

**MEMRİSTÖR TABANLI VOLTAJ
REGÜLATÖRÜ DEVRELERİ**

Kutluhan Kürşad YAVUZ

Yüksek Lisans Tezi

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Reşat MUTLU

2019

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEMRİSTÖR TABANLI VOLTAJ REGÜLATÖRÜ DEVRELERİ

KUTLUHAN KÜRŞAD YAVUZ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. REŞAT MUTLU

TEKİRDAĞ – 2019

Her Hakkı Saklıdır

Doç. Dr. Reşat MUTLU danışmanlığında, Kutluhan Kürşad YAVUZ tarafından hazırlanan “Memristör Tabanlı Voltaj Regülatörü Devreleri” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

İmza :

Üye : Prof. Dr. Hafız ALİSOY

İmza :

Üye : Doç. Dr. Reşat MUTLU

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MEMRİSTÖR TABANLI VOLTAJ REGÜLATÖRÜ DEVRELERİ

Kutluhan Kürşad YAVUZ

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

Danışman: Doç. Dr. Reşat MUTLU

Seri ve paralel voltaj regülatörleri ayarlanabilir gerilim kaynağı yapımında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bir potansiyometre vasıtasıyla bazı voltaj regülatörlerinin çıkış gerilimi kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Memristör son yıllarda ortaya çıkan, doğrusal olmayan bir devre elemanıdır. Doyumda olmayan bir memristöre eşik gerilimi değerinin üzerinde bir gerilim uygulandığında, akımının zamana göre integraline bağlı olarak memristans olarak adlandırılan elektriksel direnç değeri değişmektedir. Yani memristör sahip olduğu direnç değeri elektronik olarak ayarlanabilen bir devre elemanıdır. Memristör devre elemanın, analog ve dijital birçok devrede yeni uygulama alanları bulacağı beklenilmektedir. Literatürde memristör tabanlı filtreler ve yükselticiler gibi analog uygulama konularında pek çok çalışmalar mevcuttur. Bununla birlikte, yapılan literatür taramasında, memristörün voltaj regülatörlerinde kullanımı hakkında bir çalışma olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, memristör tabanlı seri ve paralel voltaj regülatör topolojileri önerilmiş, memristör tabanlı bazı seri voltaj regülatörleri için memristör ile diğer devre elemanlarının parametreleri kullanılarak tasarım kriterleri verilmiş, ve bazı memristör tabanlı seri voltaj regülatörleri benzetimler kullanılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Memristör, Ayarlanabilir Voltaj Regülatörleri, Seri Voltaj Regülatörleri, Analog Uygulamalar

2019, 50 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

MEMRISTOR-BASED VOLTAGE REGULATORS

Kutluhan Kürşad YAVUZ

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

Supervisor : Assoc. Prof. Resat MUTLU

Serial and parallel voltage regulators are frequently used to make adjustable voltage sources. The output voltage of some voltage regulators can be easily adjusted by means of a potentiometer. Memristor is a nonlinear circuit element that has emerged in recent years. When a voltage exceeding its threshold voltage is applied to a memristor, which is not under saturation, its electrical resistance value, called as memristance, varies depending on the time integral of its current. In other words, a memristor is a circuit element whose electrical resistance is electronically adjustable. It is expected that the memristor circuit element will find new application areas in many analog and digital circuits. There are numerous studies available in the literature on analogue circuit applications such as memristor-based filters and amplifiers. However, to the best of our knowledge, in the literature review done, it was found that there is no study about the use of the memristor in voltage regulators. In this study, memristor-based series and parallel voltage regulator topologies are proposed, design criteria for some of the series memristor-based regulators are given using the parameters of the memristor and the other circuit elements used in the regulator circuit, and some serial voltage regulators are examined using simulations.

Keywords : Memristor, Adjustable Voltage Regulators, Series Voltage Regulators, Analog Applications

2019, 50 pages

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGE DİZİNİ.....	v
ŞEKİL DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. MEMRİSTÖRLER VE MEMRİSTİF SİSTEMLER.....	3
2.1. Memristör Nedir?	3
2.2. Chua' nın Memristör Modeline Dair Matematiksel İfadeler	5
2.3. HP Memristör Modeli.....	7
2.4. Memristör Histerezis (Lyscaous) Eğrisi	9
2.5. Eşik Gerilimli Memristör Modeli	10
2.6. Matlab Simulink Ortamında Memristör Modeli.....	12
2.6.1. Doğru polarma altında memristörde memristans değişimi	13
2.6.2. Ters polarma altında memristörde memristans değişimi	16
2.7. LTspice Programında Memristör Modellenmesi	18
2.7.1. LTspice programında memristörün eşik gerilimi altında sinyal analizi.....	19
2.7.2. LTspice programında memristörün eşik gerilimi üstünde sinyal analizi	20
3. GERİLİM REGÜLATÖRLERİ	22
3.1. Zener Diyotlu Gerilim Regülatörleri	22
3.2. Transistörlü Gerilim Regülatörleri	24
3.2.1. Transistörlü seri regülatör devresi.....	24
3.2.2. Transistörlü paralel regülatör devresi.....	25
3.3. Opamp Kullanılarak Yapılan Gerilim Regülatörleri	26
3.3.1. Opamp kullanılarak yapılan paralel gerilim regülatörü	26
3.3.2. Opamp kullanılarak yapılan seri gerilim regülatörü	1
3.4. Entegre (IC) Gerilim Regülatörleri	29
4. MEMRİSTÖR TABANLI GERİLİM REGÜLATÖRLERİ	31
4.1. Memristör Tabanlı Paralel Gerilim Regülatörü.....	32
4.2. Memristör Tabanlı Seri Gerilim Regülatörü	33
4.3. Memristör Tabanlı Seri Gerilim Regülatörleri Tasarım Kriterleri	35

4.4. MTSVR-A Devresi Tasarım Kriterleri.....	35
4.5. MTSVR-B Devresi Tasarım Kriterleri.....	37
4.6. MTSVR-C Devresi Kriterleri.....	38
4.7. Entegre (IC) Gerilim Regülatörleri.....	39
5. LTSPİCE PROGRAMINDA YAPILAN MEMRİSTÖR TABANLI SERİ GERİLİM REGÜLATÖRLERİ SİMÜLASYONLARI.....	40
5.1. MTSVR-A Voltaj Regülatörünün Eşik Gerilimi Altında LTspice Programında Yapılan Benzetimi.....	40
5.2. MTSVR-A Voltaj Regülatörü'nün Eşik Gerilimi Üzerinde Ltspice Programında Yapılan Benzetimi.....	43
6. SONUÇ.....	46
7. KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	50

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Eşik gerimli ve Biopak pencere fonksiyonuna sahip, pozitif DC gerilim uygulanarak benzetimi yapılan memristörün parametreleri	14
Çizelge 2.2. Eşik gerimli ve Biopak pencere fonksiyonuna sahip, negatif DC gerilim uygulanarak benzetimi yapılan memristörün parametreleri	16
Çizelge 2.3. LTspice modelinde kullanılan memristöre ait parametreler.....	19

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 2.1. Temel devre elemanları ile gerilim, akım, yük ve akı arasındaki ilişki	3
Şekil 2.2. Memristör Sembölü.....	4
Şekil 2.3. Memristörün eklenmesiyle oluşan temel devre elemanları ile gerilim, akım, yük ve akı arasındaki ilişki	4
Şekil 2.4. TiO ₂ memristörün HP laboratuvarlarında R.Stanley Williams tarafından alınan fotoğrafı (Williams ve ark. 2008)	5
Şekil 2.5. Memristör elektriksel devresi (Chua, 1971).....	5
Şekil 2.6 . HP memristör modelinin basitleştirilmiş eşdeğer devreli diyagramı	7
Şekil 2.7. a-) Chua ve Kang' ın tahmini histerisis eğrisi b-) Chua ve Kang'a göre mümkün olan memristör histerisis eğrisi c-) Williams'ın bulduğu doymamış memristörün histerisis eğrisi d-)Williams'ın bulduğu doyuma ulaşan memristörün histerisis eğrisi.....	10
Şekil 2.8. Eşik gerilimi üzerinde gerilim uygulanan memristörde memristans değişim grafiği	11
Şekil 2.9. Beş farklı p değeri için Biolek pencere fonksiyonu	12
Şekil 2.10. Eşik gerilimli, Biolek pencere fonksiyonuna sahip memristör simulink modeli ...	13
Şekil 2.11. Memristör memristansı $M(q)$ 'nun zamana göre değişimi	14
Şekil 2.12. Memristör yükü q 'nun zamana göre değişimi.....	15
Şekil 2.13. Memristör akımının zamana göre değişimi.....	15
Şekil 2.14. Mq memristansının zamana göre değişimi.....	17
Şekil 2.15. Memristör yük değerinin zamana göre değişimi.....	17
Şekil 2.16. Memristör akımının zamana göre değişimi.....	18
Şekil 2.17. LTspice programında memristör sembolü	18
Şekil 2.18. Gerilim kaynağı ile beslenen LTspice'ta modellenmiş memristör devresi.....	19
Şekil 2.19. Eşik gerilimi altında voltaj uygulanmış memristörün gerilimi, akımı ve memristansının zaman göre değişimi	20
Şekil 2.20. Eşik gerilimi altında gerilim uygulanmış memristörde akım ve voltaj histerisis eğrisi	20
Şekil 2.21. Eşik gerilimi üstünde voltaj uygulanmış memristörün gerilimi, akımı ve memristansının zaman göre değişimi	21
Şekil 2.22. Eşik gerilimi üstünde gerilim uygulanmış memristörde akım ve voltaj histerisis eğrisi	21
Şekil 3.1. Gerilim regülatörü blok diyagramı.....	22
Şekil 3.2. Zener diyot ile yapılmış temel regülatör devresi.....	23
Şekil 3.3. Zener diyot ve transistör ile yapılmış seri regülatör devresi	24
Şekil 3.4. Zener diyot ve transistör ile yapılmış paralel regülatör devresi	25
Şekil 3.5. Opampli paralel regülatör devresi	26
Şekil 3.6. Opampli seri regülatör devresi	1
Şekil 3.7. 78xx regülatör devresi	29
Şekil 3.8. LM317 ile gerçekleştirilmiş ayarlı regülatör devresi	30
Şekil 4.1. Memristansı ayarlanabilir memristör tabanlı seri regülatör devresi.....	31
Şekil 4.2. Paralel gerilim regülatörü devresinde R_1 direnci yerine $R(x)$ memristörü yerleştirilerek elde edilen memristör tabanlı paralel gerilim regülatörü devresi ...	32
Şekil 4.3. Paralel gerilim regülatörü devresinde R_2 direncini yerine $R(x)$ memristörü yerleştirilerek elde edilen memristör tabanlı paralel gerilim regülatörü devresi ...	32

Şekil 4.4. Paralel gerilim regülatörü devresinde R_1 ve R_2 dirençleri yerine $R1(x1)$ ve $R2(x2)$ memristörlerinin yerleştirilmesiyle elde edilen memristör tabanlı paralel gerilim regülatörü devresi	33
Şekil 4.5. MTSVR-A	34
Şekil 4.6. MTSVR-B	34
Şekil 4.7. MTSVR-C	35
Şekil 4.8. Memristör tabanlı LM317 ile yapılmış ayarlanabilir regülatör devresi	39
Şekil 5.1. Eşik gerilimi altında MTSVR-A devresinin LTspice benzetimi.....	40
Şekil 5.2.Eşik gerilimi altında MTSVR-A devresinin zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci	41
Şekil 5.3. Şekil 5.2'nin büyütülmüş görüntüsü a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c)Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci	41
Şekil 5.4. Roff memristans değerinde Şekil 5.1. devresi simüle edildiğinde zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci.....	42
Şekil 5.5. Ron memristans değerinde Şekil 5.1. devresi simüle edildiğinde zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d)Memristör Direnci.....	43
Şekil 5.6. Memristör geriliminin, eşik gerilimi üzerinde gerilime sahip olması durumu için kullanılan MTSVR-A devresi LTspice benzetimi	44
Şekil 5.7. Şekil 5.6 'da ki MTSVR-A devresi için zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci	44
Şekil 5.8. Şekil 5.6 'da ki devredeki memristörün ters bağlanmasıyla elde edilen, memristör geriliminin, eşik gerilimi üzerinde gerilime sahip olması durumu için MTSVR-A devresi LTspice benzetimi	45
Şekil 5.9. Şekil 5.8 'de verilen MTSVR-A devresi için zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	:	Alternatif Akım
DC	:	Doğru Akım
MTSVR	:	Memristör Tabanlı Seri Voltaj Regülatörü
Opamp	:	İşlevsel Yükselteç
$M_{(q)}$:	Memristör memristans direnci
W	:	Memristör katkılı bölge uzunluğu
R_{ON}	:	En küçük memristör direnç değeri
R_{OFF}	:	En büyük memristör direnç değeri
D	:	Memristör TiO_2 alanı uzunluğu
q	:	Elektrik yükü
TiO_2	:	Titanyumdioksit
V	:	Gerilim (Volt)
V_i	:	Giriş gerilimi
V_{out}	:	Çıkış gerilimi
V_X	:	Memristör gerilimi
V_{TH}	:	Memristör eşik gerilimi
i	:	Akım
R	:	Direnç
R_X	:	Memristör direnci
T	:	Transistör
φ	:	Akı
p	:	Biölek fonksiyonu katsayısı

ÖNSÖZ

Bu çalışma süresince değerli bilgilerini benimle paylaşarak süreci kolaylaştıran, danışmanlığın daha da ötesinde benim için hayat koçu olan, bana yeni ufuklar kazandıran değerli hocam Doç. Dr. Reşat MUTLU' ya teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Yüksek lisans eğitimi boyunca kapılarını hep açık tutan, samimi bir biçimde emek veren tüm hocalarıma teker teker teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu süreçte bana hep destek veren, zorlukları benimle göğüsleyen, hayatımın her evresinde bana destek olan sevgili eşim en büyük şansım Nilgün ÖZEBİL YAVUZ' a, sabırla yolumu gözleyen birlikte geçirebileceğimiz zamanlardan feragat eden sevgili kızım İnci YAVUZ' a ve beni bu günlere sevgi ve saygı kelimelerinin anlamlarını bilecek şekilde yetiştirerek getiren ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler.

Mayıs 2019

Kutluhan Kürşad YAVUZ
(Elektronik ve Haberleşme Mühendisi)

1. GİRİŞ

Memristör, Dr. Chua tarafından 1971 yılında yayınladığı “Memristör – Kayıp Devre Elemanı” isimli makalesinde varlığı teorik olarak iddia edilen bir devre elemanıdır. Dr. Chua bu devre elemanını henüz keşfedilmediği için kayıp devre elemanı olduğunu, yüke bağımlı bir elektriksel direnci olduğundan dolayı hafızası olduğunu iddia etmiş ve İngilizce direnç (resistor) ve hafıza (memory) kelimelerini birleştirerek onu memristör diye isimlendirmiştir. Bu devre elemanı dilimize hafızalı direnç ya da memristör diye geçmiştir (Mutlu 2009). Dr. Chua bu devre elemanının nonlinear bir devre elemanı olduğunu, yüke yani akımın integraline bağlı bir direnci olduğunu ve güç tükettiğini göstermiştir. Bu elemanın elektriksel direncine memristans adını vermiştir (Chua 1971). Hâlihazırda memristör gibi davranan memristif sistemlerin varlığını iddia etmiştir (Chua 1971). 1976’da çalışma arkadaşı Kang ile birlikte Memristif sistemlerin denklemlerini vermiş, halojen lambaların ve termistörlerin memristif sistem olduğunu, insan nöronunun memristif sistem kullanarak modellenebileceğini göstermiştir (Chua ve Kang 1976).

Memristör gibi davranan bir devre elemanı nerdeyse 37 sene bulunamamıştır. 2008’de Stanley Williams önderliğindeki bir HP araştırma timi memristör gibi davranan, platinyum kontaklar arasına sıkıştırılmış bir ince film titanyum dioksit bulmuşlardır (Williams ve ark. 2008). Bu gelişme memristörleri tüm dünyada popüler bir araştırma konusu yapmış ve birçok makale yayınlanmıştır (Strukov ve ark. 2008, Joglekar ve Wolf 2009, Kavehei ve ark. 2010, Vongehr ve ark. 2015). Bazı araştırmacılar benzetimler kullanarak memristörün kullanımını ve özelliklerini incelemekteler (Zaplatilek 2011, Biolek 2009, Shahar 2013). Bazı araştırmalar da memristörün üretimi üzerine yapılmaktadır. Memristör modellemesi üzerine de yapılmış çok sayıda araştırma mevcuttur. Memristörün analog elektrik devresi uygulamaları olduğu gibi sayısal elektrik devresi uygulamaları da mevcuttur. Analog devrelerdeki başlıca uygulamaları şu an için filtreler (Driscoll ve ark. 2010, Ascoli ve ark. 2013, Chew ve Li 2012, Yener ve ark. 2014), kuvvetlendiriciler (Wey ve Jemison 2011), modülatör devreleri (Wey ve Benderli, 2009), kaos jeneratörleri (Muthuswamy 2010), anahtarlama devreleri (Yi ve ark. 2011), osilatörler (Mutlu, 2015, Talukdar ve ark. 2011, Mutlu ve ark. 2014) olarak gözükmektedirler. Sayısal uygulamalarına örnek olarak bilgisayara hafızaları ve flip flop devreleri verilebilir (Pershin ve Di Ventra 2010, Karakulak ve ark. 2016). İster analog, ister dijital devreler olsun tüm elektronik devre ve cihazlar çalışmak için bir besleme gerilimine ihtiyaç duyarlar. Elektronik devre ve cihazların sağlıklı çalışabilmesi için besleme gerilimi değerinin kabul

edilebilir bir aralıkta olması gerekir. Bu sebeple elektronik devrelerin beslenmesinde gerilim regülatörleri kullanılmaktadır. Regülatörler, çıkışında ki yükün gücünün değişmesine bakmaksızın, girişine uygulanan AC ya da DC gerilimi düzenleyen (hemen hemen sabitleyen) devrelerdir. Zener diyot ile basit regülatörler yapmak mümkündür. Ayrıca zener diyot transistör ve Opamp kullanılarak daha yüksek akım ve gerilimlerde çalışan regülatörler üretilebilmektedir. Bu devreler yükün transistöre seri ya da paralel bağlanması durumuna göre seri ve paralel regülatörler olarak adlandırılırlar. Regülatör devreleri çoğunlukla zener diyot, transistör, Opamp ve özel olarak üretilen regülatör entegreleri ile yapılmaktadır. Genellikle, 78xx, 79xx, LM serisi regülatör entegreleri gerilim regülatörü devrelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Tüm bu regülatör devrelerinde, bir potansiyometre yardımıyla çıkış gerilimi ayarlanabilir regülatörler oluşturulabilmektedir.

Yapılan literatür taramasında, memristör kullanan hiçbir gerilim regülatörü uygulaması bulunamamıştır. Bu çalışmada literatürde bir ilk olarak memristör tabanlı gerilim regülatörleri devreleri önerilmiştir. Memristör, doyma noktalarında değilse (o yöne doğru gecen akıma göre direnci alabileceği minimum ya da maksimum değerini almamışsa), memristöre eşik gerilimi üzerinde bir gerilim uygulandığında içinden geçen akım ile memristansının yani elektriksel direnç değerinin ayarlanabilmesi mümkündür. Memristör eşik gerilimine sahip olması ve direnç değerinin ayarlanabilir olması özelliklerinden dolayı potansiyometre gibi kullanılabilir. Bu sayede memristör tabanlı ayarlanabilir regülatör devreleri tasarımı yapılabilir. Bu çalışmada memristör tabanlı gerilim regülatörleri için çeşitli topolojiler ve çalışma prensipleri verilmiş ve benzetimler ile eşik gerilimi altı ve üstünde davranışları gösterilmiştir.

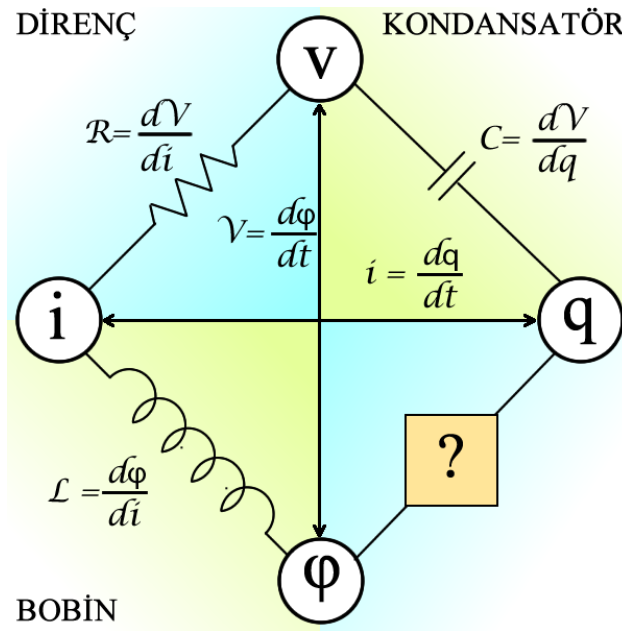
Bu tez şu takip eden şekilde düzenlenmiştir. İkinci kısımda memristör elemanı kısaca özetlenmiş ve bazı memristör blog diyagramları verilmiştir. Üçüncü kısımda en çok kullanılan gerilim regülatörleri hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü kısımda memristör tabanlı gerilim regülatörleri tanıtılmış ve tasarım kriterleri verilmiştir. Beşinci bölümde memristör tabanlı seri voltaj regülatörlerin eşik gerilimi altı ve üstü gerilimler için benzetimleri yapılmıştır. Tez sonuç kısmı ile bitirilmiştir.

2.MEMRİSTÖRLER VE MEMRİSTİF SİSTEMLER

Bu bölümde memristörün, yapısı, akım, yük, gerilim, memristör direnci olan memristans arasındaki matematiksel ilişkiler verilmiştir. Ayrıca Dr. Chua ve HP Firmasının memristör modelleri ile histerezis eğrileri, Matlab™ programının Simulink™ uygulamasında elde edilen memristör blok diyagramları verilmiştir. Bir memristörün Simulink ve LTspice programlarında benzetimleri yapılarak, elde edilen akım, gerilim, memristör direnci eğrileri verilmiştir.

2.1. Memristör Nedir?

Direnç, kondansatör ve bobin temel devre elemanları olarak bilinmektedir. Temel devre elemanlarını içeren bir elektrik devresinde gerilim, akım, akı ve yük değişkenleriyle devre elemanları arasındaki ilişkileri Şekil 2.1.1' de görüldüğü üzere açıklanabilmektedir.



Şekil 2.1. Temel devre elemanları ile gerilim, akım, yük ve akı arasındaki ilişki

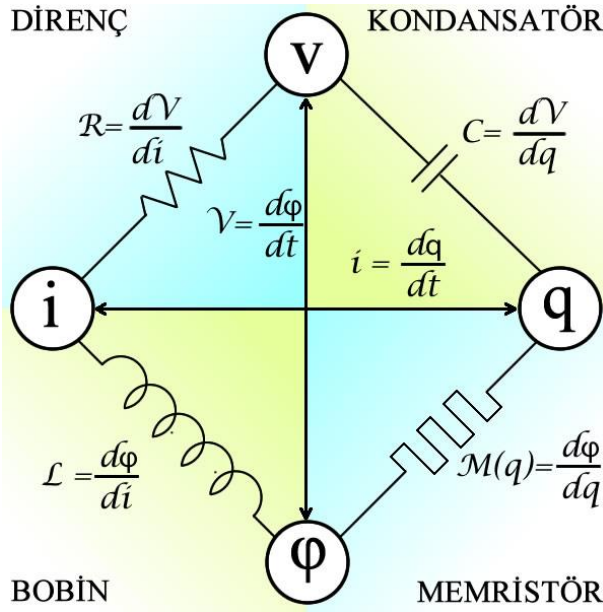
Bu şekilde görüldüğü üzere akı (ϕ) ve elektrik yükü (q) arasındaki ilişkiyi açıklayan bir ifade yoktur. 1971 yılında bu eksikliği fark eden Dr. Leon Chua burada eksik devre elemanının olduğu iddiasında bulundu ve bu elemanı memristör (hafıza ve direnç kelimelerinin birleşimi) diye isimlendirdi. Memristör dilimize hafızalı direnç diye çevrilebilir.

Chua'ya göre memristör doğrusal olmayan bir dirence sahipti ve değeri yüke bağlı olarak değişiyordu. Chua memristörün elektriksel direnç değerini memristans (M) olarak adlandırdı. Memristans değeri yüke bağlı olarak değişiyor ve akım kesildiğinde bu değeri kaldığı değerde koruyabiliyordu. Chua Memristör sayesinde Şekil 0.'deki akı ve yük arasında

ki boşluğu doldurmuş oldu ve Memristör'ü Şekil 2.2'de görülen sembol ile gösterdi (Chua, 1971). Memristörün eklenmesi ile oluşan temel devre elemanları ile gerilim, akım, yük ve akı arasındaki ilişki Şekil 2.3'te görülebilir.

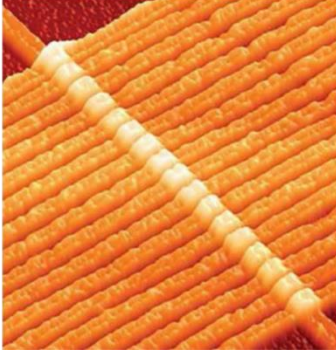


Şekil 2.2. Memristör Sembolü



Şekil 2.3. Memristörün eklenmesiyle oluşan temel devre elemanları ile gerilim, akım, yük ve akı arasındaki ilişki

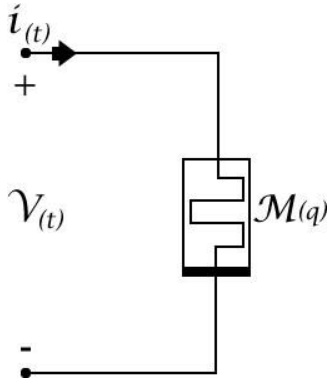
Chua, memristörün dördüncü temel devre elmanı olduğunu söyledi ve memristörün akı bağımlı olarak modellenebileceğini de gösterdi. Teorik olarak ortaya atılan memristör araştırmacılar tarafından çok ilgi görmedi ve üzerinde fazla bir çalışma yapılmadı. 2008 yılında Stanley Williams ve yönettiği araştırma ekibi HP laboratuvarlarında, Platinyum kontaklar arasına TiO₂ konularak nano boyutlarda memristör ürettiklerini duyurdular (Williams ve ark. 2008). Şekil 2.4.'te HP'nin ürettiği iyonik memristöre ait fotoğraf görülmektedir. Memristörün fiziksek olarak gerçekleştirilmesi bilim dünyasında yeni bir heyecana sebep olmuş ve memristör üzerindeki çalışmalar hızlıca artmıştır. Aynı zamanda memristörün, temel devre elemanları olarak bobin, kondansatör ve direnç ile beraber temel devre elemanları arasında yer almasını sağlamıştır.



Şekil 2.4. TiO2 memristörün HP laboratuvarlarında R.Stanley Williams tarafından alınan fotoğrafı (Williams ve ark. 2008)

2.2. Chua' nın Memristör Modeline Dair Matematiksel İfadeler

Chua, memristörün direnç değerini memristans olarak adlandırmış ve memristans değerinin elektriksel yüke bağlı olmasından dolayı değişen memristans/elektriksel direnç değerini $M(q)$ olarak ifade etmiştir. $V(t)$ gerilimi ile beslenen bir memristörün elektriksel devresi Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Memristör elektriksel devresi (Chua, 1971)

Memristörün rezistif özelliğinden dolayı bu elektriksel devreden çıkarımla memristans değeri,

$$M(q) = \frac{V(t)}{i(t)} \quad (2.1)$$

$$V(t) = M(q)i(t) \quad (2.2)$$

Burada, $v(t)$ memristör gerilimi ve $i(t)$ memristör akımıdır. Memristörün yükü, memristör akımının zamana göre integrali alınarak bulunur,

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

ve memristör akısı da, memristör geriliminin zamana göre integrali alınarak bulunur,

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

τ integral ara değişkenidir (İngilizce’de dummy variable diye adlandırılmaktadır). Formül 2.3 ve 2.4 ‘ten faydalanarak, memristans direnci elektriksel akı φ ve elektriksel yük q cinsinden yazılabilir,

$$M(q) = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{\frac{d\varphi}{dt}}{\frac{dq}{dt}} = \frac{d\varphi}{dq} \quad (2.5)$$

Formül 2.5’te görüldüğü üzere memristör yükü akımın integraline bağlıdır. Memristörün sahip olduğu yük miktarı değiştikçe, $M(q)$ memristans değeri de değişmektedir. Memristansın yüke bağımlı özelliği memristörü nonlineer bir eleman yapmaktadır. Bir memristöre bir AC akım uygulandığında, gerilimi ve memristansı da periyodik olmaktadır. Bir memristöre çok yüksek frekanslı bir AC akım uygulandığında, memristansın ortalama değeri fazla değişmeyeceğinden memristör, doğrusal bir direnç gibi davranmaya başlamaktadır. Formül 2.3’te görüleceği üzere memristörde bir akım geçişi olmadığında yük değişimi gerçekleşmeyeceğinden (Bu integralin değeri değişmeyeceğinden) $M(q)$ memristans değeri değişmeyecektir. Bir memristör bu özelliğinden dolayı hafızalı bir devre elemanı olarak davranmaktadır. Memristörün hafızası elektriksel yükü q ’ya ya da memristansı $M(q)$ ’ya bağlıdır.

Hafızalı bir direnç özelliği gösteren memristör aynı zamanda bir direnç gibi güç harcamaktadır (Chua 1971) Harcadığı güç şu şekilde ifade edilir,

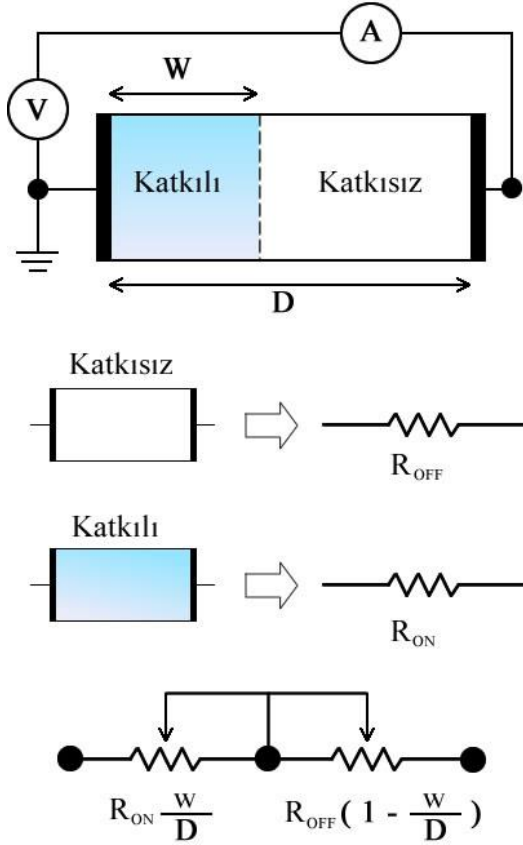
$$P(t) = V(t)i(t) \quad (2.6)$$

$$P(t) = M(q)i^2(t) \quad (2.7)$$

2.3. HP Memristör Modeli

2008 yılında Stanley Williams önderliğinde ki araştırma ekibi “Kayıp Memristör Bulundu” makaleleri ile HP laboratuvarlarında fiziksel olarak memristörün elde edildiğini duyurdular (Williams ve ark. 2008). HP'nin memristörü nano boyutlarda üretilen platinyum kontaklar arasına sıkıştırılmış TiO_2 bir ince film den oluşmaktaydı. Saf haldeki TiO_2 direnci yüksek bir madde olup, oksijen katkısı ile bu direnç değeri düşürülebilmektedir. Bu özelliği sayesinde düşük ve yüksek iki farklı direnç noktasına sahip olabilmekte ve bu değer aralığında bir direnç değeri alabilmektedir.

Şekil 2.6' de verilen HP memristör modeli incelenerek, HP memristans değerinin değişimi daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 2.6 . HP memristör modelinin basitleştirilmiş eşdeğer devreli diyagramı

R_{OFF} , memristörün ince film bölgesinin tümüyle katkısız olduğu durum için sahip olduğu direnç değeridir. Diğer bir deyişle memristörün alabileceği en yüksek memristans değeridir. R_{ON} , memristörün ince film bölgesinin tümüyle katkılı olduğu durum için direnç değeridir. R_{ON} memristörün alabileceği en düşük memristans değeridir. Memristörün yük miktarı arttıkça

katkılanmış bölge uzunluğu artarak ince film bölgesinin toplam memristans değerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple memristörün ince film bölgesinin tümüyle katkı olduğu noktada memristans doymadadır ve bu noktada memristans değeri en düşük değerini alırken yükü maksimum değerini almaktadır.

D memristörün ince film bölgesinin (TiO_x bölgesinin) toplam uzunluğudur. w memristörün katkılanmış ince film bölgesinin (TiO_2 bölgesinin) toplam uzunluğudur. Şekil 2.3.1 'de görülebildiği üzere memristör aslında katkılanmış ve katkılanmamış bölgelerin seri bağlanmasından yani iki seri dirençten oluşan bir elemandır. Memristörden akım geçirildiğinde katkılı bölge uzunluğu w artmaya başlar, bu durum $w=D$ olana kadar devam eder ve bu durumda $w/D=1$ olur, toplam memristans en düşük değeri olan R_{ON} değerine eşit olur. Katkısız bölge tam uzunluğa ulaştığında, katkılı bölge uzunluğu $w=0$ olur ve $w/D=0$ olur ve bu durumda memristans değeri en yüksek değerine olan R_{OFF} değerine gelir. Bu durumda memristör direnci matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir;

$$R(w) = \left(R_{ON} \frac{w(t)}{D} + R_{OFF} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) \quad (2.8)$$

HP Memristör modelinden, uygulanan akım ile katkılı bölgenin uzunluğunun değişim hızı (dw/dt) zamana göre şu şekilde ifade edilebilir;

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} i(t) \quad (2.9)$$

Memristörün içindeki oksijen atomlarının hareketliliği (mobilitisi) μ_v ile gösterilir. Bu katsayı memristörün yapısına göre değişiklik gösterir.

Denklem 2.9'un zamana göre integrali alınır, katkılanmış bölge uzunluğu,

$$w(t) = \mu_v \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (2.10)$$

Olarak elde edilir. $R_{ON} \ll R_{OFF}$ olduğunu varsayarak, denklem (2.10)'ı denklem (2.8)'de yerine koyduğumuzda, memristansın yüke bağlı değişimi edilir,

$$M(q) = R_{OFF} \left(1 - \frac{\mu_v R_{ON}}{D^2} q(t) \right) \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)' den anlaşılacağı üzere memristörün sıfır yük anındaki memristansı $M_0 = R_{OFF}$ olur. Memristörden geçen akımın integraline bağlı olarak memristörün yükü değişmektedir. Memristans değeri yüke bağlı olarak, şu şekilde de yazılabilir,

$$M(q) = M_0 - Kq(t) \quad (2.12)$$

Memristör yük değeri doyum (q_{sat}) değerine ulaştığında $M(q) = M_{sat} = R_{ON}$ olacaktır.

Memristör yükü ve memristans değişimini şu şekilde ifade edilebilir:

$$0 < q < q_{sat} \quad (2.13)$$

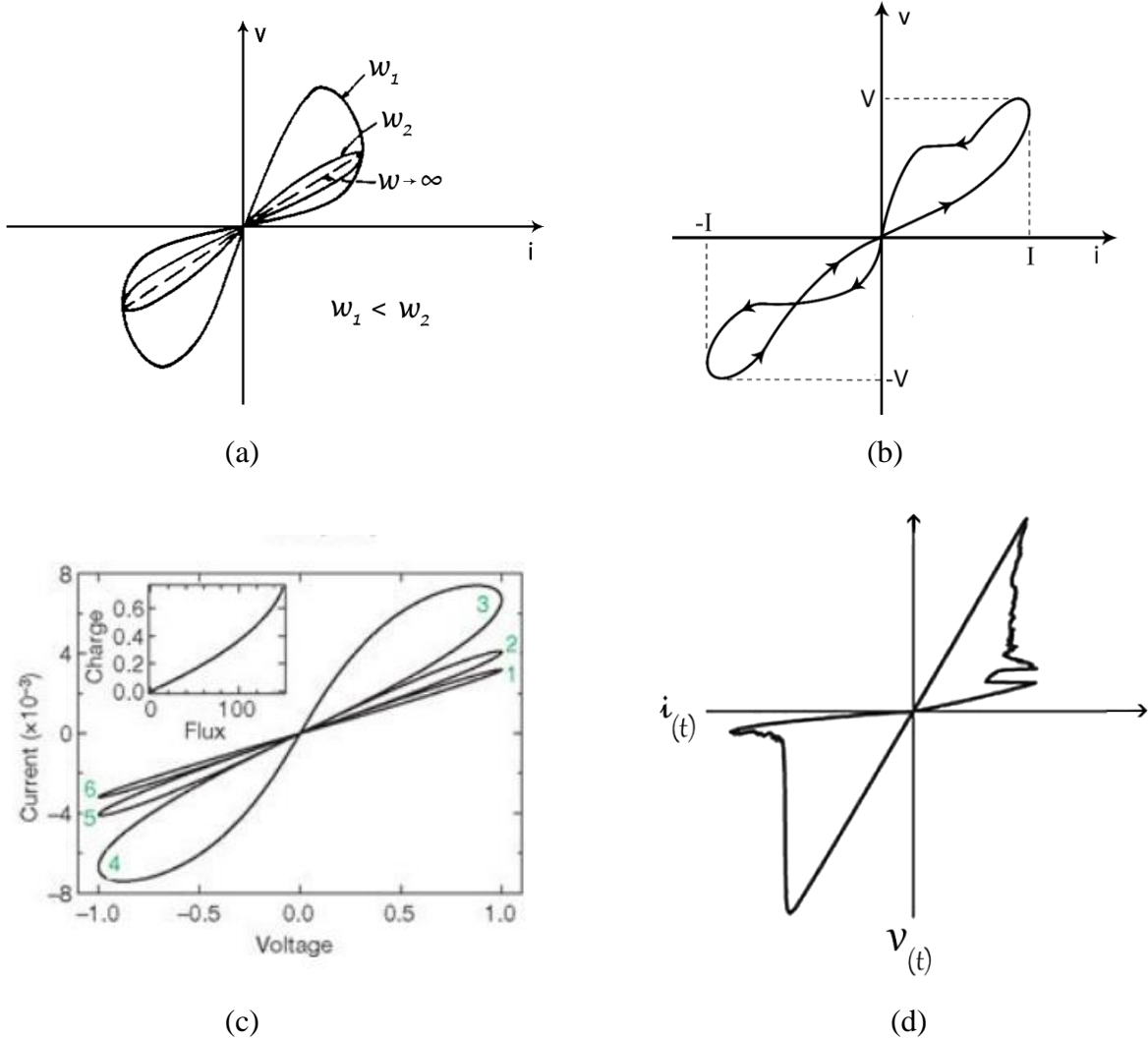
$$M(q) = \begin{cases} M_0 - Kq & 0 < q < q_{sat} \\ M_0 - Kq_{sat} & i \geq 0 \text{ ve } q = q_{sat} \\ M_0 & i < 0 \text{ ve } q = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Burada $M(q)$ yüke bağlı olarak memristörün memristansını, M_0 maksimum memristans veya sıfır yük memristansını, K memristörün yük katsayısını ve q ise memristörün anlık yükünü ifade etmektedir.

2.4. Memristör Histerezis (Lyscaous) Eğrisi

Chua ve öğrencisi Kang yazdıkları makalede, memristöre benzeyen sistemleri memristif sistemler olarak adlandırmış ve Hodgkin-Huxley sinir sistemi, termistörler ile gaz deşarj lambaları gibi birçok sistemin memristöre benzer denklemler kullanarak modellenebileceğini çalışmalarında gösterdiler ve buna benzer sistemleri memristif sistemler olarak isimlendirdiler. Aynı zamanda memristif sistemleri tanımlayan denklemleri verdiler (Chua ve Kang 1976). Bu yayınlarında ayrıca ilk defa AC sinyal uygulanan bir memristöre ait akım-gerilim histerezis eğrisini paylaştılar. (Şekil 2.4.1-a), Taylor Serisi ve Kutupsal Fonksiyonlar Kullanarak memristör histerezis eğrisinin açıklanabileceği Reşat Mutlu tarafından gösterildi (Mutlu 2010). Şekil 2.4.1-a'da görülen, Chua ve Kang verdikleri tahmini histerezis eğrisini yorumlayarak frekansın (ω) artmasıyla eğrinin doğrusallaştığını iddia ettiler. Chua ve Kang' a göre her sıfırdan geçen çimdiklenmiş histerezis eğrisi mümkün değildir. Mümkün olan memristör histerezis eğrisi Şekil 2.4.1-b 'de görülmektedir (Chua ve Kang, 1976). Williams ve ekibinin buldukları memristörün teorik histerezis eğrisi Şekil 2.4-c'de görüldüğü gibi Chua'nın tahmini eğrisine benzemektedir. Williams ve ark. Chua'nın teorilerine ek olarak buldukları memristörün bir tür doyma mekanizmasına sahip olduğunu ve doyuma gittikten sonra (R_{OFF} veya R_{ON} değerine ulaştığında) memristörün sabit/doğrusal bir direnç gibi çalıştığını

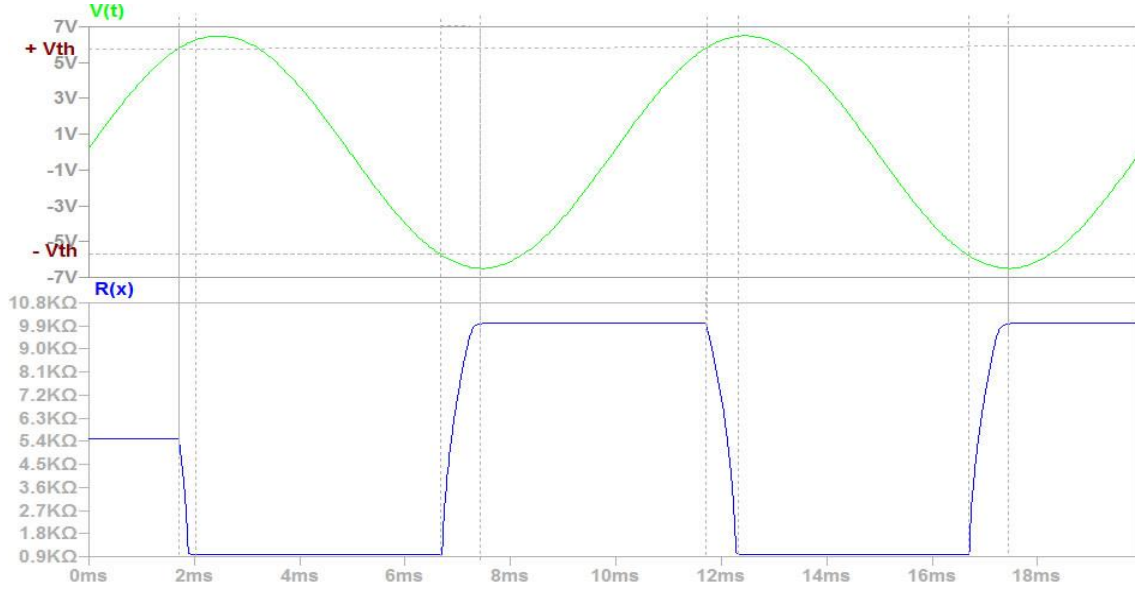
buldular. TiO_2 memristörün deneysel doyum noktasında histerisis eğrisi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. a-) Chua ve Kang’ın tahmini histerisis eğrisi b-) Chua ve Kang’a göre mümkün olan memristör histerisis eğrisi c-) Williams'ın bulunduğu doymamış memristörün histerisis eğrisi d-)Williams'ın bulunduğu doyuma ulaşan memristörün histerisis eğrisi

2.5. Eşik Gerilimli Memristör Modeli

Bazı memristörlerin simetrik veya asimetrik eşik gerilimine sahip olduğu konusundan çeşitli çalışmalarda bahsedilmiştir (Pershin ve Di Ventra, 2010)(Kvatinsky ve ark. 2013). Bu modellerde memristöre uygulanan gerilim değeri eşik gerilimi aşmadığı sürece memristans değerinin değişmemektedir. Memristör gerilimi, eşik gerilim değerini aştığında Şekil 2.8’de görüldüğü üzere $M(q)$ memristans değeri değişmeye başlar (Mutlu ve ark. 2016) (Yi ve Perner 2011) (Biölek ve ark. 2009) (Joglekar ve ark. 2009).



Şekil 2.8. Eşik gerilimi üzerinde gerilim uygulanan memristörde memristans değişim grafiği

Biolek memristör modelinde memristör direnci yani memristansı $R(x)$ ile ifade edilir. Memristans değeri x durum değişkenine ya da q yük miktarına bağlıdır. $R_{ON} \leq R(x) \leq R_{OFF}$ olmak üzere memristörün uçsal denklemleri şu şekilde yazılabilir,

$$V_m(t) = R(x) i_m(t) \quad (2.15)$$

Bu çalışmada da simetrik eşik gerilimine sahip, doğrusal olmayan iyon sürüklenme hızlı memristörler referans alınmıştır (Biolek ve ark. 2009). HP memristör modelinde oksijen iyonlarının hızı sabit kabul edilmektedir. Biolek ve ark.'ları oksijen iyonlarının hareket hızlarının sabit olmadığını, doyumdaki bir memristörde iyonların hareket hızının ve ince film sınırlarına yaklaştıkça azaldığını göstermişlerdir. Bunu akıma bağlı bir pencere fonksiyonu olarak vermişlerdir (Biolek ve ark. 2009). Biolek pencere fonksiyonu sayesinde iyon sürüklenme hızları parametreler kullanarak farklı durumlar ve akım yönleri için modellenilebilir. V_{TH} eşik gerilimi ve $f(x, i)$ pencere fonksiyonu olmak üzere, simetrik eşik gerilimi için, x memristör durum değişkeninin zamana göre değişim hızı,

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} \frac{\mu_v \cdot i_m(t) \cdot R_{ON}}{D^2} f(x, i) & , \quad V_{TH} \leq V(t) \\ 0 & , \quad -V_{TH} \leq V < V_{TH} \\ \frac{\mu_v \cdot i_m(t) \cdot R_{ON}}{D^2} f(x, i) & , \quad V(t) < -V_{TH} \end{cases} \quad (2.16)$$

Olarak verilmektedir. Denklemde verilen durum değişkeni x , memristörün katkılı uzunluğunun toplam uzunluğa oranını ifade etmektedir,

$$x = \frac{w}{D} \quad (2.17)$$

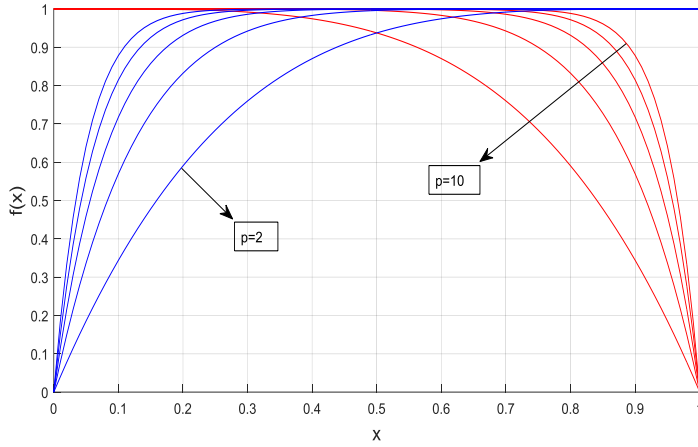
Katkısız durumda $w=0$, katkılı durumu doyuma ulaştığında $w=D$ olacağından dolayı x durum değişkeni 0-1 arası bir değer alabilir. Memristans değerini x durum değişkeni cinsinden ifade edilirse,

$$R(x) = R_{OFF} - (R_{OFF} - R_{ON})x \quad (2.18)$$

olur. $f(x, i)$ pencere fonksiyonu hem x durum değişkenine hem de memristör akımına bağlıdır ve denklemini şu şekildedir,

$$f(x, i) = 1 - (x - \text{stp}(-i))^{2p} \quad (2.19)$$

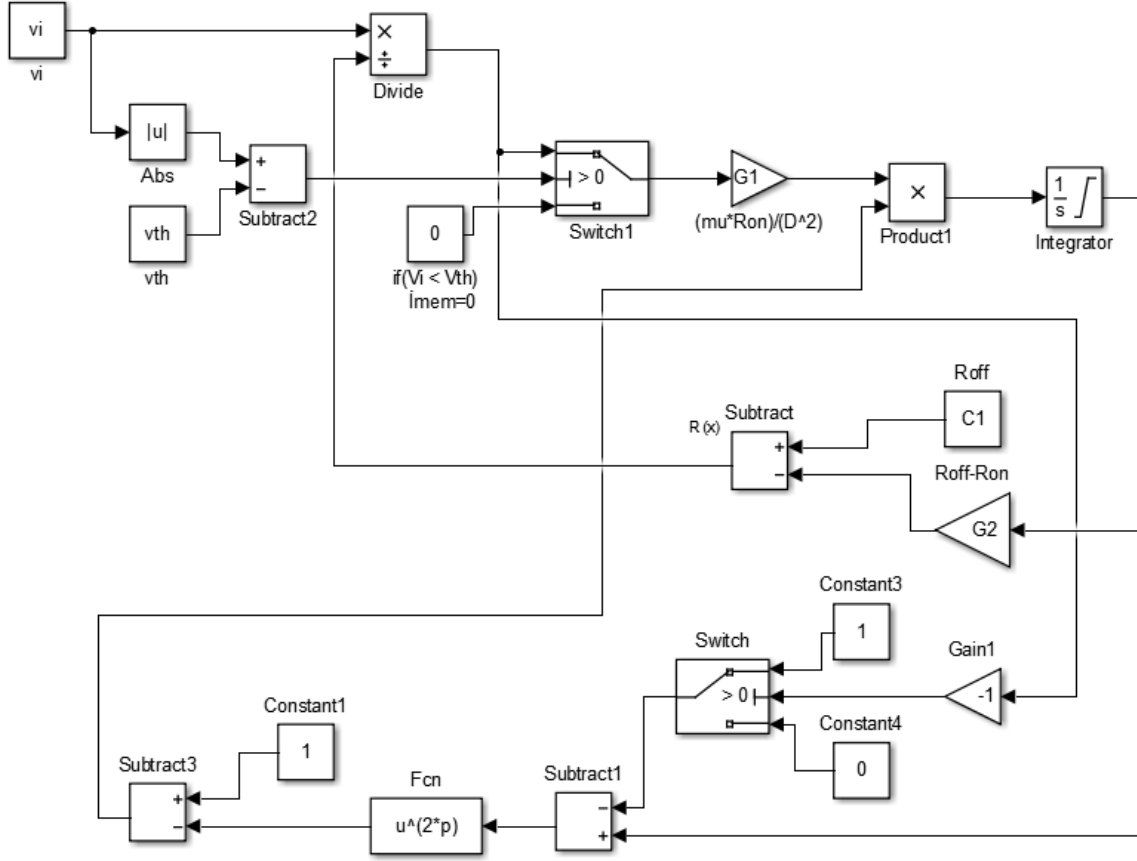
Bu denklemde p , pencere fonksiyonunun kuvvet sabitidir ve $\text{stp}(\)$ birim basamak fonksiyonudur. Biölek pencere fonksiyonu, 5 farklı p değeri için Şekil 2.5.2’de çizdirilmiştir.



Şekil 2.9. Beş farklı p değeri için Biölek pencere fonksiyonu

2.6. Matlab Simulink Ortamında Memristör Modeli

Bu bölümde, memristörün Matlab’ın Simulink uygulamasında oluşturulmuş eşik gerilimli ve Biölek pencere fonksiyonuna sahip modeli verilmiştir. Yapılan memristör Blok Diyagramı Şekil 2.10.’de verilmiştir.



Şekil 2.10. Eşik gerilimli, Biolek pencere fonksiyonuna sahip memristör simulink modeli

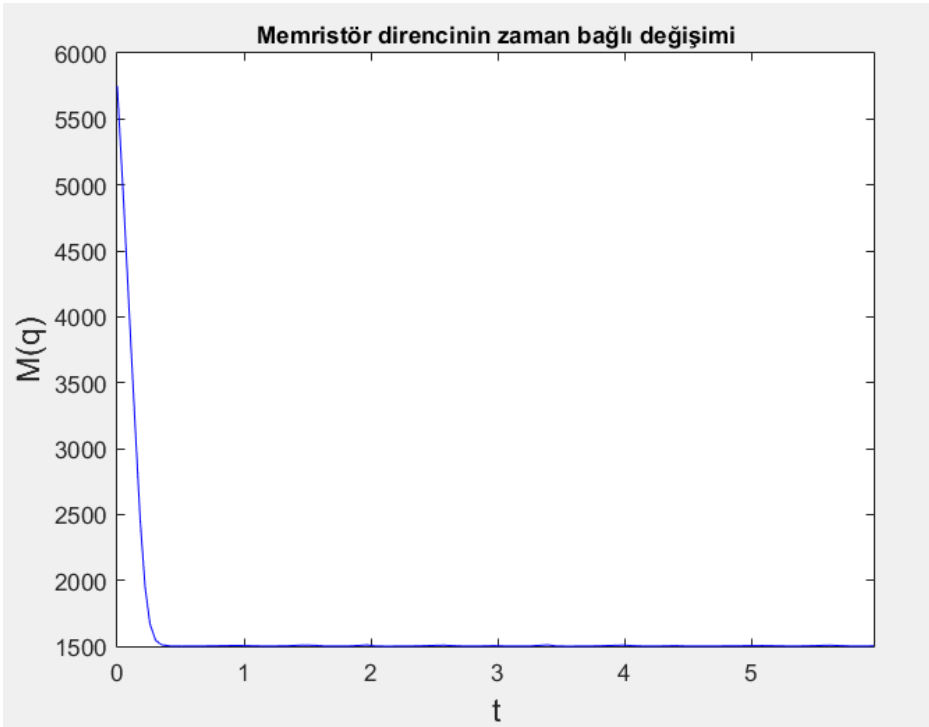
Şekil 2.6.' da görülen Memristör modelinin, V_i giriş geriliminin pozitif ve negatif olarak V_{th} eşik geriliminden büyük olması durumları için ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Takip eden kısımlarda Eşik gerilimine sahip bu memristörde memristans değerinin değişimi Simulink paket programı kullanarak incelenecektir.

2.6.1. Doğru polarma altında memristörde memristans değişimi

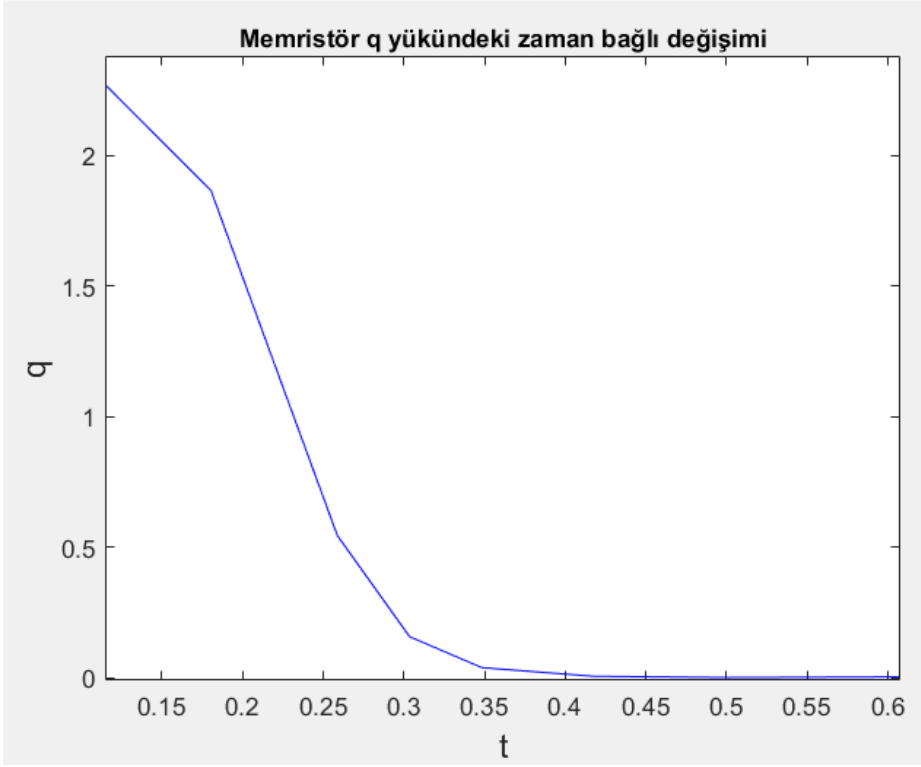
Şekil 2.10'da görülen Memristör modelini ilk olarak V_i giriş geriliminin pozitif olacak şekilde V_{TH} eşik geriliminden büyük olması durumu için, Çizelge 2.1'de verilen değerler kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Bu durumda, memristör memristansının, yükünün ve akımının zamana göre değişimi Şekil 2.11 -2.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Eşik gerilimli ve Biölek pencere fonksiyonuna sahip, pozitif DC gerilim uygulanarak benzetimi yapılan memristörün parametreleri

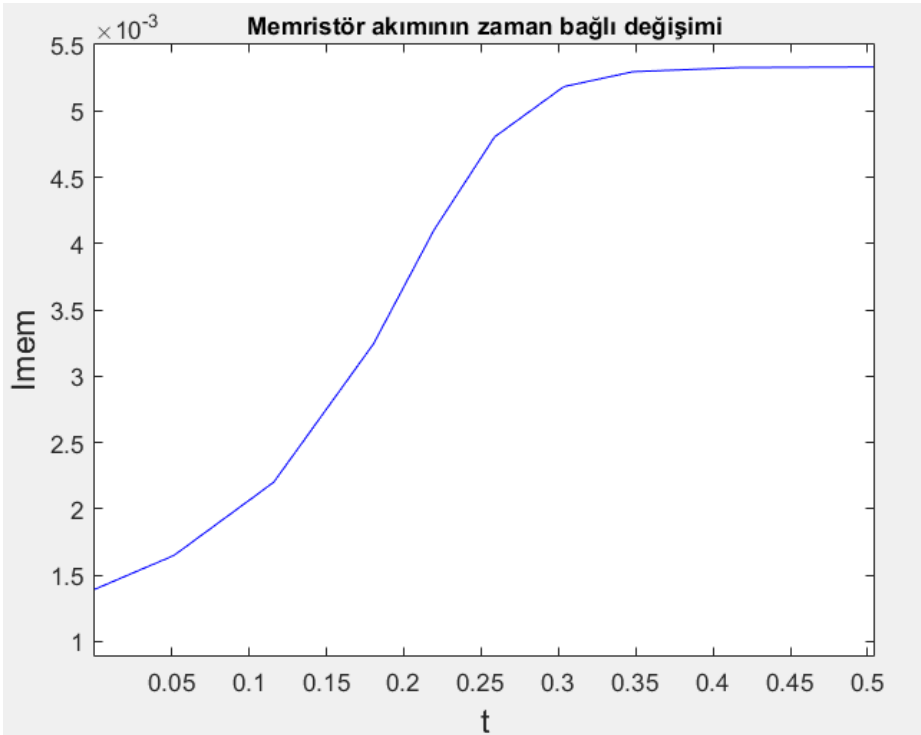
R_{ON}	1500 Ω
R_{OFF}	10000 Ω
μ	10^{-14}
D	10^{-9} metre
p	2
V_i	8 Volt
V_{TH}	5 Volt



Şekil 2.11. Memristör memristansı $M(q)$ 'nun zamana göre değışimi



Şekil 2.12. Memristör yükü q 'nun zamana göre değişimi



Şekil 2.13. Memristör akımının zamana göre değişimi

Bu dalga şekillerinden görüldüğü üzere memristördeki yük miktarı artarken, memristans formülü gereği, memristör memristansı azalmaktadır. Azalan memristansa bağlı olarak, memristör üzerinden geçen akım artmaktadır. Bu durumda akımın alabileceği en yüksek değer, memristör memristansının dayanabileceği en yüksek akım değeri $i_{m_{max}}$ ile sınırlanması zorunluluğu ortaya çıkar.

$$i_{m_{max}} > \frac{V_i - V_{TH}}{M_{qsat}} \quad (2.20)$$

Bu durumda memristör girişine uygulanabilecek en büyük gerilim değeri,

$$V_i - V_{th} = i_{m_{max}} M_{qsat} \quad (2.21)$$

$$V_i = i_{mem_{max}} M_{qsat} + V_{TH} \quad (2.22)$$

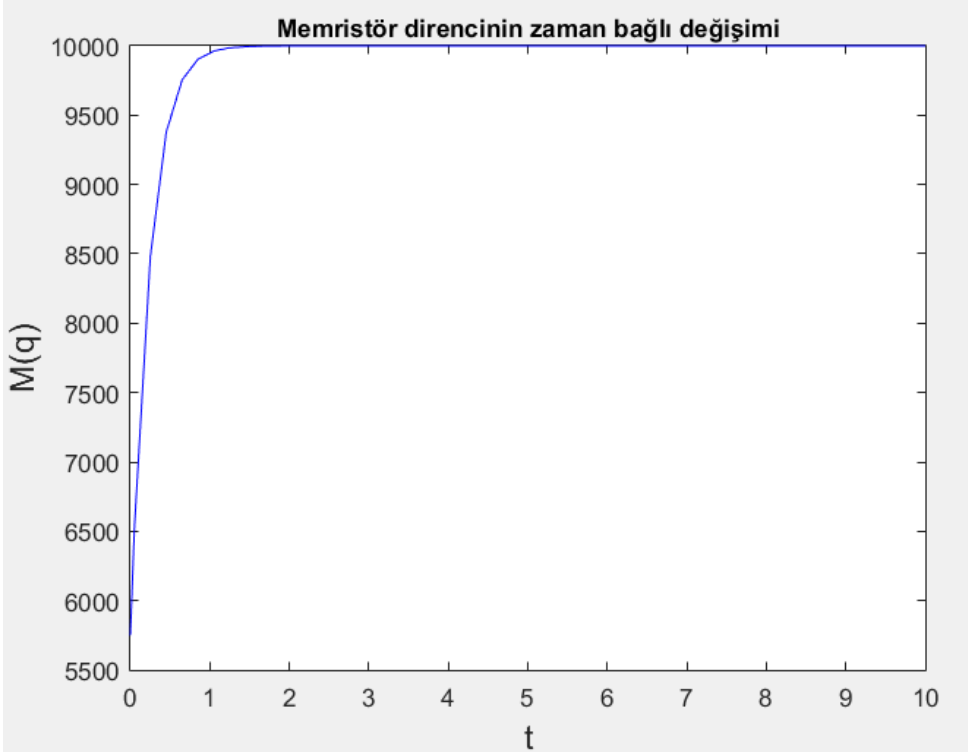
olarak bulunur.

2.6.2. Ters polarma altında memristörde memristans değişimi

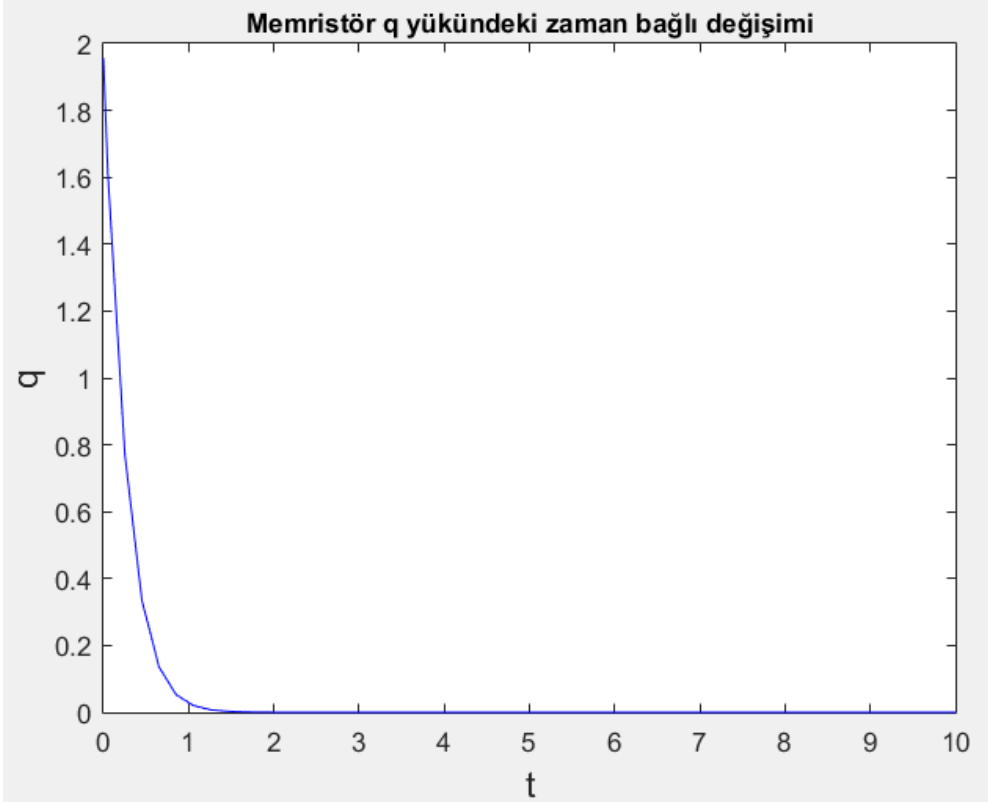
Şekil 2.10'da görülen Memristör modeline mutlak değeri V_{TH} eşik geriliminden büyük negatif bir V_i giriş gerilimi uygulanarak, Çizelge 1.2.'de verilen değerler için benzetimi yapılmıştır. Elde edilen memristör memristansı, yükü ve akımının zamana göre değişimi Şekil 2.14 – 2.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Eşik gerilimli ve Bioklek pencere fonksiyonuna sahip, negatif DC gerilim uygulanarak benzetimi yapılan memristörün parametreleri

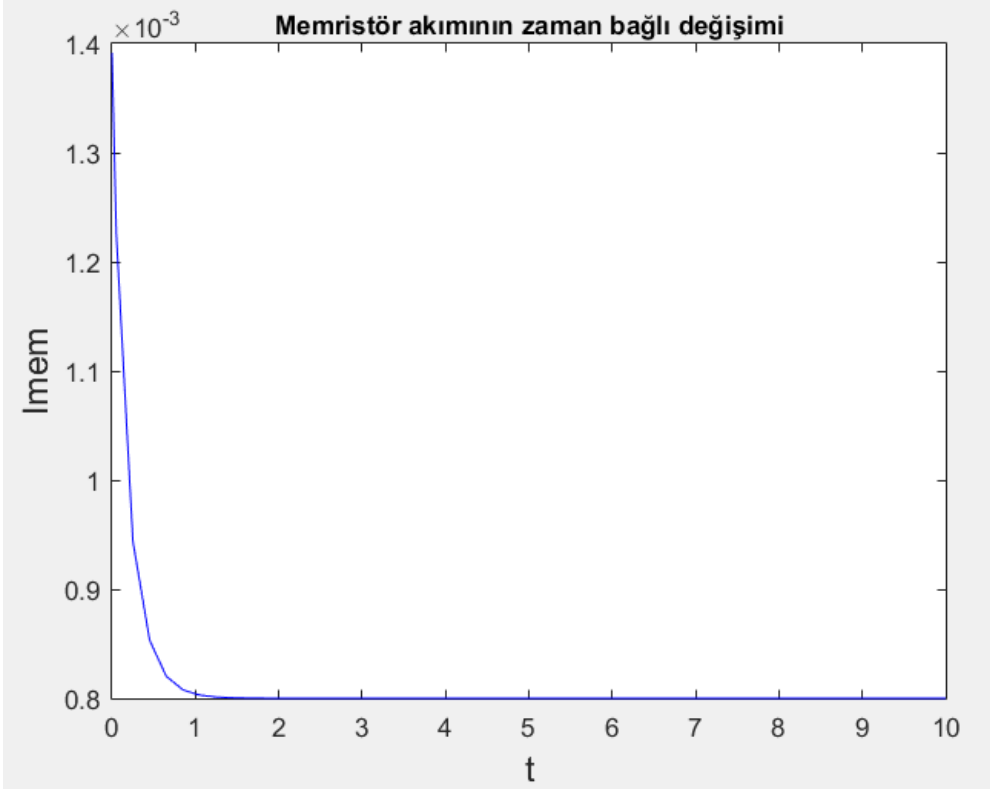
R_{ON}	1500 Ω
R_{OFF}	10000 Ω
μ	10^{-14}
D	10^{-9} metre
P	2
V_i	-8 Volt
V_{TH}	5 Volt



Şekil 2.14. M_q memristansının zamana göre değişimi



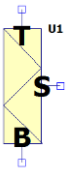
Şekil 2.15. Memristör yük değerinin zamana göre değişimi



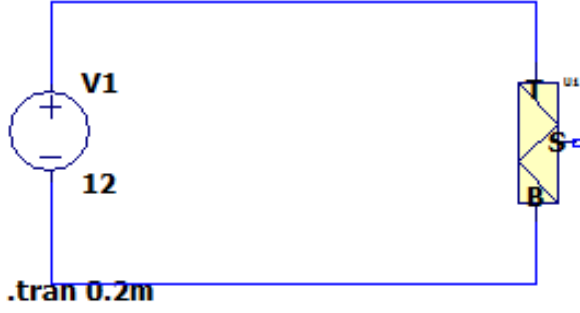
Şekil 2.16. Memristör akımının zamana göre değişimi

2.7. LTspice Programında Memristör Modellenmesi

LTspice programı AnalogDevices firması tarafından geliştirilmiş, olan ücretsiz olarak edinilebilen, analog devrelerin benzetimini yapmak, devrelerdeki dalga şekillerini görüntülemek ve devre analizlerini gerçekleştirmek için kullanılan bir benzetim programıdır. www.analog.com adresinden indirilebilir. LTspice ortamında hazır devre elemanları olduğu gibi, kendi devre elemanınızı oluşturmanıza izin vermektedir. Bu tezde kullanılan model Biolek pencere fonksiyonuna sahip, Karakulak'ın (2018) geliştirdiği LTspice modelidir. LTspice programında modellenen memristör sembolü Şekil 2.17'de ve Gerilim kaynağı ile beslenen LTspice'ta modellenmiş memristör devresi Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Çizelge 2.1.'de LTspice memristör modelinin parametreleri verilmiştir. değerleri



Şekil 2.17. LTspice programında memristör sembolü



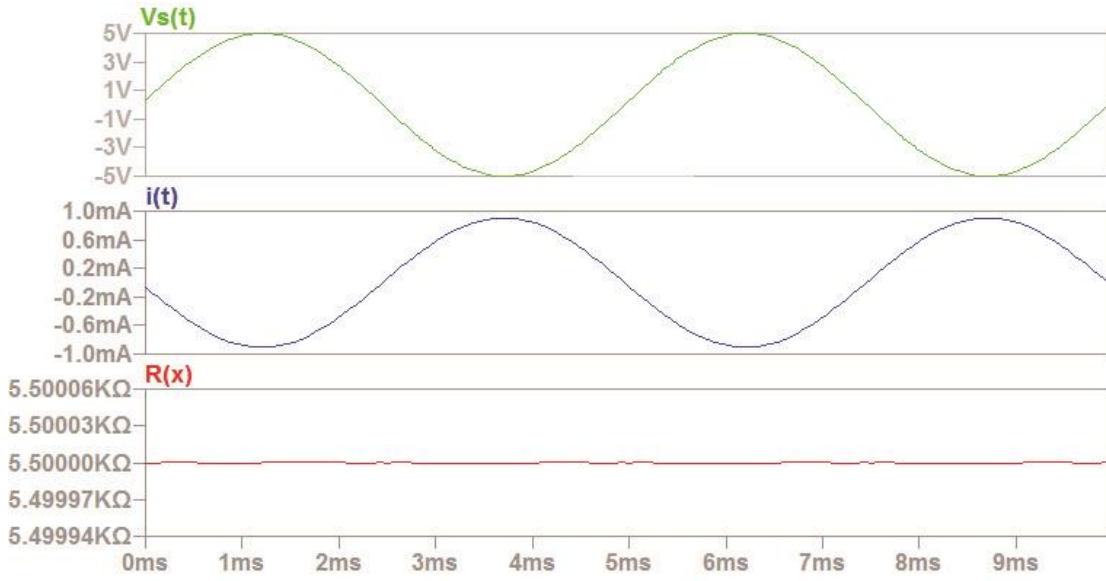
Şekil 2.18. Gerilim kaynağı ile beslenen LTspice'ta modellenmiş memristör devresi

Çizelge 2.3. LTspice modelinde kullanılan memristöre ait parametreler

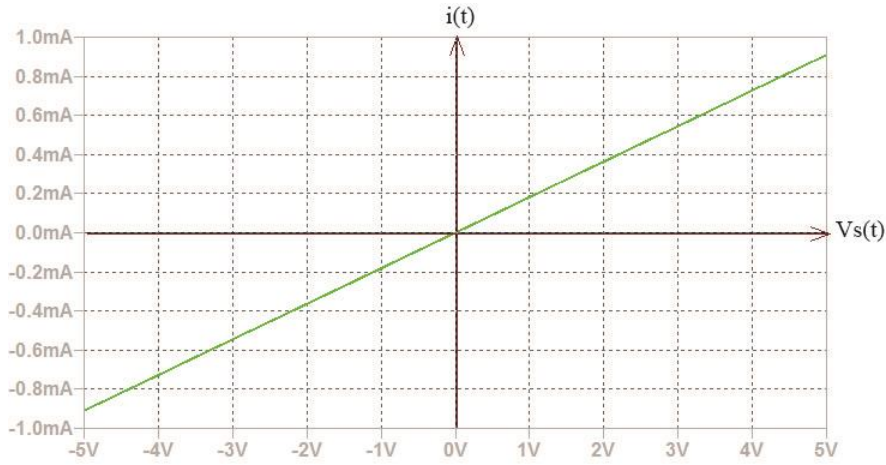
En Küçük Memristör Direnci	R_{ON}	1k Ω
En Yüksek Memristör Direnci	R_{OFF}	10 k Ω
Pencere Fonksiyonu Katsayısı	P	10
Memristör Direnci Başlangıç Değeri (0-1 arası bir değer alır 0 en küçük, 1 en büyük direnci değeridir)	x_0	0.5
Meristördeki O Atomlarının Yayılım Hızı	μ_v	400 $\frac{m^2}{V.s}$
Memristör TiO ₂ Film Uzunluğu	D	16 μm
Eşik Gerilimi	V_{TH}	10*0.58=5.8V

2.7.1. LTspice programında memristörün eşik gerilimi altında sinyal analizi

Bu bölümde Çizelge 2.3.'te verilen parametreler ile Şekil 2.18'de görülen devre LTspice programında, $V_s(t)=5.\sin(2. \pi.100.t)$ sinüsoidal giriş gerilimi için simüle edilmiştir. Uygulanan bu gerilim eşik gerilimi V_{TH} 'in altındadır. $V_s(t)$ giriş gerilimi, $i(t)$ memristör akımı ve $R(x)$ memristansın zaman göre değişimi Şekil 2.19.'da gösterilmiştir. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, memristör gerilimi, memristör eşik gerilimi altında ise, memristör sabit bir direnç gibi davranmaktadır. Bu durum Şekil 2.20'de görülen memristöre ait histerisis eğrisinden daha iyi anlaşılabilir.



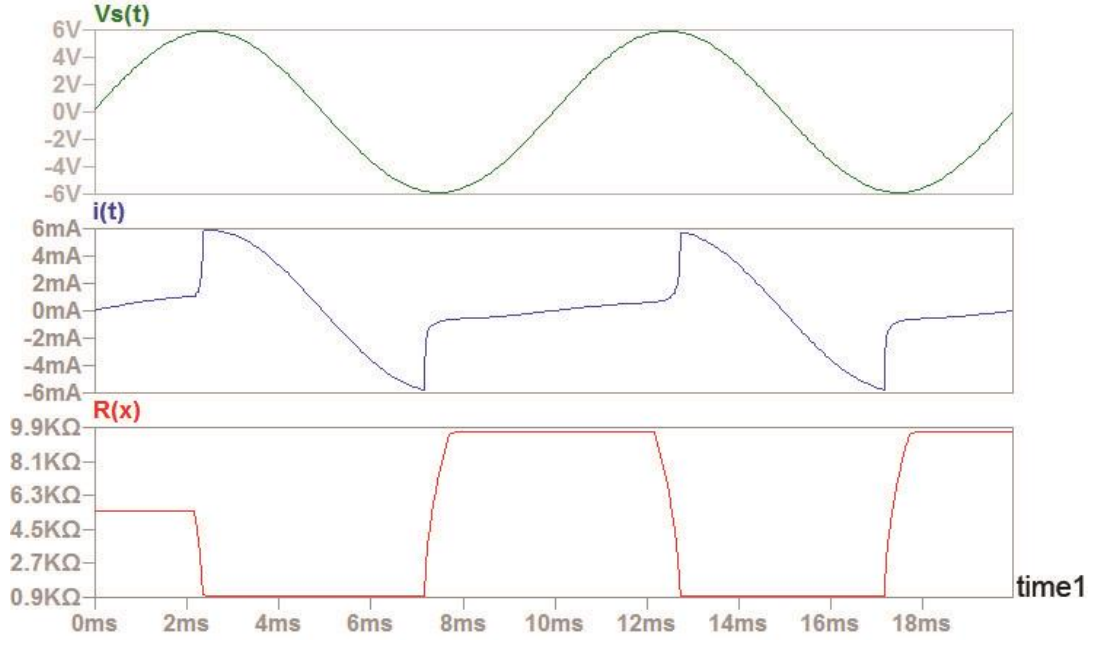
Şekil 2.19. Eşik gerilimi altında voltaj uygulanmış memristörün gerilimi, akımı ve memristansının zaman göre değişimi



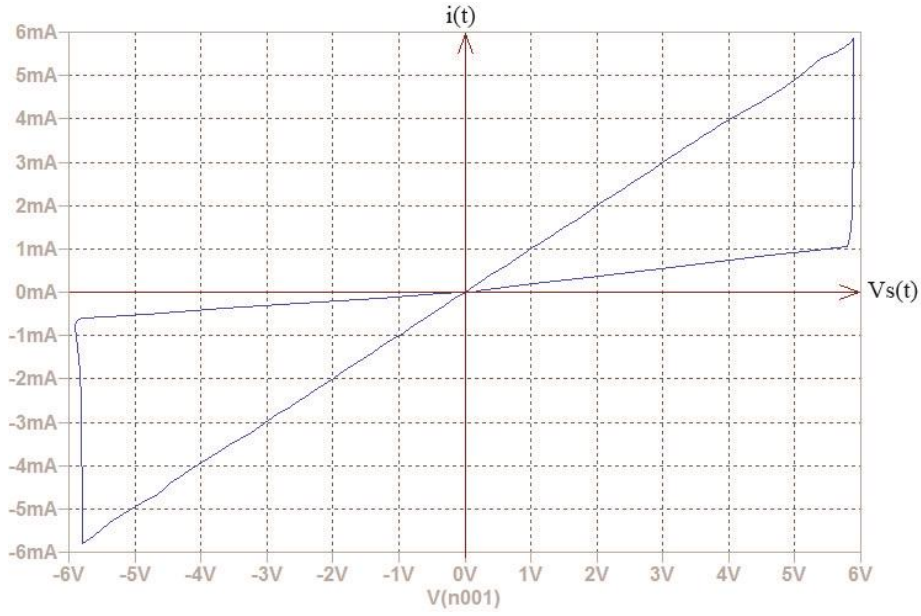
Şekil 2.20. Eşik gerilimi altında gerilim uygulanmış memristörde akım ve voltaj histerezis eğrisi

2.7.2. LTspice programında memristörün eşik gerilimi üstünde sinyal analizi

Bu bölümde Çizelge 2.3’de verilen parametreler ile Şekil 2.19’da görülen devre LTspice programında, $V_s(t) = 5,9 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot t)$ sinüsoidal giriş gerilimi için simüle edilmiştir. Uygulanan bu gerilim eşik gerilimi V_{TH} ’in üstündedir. $V_s(t)$ giriş gerilimi, $i(t)$ memristör akımı ve $R(x)$ memristansın zaman göre değişimi Şekil 2.21.’de gösterilmiştir. Memristöre ait histerisis eğrisi şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.21. Eşik gerilimi üstünde voltaj uygulanmış memristörün gerilimi, akımı ve memristansının zaman göre değişimi

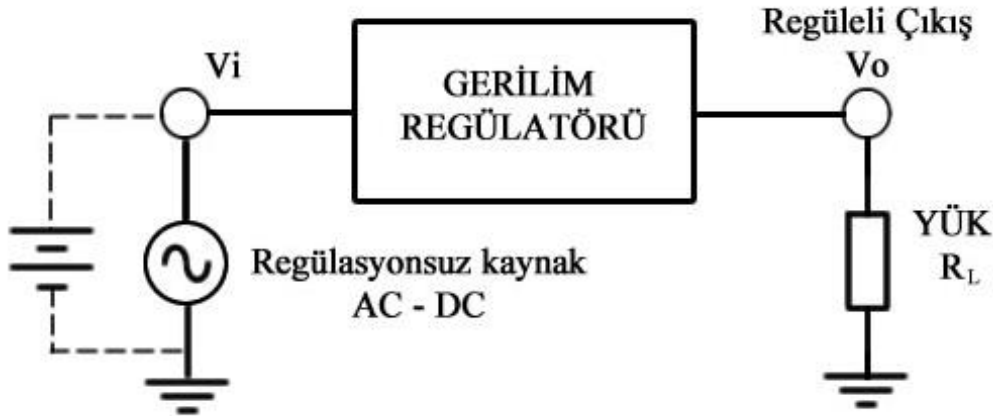


Şekil 2.22. Eşik gerilimi üstünde gerilim uygulanmış memristörde akım ve voltaj histerisis eğrisi

3. GERİLİM REGÜLATÖRLERİ

Bu bölümde gerilim regülatörü devreleri kısaca tanıtılmıştır. Çalışma prensipleri ve türleri hakkında bilgiler verilmiştir.

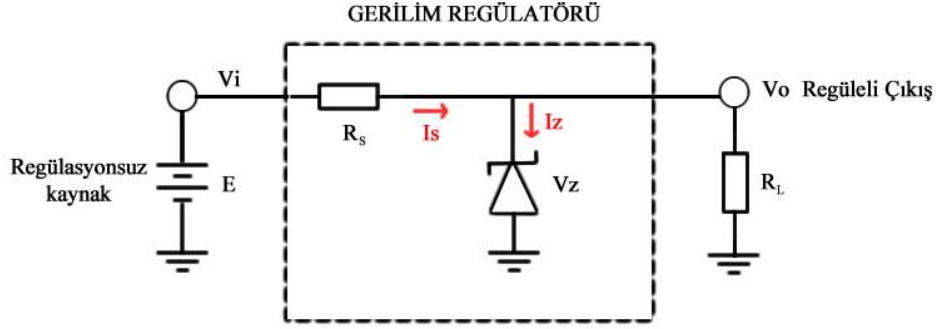
Elektronik devrelerinin çalışması için besleme gerilimine ihtiyaç duyulur. Bu besleme gerilimi (kaynak gerilimi) her elektronik devre yani yük için kabul edilebilir bir değer aralığında kalmalıdır. Bu nedenle, kaynağımızın çıkış gerilimini sabit tutma zorunluluğu ortaya çıkar. Çıkış gerilimini sabit tutma işlemine regülasyon, regülasyon için kullanılan devrelere de regülatör devreleri denilir. Gerilim regülatörleri giriş voltajındaki veya çıkış yükündeki değişime rağmen gerilimi düzenler ve bağlı yükler için bir koruyucu görevi görürler. Dalgacıklı DC ya da sabit DC voltajları düzenlerler yani yükün sahip olması istenen değerlere indirirler. Sabit çıkış gerilimi üretmek için zener diyotlu, transistörlü, opamp'lı veya entegre devreli çeşitli regülatör devreleri üretilmiştir.



Şekil 3.1. Gerilim regülatörü blok diyagramı

3.1. Zener Diyotlu Gerilim Regülatörleri

Zener diyotlar yapı itibari ile ters polarma altında çalışan ve uçları arasındaki gerilim değeri hemen hemen sabit olan diyotlardır. Bu sebeple gerilim regülasyonunda kullanılmaktadırlar. Zener diyota uygulanan gerilim, zener gerilimi (V_z) değerine ulaştığında zener diyottan akan akımın değeri artmaya başlar ve bu olurken uçları arasındaki gerilim hemen hemen zener geriliminde sabit kalmaya başlar. Farklı zener gerilimine sahip zener diyotlar üretilmektedir. Şekil 3.2.'de zener diyotla yapılmış basit bir regülatör görülmektedir.



Şekil 3.2. Zener diyot ile yapılmış temel regülatör devresi

Şekil 3.2.'de görülen zener diyotlu gerilim regülatörü tasarlanırken, regülatör çıkışında zener gerilimine eşit bir çıkış gerilimi istenir. Bu nedenle zener diyotlu regülatörün giriş değeri zener geriliminden büyük olmalıdır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer hususta, zener diyot üzerinden geçebilecek maksimum zener akımının aşılmasını engellemek için kaynakla arasına seri bir direnç bağlaması (R_s) gerekliliğidir.

$$V_i = E > V_z \quad (3.1)$$

Bu durumda çıkış gerilimi zener gerilimine eşit olur.

$$V_o = V_L = V_z \quad (3.2)$$

Regülatör devresinde R_s direncinin amacı zener içinden geçen akımı sınırlandırarak, maksimum zener akımı I_{Zmax} değerinin altında tutarak zenerin bozulmasını engellemektir. Devrede yük bağlı değilken zener diyot üzerinden maksimum seviyede akım akacaktır, bu durumda R_s ve zener seri durumda olduğundan üzerlerinden akacak akımlar eşittir,

$$I_s = I_z \quad (3.3)$$

$$E = V_z + V_{R_s} \quad (3.4)$$

Maksimum akım değerimiz I_{Zmax} olacağından Denklem (3.4)'ü düzenlersek,

$$E = V_z + R_s I_{Zmax} \quad (3.5)$$

elde edilir. R_s direncinin değeri

$$R_s = \frac{E - V_z}{I_{Zmax}} \quad (3.6)$$

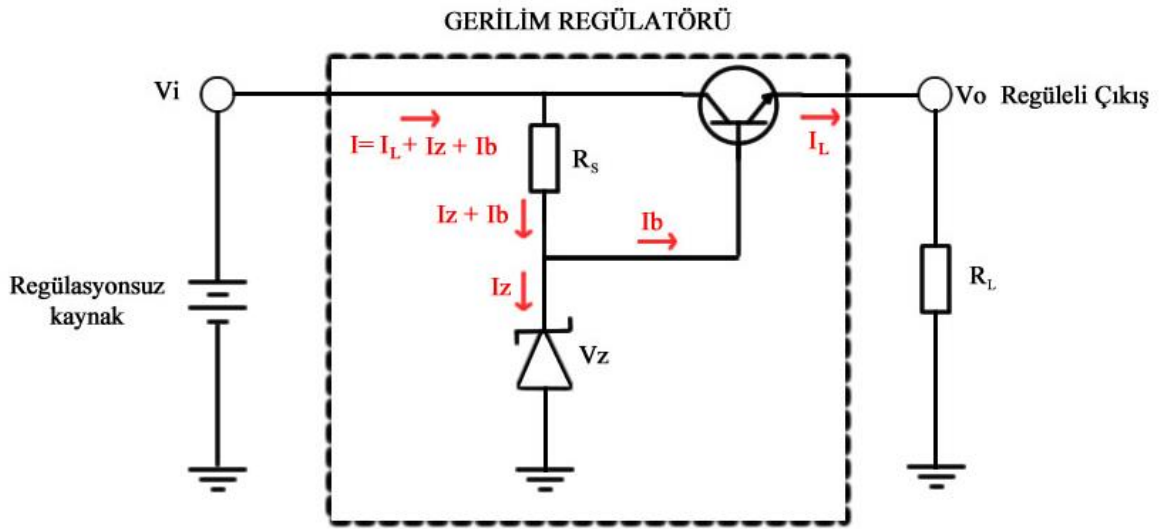
olarak bulunur.

3.2. Transistörlü Gerilim Regülatörleri

Zener diyotlu regülatör devreleri, zener gerilimi ve zener akımındaki sınırlamalardan dolayı verimli çalışmamaktadır ve tek başına yük akımını karşılamaya yeterli olmamaktadırlar. Bu nedenle transistör kullanarak daha verimli regülatör devreleri elde edilebilmektedir. Gerekli referans gerilim değerini sağlamak için yine zener diyot kullanılmaktadır. Seri ve paralel olmak üzere iki tip transistörlü regülatör devresi yapılabilmektedir.

3.2.1. Transistörlü seri regülatör devresi

Bu regülatörler yükün transistöre seri bağlanması ile elde edilirler. Şekilde basit bir seri regülatör devresi görülmektedir. Transistörün beyz gerilimi zener diyot üzerinden alınmaktadır



Şekil 3.3. Zener diyot ve transistör ile yapılmış seri regülatör devresi

Çıkış gerilimi şu şekilde ifade edilir,

$$V_o = V_Z - V_{BE} \quad (3.7)$$

Aynı zamanda çıkış gerilimi yük direnci ve yük akımına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$V_o = I_L \times R_L \quad (3.8)$$

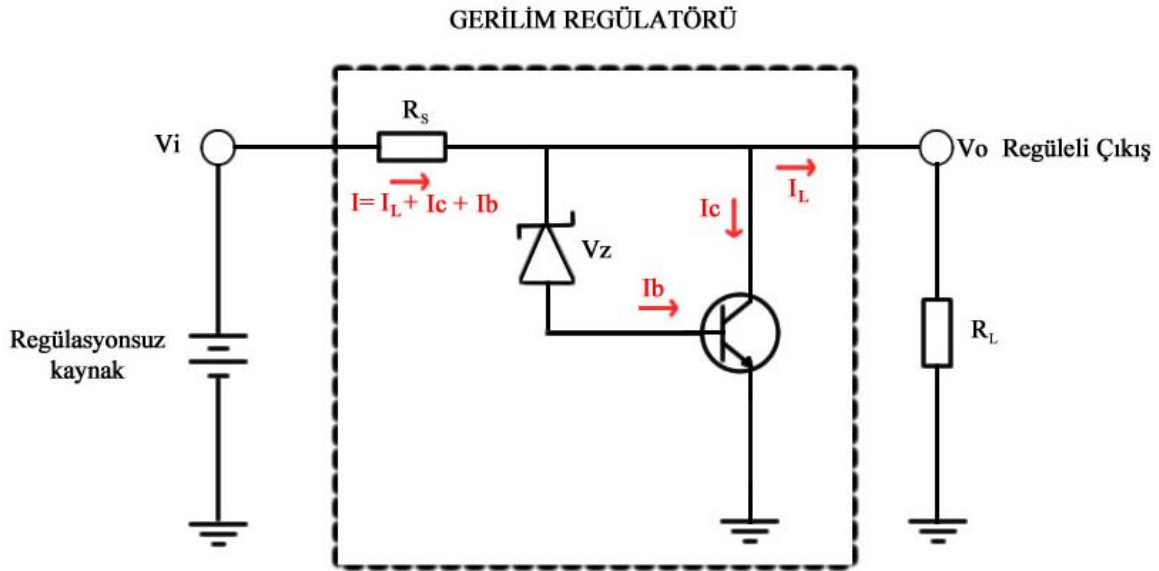
Devre akımı zener ve yük akımlarının toplamına eşittir.

$$I = I_Z + I_L \quad (3.9)$$

Zener gerilimi sabit olduğundan, I_Z değişmeyecektir. Bu nedenle yük direncinin değişmesi durumunda I_L akımında meydana gelen değişiklikler I_B akımında değişime neden olarak çıkış geriliminin sabit kalmasını sağlar.

3.2.2. Transistörlü paralel regülatör devresi

Yükün transistöre paralel bağlanması ile elde edilirler. Şekilde basit bir paralel regülatör devresi görülmektedir. Transistörün beyz gerilimi zener diyot üzerinden alınmaktadır



Şekil 3.4. Zener diyot ve transistör ile yapılmış paralel regülatör devresi

Paralel regülatörde çıkış gerilimi,

$$V_o = V_Z + V_{BE} \quad (3.10)$$

$$V_o = V_i - V_{RS} \quad (3.11)$$

olarak bulunur.

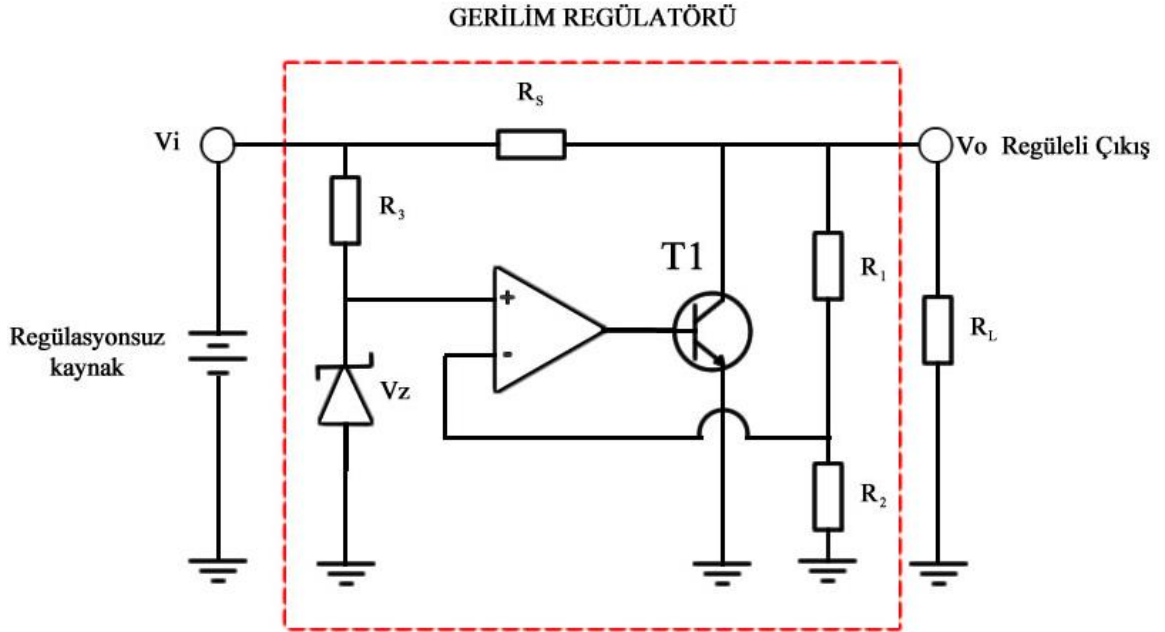
Çıkış geriliminde meydana gelecek bir artış durumunda, (3.10) numaralı denklemden görüleceği üzere V_{BE} (V_Z sabit olduğundan) gerilim değerini de artıracaktır. Bu durumda transistörden akacak olan I_c akımını artırarak I_L akımını azaltacak ve çıkış geriliminin sabit kalmasını sağlayacaktır. Çıkış geriliminin azalması durumunda da, V_{BE} azalacağından dolayı transistör üzerinden akan I_c akımı azalma eğilimi gösterecek ve I_L artarak, çıkış gerilimini arttıracak ve sabit tutacaktır.

3.3. Opamp Kullanılarak Yapılan Gerilim Regülatörleri

Bu bölüme kadar anlatılan regülatör devrelerinde çıkış gerilimi, zener diyot gerilimine yakın değerlerde elde edilebilmekteydi. Opampın bir fark yükselteci olarak kullanıldığı opamplı regülatörlerde, daha yüksek değerlerde elde edilebilir. Opamplı regülatörlerde zener gerilimi sadece referans gerilimi olarak kullanılmaktadır ve çıkışta dalgalanmaların engellenmesini sağlanmaktadır. Bu tip regülatörler yükün, opampın çıkışına bağlanan transistöre seri ve paralel oluşuna göre adlandırılır.

3.3.1. Opamp kullanılarak yapılan paralel gerilim regülatörü

Şekil 3.5. Opamplı paralel regülatör devresi görülmektedir. T1 transistörü, çıkış akımının artması yada azalması durumunda üzerinden akan akımı artırıp azaltmak suretiyle regülasyon işleminin yapılmasını sağlar.



Şekil 3.5. Opamplı paralel regülatör devresi

Bu devredeki çıkış gerilimi,

$$V_o = \frac{V_i}{R_1 + R_2 + R_s} (R_1 + R_2) \quad (3.12)$$

olarak hesaplanır. Regülatör devresinde, transistör içinden geçen akımı kontrol eden opampın çıkışındaki gerilim,

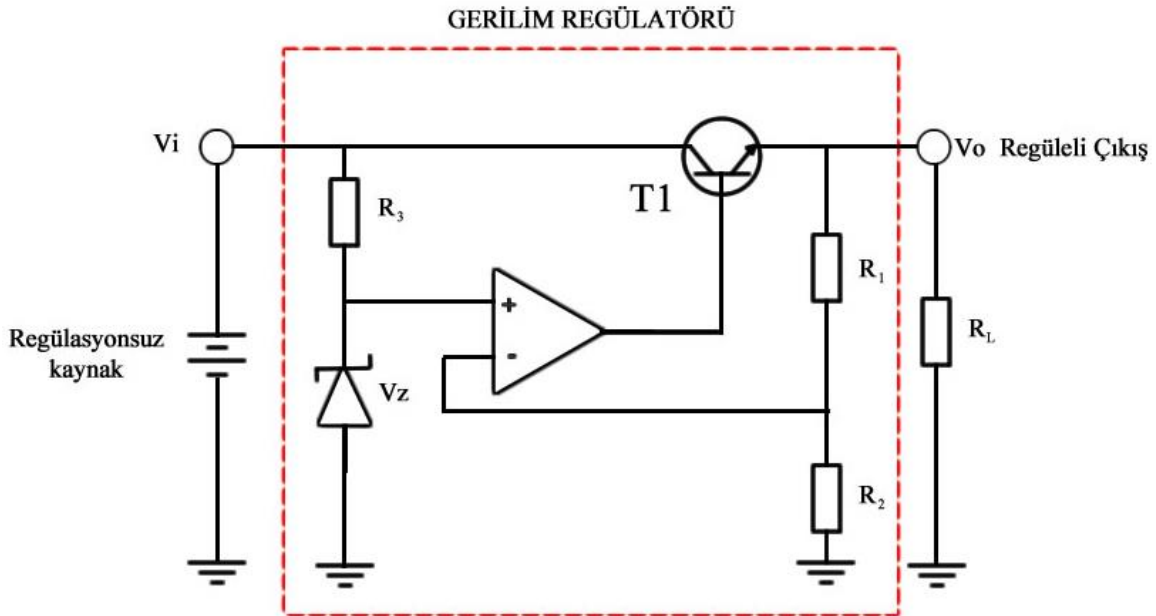
$$V_{opamp} = (V_z - V_{R_2}) \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3.13)$$

olarak elde edilmektedir.

(3.13) numaralı denklemden görüleceği üzere, çıkış gerilimindeki artışa bağlı olarak R_2 üzerinde düşen gerilim artacağından V_{opamp} çıkış değeri aratarak T1 transistörünün üzerinden daha fazla akım akmasını sağlayarak çıkış akımını dengeler ve devre regülasyon işlemini gerçekleştirir. Çıkış gerilimindeki azalma V_{opamp} çıkış değerini düşürecek, T1 transistörü üzerinden akan akım azalacağı için çıkış akımı artarak, devre regülasyon işlemini gerçekleştirmiş olacaktır.

3.3.2. Opamp kullanılarak yapılan seri gerilim regülatörü

Bu regülatör devresinde transistör yüke seri olarak bağlandığından bu ismi almıştır.



Şekil 3.6. Opampli seri regülatör devresi

Bu devrede ki çıkış gerilimi,

$$V_o = V_z \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3.14)$$

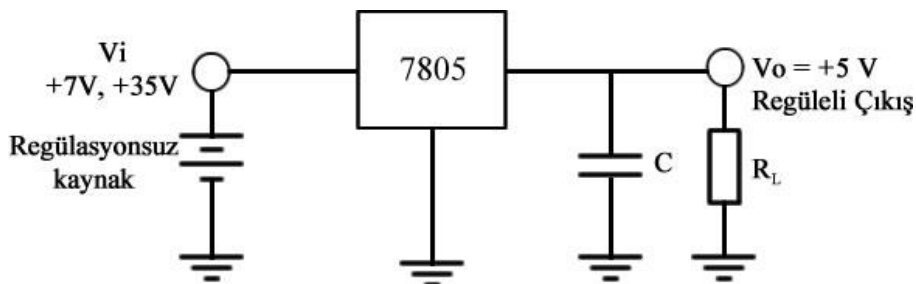
Devredeki opamp çıkışı,

$$V_{opamp} = (V_Z - V_{R_2})\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (3.15)$$

olarak hesaplanır. Bu denklemden görüleceği üzere, devre çıkışındaki bir gerilim azalması durumunda Zener Referans gerilimi ile R_2 direnci üzerindeki düşen gerilim değeri farkının artmasına neden olarak opamp çıkışındaki gerilim değerinin artmasına neden olur. Bu artış transistör üzerinden akacak olan akımın artışını sağlayarak çıkış geriliminin artmasına ve regülasyon işleminin gerçekleşmesine olanak sağlar. Çıkış gerilimindeki artış durumunda zener referans gerilim ile R_2 üzerindeki gerilim düşümü farkını azaltarak, opamp çıkışındaki farkın azalmasına ve T1 üzerinden geçen akımın azalarak, çıkış geriliminin düşmesini sağlayarak gerilim regülasyonunun gerçekleşmesini sağlar.

3.4. Entegre (IC) Gerilim Regülatörleri

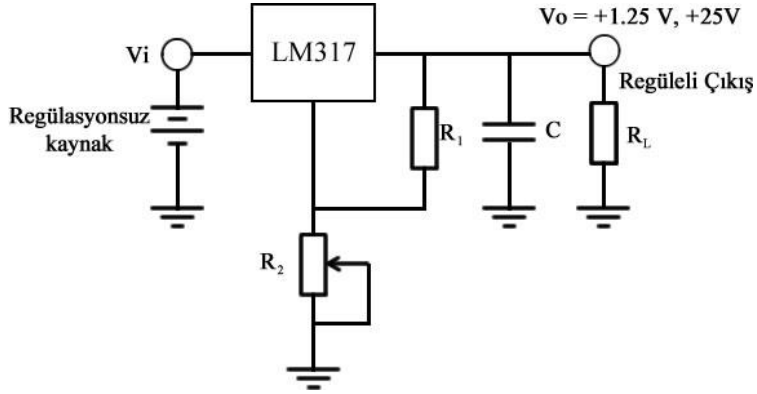
Günümüzde en çok kullanılan gerilim regülatörü çeşitlerinden bir tanesi entegre devre gerilim regülatörleridir. Bu entegrelerin içerisinde referans kaynağı, hata yükseltici, kontrol elemanı, aşırı yük koruma devreleri bulunmaktadır. Entegre gerilim regülatöründen en çok kullanılanlara örnek olarak 7805, 7812, 7905, 7912, LM317 ve LM337 sayılabilir. Genellikle giriş, toprak ve çıkış olmak üzere üç bacaklı üretilen entegre gerilim regülatörleri bu haliyle basit ve kullanışlı elemanlardır. Aynı zamanda geniş bir gerilim değeri aralığında giriş uygulanabilirken, çıkış değerini sabit tutarlar. Genel olarak 78xx tarzında isimlendirilirler, çıkış voltajı son iki hanede belirtilir; 05, 06, 08, 10, 12, 15, 18 gibi. 78xx serisi entegreler pozitif giriş için pozitif çıkış vererek çalışırken, 79xx serisi entegreler negatif giriş için negatif çıkış vererek çalışmaktadır.



Şekil 3.7. 78xx regülatör devresi

Entegre regülatör devreleri ile ayarlanabilir regülatör devresi yapmak mümkündür. Bu konuda en çok kullanılan entegrelerden biri LM317 regülatör entegresidir. Bu regülatörde toprak

ucunun yerine ayar (ADJ) ucu bulunmaktadır. Şekil 3.8’de görüldüğü üzere çıkış ile ayar ucu arasında 1.25 Volt sabit kalacak şekilde çıkışı ayarlar.



Şekil 3.8. LM317 ile gerçekleştirilmiş ayarlı regülatör devresi

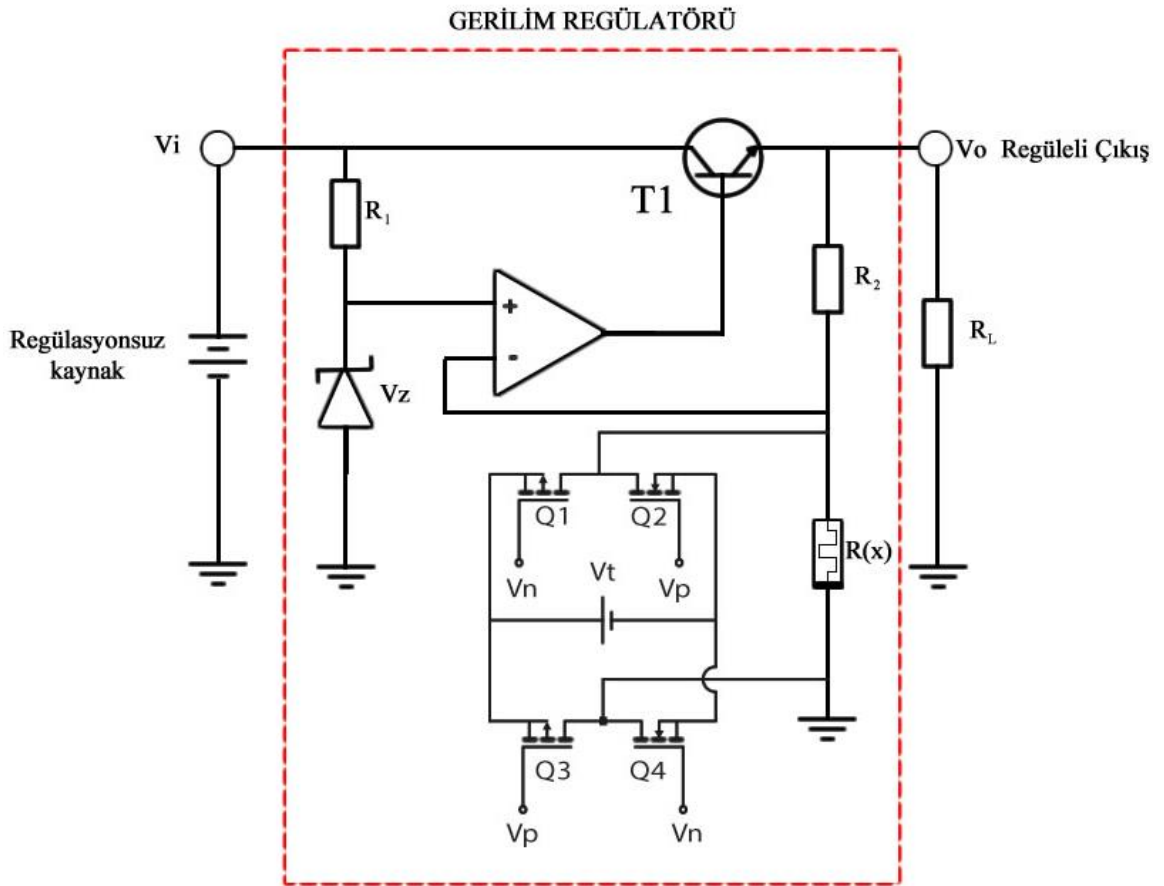
LM317’li bu devrenin çıkış gerilimi,

$$V_0 = 1.25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.16)$$

olarak verilir.

4. MEMRİSTÖR TABANLI GERİLİM REGÜLATÖRLERİ

Memristöre, eşik gerilimi üzerinde bir gerilim uygulanarak memristans direnç değeri değiştirilebilir. Daha önce İkinci bölümde gösterildiği gibi memristans değeri, memristörden akan akımın yönüne bağlı olarak, doyum noktasına kadar artar ya da azalır. Memristöre uygulanan gerilim mikrodenetleyici ile verilen darbeler ile kontrollü bir biçimde uygulanırsa, değeri dijital olarak ayarlanabilen bir direnç elde edilebilir. Bu sayede Şekil 4.1’de görüldüğü gibi potansiyometre yerine memristör kullanarak, sabit çıkışlı gerilim regülatörleri ayarlı gerilim regülatörlerine dönüştürülebilir.



Şekil 4.1. Memristanslı ayarlanabilir memristör tabanlı seri regülatör devresi

Bu bölümde farklı tiplerde memristör tabanlı ayarlanabilir gerilim regülatörü topolojilerine yer verilmiştir. Ayrıca opamp kullanılarak yapılmış memristör tabanlı seri gerilim regülatörleri analiz edilecektir.

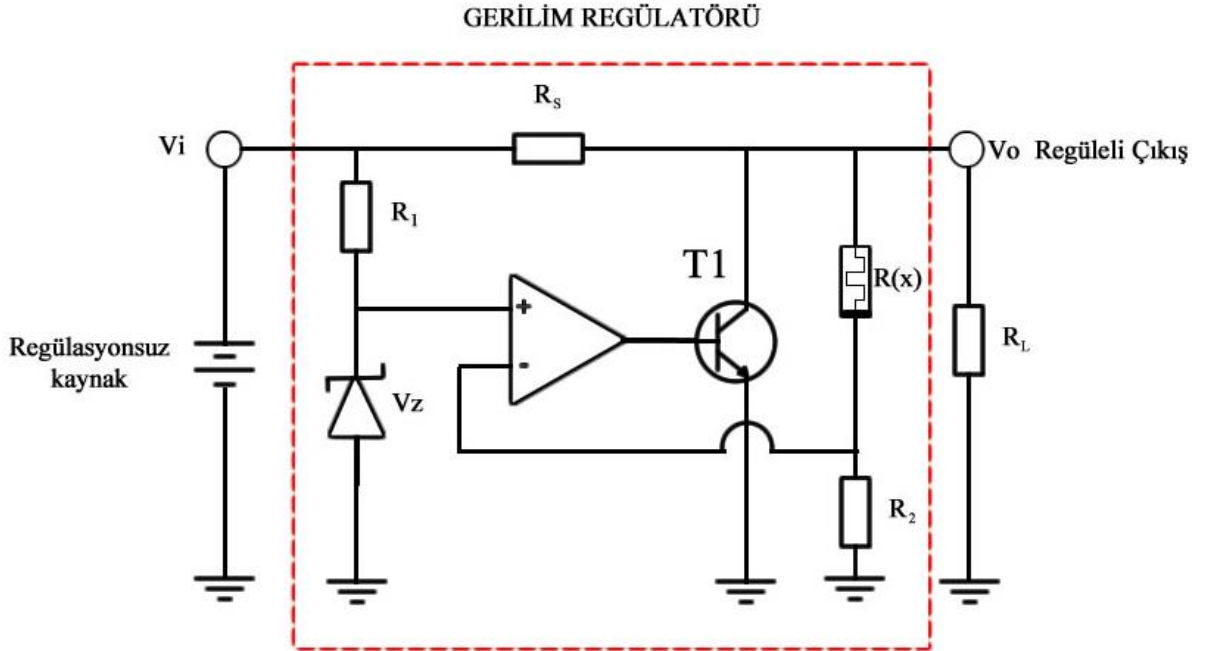
4.1. Memristör Tabanlı Paralel Gerilim Regülatörü

Şekil 4.2-4.4'te memristör tabanlı paralel gerilim regülatörlerine ait topolojiler verilmiştir. Bu topolojilerin çıkış gerilimi formülleri verilmiştir fakat detaylı analizleri yapılmamıştır.

Şekil 4.2.'de görülen R1 direncini R(x) memristörü ile değiştirilerek elde edilen memristör tabanlı paralel Gerilim regülatörünün çıkış gerilimi,

$$V_o = \frac{V_i}{R(x) + R_2 + R_s} (R(x) + R_2) \quad (4.1)$$

olarak hesaplanır.

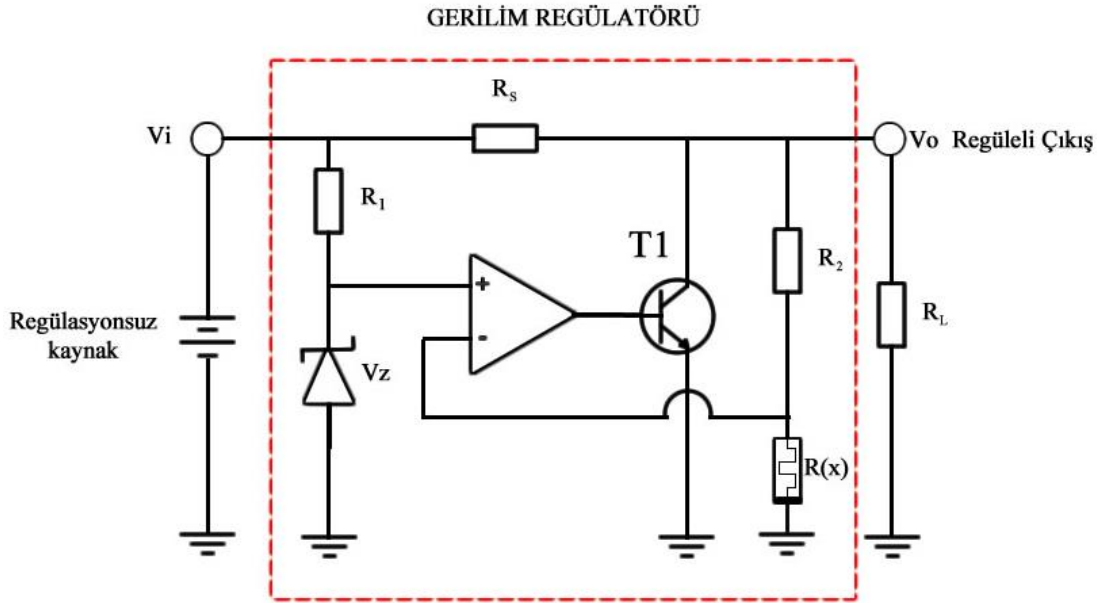


Şekil 4.2. Paralel gerilim regülatörü devresinde R1 direnci yerine R(x) memristörü yerleştirilerek elde edilen memristör tabanlı paralel gerilim regülatörü devresi

Şekil 4.3.'de görülen R2 direncini R(x) memristörü ile değiştirilerek elde edilen memristör tabanlı paralel Gerilim regülatörünün çıkış gerilimi,

$$V_o = \frac{V_i}{R(x) + R_2 + R_s} (R(x) + R_2) \quad (4.2)$$

olarak hesaplanır.

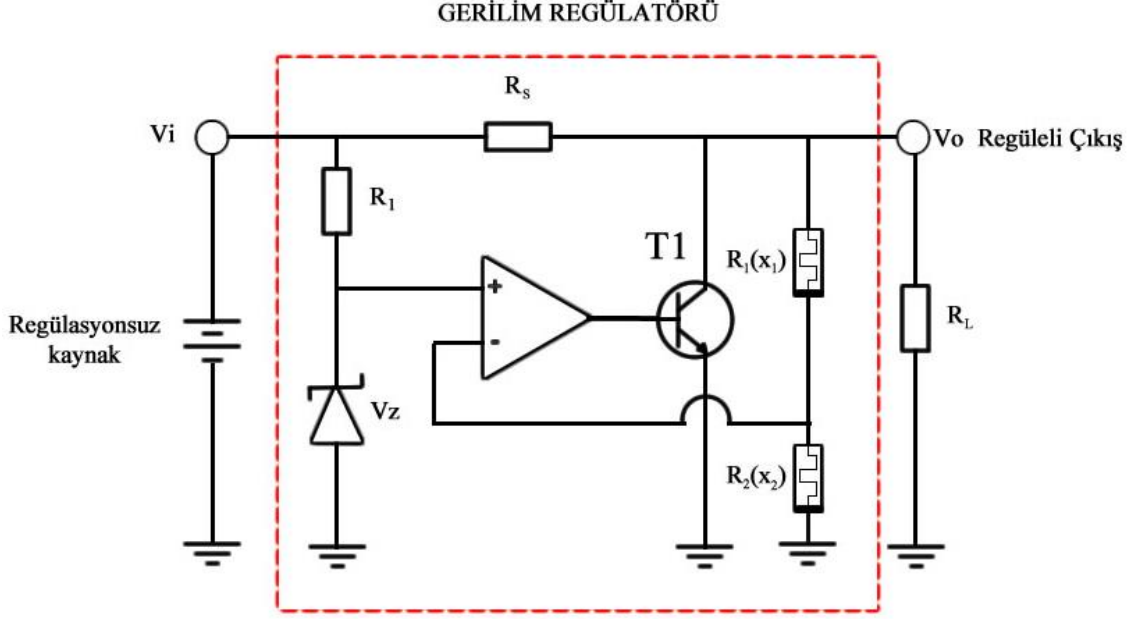


Şekil 4.3. Paralel gerilim regülatörü devresinde R₂ direncini yerine R(x) memristörü yerleştirilerek elde edilen memristör tabanlı paralel gerilim regülatörü devresi

Gerilim regülatörünün çıkış gerilimi,

$$V_o = \frac{V_i}{R_1(x_1) + R_2(x_2) + R_s} (R_1(x_1) + R_2(x_2)) \quad (4.3)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 4.4. Paralel gerilim regülatörü devresinde R_1 ve R_2 dirençleri yerine $R_1(x_1)$ ve $R_2(x_2)$ memristörlerinin yerleştirilmesiyle elde edilen memristör tabanlı paralel gerilim regülatörü devresi

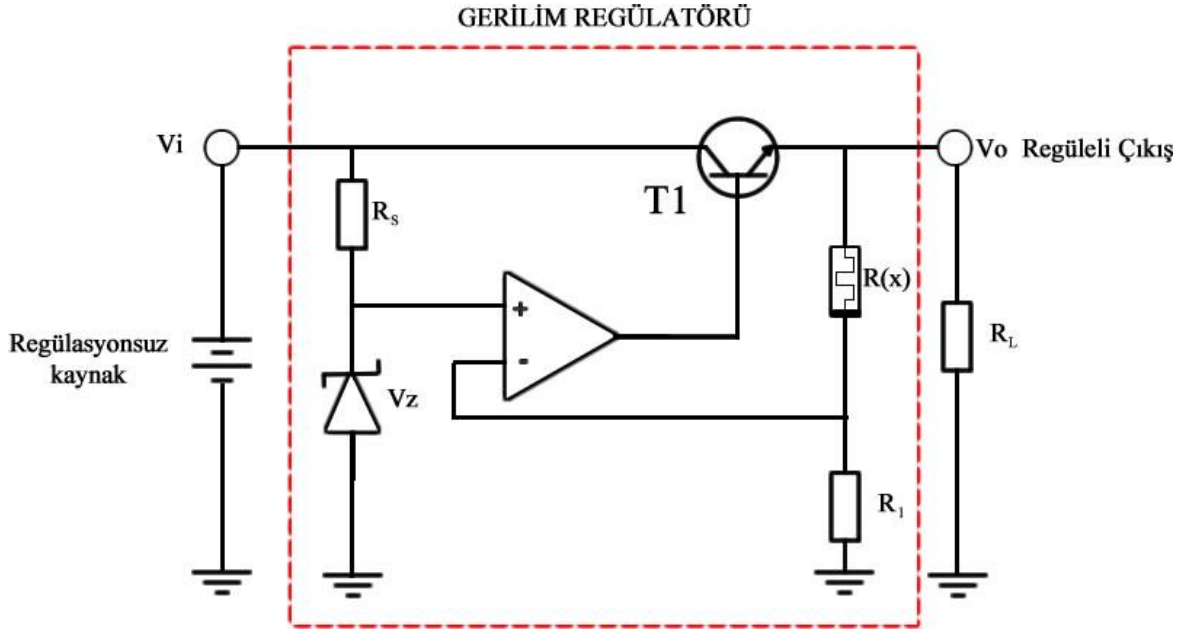
Gerilim regülatörünün çıkış gerilimi,

$$V_o = \frac{V_i}{R_1(x_1) + R_2(x_2) + R_s} (R_1(x_1) + R_2(x_2)) \quad (4.4)$$

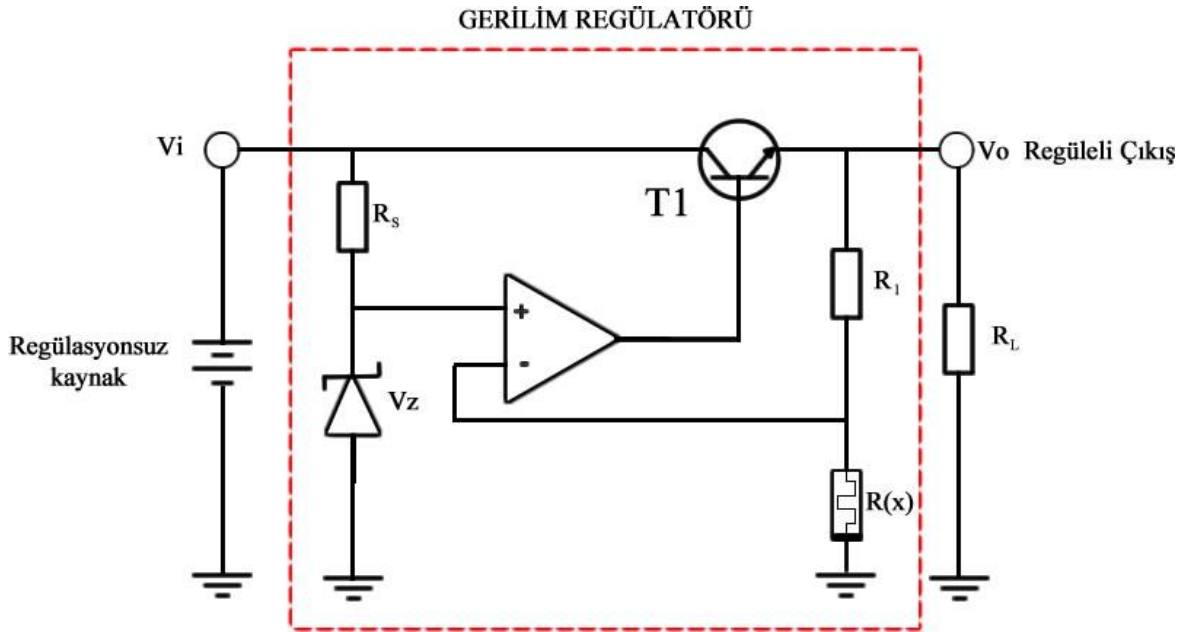
olarak hesaplanır.

4.2. Memristör Tabanlı Seri Gerilim Regülatörü

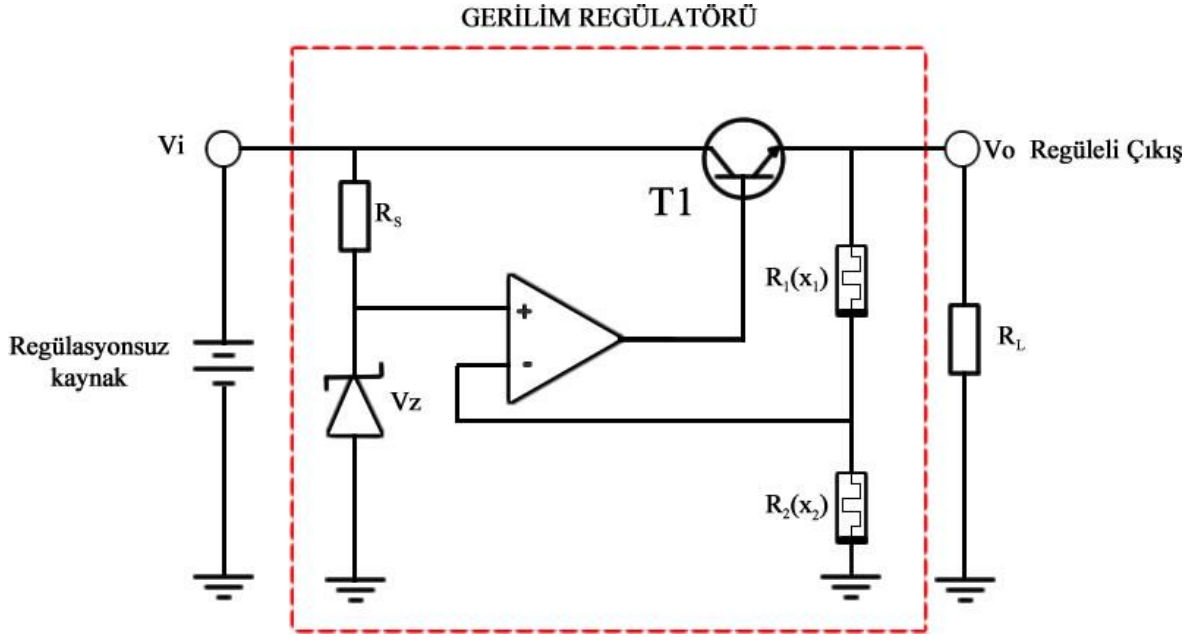
Bu bölümde memristör tabanlı seri voltaj regülatörü (MTSVR) topolojileri verilmiş ve bu devrelere ait tasarım kriterleri açıklanmıştır. Şekil 4.5’de MTSVR-A, Şekil 4.6’de MTSVR-B, Şekil 4.7’te MTSVR-C memristör tabanlı seri regülatör devreleri görülmektedir. MTSVR-A topolojisi R_1 direnci $R(x)$ memristörü ile değiştirilerek elde edilmiştir. MTSVR-B topolojisi R_2 direnci $R(x)$ memristörü ile değiştirilerek elde edilmiştir. MTSVR-C topolojisi ise hem R_1 hem de R_2 direnci memristörü ile değiştirilerek elde edilmiştir.



Şekil 4.5. MTSVR-A



Şekil 4.6. MTSVR-B



Şekil 4.7. MTSVR-C

4.3. Memristör Tabanlı Seri Gerilim Regülatörleri Tasarım Kriterleri

Bu bölümde, topolojisi verilen memristör tabanlı seri gerilim regülatörlerini tasarlarken dikkat edilmesi gereken hususlar verilmiştir. MTSVR devrelerinde, R_1 direnci değeri V_i giriş gerilimi, zener diyot akımı $I_{z(max)}$ ve zener diyot gerilimi dikkate alınarak seçilmelidir.

$$\frac{V_{in} - V_z}{R_s} \leq I_{z(max)} \quad (4.5)$$

$$R_s \geq \frac{V_{in} - V_z}{I_{z(max)}} \quad (4.6)$$

Aynı zamanda giriş gerilimi,

$$V_{in} \geq V_{out} + V_{sat} \quad (4.7)$$

olarak seçilmelidir. Burada V_{sat} transistörün doyma gerilimi değeridir.

4.4. MTSVR-A Devresi Tasarım Kriterleri

Memristör yapı itibarıyla küçük bir eşik gerilimine (V_{TH}) sahiptir. Eşik gerilimi değeri memristörlerin seri bağlanmasıyla artırılabilir ve istenilen seviyeye çıkarılabilir.

MTSVR-A devresinde çıkış gerilimi,

$$V_{out} = V_{R1} + V_X \quad (4.8)$$

olarak verilir. Burada V_X memristör gerilimidir. R_2 direnci üzerinde ki gerilim zener diyot geriliminde eşittir,

$$V_{R1} = V_Z \quad (4.9)$$

Opampın negatif giriş akımı ihmal edildiğinde, R_2 ve $R(x)$ ile seri bağlı oldukları için üzerlerinden aynı akım geçecektir, dolayısıyla memristör gerilimi,

$$V_X = \frac{V_Z}{R_1} R(x) \quad (4.10)$$

olarak hesaplanır. Çıkış denklemi yeniden düzenlenirse,

$$V_{out} = V_Z \left(1 + \frac{R(x)}{R_1} \right) \quad (4.11)$$

bulunur. Memristör modelinden dolayı, üzerinde düşen gerilim değeri eşik geriliminden büyük olamamaktadır,

$$V_X \leq V_{TH} \quad (4.12)$$

Bu durumda çıkış gerilimi için şu zorunluluk ortaya çıkar,

$$V_{out} \leq V_Z + V_{TH} \quad (4.13)$$

Dolayısıyla,

$$V_Z \left(1 + \frac{R(x)}{R_1} \right) \leq V_Z + V_{TH} \quad (4.14)$$

$$\frac{R(x)}{R_1} V_Z \leq V_{TH} \quad (4.15)$$

olarak elde edilir. $R(x)$ 'nin en alabileceği en büyük değer R_{off} değeri olduğundan, R_1 direncinin değeri,

$$R_1 \geq \frac{V_Z}{V_{TH}} R_{off} \quad (4.16)$$

olmalıdır. $R_1 \gg R_{off}$ olarak seçilirse,

$$V_{out} = V_Z \quad (4.17)$$

olmaktadır. Dolayısıyla regülatör çıkış gerilimi,

$$V_Z \leq V_{out} \leq V_Z + V_{TH} \quad (4.18)$$

4.5. MTSVR-B Devresi Tasarım Kriterleri

MTSVR-B devresi çıkış gerilimi, MTSVR-A ile yapısal benzerliğinden dolayı, denklem(1) ile aynıdır. MTSVR-B devresinde memristör gerilimi ise zener gerilimine eşittir,

$$V_X = V_Z \quad (4.19)$$

R_2 ve $R(x)$ ile seri bağlı oldukları için üzerlerinden aynı akım geçecektir, dolayısıyla,

$$V_{R2} = \frac{V_Z}{R(x)} R_1 \quad (4.20)$$

Devrenin çıkış değeri,

$$V_{out} = V_Z \left(1 + \frac{R_1}{R(x)}\right) \quad (4.21)$$

olarak verilir. Memristör modelinden dolayı, zener diyot geriliminin memristör eşik geriliminden küçük olması gerekir,

$$V_Z \leq V_{TH} \quad (4.22)$$

Çıkış gerilimi,

$$V_{out} = V_Z + V_{R1} \quad (4.23)$$

Denklem (4.20) , Denklem (4.22)' de yerine konulursa,

$$V_Z + V_{R1} = V_Z \left(1 + \frac{R_1}{R(x)}\right) \quad (4.24)$$

R_2 direncin gerilimi,

$$V_{R1} = V_Z \frac{R_1}{R(x)} \quad (4.25)$$

olarak bulunur.

V_{R2} memristans değeri ile ters orantılı olduğundan, memristansın en küçük değeri R_{on} ve en yüksek değeri R_{off} dikkate alındığında çıkış gerilimi,

$$V_Z \left(1 + \frac{R_1}{R_{OFF}}\right) \leq V_{out} \leq V_Z \left(1 + \frac{R_1}{R_{ON}}\right) \quad (4.26)$$

aralığında değişecektir.

4.6. MTSVR-C Devresi Kriterleri

MTSVR-C devresi iki adet memristör kullanılması sebebiyle MTSVR-A ve MTSVR-B devrelerine göre daha karmaşık bir yapıdadır. $R_2(x_2)$ memristör gerilimi, zener gerilimine eşittir ve eşik geriliminin zener geriliminden büyük olması gerekmektedir, bu durumda,

$$V_{x2} = V_Z \quad (4.27)$$

$$V_{x2} \geq V_Z \quad (4.28)$$

$R_1(x_1)$ memristör gerilimi,

$$V_{x1} = R_1(x_1) Z \frac{V}{R_2(x_2)} \quad (4.29)$$

Regülatör çıkış gerilimi,

$$V_{out} = V_Z + V_{x1} \quad (4.30)$$

$$V_{out} = V_Z \left(1 + \frac{R_1(x_1)}{R_2(x_2)}\right) \quad (4.31)$$

$R_1(x_1)$ memristör gerilimi, memristör yapısından dolayı ve regülasyon esnasında eşik geriliminden küçük olması gerektiğinden çıkış gerilimi,

$$V_{out} \leq V_Z + V_{TH1} \quad (4.32)$$

olur. Denklem (4.30) 'u denklem (4.31) 'de yerine koyarsak,

$$V_Z \left(1 + \frac{R_1(x_1)}{R_2(x_2)}\right) \leq V_Z + V_{TH1} \quad (4.33)$$

$$V_Z \frac{R_1(x_1)}{R_2(x_2)} \leq V_{TH1} \quad (4.34)$$

$R_1(x_1)$ ve $R_2(x_2)$ aynı kol akımına sahiptir ve bu durumda V_{X_1} in alabileceği en yüksek değer ve $R_1(x_1)$ memristörünün eşik geriliminin seçilebilecek en küçük değeri,

$$V_Z \frac{R_1(x_1)_{OFF}}{R_2(x_2)_{ON}} = V_{X_1} \leq V_{TH_1} \quad (4.35)$$

olur. V_{X_1} 'in alabileceği en düşük değer,

$$V_Z \frac{R_1(x_1)_{ON}}{R_2(x_2)_{OFF}} = V_{X_1} \quad (4.36)$$

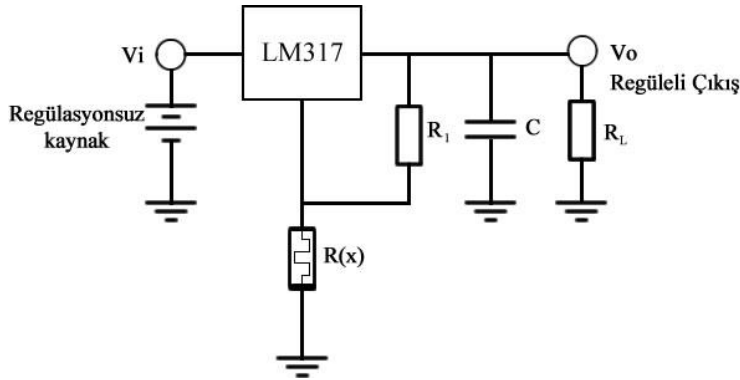
olur. Dolayısıyla regülatör çıkış gerilimi aralığı,

$$V_Z \left(1 + \frac{R_1(x_1)_{ON}}{R_2(x_2)_{OFF}}\right) \leq V_{out} \leq V_Z \left(1 + \frac{R_1(x_1)_{OFF}}{R_2(x_2)_{ON}}\right) \quad (4.37)$$

olarak bulunur.

4.7. Entegre (IC) Gerilim Regülatörleri

Bu bölümde entegre gerilim regülatörlerinden en bilinenlerinden biri olan LM317 entegresiyle yapılmış olan ayarlanabilir gerilim regülatörü devresinde potansiyometre yerine memristör bağlanarak oluşturulmuş bir memristör tabanlı entegre gerilim regülatörü devresi Şekil 4.8. 'de verilmiştir.



Şekil 4.8. Memristör tabanlı LM317 ile yapılmış ayarlanabilir regülatör devresi

Bu devrenin çıkış gerilimi,

$$V_{out} = 1,25 \left(1 + \frac{R(x)}{R_1}\right) \quad (4.38)$$

olarak bulunur. Çıkış geriliminin en küçük ve en büyük değeri R_{ON} ve R_{OFF} değerlerine bağlı olduğundan, bu aralık

$$1,25 \left(1 + \frac{R_{ON}}{R_1}\right) \leq V_{out} \leq 1,25 \left(1 + \frac{R_{OFF}}{R_1}\right) \quad (4.39)$$

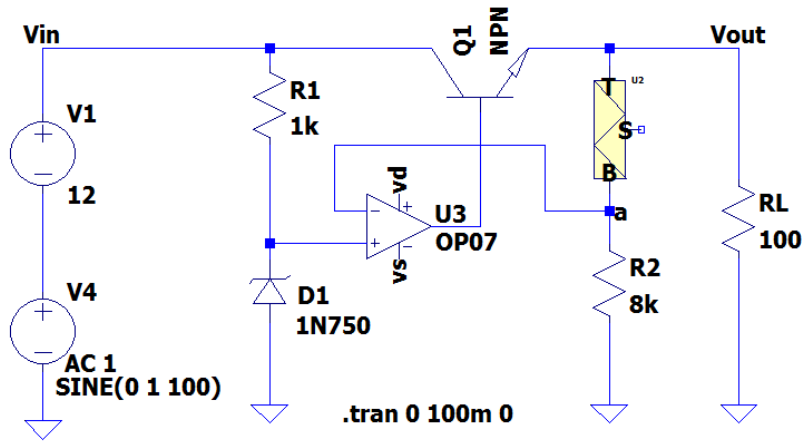
olarak bulunur.

5. LTSPICE PROGRAMINDA YAPILAN MEMRİSTÖR TABANLI SERİ GERİLİM REGÜLATÖRLERİ SİMÜLASYONLARI

Bu bölümde, Bölüm-4'te topolojileri ve kriterleri verilen, memristör tabanlı seri voltaj regülatörlerinden MTSVR-A devresinin, memristör geriliminin memristör eşik geriliminin altı ve üzeri gerilim değerlerinde iken LTspice programı kullanarak benzetimleri yapılmış ve ortaya çıkan dalga biçimleri incelenmiştir. MTSVR-B ve MTSVR-C topolojisi benzeri şekilde incelenebileceğinden benzetimi yapılmamıştır.

5.1. MTSVR-A Voltaj Regülatörünün Eşik Gerilimi Altında LTspice Programında Yapılan Benzetimi

Önceki bölümde analizleri kriterleri ortaya konulan MTSVR-A devresinin LTspice programında yapılan benzetimi Şekil 5.1.'te görülmektedir. Bu bölümde memristör gerilimi eşik geriliminden küçük kalacak biçimde LTspice programında benzetimi yapılmıştır. Memristör olarak Bölüm-2.7'de modellenen memristör kullanılmıştır.

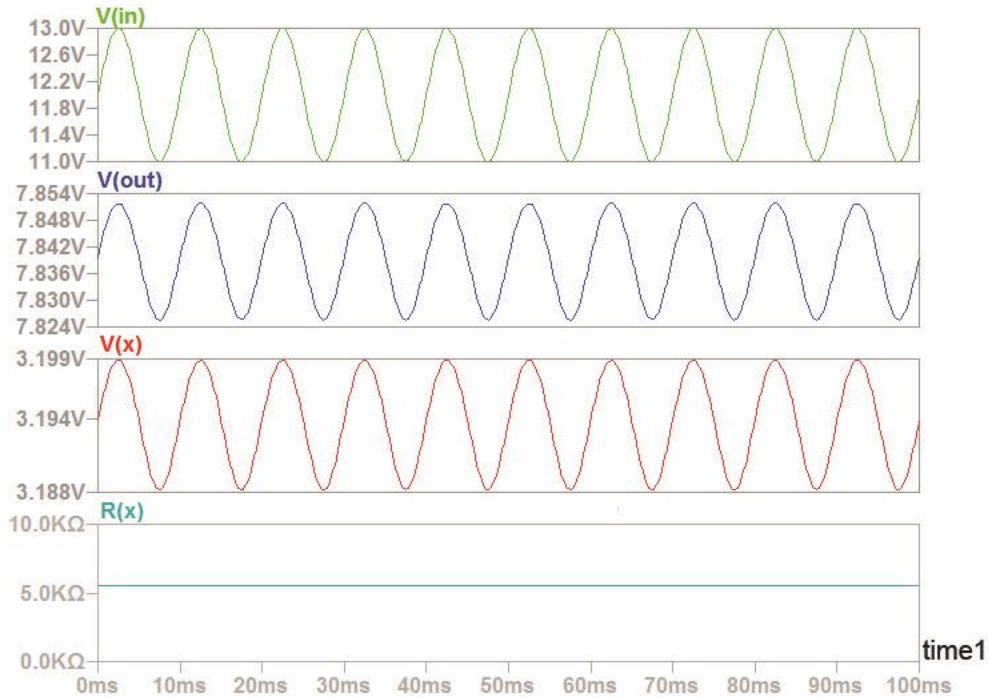


Şekil 5.1. Eşik gerilimi altında MTSVR-A devresinin LTspice benzetimi

Devre giriş voltajı $V_{in}(t)=12+1. \sin(200\pi t)$ Volt ve $x=0,5$ değerindeki memristör direnç değerinde, giriş gerilimi, çıkış gerilimi, memristör gerilim ve memristör memristansının zamana göre değişimi Şekil 5.2'de görülmektedir. Aynı zamanda bu dalga biçimlerinin büyütülmüş hali Şekil 5.3'te verilmiştir. Memristör voltajının eşik gerilimi altında kaldığı ve memristans değerinde herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmektedir.

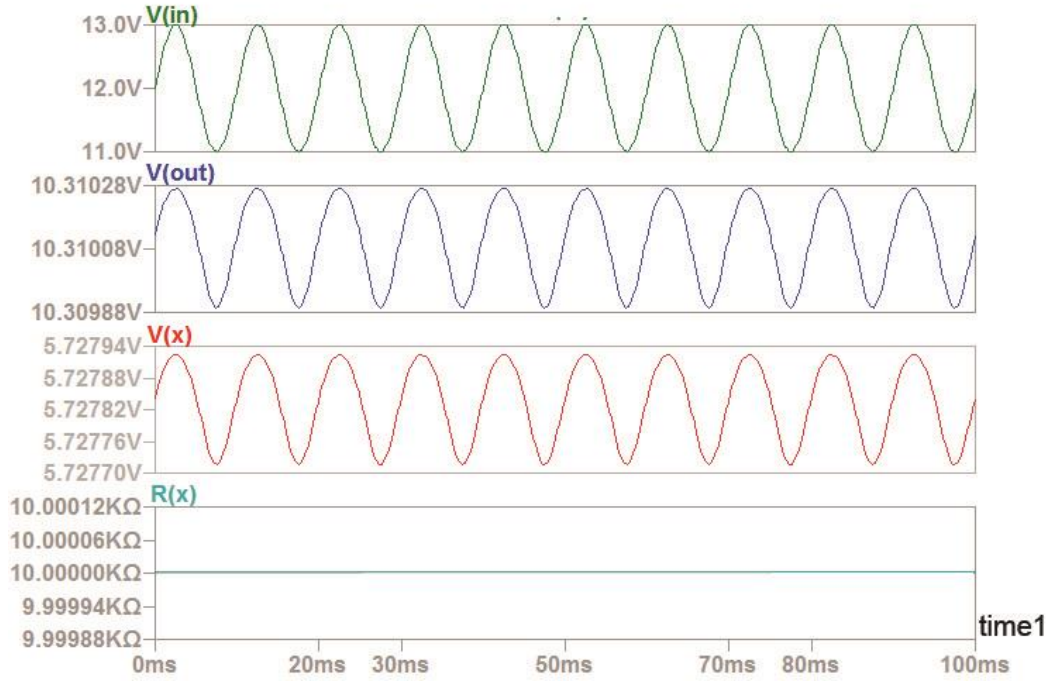


Şekil 5.2. Eşik gerilimi altında MTSVR-A devresinin zamana göre dalga biçimleri
a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci



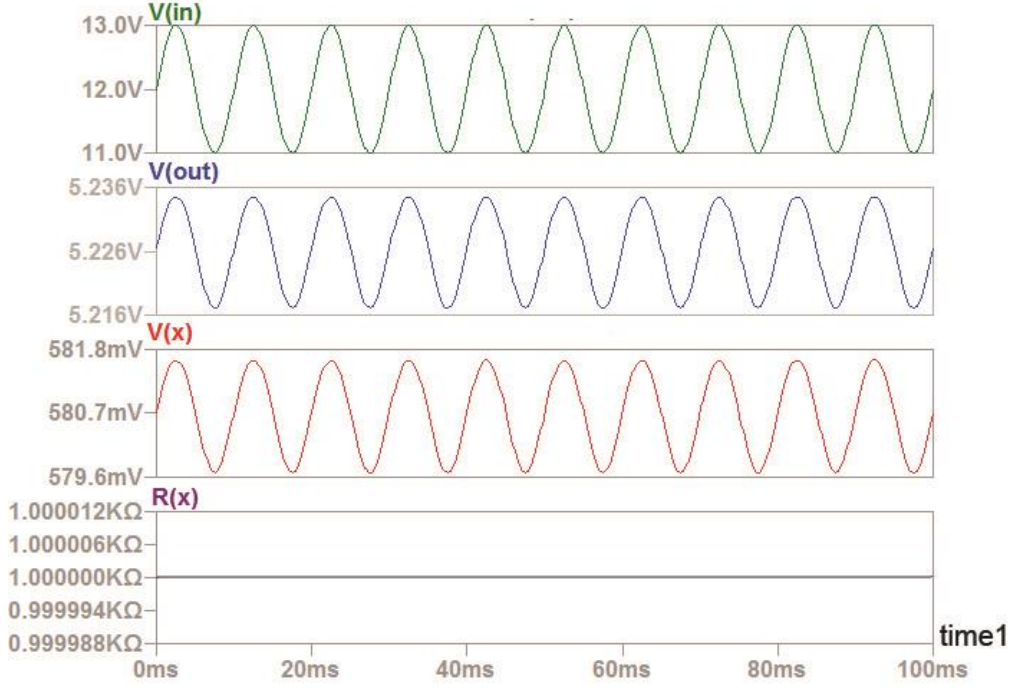
Şekil 5.3. Şekil 5.2'nin büyütülmüş görüntüsü a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi,
c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci

Şekil 5.1.'de verilen devre, memristörün R_{off} direnç değeri için benzetimi yapıldığında elde edilen ve Şekil 5.4'te verilen grafiklerde görüldüğü üzere memristör gerilimi eşik gerilimi değerine çok yakındır ve regülatör çıkış gerilimi en yüksek seviyesindedir.



Şekil 5.4. Roff memristans değerinde Şekil 5.1. devresi simüle edildiğinde zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci

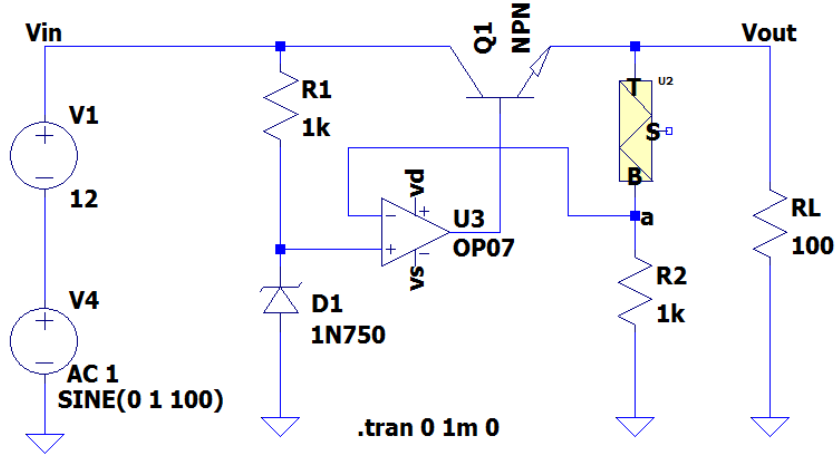
Şekil 5.1. 'de verilen devre, memristörün R_{on} direnç değeri için için benzetimi yapıldığında, elde edilen ve Şekil 5.5.'te verilen grafiklerde görüldüğü üzere memristör gerilimi çok küçük bir gerilime sahiptir ve regülatör çıkış gerilimi en küçük değerindedir ve bu değer zener diyot gerilimine çok yakın bir değerdir.



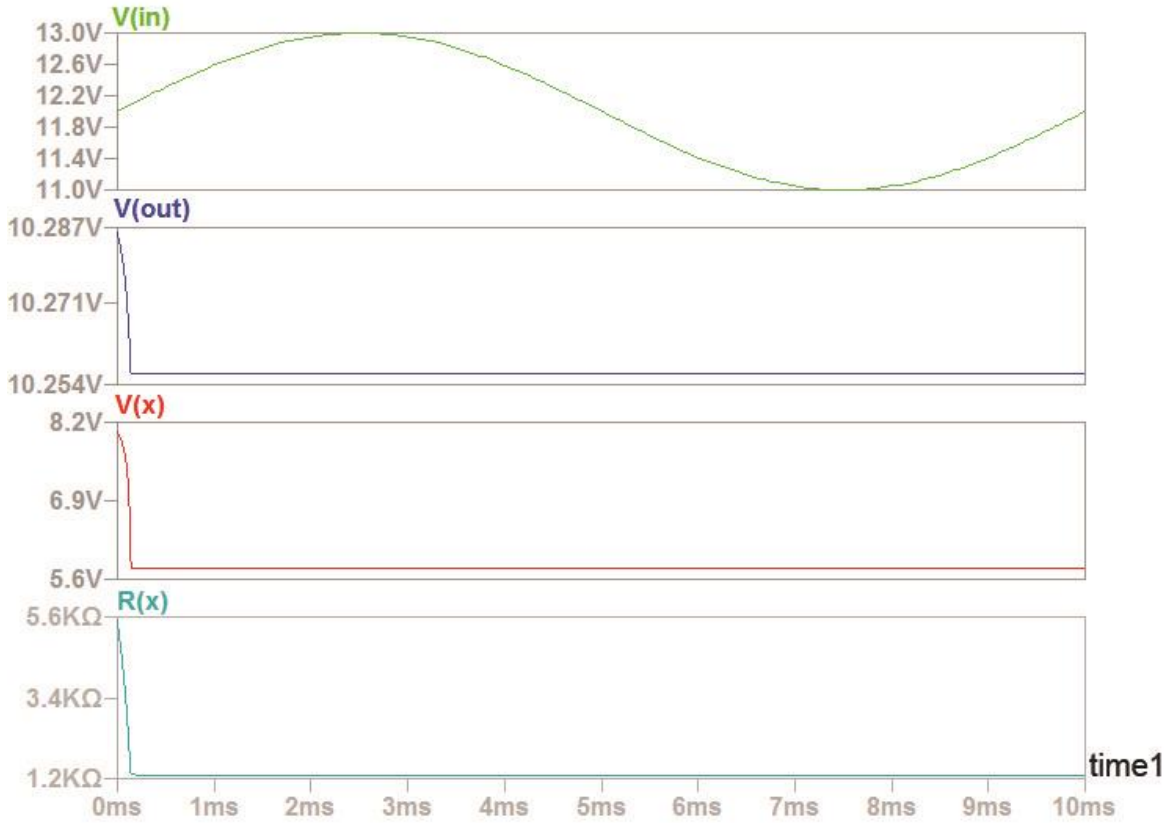
Şekil 5.5. Ron memristans değerinde Şekil 5.1. devresi simüle edildiğinde zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci

5.2. MTSVR-A Voltaj Regülatörü'nün Eşik Gerilimi Üzerinde Ltspice Programında Yapılan Benzetimi

Bu bölümde Şekil 5.1'de görülen MTSVR-A Voltaj Regülatörü'nün, memristör geriliminin, memristör eşik gerilimi üzerinde olduğu durum için benzetimi yapılmıştır. Şekil 5.6.'de görülen devrede, giriş gerilimi $V_{in}(t)=12+1.\sin(200\pi t)$ Volt için ve R_2 direnci $1K\Omega$ olarak seçilerek, memristans geriliminin eşik geriliminden büyük olması sağlanmıştır. Memristans değeri, memristör gerilimi eşik gerilimini geçince değişmeye başlar. Şekil 5.7.'de, giriş gerilimi, çıkış gerilimi, memristör gerilimi ve memristansının zamana göre değişimi görülmektedir.



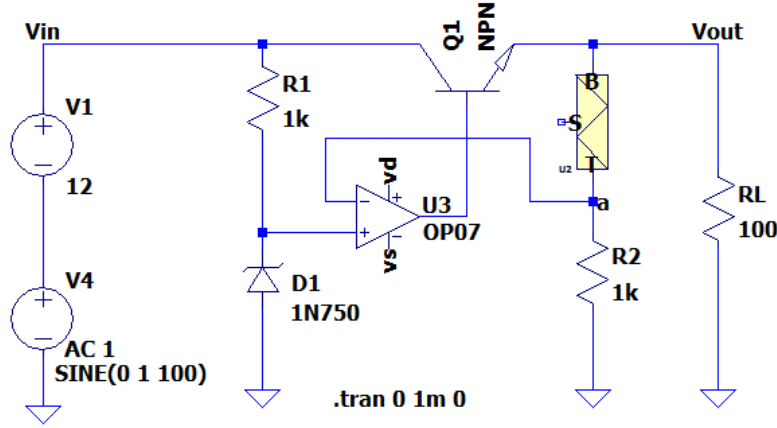
Şekil 5.6. Memristör geriliminin, eşik gerilimi üzerinde gerilime sahip olması durumu için kullanılan MTSVR-A devresi LTspice benzetimi



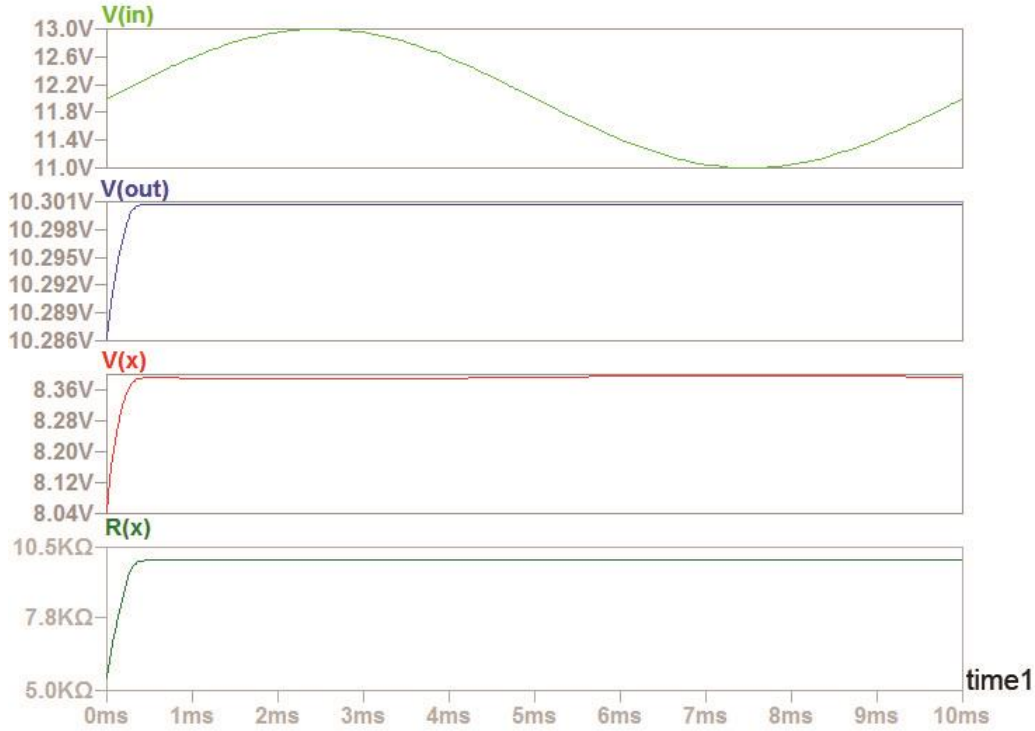
Şekil 5.7. Şekil 5.6 'da ki MTSVR-A devresi için zamana göre dalga biçimleri
a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci

Memristör akımının yönü, memristans değerinin azalma ya da artma yönünde davranış sergilemesine neden olur. Yada memristörün bağlantısı ters çevrildiğinde, direnç değerinin ters yönde değiştiği görülür. Memristör bağlantısının değiştirildiği devre Şekil 5.8'te görülmektedir. Bu durumda, giriş gerilimi yine $V_{in}(t)=12+1.\sin(200\pi t)$ Volt için devre simüle edildiğinde, devrenin giriş gerilimi, çıkış gerilimi, memristör gerilimi ve memristans değerlerinin zamana

göre değişimi Şekil 5.9’ da verilmiştir. Memristör polaritesinin değişmesi, Şekil 5.9’ da görüldüğü gibi memristans değişiminin de ters yönde olmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.8. Şekil 5.6 ‘da ki devredeki memristörün ters bağlanmasıyla elde edilen, memristör geriliminin, eşik gerilimi üzerinde gerilime sahip olması durumu için MTSVR-A devresi LTspice benzetimi



Şekil 5.9. Şekil 5.8 ‘de verilen MTSVR-A devresi için zamana göre dalga biçimleri a) Giriş Gerilimi, b) Çıkış Gerilimi, c) Memristör Gerilimi, d) Memristör Direnci

6. SONUÇ

Memristor, davranışı iyi bilinmeyen yeni ve doğrusal olmayan bir devre elemanıdır. Elektrik devrelerinde nerelerde kullanılabileceği henüz tam olarak anlaşılmamıştır. Bu yeni eleman için yeni kullanım alanları keşfedilmesi çok önemlidir. Bu tezde literatürde bir ilk olarak, yeterli eşik gerilimi V_{TH} değerine ve gerekli R_{ON} ve R_{OFF} memristansına sahip bir memristör ya da daha fazla memristör kullanarak, ayarlanabilir seri ve paralel gerilim regülatörlerinin, yapılabileceği gösterildi. Seri voltaj regülatörlerinin üç farklı topolojisi için tasarım kriterleri verildi ve LTspice programı kullanarak benzetimleri yapıldı. Böyle regülatör devrelerinde memristör memristansı bir mikrodenetleyici ile elektronik olarak kontrol edilebilir (ayarlanabilir) ve güç kaynağı kesildiğinde memristör ayarlanan direnç değerinde kalacağından, besleme gerilimi yeniden geldiğinde regülatör çıkış voltajı istenilen/ayarlanan değerde sabit kalmış olacaktır. TiO_2 veya diğer tip memristör cihazları henüz yeterince olgunlaşmamıştır. Yakın gelecekte analog uygulamalarda kullanılabilecek memristörlerin piyasalara iki uçlu bir devre elemanı olarak sunulması beklenilmektedir. Bu gerçekleştiği zaman, kullanıcılar bir TiO_2 veya farklı tip bir memristör(ler) ile daha önce teorik olarak ve benzetimler kullanarak analiz edilmiş analog devrelere ait mevcut bilgileri ve tasarım kriterlerini kullanarak tasarlayabilirler. Memristör tabanlı voltaj regülatörlerinin gelecekte yaygın olarak kullanılan elektronik devrelerin bir parçası olması ihtimal dâhilindedir. Bu çalışma memristör tabanlı voltaj regülatörleri çalışmalarını için bir başlangıç noktası olarak kullanılabilir. Kullanılacak memristör modeli geliştikçe memristör tabanlı voltaj regülatörlerinin tasarım kriterleri de bu tezde verilen yöntemler kullanılarak güncellenmelidir.

7. KAYNAKLAR

- Ascoli, A., Tetzlaff, R., Corinto, F., Mirchev, M., Gilli, M., (2013). Memristor-based filtering applications, In: 14th Latin American Test Workshop (LATW), 3-5 April 2013, Cordoba.
- Berdan, R., T. Prodromakis, and C. Toumazou (2012). High precision analogue memristor state tuning, *Electronics letters* 48, 18: pp.1105-1107.
- Bi, X., Zhang, C., Li, H., Chen, Y., & Pino, R. E. (2012). Spintronic memristor based temperature sensor design with CMOS current reference. In 2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. pp. 1301-1306 IEEE.
- Biolek Z., Biolek D., and Biolkova V., (2009). SPICE model of memristor with non-linear dopant drift, *Radioengineering*, 18.2: pp. 210–214.
- Chew, Z.J., Li, L., (2012). Printed circuit board based memristor in adaptive lowpass filter, *Electronics Letters*, 48: pp. 1610-1611.
- Chua L. O. (1971). Memristor - The Missing Circuit Element, *IEEE Trans.Circuit Theory*, 18: pp. 507-519.
- Chua L. O. and Kang S. M. (1976). Memrisive devices and systems, *Proc.IEEE*, 64: pp. 209-223.
- Driscoll, T., Quinn, J., Klein, S., Kim, H.T., Kim, B.J., Pershin, Y.V., Ventra, M.D., Bassov, D.N.,(2010). Memristive adaptive filters, *Applied Physics Letters*, 97: pp. 1–3.
- Joglekar Y. N. and Wolf S. J. (2009). The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits, *Eur. J. Phys.*, 30.4: pp. 661–675.
- Karakulak E., Mutlu R., and Erdem U., (2016). Reconstructive sensing circuit for complementary resistive switches-based crossbar memories, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*24.3:pp. 1371-1383.
- Kavehei O., Iqbal A., Kim Y.S., Esraghian K., AL-Sarawi S.F., Abbott D. (2010). The fourth element: characteristics, modeling and electromagnetic theory of the memristor, *Proc. R. Soc. A*, 466: p.p. 2175–2202.
- Muthuswamy B. (2010). Implementing memristor based chaotic circuits, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 20(5): pp. 1335-1350.
- MUTLU R., Taylor Serisi ve Kutupsal Fonksiyonlar Kullanarak Memristörün (Hafızalı Direncin) Histeresis Eğrisinin Açıklanması, 3. İleri Muhendislik Teknolojileri Sempozyumu, 29-30 Mayıs 2010 (29.05.2010-30.05.2010).

- Mutlu, R. (2015). Solution of TiO₂ memristor-capacitor series circuit excited by a constant voltage source and its application to calculate operation frequency of a programmable TiO₂ memristor-capacitor relaxation oscillator. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23(5):pp. 1219-1229.
- Mutlu, R., ve Karakulak, E. (2018). Memristor-Based Phase Shifter. In 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT) (pp. 1-5). IEEE.
- Özgüvenç, A., Mutlu, R., & Karakulak, E. (2016). Sawtooth signal generator with a memristor, 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences Afyon Kocatepe University, Turkey 21-22 April.
- Pershin Y. V., Martinez-Rincon J., Di Ventra M. (2011). Memory circuit elements: from systems to applications, Comments: to be published in the Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 8: pp. 441-448.
- Pershin Y., Di Ventra M. (2010). Practical Approach to Programmable Analog Circuits with Memristors, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 57: pp. 1857 – 1864.
- Prodromakis T., Toumazou C. (2010). A Review on Memristive Devices and Applications, *Electronics, Circuits, and Systems (ICECS)*, 17th IEEE International Conference on, pp. 934 – 937.
- Shahar K., Eby G. F., Avinoam K., Uri C. W., (2013). TEAM: ThrEshold Adaptive Memristor Model, *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on* 60.1: pp. 211 – 221.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (1998). *Microelectronic circuits*. New York: Oxford University Press.
- Shin S., Kim K., Kang S.M.(2009), Memristor-based fine resolution programmable resistance and its applications, in *ICCCAS 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, pp. 948–951.
- Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., and Williams R. S. (2008), The missing memristor found, *Nature (London)*, 453: pp. 80-83, 2008.
- Shin S., Kim K., Kang S.M. (2011). Memristor applications for programmable analog ICs, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 10: pp. 266–274.
- Talukdar A, Radwan AG, Salama KN. (2011), Generalized model for memristor-based Wien-family oscillators, *Journal of Microelectronics*, 42: pp. 1032–1038.
- Vongehr, Sascha, and Xiangkang Meng. The missing memristor has not been found., *Scientific reports* 5 (2015).

- Wey T.A., Jemison W.D. (2010). An automatic gain control circuit with TiO₂ memristor variable gain amplifier, in 2010 8th IEEE International NEWCAS Conference (NEWCAS), pp. 49–52.
- Wey T.A., Jemison W.D. (2011). Variable gain amplifier circuit using titanium dioxide memristors, IET Circuits, Devices & Systems, 5: pp. 59–65.
- Wey TA, Benderli S. (2009), Amplitude modulator circuit featuring TiO₂ memristor with linear dopant drift. Electronics Letters, 45: pp. 1103 – 1104.
- Yener Ş., Mutlu R., Kuntman H. H.,(2015). A new memristor-based low-pass filter topology and its small-signal solution using MacLaurin series, Optoelectronics And Advanced Materials – Rapid Communications, 9: pp. 266-273.
- Yener Ş., Mutlu R., Kuntman H. H., (2014). Performance Analysis of a Memristor - Based Biquad Filter Using a Dynamic Model, Journal of Microelectronics,Electronic Components and Materials, 44: pp. 109-118.
- Yener, Ş. Ç., Mutlu, R., Yener, T., & Kuntman, H. H. (2017). Memristor-based timing circuit. In 2017 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting. pp.1-3 IEEE.
- Yi, W., Perner, F., Qureshi, M. S., Abdalla, H., Pickett, M. D., Yang, J. J., ... & Williams, R. S. (2011). Feedback write scheme for memristive switching devices. Applied Physics A, 102(4), 973-982.

ÖZGEÇMİŞ

Kutluhan Kürşad YAVUZ, 16 Mayıs 1982 yılında Biga’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İzmir’de tamamladı. Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Elektronik Öğretmenliği programından 2005 yılında mezun oldu. 2016 yılında Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ve Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme programlarından mezun oldu. 2016 yılında başlayan Yüksek Lisans eğitimine devam ediyor.