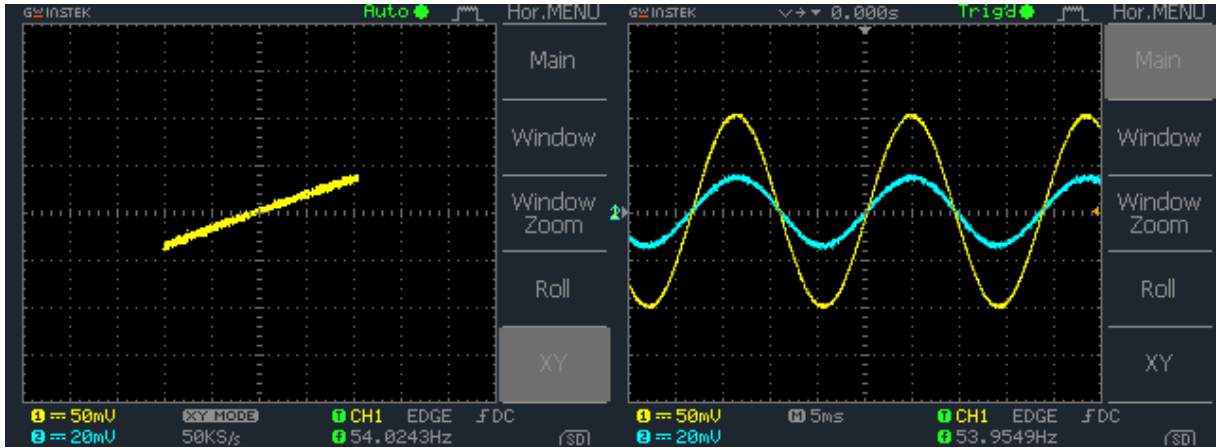


Şekil 4.35: Frekansı 36Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

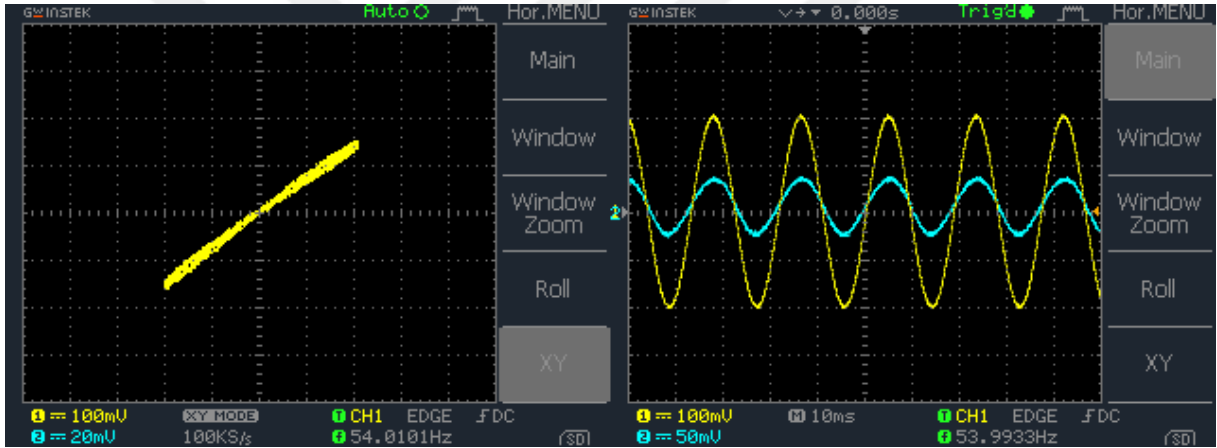
Farklı gerilimlerde 36Hz frekansta test edilen memristör emulatörü memristörü taklit etmeyi başarmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde beklenen çift döngüsel sıfır geçişi özelliğini sağlayarak memristörü taklit etmeyi başardığı gözlemlenmiştir.

Taklitçinin 54Hz frekans ve $0.2V_{pp}$ gerilim ile beslendiği durumdaki davranışı Şekil 4.36'da verilmiştir. 54Hz frekansta $0.4V_{pp}$ gerilim uygulanan emulatörün davranışı Şekil 4.37'de görülmektedir. İki farklı gerilim seviyesinde de histerisis eğrisi daralarak doğrusal bir

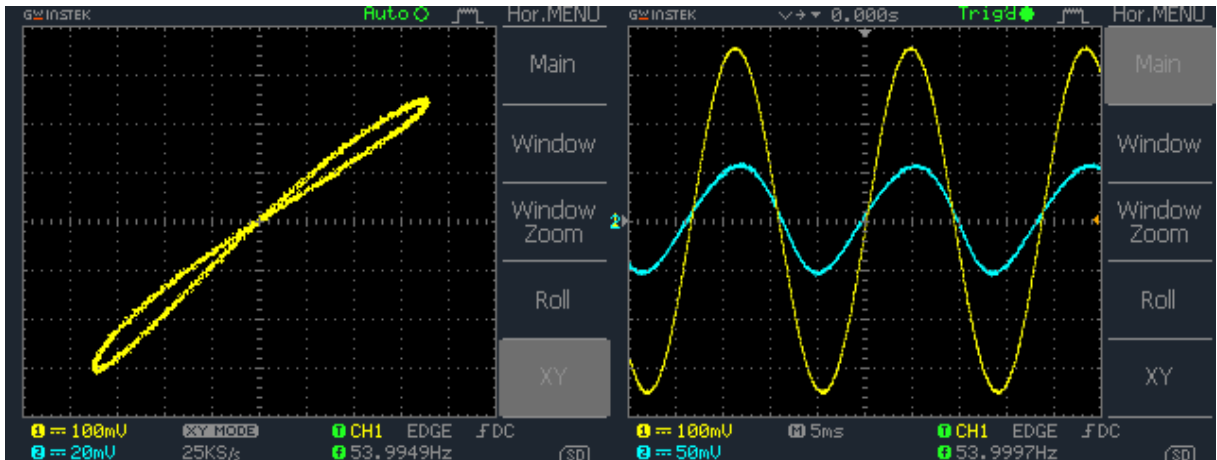
direncin histerisis eğrisine benzese de memristif özelliğini korumaktadır. Akım ve gerilim eğrilerinin sinüsoidal işarete benzerliği artmaya başlamıştır.



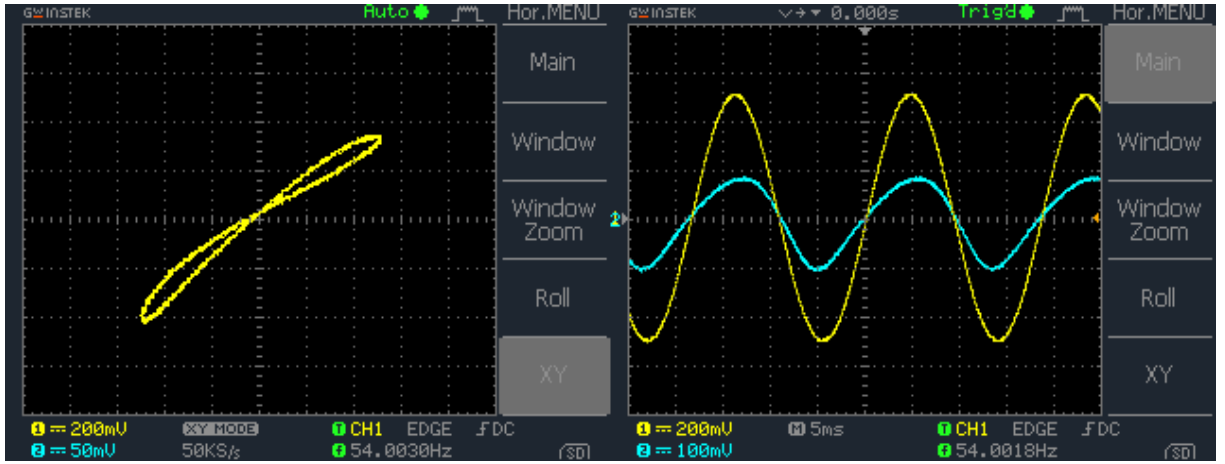
Şekil 4.36: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



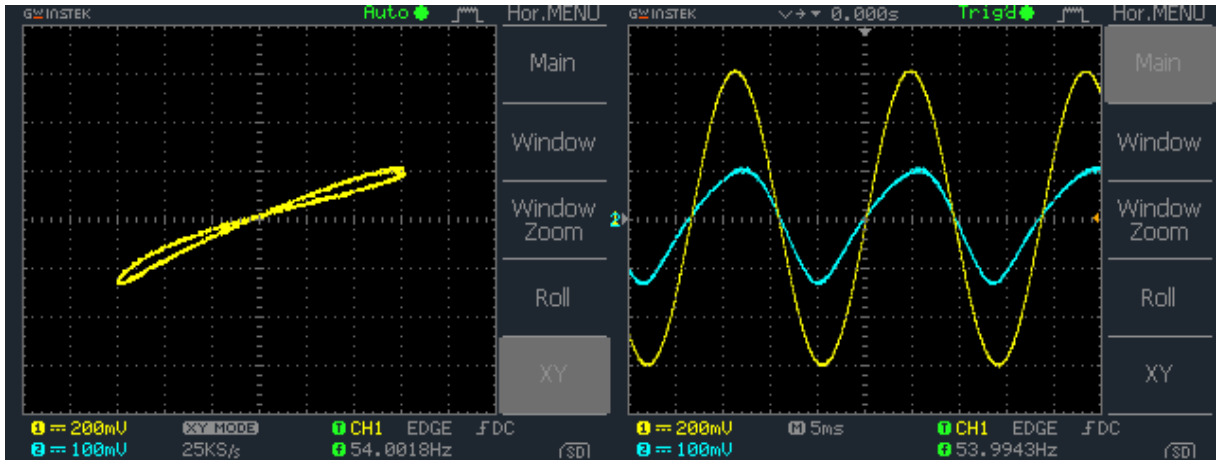
Şekil 4.37: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



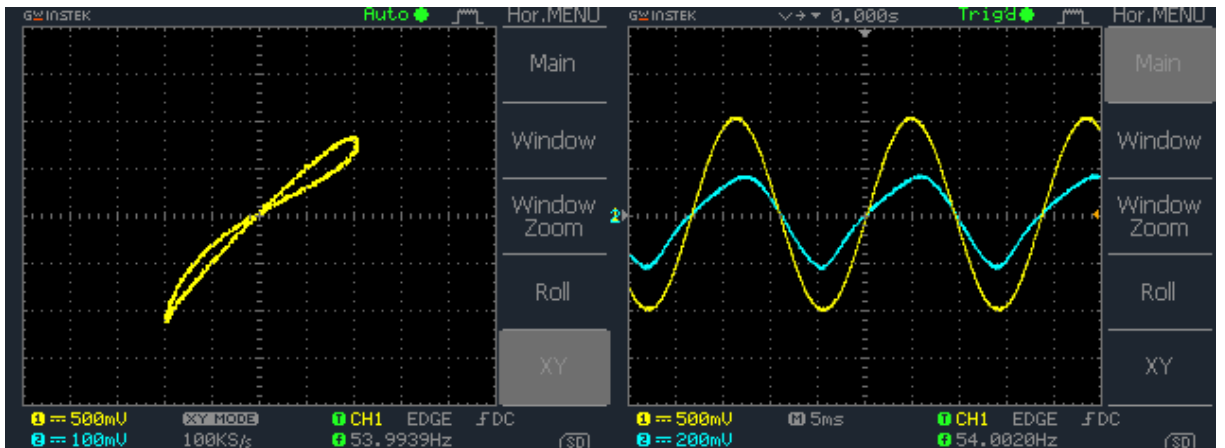
Şekil 4.38: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.39: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.40: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

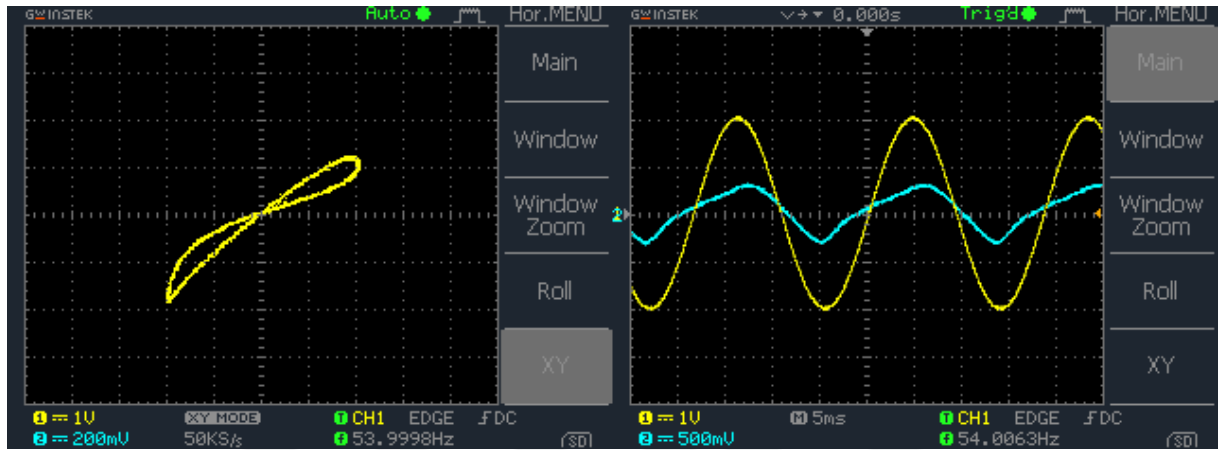


Şekil 4.41: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

Şekil 4.38’de 54Hz frekansta ve $0.7V_{pp}$ gerilim uygulanan memristör taklitçisinin histerisis eğrisi ile akım-gerilim eğrileri görülmektedir. 54Hz frekansta $1V_{pp}$ gerilim ile

beslenen emulatörün davranışı Şekil 4.39’da verilmiştir. Emulatörün 54Hz frekans ve 1.2V_{pp} gerilim altındaki davranışı Şekil 4.40’taki gibidir. Buradaki üç farklı gerilim uygulandığı durumda da histerisis eğrileri simetrik olmakla birlikte oldukça daralmıştır ve sıfır geçişi mevcuttur.

Akım ve gerilim eğrilerinden hareketle akım eğrileri tepesi yuvarlatılmış testere dişi işareti andırmaktadır ve Simulink modeli kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda elde edilen eğriler ile benzerdir.

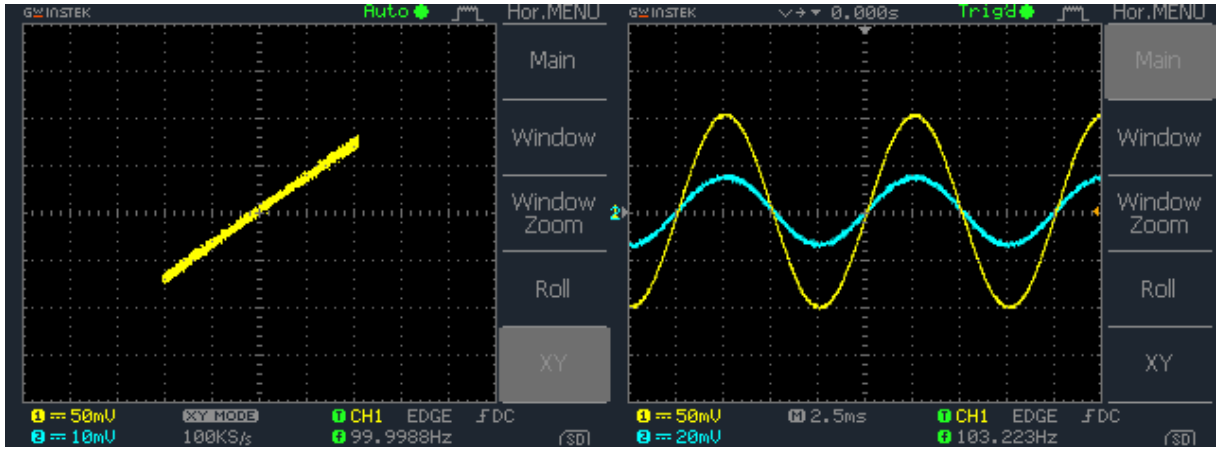


Şekil 4.42: Frekansı 54Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

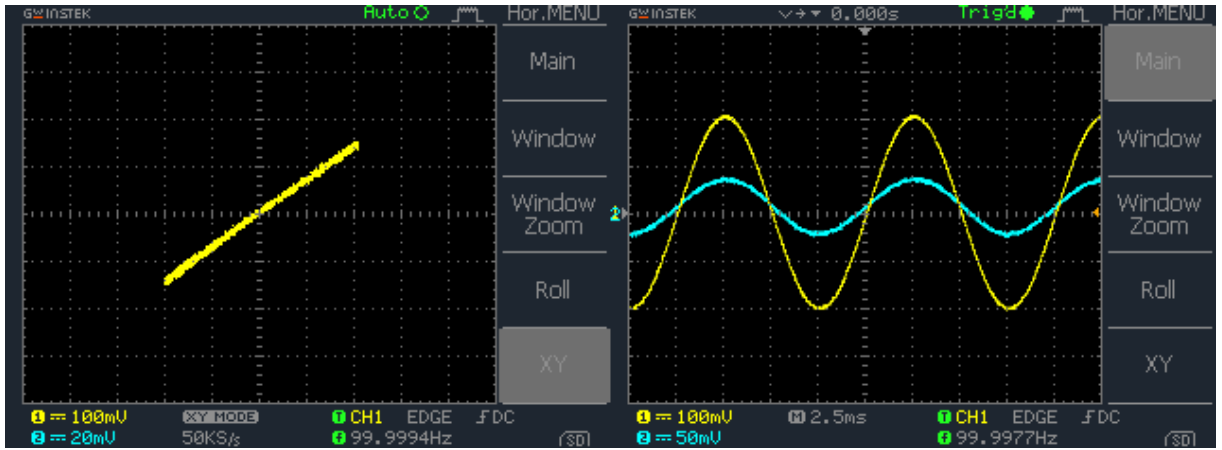
Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de 54Hz frekansta memristör taklitçisinin 2V_{pp} ile 4V_{pp} gerilim ile beslendiği durumlardaki davranışları verilmiştir. Burada gerilimin artmasına bağlı olarak histerisis eğrilerdeki simetrik yapı bozulmaya başlamıştır. Hem akım-gerilim eğrileri hem de histerisis eğrileri göz önünde bulundurulursa sistemin memristif özellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

54Hz frekansta farklı gerilim düzeylerinde deneyleri gerçekleştirilen bu memristör emulatörünün histerisis eğrisinin sıfır geçişi sağladığı ve memristörü taklit edebildiği kanıtlanmıştır.

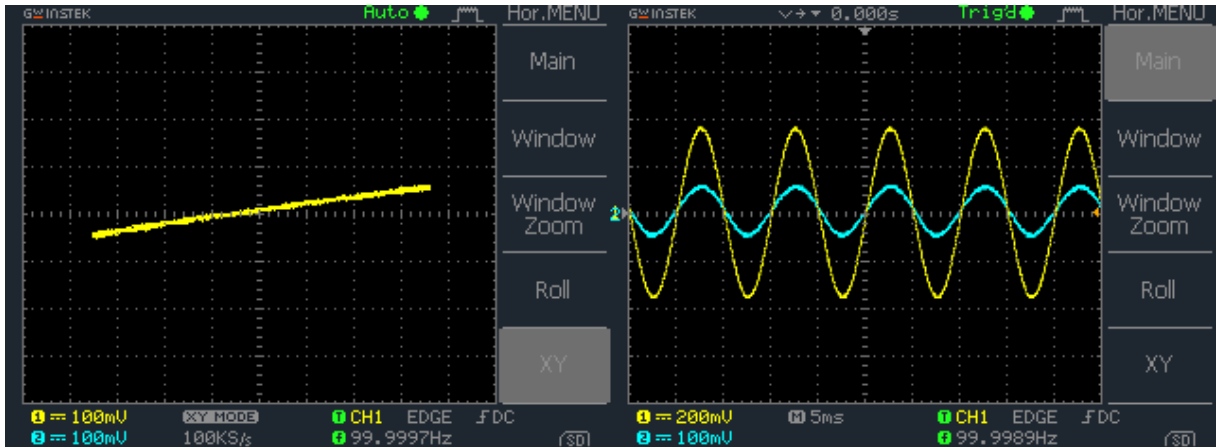
Şekil 4.43’te 100Hz frekansta 0.2V_{pp} gerilim uygulanan memristör taklitçisinin durumu verilmiştir. Memristör taklitçisinin 100Hz frekansta 0.4V_{pp} ile 0.7V_{pp} gerilim altındaki davranışları Şekil 4.44 ve Şekil 4.45’te verilmiştir. Şekillerdeki akım ve gerilim eğrileri incelendiğinde bu gerilim seviyelerinde memristör emulatörünün davranışının büyük ölçüde dirence benzediği görülmektedir. Histerisis eğrileri de neredeyse direnç gibi doğrusaldır.



Şekil 4.43: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



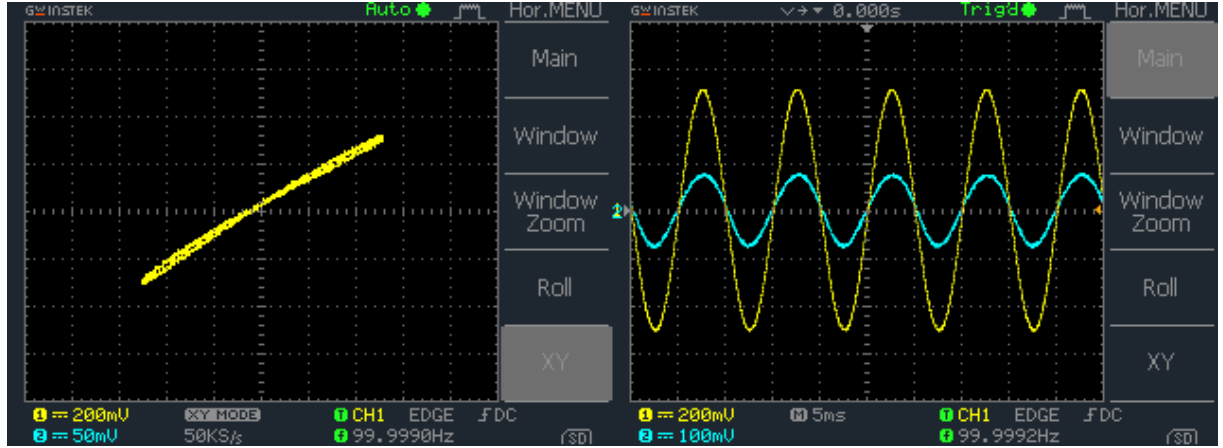
Şekil 4.44: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



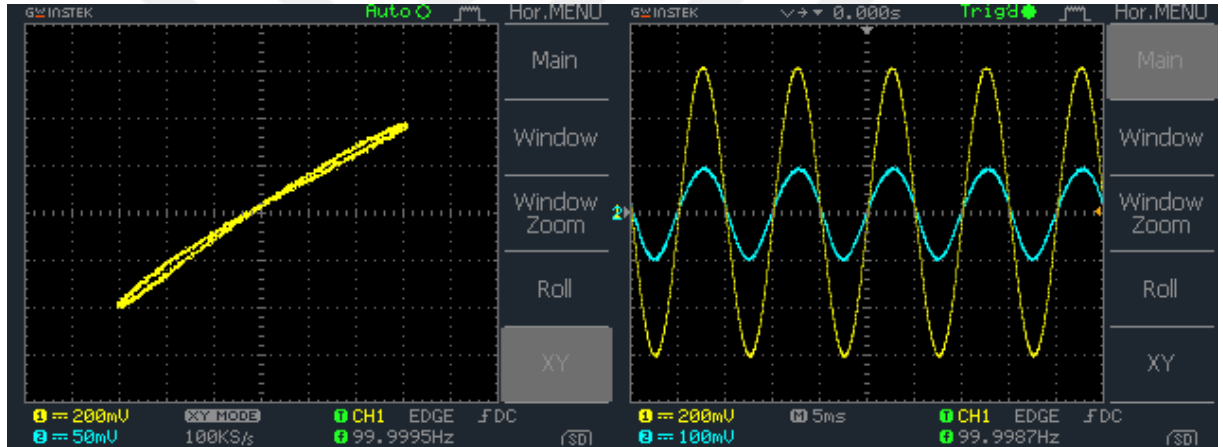
Şekil 4.45: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

100Hz frekansta $1V_{pp}$ ile $1.2V_{pp}$ gerilim altındaki memristör taklitçisinin davranışları Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de verilmiştir. Akım ve gerilim eğrileri her ne kadar sinüsoidal işaretler

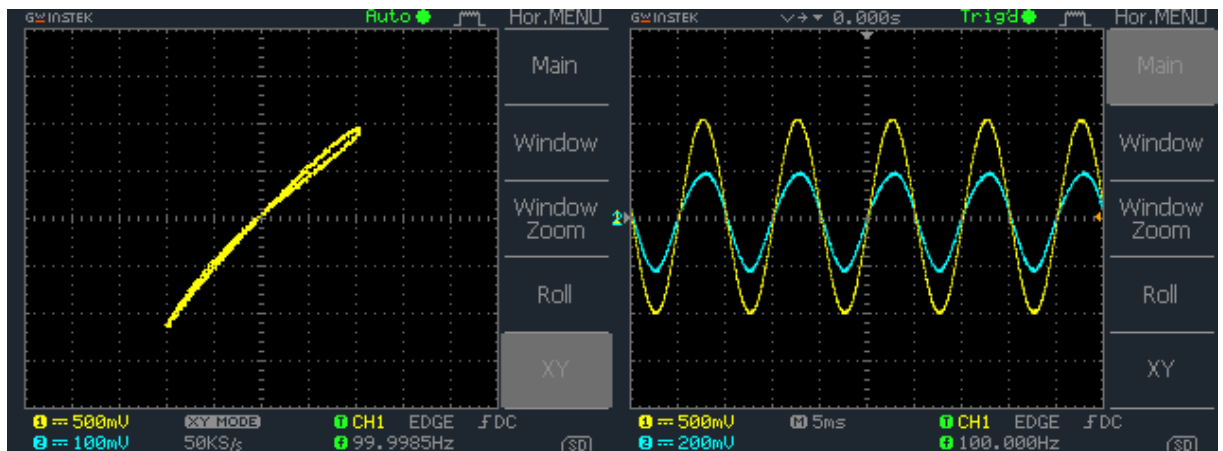
gibi görünse bile histerisis eğrileri simetriktr ve sıfırdan geçen iki halka oluşturmışlardır. Bu iki farklı gerilimdeki emulatörün durumu için memristörü taklit edebildiği söylenebilir.



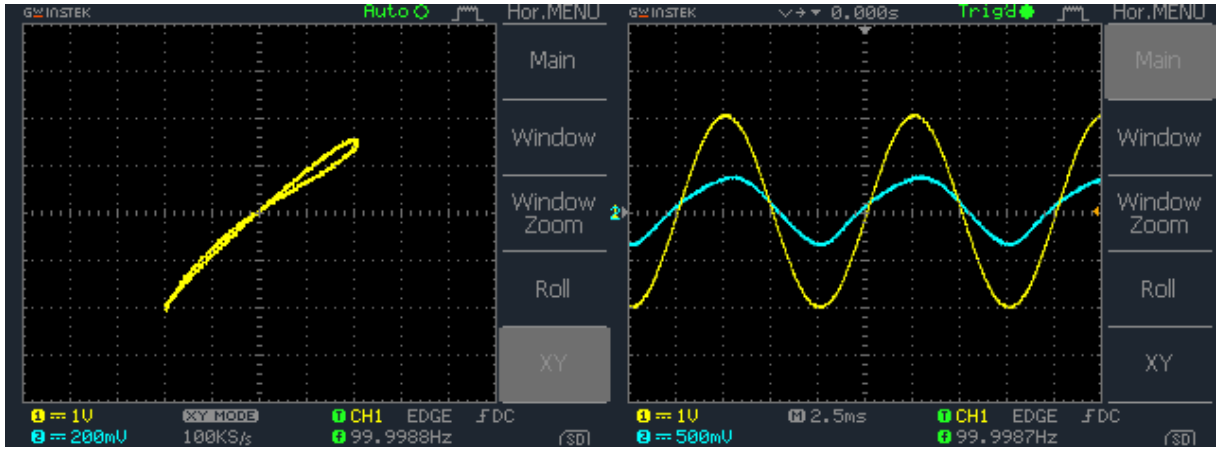
Şekil 4.46: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



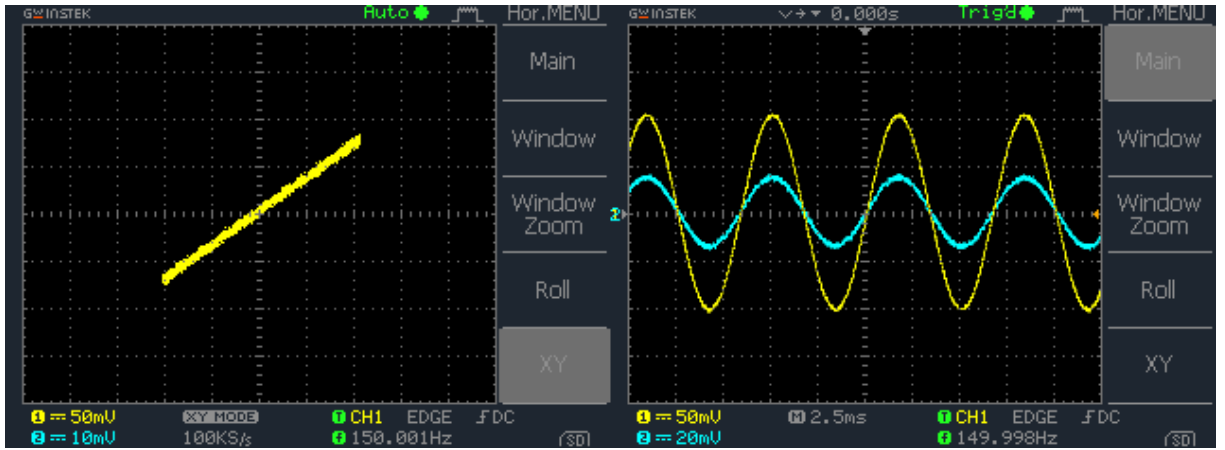
Şekil 4.47: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



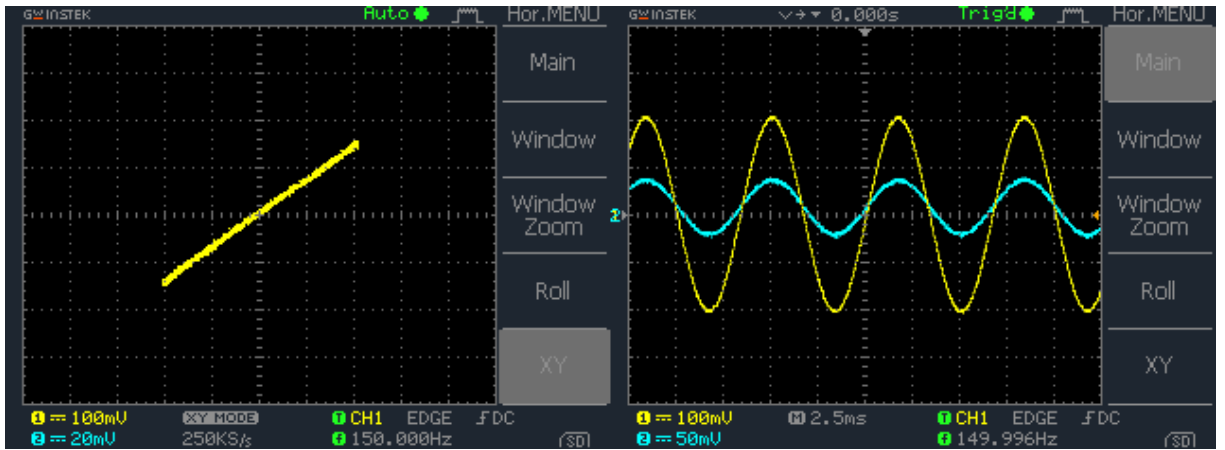
Şekil 4.48: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.49: Frekansı 100Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



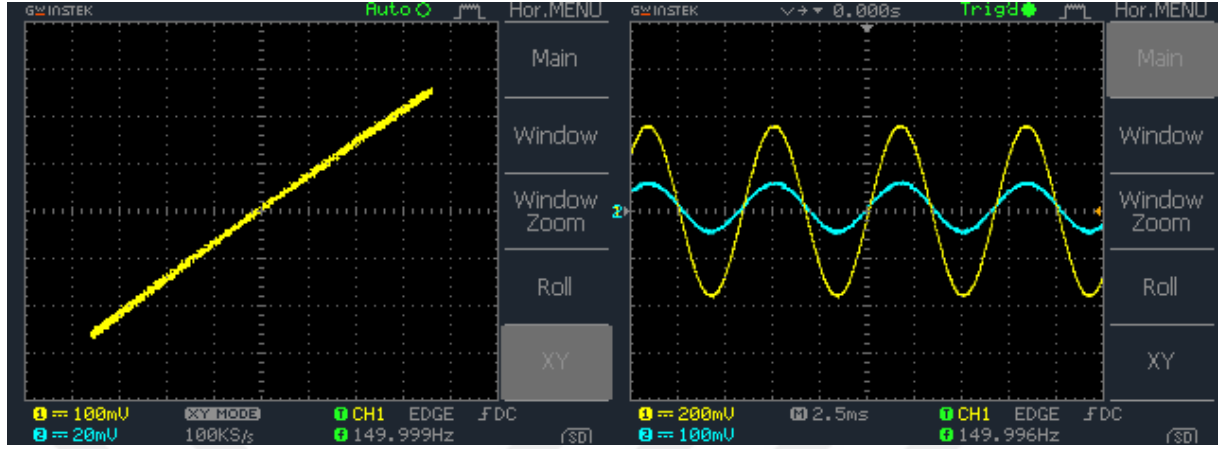
Şekil 4.50: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 0.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



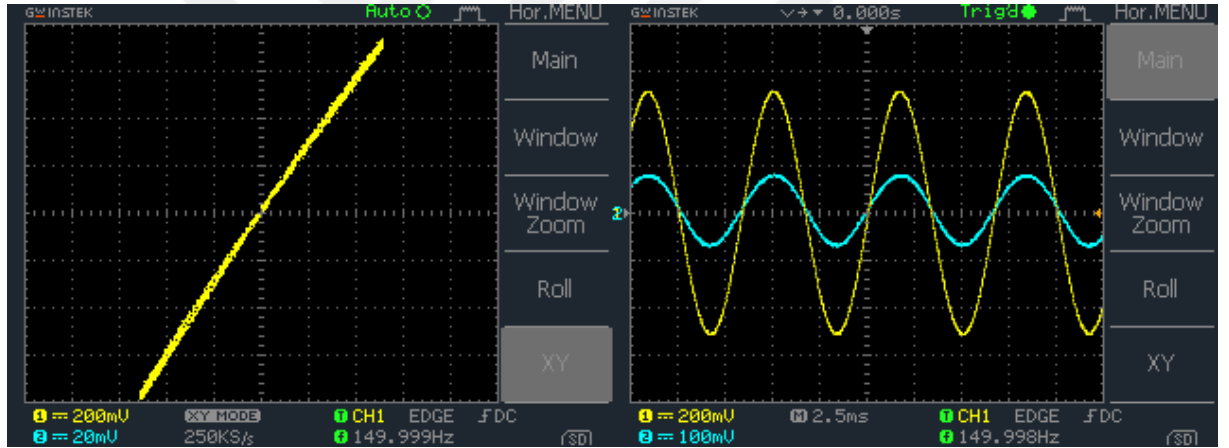
Şekil 4.51: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 0.4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

100Hz frekansta $2V_{pp}$ ile $4V_{pp}$ gerilim uygulanan memristör taklitçisinin davranışları Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’da verilmiştir. Burada histerisis eğrilerindeki asimetrikliği gerilime

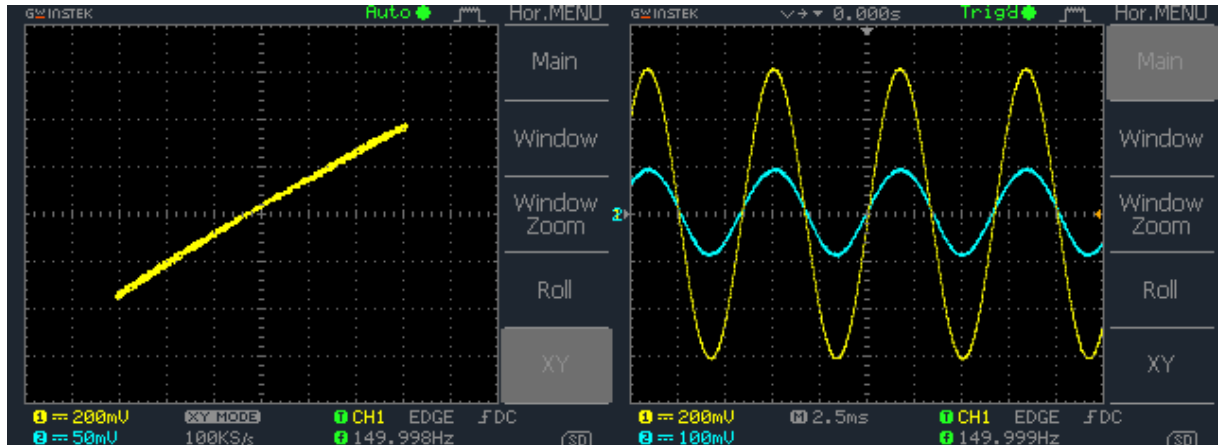
bağlı olarak artmıştır. Akım ve gerilim eğrileri de düşünüldüğünde bu iki gerilim için emulatrörün memristörü taklit ederek memristif sistem gibi davrandığı görölmektedir.



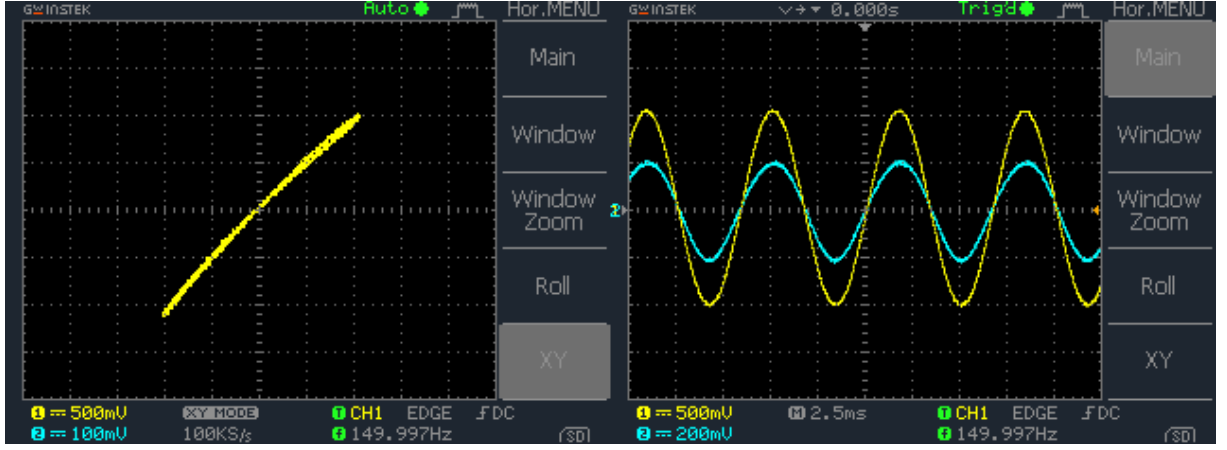
Şekil 4.52: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 0.7V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



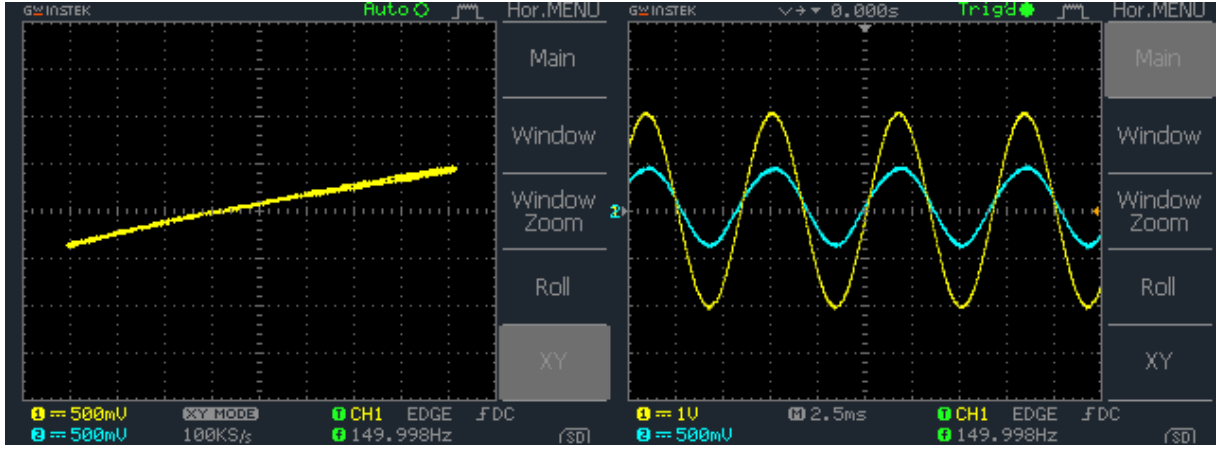
Şekil 4.53: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.54: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 1.2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

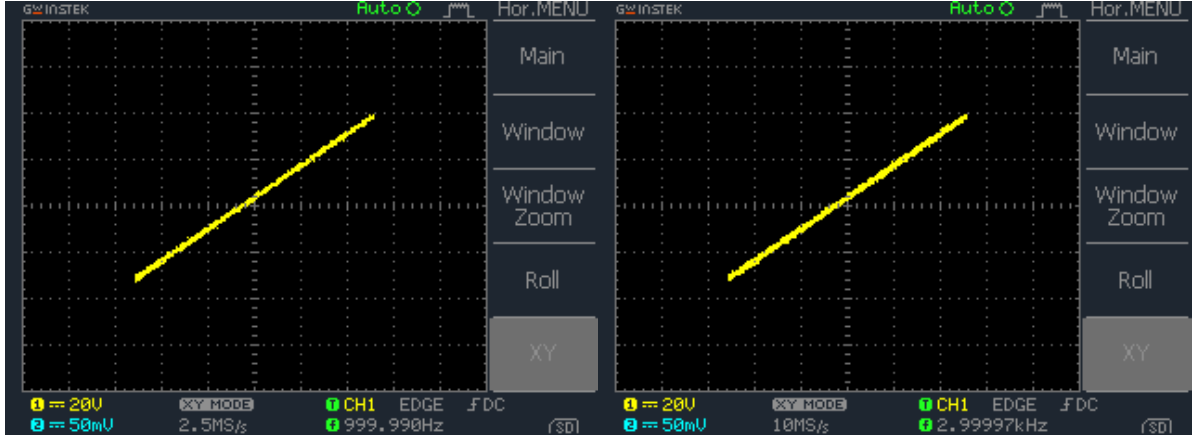


Şekil 4.55: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.



Şekil 4.56: Frekansı 150Hz ve tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim uygulanan memristörün histerisis ve akım - gerilim eğrileri.

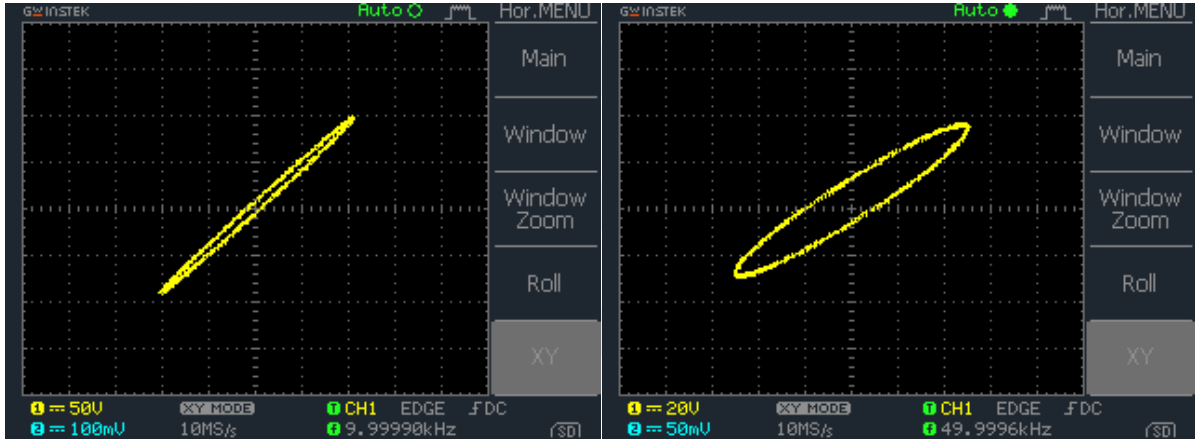
Farklı seviyelerde gerilim uygulanan memristör taklitçisinin 150Hz frekanstaki davranışları Şekil 4.50 ile Şekil 4.56 arasındaki şekillerde verilmiştir. Akım ve gerilim dalga şekillerinden de görüldüğü üzere 150Hz frekansta memristör akım ve gerilimleri sinüsoidaldirler. Histerisis eğrileri de direnç gibi doğrusal tek değerli bir fonksiyon şeklindedir. Yüksek frekansta memristörler direnç gibi davranmaktadırlar. Chua ve Kang 1976'daki çalışmalarında frekans arttıkça memristörün veya memristif sistemlerin direnç gibi davranmaya başladığını teorik olarak tahmin etmişlerdir (Chua ve Kang, 1976). Stanley Williams ve ekibi ise ürettikleri tipteki memristörün bir doyma mekanizmasına sahip olduğunu, belirli bir yük değerinde memristörün yüke bağımlılığını kaybederek direnç gibi davrandığını deneysel olarak keşfetmişlerdir (Williams ve ark., 2008). Tasarlanan memristör emulatörü için bu durum söz konusudur. 150Hz ve üzerindeki frekanslarda bu taklitçi yüke bağımlılığını kaybederek direnç gibi davranmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 4.57: Tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 1 kHz ve (b) 3 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.



(a)

(b)

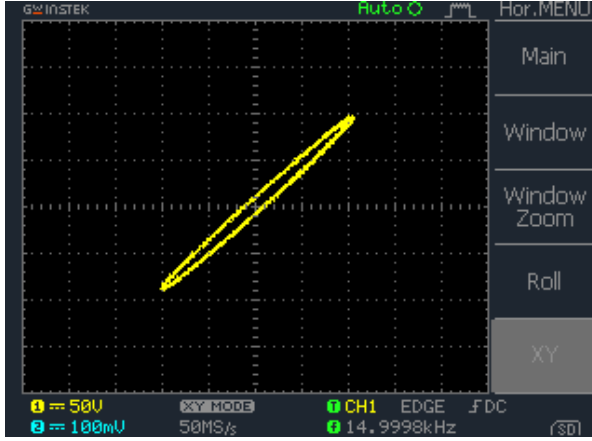
Şekil 4.58: Tepeden tepeye değeri 1V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 5 kHz ve (b) 20 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.



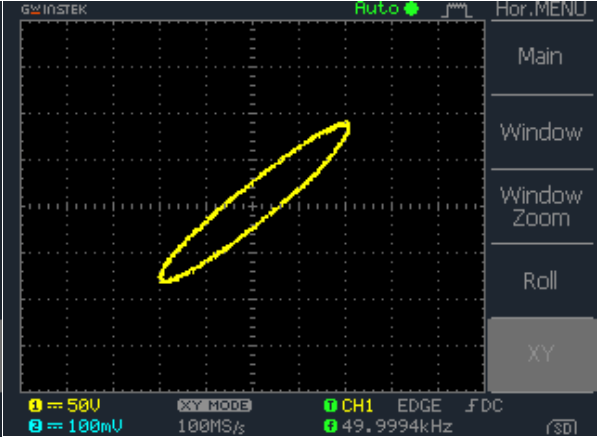
(a)

(b)

Şekil 4.59: Tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 1 kHz ve (b) 3 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.

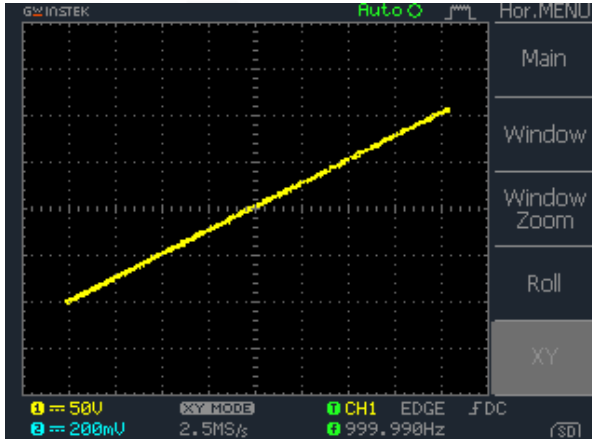


(a)

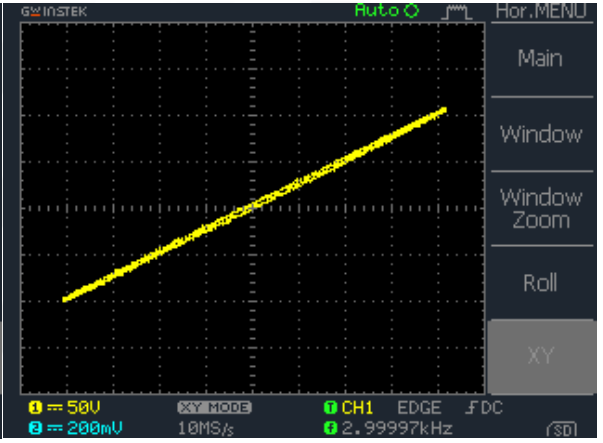


(b)

Şekil 4.60: Tepeden tepeye değeri 2V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 5 kHz ve (b) 20 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.

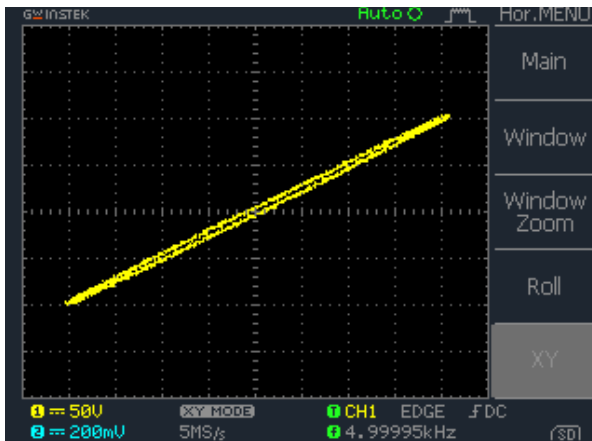


(a)



(b)

Şekil 4.61: Tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 1 kHz ve (b) 3 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.



(a)



(b)

Şekil 4.62: Tepeden tepeye değeri 4V olan sinüsoidal gerilim ve frekansı (a) 5 kHz ve (b) 20 kHz işaretler uygulanan memristörün histerisis eğrileri.

Tepeden tepeye 1V, 2V ve 4V gerilim seviyelerinde 1 kHz, 3 kHz, 5 kHz ve 20 kHz frekanslı sinyaller uygulanan memristör taklitçisinin davranışları Şekil 4.57 ile Şekil 4.62 arasındaki şekillerde verilmiştir. Histerisis eğrilerde de görüldüğü üzere memristör emulatörü, frekansı 3 kHz'e kadar uygulanan sinyallerde memristif sistem özelliği korumaktadır. Memristör emulatörüne uygulanan sinyalin frekansı 3 kHz'in üzerine çıktığında bu memristör taklitçisi istenen şekilde çalışmamaktadır. Farklı gerilim seviyelerinde 5kHz ve üzerindeki frekanslarda memristör emulatörünün histerisis eğrileri incelendiğinde sıfır geçişini sağlayamadığı görülmektedir. Dolayısıyla tasarlanan bu taklitçi devre 5 kHz ve üzeri frekanslarda memristif sistemmiş gibi davranmamakta ve memristör davranışlarını mimikleyememektedir.

Üretilen her LED bir toleransa sahiptir. Bu yüzden kullanılan LEDler birbirinin aynısı olmayabilir. Bundan dolayı deneylerde elde edilen şekillerde pozitif ve negatif gerilimlerde histerisis eğrisinin davranışı simetrik değildir.

S. P. Adhikari ve arkadaşları “Three Fingerprints of Memristor (Memristörün üç parmakizi)” isimli çalışmalarında memristörlerin ya da memristif sistemlerin sahip olması gereken üç karakteristik özelliği ortaya koymuşlardır (Adhikari ve ark., 2013). Chua'nın da aralarında bulunduğu çalışma grubuna göre bir elemanı ya da sistemi, memristör veya memristif sistem olarak tanımlayabilmek için sahip olması gereken birinci parmak izi çimdiklenmiş sıfır geçiş özelliği bulunan döngüsel histerisis eğrisinin mevcut olmasıdır. Onlar frekans arttıkça histerisis eğrisindeki alanının daralmasını, memristörlerin ya da memristif sistemlerin sahip olması gereken ikinci parmak izi olarak tanımlamışlardır. Çalışmalarında üçüncü parmak izini ise memristörlerin ya da memristif sistemlerin çimdiklenmiş histerisis eğrilerinin sonsuz frekansta küçüleceğini, tek değerli bir fonksiyona dönüşüp direnç gibi doğrusal bir forma bürünmesi olarak tanımlamışlardır.

Tasarlanan memristör emulatörü için farklı frekans ve gerilim seviyelerinde yapılan deneyler ele alındığında bu memristör taklitçi devresi memristörlerin ya da memristif sistemlerin sahip olması gereken üç parmak izine de sahiptir (Adhikari ve ark., 2013). Dolayısıyla bu emulatör gerçek bir memristör olmasa bile memristif bir sistemin özelliklerini taşımaktadır. Böylece tasarlanan memristör taklitçisinin, memristif bir sistemmiş gibi davranarak memristörü taklit edebildiği ispatlanmıştır.

LDR (Light-Dependent Resistor veya ışığa bağımlı direnç) ışık kontrollü değişken bir dirençtir. LDRler, yüksek dirençli yarıiletkenlerden üretilmektedirler. Karanlıkta, bir LDR birkaç

megaohm ($M\Omega$) kadar yüksek bir direnç gösterebilirken, ışıkta birkaç yüz ohm kadar düşük bir dirence sahip olabilir. Bir LDR'deki ışık olayı belirli bir frekansı aşarsa, yarı iletken tarafından absorbe edilen fotonlar bağlı elektronlara iletim bandına atlamak için yeterli enerjiyi verirler. Ortaya çıkan serbest elektronlar (ve delik ortakları) elektrik iletir ve böylece direnci düşürür. Direnç aralığı ve LDR hassasiyeti, farklı cihazlar arasında önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Dahası, LDRler belli dalga boyu bantları içindeki fotonlara büyük ölçüde farklı tepki verebilir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan bu yüksek lisans tezinde, literatürde bir ilk olarak ışıık yayan LED'ler ve LDR kullanılarak bir memristör emulatörü yapılmıştır. Tasarlanan bu memristör taklitçisinin gerçekenmesi için kullanılan LED-LDR sistemi için ışıktan yalıtılmış kapalı bir deney düzeneği oluşturularak optokuplör yapılmıştır. Taklitçi devre board üzerine kurulmuştur. Memristör emulatörünün davranışı sinüsoidal gerilim kullanılarak test edilmiştir. Taklitçi devrenin farklı frekans ve gerilim değeriindeki davranışları incelenmiştir. Memristöre uygulanan gerilim ve uçlarından akan akım dijital osiloskop kullanılarak ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır.

Farklı frekans ve gerilim seviyelerinde deneysel olarak test edilerek elde edilen akım, gerilim ve histerisis eğriler de göz önünde bulundurulduğunda, gerçeken memristör emulatörü, gerçeken bir memristör olmamasına rağmen memristörmüş gibi davranışlar sergilemektedir. Bu emulatör gerçeken bir memristör olmasa bile memristif bir sistemin özelliklerini taşımaktadır. Dolayısıyla bu memristör taklitçi devresi memristörlerin ya da memristif sistemlerin sahip olması gereken üç parmak izine de sahiptir (Adhikari ve ark., 2013). Böylece tasarlanan memristör taklitçisi, memristif bir sistemmiş gibi davranarak memristörü taklit edebildiğini göstermektedir. Bu emulatör 3 kHz'e kadar oldukça iyi bir performans göstermiştir. Gerçeken bir memristör olmasa bile bu devre, memristif bir sistemmiş gibi, yüke bağımlılık ve histerisis gibi memristör davranışlarını mimikleyebildiği gösterilmiştir. Mutlu ve Karakulak'ın çalışmalarında olduğu gibi bu memristör taklitçisi DC offset geriliminden etkilenmemektedir (Mutlu ve Karakulak, 2009a). Dolayısıyla memristör emulatörü oldukça yüksek bir başarımla çalışmaktadır. Böylelikle ışıığa bağılı direnç ve LED kullanarak yapılmış bir memristör emulatör devresi amacına ulaşmıştır.

Bu çalışmada yapılan memristör emulatörü kaos devrelerinde, analog yükselteçlerde, osilatörlerde vb. analog devrelerde rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca bu emulatör literatürde sıklıkla karşılaşılan memkapasitör (hafızalı kondansatör) ve memindüktör (hafızalı bobin) elemanlarının memristör emulatörleri ve jirator devreleri kullanılarak yapılan uygulamalarında kullanımı için uygundur.

Bu çalışmada sunulan emulatör devresi sınırlı çalışma frekansına sahip olduğundan, çok yüksek frekanslarda (3 kHz üzeri) memristör davranışlarını incelemek için uygun değildir. Frekansı sınırlandıran (düşük frekansta çalışan) devre elemanları çalışma frekansını etkilediğinden daha yüksek frekans cevabı olan elemanlar kullanılarak 3 kHz'in üzerine

çıkılabileceği düşünülmektedir. LDR'lerin yüksek frekanslarda hata meydana getirdiği bilinmektedir. Biz bunun için gelecekte yapılacak çalışmalarda LDR yerine fotodiyot ya da fototransistör gibi yüksek frekans cevabı olan elemanlar kullanılmasını öneriyoruz. Bunun benzeri memristör emulatörleri optokuplör kullanılarak da rahatlıkla yapılabilir.

Burada kullanılan opampların negatif gerilim çıkışı ters bağlanan ikinci LED'i beslemek için kullanılmıştır. Ancak üretilen malzemelerin karakteristiğinden ötürü LED'ler birbirleriyle özdeş değildir. Bu durum asimetri hatası meydana getirmektedir. Bunun önüne geçebilmek için LEDlerin bağlandığı noktada köprü tipi diyot kullanılarak hem pozitif hem de negatif gerilimlerde çalışabilecek tek bir LED kullanılabilir.



KAYNAKLAR

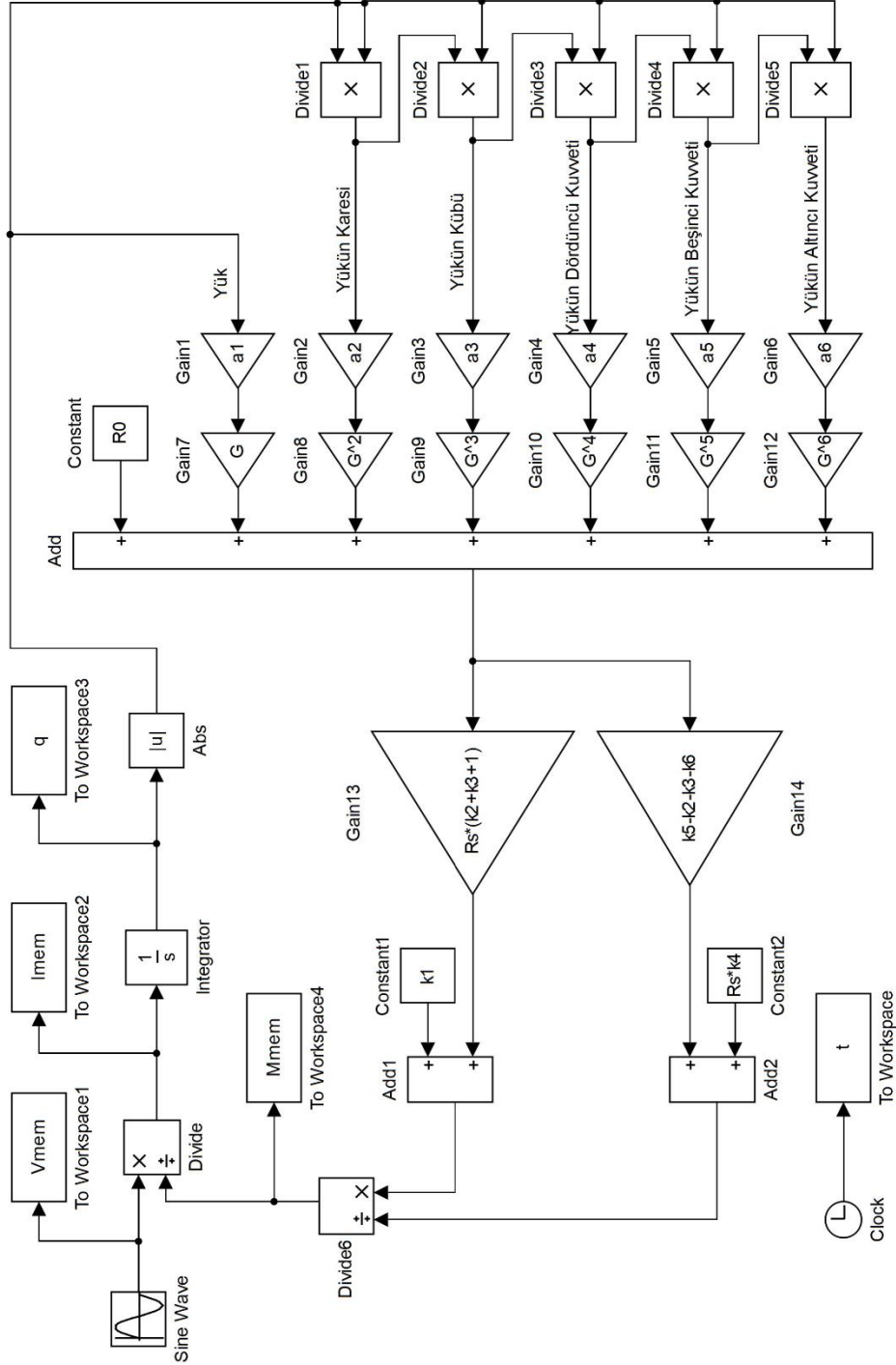
- Abdalla, H., & Pickett, M. D. (2011). SPICE Modeling of Memristor. *In Circuits and Systems (ISCAS)* (pp. 1832-1835). IEEE International Symposium on.
- Abuelma'atti, M., & Khalifa, Z. (2016). A new floating memristor emulator and its application in frequency-to-voltage conversion. *Analog Integrated Circuits Signal Processing*, 86(1), 141–147.
- Abuema'atti, M. T., & Khalifa, Z. J. (2014). A new memristor emulator and its application in digital modulation. *Analog Integrated Circuits Signal Processing*, 80, 577–584.
- Abuema'atti, M. T., & Khalifa, Z. J. (2015). A continuous-level memristor emulator and its application in a multivibrator circuit. *International Journal of Electronics and Communications*, 69, 771–775.
- Adhikari, S. P., Sah, M. P., Kim, h., & Chua, L. O. (2013). Three Fingerprints of Memristor. *IEEE Transactions Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60(11), 3008-3021.
- Alharbi, A. G., Khalifa, Z. J., Fouda, M. E., & Chowdhury, M. (2015). Memristor emulator based on single CCII. *27th International Conference on Microelectronics (ICM)*, (s. 174–177).
- Ascoli, A., Tetzlaff, R., Corinto, F., Mirchev, M., & Gilli, M. (2013). Memristorbased filtering applications. *14th Latin American Test Workshop (LATW)* , (s. 1–6).
- Biolek, D., Bajer, J., Biolkova, V., & Kolka, Z. (2011). Mutators for transforming nonlinear resistor into memristor., (s. 488–491).
- Bo-Cheng, B., Jian-Ping, X., Gua-Hua, Z., Zheng-Hua, M., & Ling, Z. (2011). Chaotic memristive circuit: Equivalent circuit realization and dynamical analysis. *Chinese Physics B*, 20(12), 120502-1–120502-6.
- Cam, Z., & Sedef, H. (2017). A new floating memristance simulator circuit based on second generation current conveyor. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 26(2), 1750029-1–1750029-15.
- Chua, L. O. (1971). Memristor - The Missing Circuit Element. *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. 18, pp. 507-519.
- Chua, L. O., & Kang, S. M. (1976). Memristive devices and systems. *Proc.IEEE*, vol. 64, pp. 209-223.
- Chua, L. O., Tseng, & Chong-Wei. (1974). A memristive circuit model for p-n junction diodes. *International Journal of Circuit Theory and Applications* , vol 2, (no. 4):367-389 .

- Elwakil, A. S., Fouda, M. E., & Radwan, A. (2013). A simple model of double-loop hysteresis behavior in memristive elements. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 60(8), 487–491.
- Hussein, A. I., & Fouda, M. E. (2013). A simple MOS realization of current controlled memristor emulator. *International Conference on Microelectronics (ICM)*, 1–4.
- Jo, K. H., Jung, C. M., Min, K. S., & Kang, S. M. (2010). SelfAdaptive Write Circuit for Low-Power and VariationTolerant Memristors. *Transactions on Nanotechnology, IEEE* , Volume: PP , Issue: 99, 2010 , Page(s): 1 – 1.
- Karakulak, E., & Mutlu, R. (2016). Reconstructive Sensing Circuit for Complementary Resistive Switches Based Crossbar Memories. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24(3), 1371-1383.
- Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y. S., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S. F., & Abbott, D. (2010). The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor. DOI: 10.1098/rspa.2009.0553.
- Kim, H., Sah, M., Yang, C., & Chua, L. (2012). Memristor emulator for memristor circuit applications. *IEEE Transactions Circuits and Systems I: Regular Papers*, 59(10), 2422–2431.
- Lopez, C., Carrasco, M., & Montero, C. (2015). A 16 Hz–160 kHz memristor emulator circuit. *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, 69(9), 1208–1219 .
- Lopez, C., Lopez, J., Carrasco, M., & Montero, C. (2014). A floating analog memristor emulator circuit. *IEEE Transactions On Circuits And Systems— II: Express Briefs*, 61(5), 309–313.
- Muthuswamy, B. (2010). Implementing memristor based chaotic circuits. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20(5), 1335-1350.
- Mutlu, R., & Karakulak, E. (2009a). Analog Çarpıcı Kullanılarak Yapılmış Lineer Sürüklenme Hızlı TiO₂ Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi. In *Electrical, Electronics and Computer Engineering (ELECO)*, (s. 380-384).
- Mutlu, R., & Karakulak, E. (2009b). Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*.
- Niu, D., Chen, Y., Xu, C., & Xie, Y. (2010). Impact of process variations on emerging memristor. *47th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, (s. Page(s): 877 – 882.).

- Olumodeji, O. A., & Gottardi, M. (2016). Emulating the Physical Properties of HP Memristor Using an Arduino and a Digital Potentiometer. In *Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, 12th Conference on (pp. 1-4), IEEE.
- Pershin, Y. V., & Di Ventra, M. (2010a). Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks. *Neural Networks*, vol. 23, p. 881.
- Pershin, Y. V., & Di Ventra, M. (2010b). Practical approach to programmable analog circuits with memristors. *IEEE Transactions Circuits and Systems I: Regular Papers*, 57(8), 1857–1864.
- Pershin, Y. v., Fontaine, S. L., & Ventra, M. D. (2008). Memristive model of amoeba's learning. *Physical Review E*, 80(2), 021926.
- Pershin, Y., Martinez-Rincon, J., & Di Ventra, M. (2010c). Memory circuit elements: from systems to applications. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, arXiv:1006.3598.
- Radwan, A. G., & Fouda, M. E. (2015). Memristor: Models, Types, and Applications. In *On The Mathematical Modeling of Memristor, Memcapacitor, and Meminductor* (pp. 231, 188 illus., 29 illus., XX). Springer.
- Shin, S., Kim, K., & Kang, S. M. (2010). Memristor Applications For Programmable Analog ICs. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 99, 1 – 1.
- Sozen, H., & Cam, U. (2015). New memristor emulator circuit using OTAs and CCIIs. *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, (s. DOI: 10.1109/ELECO.2015.7394456).
- Sozen, H., & Cam, U. (2016). Electronically tunable memristor emulator circuit. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 89(3), 655–663.
- Valsa, J., Biolek, D., & Biolek, Z. (2011). An analogue model of the memristor. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 24(4), 400–408.
- Vourkas, I., & Sirakoulis, G. (2016). Memristor Modeling. In *Memristor-Based Nanoelektronic Computing Circuits and Architectures* (pp. 241. 117 illus., 100 illus., XXV). Springer.
- Wey, T., & Benderli, S. (2009). Amplitude modulator circuit featuring TiO₂ memristor with linear dopant drift. *Electronics Letters*, Vol.: 45, Page(s): 1103 – 1104.
- Williams, S. (2008). How we found the missing memristor. *IEEE Spectrum*, 45(12), 28–35.
- Williams, S., Strukov, D. B., Snider, G. S., & Stewart, D. R. (2008). The missing memristor found. *Nature (London)*, vol. 453, pp. 80-83.

- Yang, J. J., Pickett, M. D., Li, X., Ohlberg, D. A., Stewart, D. R., & William, S. R. (2008). Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices. *Nature Nanotechnology*, 429-433.
- Yener, Ş., & Kuntman, H. (2012). CMOS DDCC Temelli Memristör Gerçeklemesi ve Kaotik Haberleşme Uygulaması. *ELECO Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*. Bursa.
- Yesil, A., Babacan, Y., & Kacar, F. (2014). A new DDCC based memristor emulator circuit and its applications. *Microelectronics Journal*, 45(3), 282–287.
- Yu, D., Chen, H., & Lu, H. (2013a). A meminductive circuit based on floating memristive emulator. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1692–1695.
- Yu, D., Chen, H., & Lu, H. (2013b). Design of a practical memcapacitor emulator without grounded restriction. *IEEE Transaction on Circuits and Systems- II, Express Briefs*, 60(4), 207–211.
- Yu, D., Lu, H. H., Fitch, L. A., & Liang, Y. (2014). A floating memristor emulator based relaxation oscillator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers*, 61(10), 2888–2896.
- Zakhidov, A. A., Jung, B., Slinker, J. D., Abruna, H. D., & Malliras, G. G. (2010). A light-emitting memristor. *Organic Electronics*, 11(1), 50-153 .

EK1 MEMRİSTÖR EMULATÖRÜ MATLAB™ SIMULINK® BLOK DİYAGRAMI



Şekil 5.1.1: Memristör Taklitçi Devre MATLAB Simulink Blok Diyagramı.

$$M(q) = \left(\frac{k_1 + \left[a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5^{-5} \left| \gamma^5 q(t)^5 \right| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 \left| \gamma^3 q(t)^3 \right| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 \left| \gamma q(t) \right| + R_0 \right] R_S (k_2 + k_3 + 1)}{R_S k_4 + \left[a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5^{-5} \left| \gamma^5 q(t)^5 \right| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 \left| \gamma^3 q(t)^3 \right| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 \left| \gamma q(t) \right| + R_0 \right] [k_5 - k_2 - k_3 - k_4]} \right) \quad (3.37)$$

$$v(t) = \left(\frac{k_1 + \left[a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5^{-5} \left| \gamma^5 q(t)^5 \right| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 \left| \gamma^3 q(t)^3 \right| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 \left| \gamma q(t) \right| + R_0 \right] R_S (k_2 + k_3 + 1)}{R_S k_4 + \left[a_6 \gamma^6 q(t)^6 + a_5^{-5} \left| \gamma^5 q(t)^5 \right| + a_4 \gamma^4 q(t)^4 + a_3 \left| \gamma^3 q(t)^3 \right| + a_2 \gamma^2 q(t)^2 + a_1 \left| \gamma q(t) \right| + R_0 \right] [k_5 - k_2 - k_3 - k_4]} \right) i(t) \quad (3.39)$$

[illegible]

```

%=====
%%      ~ Memristör Akım ve Geriliminin Zamana Göre Değişimi ~
plot(t,Vmem, 'r', 'LineWidth', lineWidth);
hold on;
grid on;
plot(t,Imem, 'g', 'LineWidth', lineWidth);
title('Memristör Gerilim-Akım Eğrileri', 'FontSize', fontSize);
xlabel('Zaman (ms)', 'FontSize', fontSize);
ylabel('V_m_e_m , I_m_e_m', 'FontSize', fontSize);
legend('Vmem','Imem');
%=====

%=====
%%      ~ Memristör Emulatorü Histerisis Eğrisi ~
plot(Vmem,Imem, 'b', 'LineWidth', lineWidth);
title('Memristör Histerisis Eğrisi', 'FontSize', fontSize);
xlabel('V_m_e_m', 'FontSize', fontSize);
ylabel('I_m_e_m', 'FontSize', fontSize);
%=====

%=====
%%      ~ Memristör Yükünün Zamana Göre Değişimi ~
plot(t,q,'LineWidth', lineWidth);
title('Memristör Yük-Zaman Eğrisi', 'FontSize', fontSize);
ylabel('Yük', 'FontSize', fontSize);
xlabel('Zaman (ms)', 'FontSize', fontSize);
%=====

%=====
%%      ~ Memristör Memristansının Zamana Göre Değişimi ~
plot(t,M,'LineWidth', lineWidth);
title('Memristör Memristans-Zaman Eğrisi', 'FontSize', fontSize);
ylabel('Memristans (ohm)', 'FontSize', fontSize);
xlabel('Zaman (ms)', 'FontSize', fontSize);
%=====

```

ÖZGEÇMİŞ

Fatih TULUMBACI, 16 Ağustos 1991’de Tekirdağ’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Tekirdağ İlköğretim Okulu’nda tamamladı. Lise eğitimini Tekirdağ Anadolu Teknik Lisesi, Elektrik-Elektronik Teknolojisi alanı, Görüntü ve Ses Sistemleri dalında okul birinciliği ile tamamladı. Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Elektronik Öğretmenliği programında yaptı. Ardından Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünü bitirdi. Halen Eylül 2015’te başladığı Yüksek Lisans eğitimine devam ediyor. Lisans eğitimi sırasında endüstri stajını iki dönem olarak TRT, Ankara Naklen Yayınlar ve Verici İşletmeleri’nde yaptı. Akademik gelişiminin yanı sıra kişisel gelişimine de önem veren, çeşitli görev ve etkinliklerde faaliyet gösteren Fatih TULUMBACI, Grafik ve Animasyon, Beden Dili, Etkili İletişim, Diksiyon gibi kurs ve seminerlere katıldı. İngilizce bilen TULUMBACI, karikatür çizmeyi, kitap okumayı, yüzmeyi seviyor ve bekar.