

Optoelektronik Tabanlı Gerilim Kontrollü Memristör Emülatörü

An Optoelectronic-based Voltage-controlled Memristor Emulator

Arif Kıvanç Üstün¹, Meltem Apaydın Üstün¹, Reşat Mutlu¹
0000-0002-9336-7930 0000-0001-9225-9455 0000-0003-0030-7136

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye
akustun@nku.edu.tr, mapaydin@nku.edu.tr, rmutlu@nku.edu.tr

Öz

1971 yılında Memristörün dördüncü temel devre elemanı olduğu Dr. Chua tarafından ileri sürülmüştür. 1976 yılında Memristif sistemlerin varlığının farkına varılmıştır. Memristör doğrusal olmayan hafızalı pasif bir devre elemanıdır. 2008 yılında bir TiO_2 ince filmin belli bir çalışma aralığında memristör gibi davrandığı gösterilmiştir. Bundan sonra memristör oldukça popüler bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmıştır. Memristörlerin piyasaya çıkmasıyla birlikte hafızaya sahip olmaları nedeniyle kontrol, sinyal işleme, programlanabilir mantık, filtreleme ve haberleşme elektronik sistemleri, hafıza çipleri vb. alanlarda yenilikler getirmesi beklenilmektedir. İnce film memristif sistemler sadece az sayıda şirket ve üniversiteler tarafından elde edilebilmektedir. Bu nedenle çoğu araştırmacı çalışmalarında hala benzetimler ve/veya memristör emülatörleri kullanmaktadır. Literatürde bildiğimiz kadarıyla optik prensiplerle veya optik devre elemanlarıyla çalışan az sayıda memristör emülatörü bulunmaktadır. Bu çalışmada literatürde ilk kez gerilim kontrollü ayarlanabilir karakteristikli bir optoelektronik tabanlı memristör emülatörü tasarlanmıştır. Bu emülatörün karakteristiği öngerilim kullanarak değiştirilebilmektedir. Çalışmada önce emülatörün denklemleri türetilmiş, ardından Simulink benzetim programı kullanılarak yapılan benzetimler ve yapılan deneyler ile emülatörün memristör davranışını iyi bir şekilde taklit edebildiği doğrulanmıştır. Memristör emülatörünün iyi bir performansa sahip olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Memristör, Memristör Emülatörü, LED, Işığa Bağımlı Direnç, Elektronik Tasarım, Optoelektronik.

Abstract

In 1971, Dr. Chua suggested that the memristor is the fourth basic circuit element. In 1976, the existence of memristive systems was realized. Memristor is a passive circuit element with nonlinear memory. In 2008, it was shown that a TiO_2 thin film behaves like a memristor within a certain operating range. After this, memristors emerged as a very popular research area. With the introduction of memristors to the market, it is expected that they will bring innovations in the fields of control, signal processing, programmable logic, filtering and communication electronic systems, memory chips, etc. due to their memory. Thin film memristive systems can only be obtained by a few companies and universities. Therefore, most researchers still use simulations and/or memristor emulators in their studies. As far as we know, there are only a few memristor emulators in

literature that work with optical principles or optical circuit elements. In this study, a voltage-controlled optoelectronic-based memristor emulator with an adjustable characteristic using a biasing voltage is designed for the first time in literature. The characteristics of this emulator can be altered using a biasing voltage. In this study, first, the equations of the emulator were derived, and then, by simulations and experiments using the Simulink simulation, it was verified that the emulator can imitate the memristor behavior well. It was shown that the memristor emulator has a good performance.

Keywords: Memristor, Memristor Emulator, LED, Light Dependent Resistor, Electronic Design, Optoelectronics

1. Giriş

Doğrusal olmayan (nonlinear) devre teorisinin kurucusu Dr. Leon Chua 1971'de devre değişkenleri arasındaki simetriyi göz önünde bulundurarak direnç, endüktör ve kapasitör dışında bir temel devre elemanının da olması gerektiğini ileri sürdü [1]. Memristör yani hafızalı direnç diye isimlendirdiği bu devre elemanını güç tüketen, yüke bağlı, doğrusal olmayan bir devre elemanı olarak tanımladı. Memristörün değeri değişen yüke bağlı elektriksel direncini memristans ve akiya bağlı iletkenliğini memdükans diye isimlendirdi. Chua ve Kang 1976'da memristöre benzer özellikleri olan sistemleri memristif sistemler olarak tanımladı ve bu sistemlerin AC sinyal ile beslendiğinde sıfır geçişli frekansa bağlı histerezis eğrisine sahip olması gerektiğini gösterdi [2]. Memristor neredeyse kırk yıl kuramsal devre elemanı olarak kaldı [3]. 2008'de platin kontaklar arasına sıkıştırılmış bir TiO_2 ince filminin 2008 yılında bir memristör gibi davrandığının farkına varıldı [4]. Bu keşfin ardından memristör ve nano boyuttaki memristif sistemler popüler bir araştırma alanı haline geldi [5, 6]. İdeal bir memristörün sıfırdan geçen histerezis eğrisi olmalıdır [2]. Memristörlerin üç parmak izi, memristörleri veya memristif sistemleri teşhis etmek için yaygın olarak kullanılır [7]. İdeal memristör hala bulunmamıştır ama bugünlerde memristif sistemler ve ideal olmayan memristörler de memristör diye isimlendirilmektedir [8]. Memristör bazı nonlinear dirençleri modellemeyi kolaylaştırmak için kullanılan bir aygıt veya ideal bir devre elemanı modeli olarak da düşünülebilir [1, 8].

Memristörün yeni tip analog ve dijital devre uygulamalarını ortaya çıkarması beklenilmektedir [9-12]. Bir ince film memristör prototipi geliştirmek, bu hafızalı devre elemanları nano boyutta yapıldığından oldukça maliyetlidir. Günümüzde araştırma yapılması için piyasada satılan az sayıda memristör direnç gibi elemanlarla karşılaştırıldığında pahalıdır [13, 14].

Bu nedenle memristör emülatörleri, memristör araştırmalarında kavramların kanıtlanması için tasarlanmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 9, 15-19]. İlk memristör emülatörü Chua tarafından kullanılmıştır [1]. Dijital potansiyometre kullanan memristör emülatörleri [9, 20]'de incelenmiştir. Ayrık komponentler kullanılarak yapılan bir MOSFET tabanlı memristör emülatörü [21, 22]'de bulunabilir. Akım taşıyıcı kullanan memristör emülatörleri de yapılabilmektedir [23-26]. Bazı memristör emülatörleri analog çarpıcılar kullanarak yapılabilmektedir [27, 28]. Geçenlerde güç katsayısı düzeltme güç elektroniği devre topolojisi kullanılarak yeni tür bir tür memristör emülatörü yapılabileceği de gösterilmiştir [29].

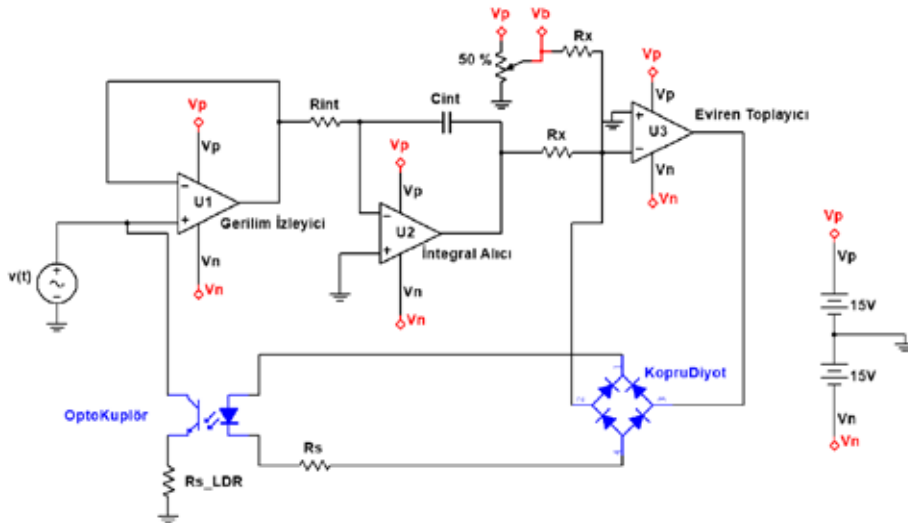
Zakhidov ve arkadaşları [30] çalışmalarında ışık saçan memristörlerin de olduğunu rapor etmişlerdir. Bu türde sensör veya hesaplamalarda kullanılabilecek memristörler üzerine nano boyutta çalışmalar devam etmektedir [31-34]. Literatürde birkaç optoelektronik tabanlı memristör emülatörü bulunmaktadır [35-38]. [35]'te ışığa bağlı bir direnç (LDR) kullanılarak optoelektronik tabanlı bir memristör yapılmıştır. Bu devre [36]'da bir kaos üretici yapmak için kullanılmıştır. [37]'de optik devre bileşenleri kullanılarak rasyonel memristör fonksiyonuna sahip bir memristör emülatörü yapılmıştır. Benzeri bir optokuplör mikrodenetleyici ile kontrol edilerek bir hibrid memristör emülatörü [38]'de yapılmıştır. Bu emülatörlerden bazıları elle yapılmış optokuplör içermektedir [35-38]. Gerilim (Akı) kontrollü bir emülatör emülatörü [39]'da sunulmuştur. Literatürde bildiğimiz kadarıyla henüz gerilim kontrollü bir optoelektronik tabanlı emülatör yapılmamıştır. Bu şekilde ayarlanabilir bir memristans karakteristiğine sahip devre osilatör yapılarında kullanılabilmektedir. Bu çalışmanın amacı elde yapılan bir optokuplör kullanarak gerilim kontrollü ayarlanabilir karakteristiğe sahip bir memristör emülatörü yapılmasıdır. [36-38,41,42]'deki benzer devrelerden ilham alınarak tasarlanmıştır ve bu devrenin ayarlanabilir karakteristiğine sahip olduğu gösterilecektir. [37]'deki memristör emülatörü de ayarlanabilir bir karakteristiğe sahiptir ama memristans fonksiyonunun ayarlanması sahip olduğu geri beslemeden dolayı oldukça kompleks bir işlemdir. Osilatör çalışmaları için bu ayar oldukça zordur. Bu çalışmada yapılan emülatörün ayarı daha basittir ve memristör tabanlı herhangi bir

uygulama için parametreleri ve davranışı daha kolayca ayarlanabilir. Benzetimler ve deneyler kullanılarak emülatörün memristör davranışını taklit edip edemediği ve iyi bir performans gösterip göstermediği incelenecektir.

Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde, bu çalışmada tasarlanan memristör emülatörü tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde optokuplör tasarlanmış ve karakteristiği yapılan deneyle belirlenmiştir. Dördüncü bölümde Simulink programı kullanılarak emülatörün benzetimi yapılmıştır. Beşinci bölümde memristör emülatörünün farklı gerilim ve frekanslardaki davranışı incelenmiştir ve memristör emülatörünün memristörün üç parmak izine sahip olduğu deneysel sonuçlar ile bu bölümde gösterilmiştir. Son olarak sonuç ve önerilerle çalışma sonlandırılmıştır.

2. Memristör Emülatör Devresi Tasarımı

Memristör emülatörü memristör benzeri özellikleri olan yani memristörü taklit eden bir elektronik devredir. Dr. Chua'nın 1971'de tasarladığı emülatör devresi çok sayıda işlemsel yükselteç ve transistörler içerdiğinden gerçekleştirilmesi oldukça karmaşık ve zaman alıcıdır [1]. Bu makalede elde edilmesi kolay, ucuz ve daha az elemana sahip, uygulaması kolay optoelektronik tabanlı bir memristör emülatör devresi tasarlanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilecek emülatörün şeması Şekil 1'de verilmiştir. Devre, 3 işlemsel kuvvetlendirici, 1 LDR, 1 beyaz LED, 4 diyot, 5 direnç, 1 potansiyometre ve 1 kondansatörden oluşmaktadır. LDR'ye seri bağlı olan R_s direnci deneylerde memristör akımını ölçmek için kullanılacaktır. Gerilim takipçisi olarak kullanılan U1 işlemsel kuvvetlendiricinin girişine ve LDR ile ona seri bağlı olan R_{s_LDR} direncine uygulanan gerilim $v(t)$, memristör emülatörünün gerilimidir. Tüm opamplar ± 15 Voltluk simetrik güç kaynağı ile beslenmiştir. Gerilim takipçisine yük olarak U2 işlemsel kuvvetlendiricisi ile yapılan eviren integral alıcı devre eklenmiştir. U3 bir eviren toplayıcı devresidir. U3 girişinde integratör çıkış gerilimi ve potansiyometreden elde edilen öngerilim gerilimi toplanmakta ve bu toplanan değere doğrusal bağlı bir akım, geri besleme yolu üzerinden akmaktadır. Bu geri



Şekil 1: Memristör emülatörünün devre şeması.

besleme akımı Şekil 1'de görülen köprü diyot içinden akarak LEDden bir DC akım geçmesini sağlamaktadır. İki farklı LED'in kullanılması devre dalga şekillerinde asimetriye yol açabileceğinden, bunu önlemek için, LED'ler bir diyot köprüsü kullanılarak beslenmiştir. Bu işlem hem pozitif hem de negatif akım polaritesi için LED'den pozitif bir akım geçmesini sağlayacaktır. Öngerilimleme değeri sıfır olmadıkça LED'in içinden her zaman bir DC akım geçmesini sağlamakta ve LDR direncinin kabul edilebilir değerler arasında kalmasını sağlamaktadır. İntegral alıcı devreden dolayı uygulanan gerilimin integraline yani memristör emülatörünün akısına bağlı bir LED akımı ve bu LED akımı ile optokuplör vasıtasıyla yapılan optik bağlantı sayesinde LDR'nin direncinin değişimi sağlanmaktadır. Yani akıya bağlı bir LDR direnci elde edilmektedir. R_s seri direnci LED'i korumak için devreye konulmuştur. Devrede gerilim izleyicisi olarak kullanılan U1 işlemsel kuvvetlendiricisinin çıkış gerilimi memristör emülatörü giriş gerilimi $v(t)$ 'ye eşittir. İntegral alıcı U2 işlemsel kuvvetlendiricisinin çıkış gerilimi

$$V_{Integrator}(t) = -\frac{1}{R_{int}C_{int}} \int_{-\infty}^t v(t) dt \quad (1)$$

olarak verilir. Burada R_{int} integratör giriş direnci ve C integratör kapasitansdır. Emülatör akısı $\varphi(t)$ memristör geriliminin integralidir:

$$\varphi(t) = \int_{-\infty}^t v(t) dt \quad (2)$$

Memristör akısı $\varphi(t)$ kullanılarak;

$$V_{Integrator}(t) = -\frac{1}{R_{int}C_{int}} \varphi(t) \quad (3)$$

bulunur. U3 işlemsel kuvvetlendiricisi toplayıcı olarak çalışmaktadır ve giriş akımı:

$$i_x(t) = \frac{V_{Integrator}(t)}{R_x} + \frac{V_b}{R_x} = \frac{V_{Integrator}(t)}{R_x} + I_{offset} \quad (4)$$

olarak verilir. Burada R_x , U3 işlemsel kuvvetlendiricisi ile yapılan eviren kuvvetlendiricinin giriş direncidir, V_b , bias gerilimidir yani ön gerilimdir ve $I_{offset} = \frac{V_b}{R_x}$, DC offset akımıdır, $i_x(t)$ akımı aynı zamanda tam dalga doğrultucunun (köprü diyot) giriş akımına eşittir. Doğrultucunun çıkış akımı ise kullanılan optokuplördeki LED'in akımına yani $i_x(t)$ akımının mutlak değerine eşittir:

$$i_{LED}(t) = |i_x(t)| = \left| \frac{1}{R_x R_{int} C_{int}} \varphi(t) + I_{offset} \right| = |\alpha \varphi(t) + I_{offset}| \quad (5)$$

Burada $\alpha = \frac{1}{R_x R_{int} C_{int}}$ 'dir. Denklem 5'te görüldüğü üzere LED akımı memristör akısının fonksiyonudur. U2 işlemsel kuvvetlendiricisinin maksimum gerilimi yani doyma gerilimi (V_{sat}), LED akımının elde edilebilecek maksimum değerini yani LDR direncinin minimum değerini belirler:

$$\max(i_{LED}(t)) = \frac{V_{sat}}{R_x} \quad (6)$$

Memristör emülatörünün direnci;

$$R(q) = \frac{v(t)}{i(t)} = R_{LDR} + R_{S_LDR} \quad (7)$$

olarak hesaplanır. Memristör emülatörünün yükü, giriş akımının zamana göre integrali olarak tanımlanır:

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(t) dt \quad (8)$$

Memristörün minimum ve maksimum direnci R_{on} ve R_{off} ise, bu değerler

$$R_{on} = \min(R(q)) = \min(R_{LDR}) + R_{S_LDR} \quad (9)$$

ve

$$R_{off} = \max(R(q)) = \max(R_{LDR}) + R_{S_LDR} \quad (10)$$

olarak bulunur. Memristörün iletkenliği, yani akı bağımlı memdüktransi:

$$W(\varphi(t)) = \frac{1}{R(q)} = \frac{1}{R_{LDR} + R_{S_LDR}} = \frac{1}{g(|\alpha \varphi(t) + I_{offset}|) + R_{S_LDR}} \quad (11)$$

olarak hesaplanır. Memristörlerin akı değerlerine yani geçmişte uygulanan gerilimin integraline göre iletkenliği yani memdüktrans değeri değişmektedir. Burada $R_{LDR} = g(I_{LED})$ LDR direncidir ve I_{LED} LED akımının fonksiyonudur. R_{LDR} LED akımının bir çift fonksiyonudur ve formülü 3. bölümde verilecektir. Memristörün minimum ve maksimum iletkenliği yani memdüktransı W_{on} ve W_{off} olsun. Bu değerler

$$W_{on} = \min(W(\varphi(t))) = \frac{1}{\max(R_{LDR}) + R_{S_LDR}} \quad (12)$$

ve

$$W_{off} = \max(W(\varphi(t))) = \frac{1}{\min(R_{LDR}) + R_{S_LDR}} \quad (13)$$

olarak hesaplanır. Bu emülatörün memristansı ve memdüktransı için şu ifadeler her zaman doğrudur:

$$R_{on} + R_{S_LDR} \leq R(q) \leq R_{off} + R_{S_LDR} \quad (14)$$

ve

$$W_{off} \leq W(\varphi(t)) \leq W_{on} \quad (15)$$

Memristörler ve memristif sistemler akım ve gerilim kontrollü olarak modellenebilir [1-2]. Literatürde bazı araştırmacılar gerilim kontrolü yerine "akı kontrollü" ve akım kontrollü yerine "yük kontrollü" deyimlerini kullanmaktadır [40]. Memdüktrans kullanılarak, memristör emülatörünün uç denklemi

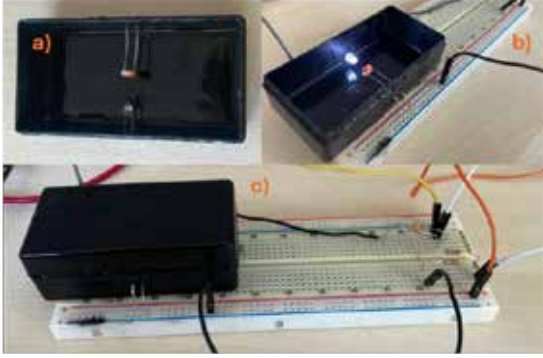
$$i(t) = W(\varphi(t))v(t) \quad (16)$$

olarak verilir.

3. Optokuplör Karakteristiği

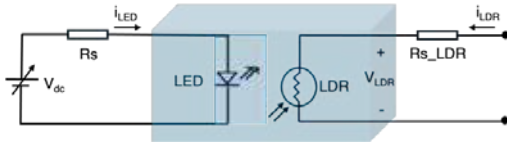
Şekil 2'de, bu çalışma için hazırlanan el yapımı optokuplör kutusu görülmektedir. Şekil 1'deki LED ve LDR bu kutunun içine yerleştirilmiştir. Beyaz ışık veren bir LED kullanılmıştır. Optokuplör içindeki LED'in akımının değerine bağlı olarak

LED'in yaydığı ışığın şiddeti LDR'nin direncinin değerini değiştirmektedir. Dışarıdan alınan ortam ışığına bağımlılığı ortadan kaldırmak için kutunun içi ve dışı siyah boya ile boyanarak istenmeyen ışığın emilmesi sağlanmıştır. Benzeri bir optokuplör [41]'de bir Biryukov osilatörü yapımında kullanılmıştır. Böyle bir optokuplörün yapımına dair daha detaylı bilgi [42]'de bulunabilir.



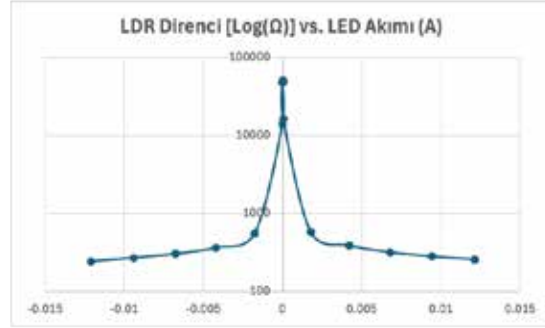
Şekil 2: El yapımı optokuplörün: a) Üstten açık ve çalışmazken çekilen fotoğrafı, b) Kapağı açık ve çalışırken çekilen fotoğrafı ve c) Kapağı kapalı ve çalışırken çekilen fotoğrafı

Şekil 3'teki deney düzeneği, bu optokuplörün karakteristiğini yani LED'in akımına bağlı olarak değişen LDR direncinin değerini ölçmek için kullanıldı. Kaynak olarak ayarlanabilir simetrik bir DC kaynağı kullanılmıştır. Seri direnç R_s , LED'in aşırı akım çekmesini engellemek ve akımını ölçmek için kullanılmıştır.



Şekil 3: Optokuplörün LED akımı-LDR direnci karakteristiğini elde etmek için kullanılan test düzeneği

Şekil 3'te görülen R_{s_LDR} seri direnci ve LDR tarafının besleme gerilimi olan 5 V gerilim kaynağı LDR direncinin ölçümünde kullanılmıştır. Ölçülen LDR direncinin LED akımına göre değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Aldığı ışık şiddetine göre LDR'nin direnç değerinin değiştiği görülmektedir. LDR'nin direnci, LED akımının sıfıra yaklaştığı noktalarda maksimum değerine ulaşmakta ve LED akımının pozitif veya negatif yönde artmasıyla birlikte LDR'nin direnci azalmaktadır. Bu değişimlerin daha iyi görünmesi için LDR direnci eksenini logaritmik olarak çizilmiştir. Eğri LDR'nin LED'in verdiği ışık, şiddetine duyarlılığını ve akım değişimlerine verdiği tepkiyi göstermektedir.



Şekil 4: LDR direncinin LED akımına göre değişimi

En küçük kareler yönteminden yararlanarak, LDR direncine LED akımının bir fonksiyonu olarak bir eğri uydurulmuştur. Seçilen fonksiyonun denklemi aşağıda verilmiştir. Denklem 17'deki katsayılar Tablo 1'de verilmiştir.

$$R_{LDR} = g(i_{LED}) = \text{sign}(i_{LED})(a_6|i_{LED}|^6 + a_5|i_{LED}|^5 + a_4|i_{LED}|^4 + a_3|i_{LED}|^3 + a_2|i_{LED}|^2 + a_1|i_{LED}| + R_0) \quad (17)$$

Tablo 1: LDR direnç fonksiyonu için elde edilen katsayıların değerleri

Katsayı	Değer
R_0	32260
a_1	9.43
a_2	-1993.94
a_3	$-9.34 \cdot 10^{-1}$
a_4	29.30
a_5	$-0.83 \cdot 10^{-2}$
a_6	-0.12

Denklem 5'te verilen LED akımı, Denklem 17'de yerine konulduğunda, memristör emülatörünün giriş direnci şu şekilde yazılabilir:

$$R_{LDR} = R_{LDR}(\varphi) = \text{sign}(\varphi)(a_6\alpha^6|\varphi|^6 + a_5\alpha^5|\varphi|^5 + a_4\alpha^4|\varphi|^4 + a_3\alpha^3|\varphi|^3 + a_2\alpha^2|\varphi|^2 + a_1\alpha|\varphi| + R_0) \quad (18)$$

Denklem 17'de verilen LDR direnci R_{LDR} Denklem 11'de verilen memristörün memdüksansında yerine konursa

$$W(\varphi(t)) = \frac{\text{sign}(\varphi)}{(a_6\alpha^6|\varphi|^6 + a_5\alpha^5|\varphi|^5 + a_4\alpha^4|\varphi|^4 + a_3\alpha^3|\varphi|^3 + a_2\alpha^2|\varphi|^2 + a_1\alpha|\varphi| + R_0) + R_{s_LDR}} \quad (19)$$

olarak elde edilir.

4. Memristör Emülatörünün Benzetimi

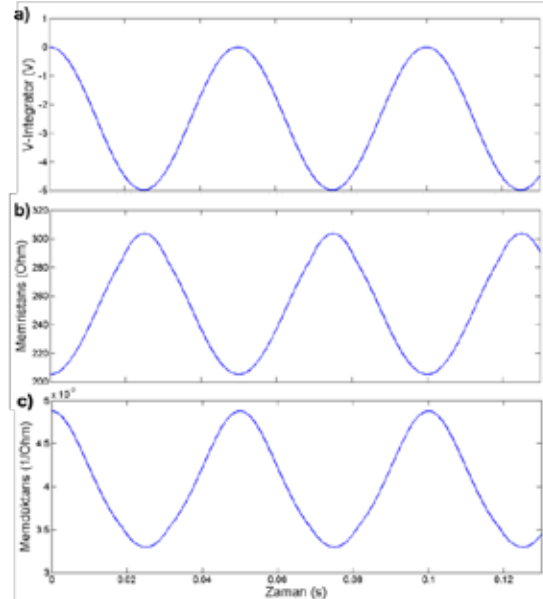
Bu bölümde Simulink benzetim programı ile yapılan emülatörün benzetim sonuçları verilmiştir. Devrenin Simulink'ten alınan blok diyagramı Şekil 5'te görülebilir. Önceki bölümde elde edilen optokuplörün karakteristiği

$$i(t) = W(\varphi(t))v(t) \quad (20)$$

$$i(t) = W(\varphi(t))v(t) \quad (20)$$

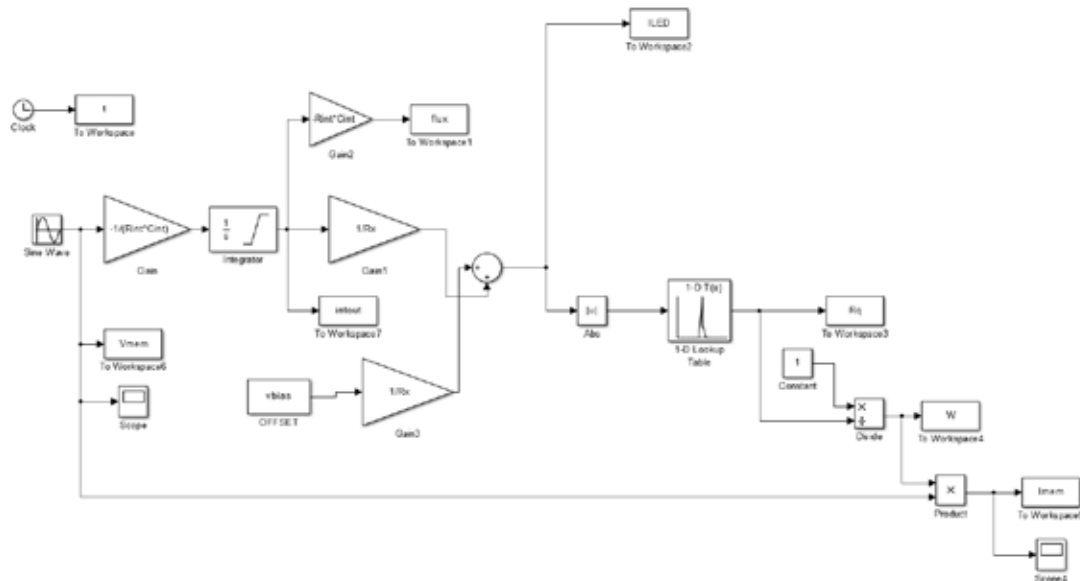
$$v(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (21)$$

Emülatör geriliminin zamana göre integrali emülatör akısını verir. Bu yüzden integratör çıkışındaki gerilim, emülatör akısı ile orantılı bir işaret olduğundan emülatör akısını gözlemlememizi sağlar. Blok diyagramında modelleme hatasını düşük tutmak amacıyla deneysel olarak elde edilen LED akımı-LDR direnci karakteristiği kullanılarak bir look-up tablosu kullanılması tercih edilmiştir. Bu look-up tablosundan memristans denklemini elde etmek için yararlanılmıştır. Bu emülatör sinüzoidal bir besleme gerilimi ($v(t) = V_{mem} = V_m \sin(\omega t) = V_m \sin(2\pi f t)$) ile beslenerek Şekil 6'daki eğriler elde edilmiştir. Şekil 6a'da 20 Hz frekanslı ve 10 V tepe-tepe gerilimine sahip sinüzoidal bir sinyal ve $\varphi(0)=0$ başlangıç memristör akısı ile benzetimi yapılan memristör emülatörünün gerilimi ve akımı görülmektedir. Emülatör akımı sinüzoidal değildir ve harmoniğe sahip olduğu görülebilir. Bunun nedeni Şekil 6b ve 6c'de görüldüğü üzere memristansın ya da memdüktansın zamana bağlı olarak değişmesidir. Burada Memristör emülatörünün memristans değeri 205 Ω ile 305 Ω arasında değişmektedir. Memdüktansın yani memristansın çarpmaya göre tersinin aldığı değerler ise 3.3 mS ile 4.8 mS arasında değişmektedir.

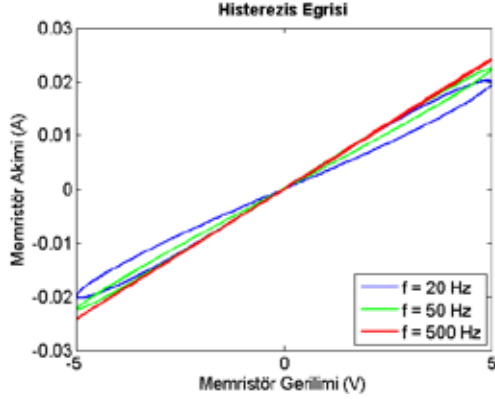


Şekil 6: $f = 20$ Hz frekanslı ve 5 V genlikli sinüzoidal bir giriş sinyali ve $\varphi(0)=0$ başlangıç memristör akısı için benzetimi yapılmış Simulink modelinden elde edilmiş emülatörün zamana bağlı a) İntegral alıcı çıkış gerilimi, b) Memristans (Ohm) ve c) Memdüktans (Siemens= $1/\text{Ohm}$) eğrileri.

Chua ve Kang [2]'de AC gerilim kaynağından beslenen memristörlerin, memristif sistemlerin veya memristör emülatörlerinin gerilimlerinin ve akımının, orijinden geçen bir histerezis eğrisine sahip olması gerektiğini gösterdiler. Buna sıkıştırılmış sıfırdan geçen histerezis eğrisi adını verdiler. Frekans arttıkça memristörün histerezis eğrisi giderek daralarak



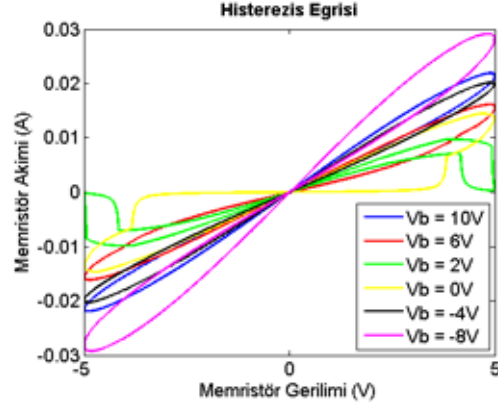
direnç benzeri davranış sergileyecektir [2,7]. Şekil 7’de benzetim sonuçları verilen memristör emülatörü modelinin, üç parmak izine sahip olduğu görülmektedir: yapılan memristör emülatörünün frekansa bağımlı, frekansla daralan ve yüksek frekansta sabit bir direnç gibi davranan bir histerezis eğrisi vardır [7].



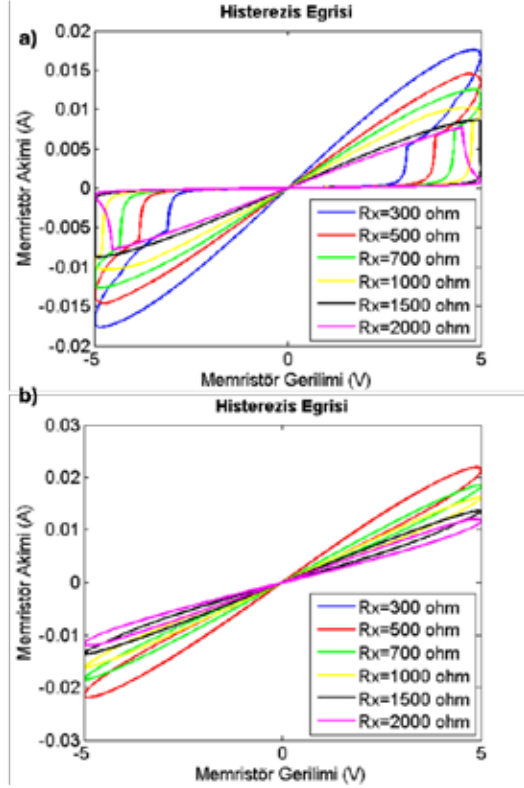
Şekil 7: 5 V genlikli ve $f = 20, 50$ ve 500 Hz frekanslı sinüzoidal giriş sinyali ve $\varphi(0)=0$ başlangıç memristör akısı için Simulink modelinden elde edilen emülatör gerilim-akım karakteristiği benzetim sonuçları

Farklı DC öngerilim değerleri için emülatör v-i karakteristiğindeki değişimler Şekil 8 ve 9’daki benzetim sonuçlarından görülebilir. Şekil 8 için öncelikle bütün bias gerilimi yani ön gerilim (V_b) değerlerinde, memristör karakteristiğinin en önemli özelliği olan sıkıştırılmış histerezis döngüsü tüm eğrilerde gözlemlenmektedir. Fakat, öngerilim değeri bu karakteristiğin şekli oldukça değişmektedir. Ön gerilimin çok az uygulandığı $V_b=0$ V veya $V_b=2$ V durumlarında histerezis eğrisi orijine göre simetrik davranmaktadır ama histerezis eğrisi artık sıkıştırılmış balonlara benzememektedir. Bunun nedeni düşük ön gerilimlerde LED’in çalışma geriliminin LED eşik gerilimi altına düşmesi ve dolayısıyla LED’den LDR’ye gelen ışığın ciddi bir şekilde dalgalanmasıdır. Hem pozitif hem negatif yüksek ön gerilim değerleri için histerezis eğrileri Chua ve Kang’ın [2]’de verdiklerine daha yakındır yani sıkıştırılmış balonlara daha çok benzemektedir. Bu sebeple, yüksek ön gerilim değerleri uygulanarak istenilen memristör cevapları rahatlıkla elde edilebilmektedir. Şekil 9’a bakıldığında, eviren toplayıcı devresinin giriş direncinin (R_x) farklı değerleri için ortaya çıkabilecek v-i karakteristikleri görülmektedir. Şekildeki v-i eğrileri farklı ön gerilim değerleri ($V_b=0$ V (Şekil 9a) ve $V_b=10$ V (Şekil 9b)) için elde edilerek emülatörün davranışı incelenmiştir. Bu benzetimler R_x giriş direncinin ve V_b ön geriliminin memristörün genel karakteristiğine etkisinin nasıl olduğunu göstermektedir. Şekil 9a’da ön gerilim yokken ($V_b=0$ V) görüldüğü üzere R_x giriş direncinin değeri arttığında LED akımı azalmakta ve memristör emülatörü daha doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. Azalan ışıktan dolayı LDR direncinin değeri artmakta ve emülatör akımı azalmaktadır. Bu durum, ayrıca sıkıştırılmış balonlara benzeyen histerezis eğrisine göre daha farklı çıkıntılı histerezis eğrileri ortaya çıkarmaktadır. Şekil 9b’de artan eşik gerilimi ile R_x direnci değeri ne olursa olsun [2]’de verilen sıkıştırılmış balonlara benzeyen histerezis eğrileri elde edilmektedir. Artan ön gerilim LDR direncini daha fazla azaltmakta, dolayısıyla

memristörün memristansını düşürmekte ve memristör emülatörünün daha fazla akım çekmesini sağlamaktadır.



Şekil 8: 5 V genlikli ve $f = 20$ Hz frekansında sinüzoidal giriş sinyali ve $\varphi(0)=0$ başlangıç memristör akısı için Simulink modelinden elde edilen emülatör gerilim-akım karakteristiğinin farklı ön gerilim (V_b) değerlerindeki benzetim sonuçları

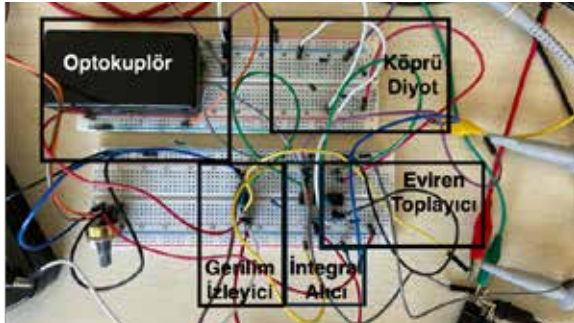


Şekil 9: 5 V genlikli ve $f = 20$ Hz frekansında sinüzoidal giriş sinyali ve $\varphi(0)=0$ başlangıç memristör akısı için Simulink modelinden elde edilen emülatör gerilim-akım karakteristiğinin farklı R_x (eviren toplayıcı giriş direnci) değerleri için a) $V_b=0$ V ve b) $V_b= 10$ V ön gerilim değerleri için benzetim sonuçları

Şekil 9'daki benzetim sonuçlarından hareketle genel bir sonuç olarak ön gerilim eklemesinin bu yapıdaki bir memristör emülatöründe memristör karakteristiğini iyileştirdiği sonucu çıkarılabilir. Buna göre, öngerilim olmadığı durumda (Şekil 9a) düşük R_x direnci değerlerinde histerezis eğrisinin alanının arttığı görülmektedir. LDR, basit anlamda bir direnç olduğu için tüm eğriler yine de orijinden geçmektedir ve simetri göstermektedir. öngerilim değeri 10 V olarak uygulandığı durumda (Şekil 9b) akım değerleri daha yüksek genliklere ulaşmaktadır. Benzetim kullanarak yapılan parametrik analiz sonucunda öngerilim değeri 10 V iken en uygun R_x değeri 500 Ω olarak gözükmemektedir. Şekil 9'daki benzetim sonuçlarından da görüldüğü üzere R_x direnci memristör emülatörünün v-i karakteristiğini kontrol etmektedir. Düşük değerler daha iyi memristör karakterististikleri sağlamaktadır. Bu direncin seçiminde toplayıcı opampın verebileceği maksimum çıkış akımının da göz önünde bulundurulması gerektiği unutulmamalıdır.

5. Deneysel Sonuçlar

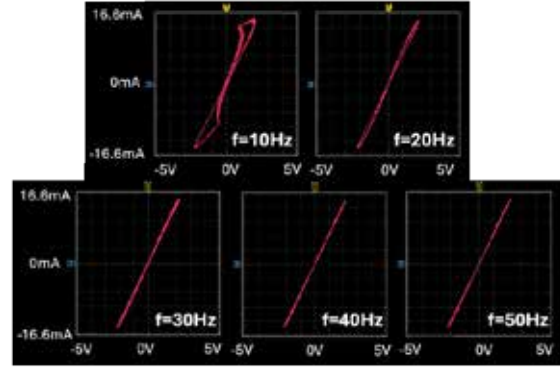
El yapımı optokuplör kullanılarak yapılan Şekil 1'de verilen Memristör emülatör devresi deney tahtası (protoboard) üzerine kurulmuştur. Kurulan sistemin fotoğrafı Şekil 10'da görülmektedir. Optokuplörün içinde yer alan LED'in eşik gerilimi altında çalıştığı durumlarda LDR direnci yüksek olacaktır. LED eşik gerilimi üzerinde çalıştığı durumlarda LDR direnci düşmektedir. Eşik gerilimi üzerinde LDR direnci LED'in parlaklığına daha duyarlı bir şekilde değişmektedir ve bu da LED üzerinden geçen akımın değerine bağlıdır. Bundan dolayı yapılan optokuplör, LED akımı ile kontrol edilebilir lineer olmayan bir direnç özelliği göstermektedir.



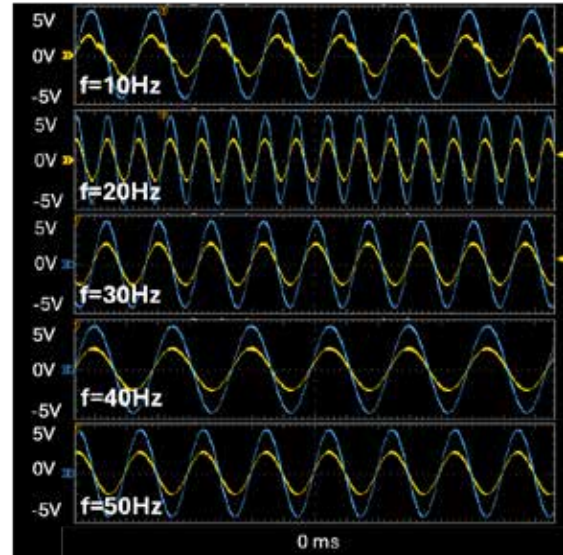
Şekil 10: Katmanları Gösterilmiş Deney Düzenegi

Farklı frekanslarda elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 11, 12, 13 ve 14'te verilmiştir. Şekil 11'de verilen deneysel sonuçlara bakıldığında memristör emülatörlerine uygulanan frekanslarda, emülatörünün sıfır akım-gerilim geçiş noktalarına sahip histerezis eğrileri elde edilmiştir. Yani memristör emülatörü memristörün üç parmak izine sahiptir ve memristörü başarıyla taklit etmektedir [7]. Şekil 13a'da gösterilen histerezis eğrileri farklı öngerilim gerilimleri (V_b) için elde edilen memristör emülatörünün akım-gerilim karakteristiklerini göstermektedir. Bu karakteristik eviren toplayıcı devreye uygulanan öngerilim değeri değiştirilerek elde edilebilmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlarda, negatif öngerilim geriliminin histerezis eğrileri daha belirgindir ve negatif öngerilim arttıkça daha fazla bozulma göstermektedir. Ayrıca eğriler daralmakta ve yukarı kaymaktadır. Negatif öngerilim gerilimler için, memristör emülatörünün direncinin

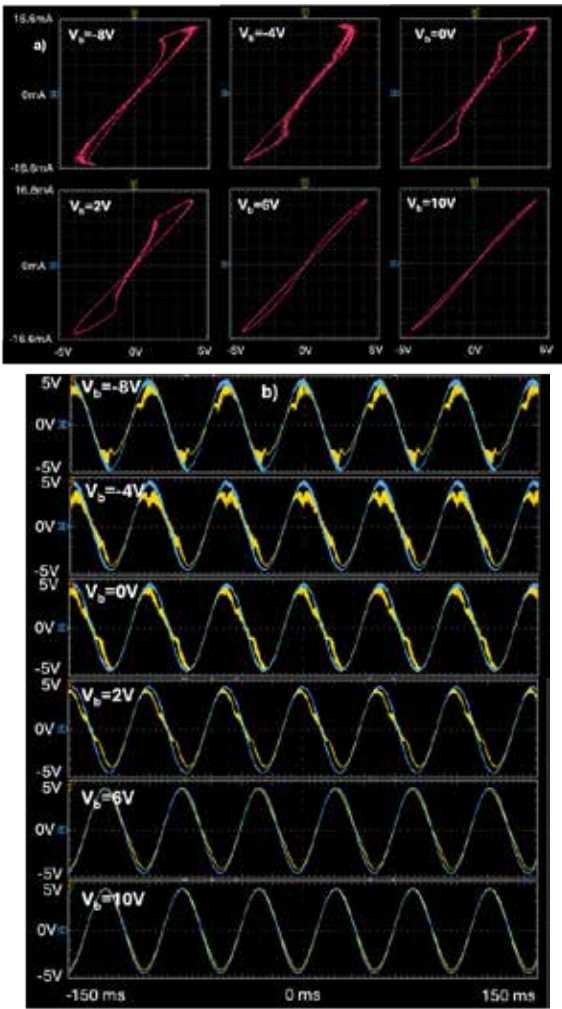
arttığı durumda akımın sınırlı kaldığını göstermektedir. Frekans artışına bağlı olarak histerezis eğrisinin alanı daralmıştır ve direnç devre elemanının akım-gerilim karakteristiğindeki gibi doğrusal bir forma dönüşmüştür (Şekil 11). Bu nedenle tasarlanan memristör emülatörü, memristörü başarıyla taklit etmektedir. Buna bağlı olarak akım ve gerilim dalga formlarındaki düzensizlikler özellikle düşük frekanslarda daha belirgin olacak biçimde Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 11: 5 V tepeden tepeye kaynak gerilimi uygulandığında memristör emülatöründen 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz ve 50 Hz frekansları için ölçülen histerezis eğrileri (Not: Öngerilim değeri $V_b = 0$ V olarak uygulanmıştır.)



Şekil 12: 5 V tepeden tepeye kaynak gerilimi uygulandığında memristör emülatöründen 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz ve 50 Hz frekansları için ölçülen akım (Sarı) ve gerilim (Mavi) eğrileri (Not: Öngerilim değeri $V_b = 0$ V olarak uygulanmıştır.)



Şekil 13: Memristör emülatörünün $f = 20$ Hz çalışma frekansında öngerilim değiştirilerek elde edilen deney sonuçları: a) Farklı ön gerilim değerleri ($V_b = -8$ V, -4 V, 0 V, 2 V, 6 V ve 10 V) için histerezis eğrileri, b) Farklı ön gerilim değerleri ($V_b = -8$ V, -4 V, 0 V, 2 V, 6 V ve 10 V) için akım (Sarı) ve gerilim (Mavi) eğrileri (Not: Giriş kaynak gerilimi değeri $V_{in} = v(t) = 5 \sin(\omega t) = 5 \sin(2\pi f t)$ olarak uygulanmıştır.)

Emülatöre herhangi bir öngerilim uygulanmadığında ($V_b = 0$ V), histerezis eğrisi hemen hemen simetrik olmaktadır. Bunun nedeni aşağıdaki formülde görüldüğü üzere $V_b = 0$ V olduğunda LED akımının memristör emülatörü akısının mutlak değerden dolayı bir çift fonksiyonu olmasıdır:

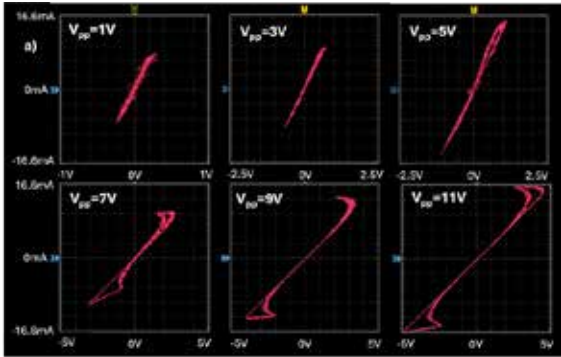
$$i_{LED}(t) = |i_x(t)| = \left| \frac{1}{R_x R_{int} C_{int}} \varphi(t) \right| = |\alpha \varphi(t)| \quad (5)$$

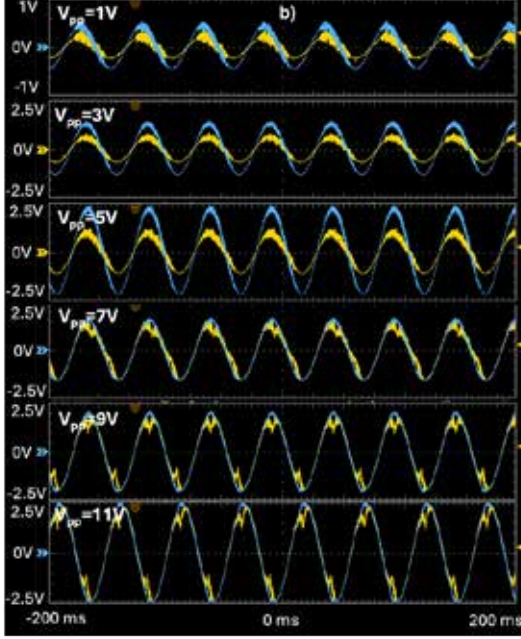
Şekil 11’de üstte görülen osiloskop ekran görüntüsünde simetriklikten sapmanın nedeni geçici hal esnasında başlangıç akı değerinin sıfırdan sapması ve memristör emülatörünün hemen hemen doyma bölgesinde çalışması olarak anlaşılmıştır.

Akımın gerilime gecikmeli olarak tepki vermesi hafıza davranışı ile ilgilidir. Öngerilim pozitif değerlerde uygulanmaya başlanıp, daha yüksek değerlere çıkıldıkça histerezis eğrileri daralmakta ve hatta en yüksek ön gerilim

değerinde ($V_b = 10$ V) neredeyse bir direnç gibi doğrusal bir davranış sergilemektedir. Bu durum öngerilim gerilim değeri yükseltildikçe memristörün LDR direnci hemen hemen artan ışıkla sabitlendiğinden bir direnç gibi davranmaya başladığını göstermektedir. Bu da memristörün hafıza özelliğinin artan LED ışığıyla azaldığını göstermektedir. Aynı şekilde benzer negatif öngerilim gerilim durumlarında memristör gerilimi ve memristör akımı dalga şekilleri Şekil 13b’den gözlemlenebilmektedir. Bu şekilde en düşük negatif ön gerilimden başlayarak en yüksek pozitif ön gerilime kadar dalga formunun değişimi görülmektedir. Bozulmalarla başlayarak daha düzgün bir sinüzoidal dalga formuna dönüştüğü gözlemlenmektedir. Bu da memristör davranışının öngerilim gerilim değeri arttıkça nasıl değiştiğini iyi bir şekilde ortaya koymaktadır.

Şekil 14’te memristör emülatöründe farklı giriş voltajları (V_{pp}) için emülatörün histerezis eğrileri (Şekil 14a) ve akım-gerilim dalga şekilleri (Şekil 14b) vardır. Düşük giriş gerilimleri için histerezis eğrisi dar ve neredeyse doğrusal, giriş voltajı arttıkça bu eğri genişlemekte ve daha belirgin doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. Bu genişleme memristörün direncinin uygulanan gerilime daha fazla bir tepki verdiğini ve hafıza etkisinin ortaya çıktığını gösterir. Emülatör devresi, $V_{pp} = 5$ V’tan yüksek giriş voltajları için tipik bir memristif davranış sergilemektedir. Dalga formları da daha dinamik ve değişken olmaktadır. Özetle, giriş gerilimi arttıkça memristör emülatörü oldukça doğrusal olmayan bir karakteristik sergilemekte ve hafıza etkisi artmaktadır. Düşük giriş gerilimlerinde aygıt neredeyse lineer bir direnç gibi davranırken yüksek voltajlarda dinamik direnç değişimleri gözlemlenmektedir. Bunun nedeni giriş geriliminin integraline bağlı olarak elde edilen integratör çıkış gerilimin daha düşük olmasıdır.

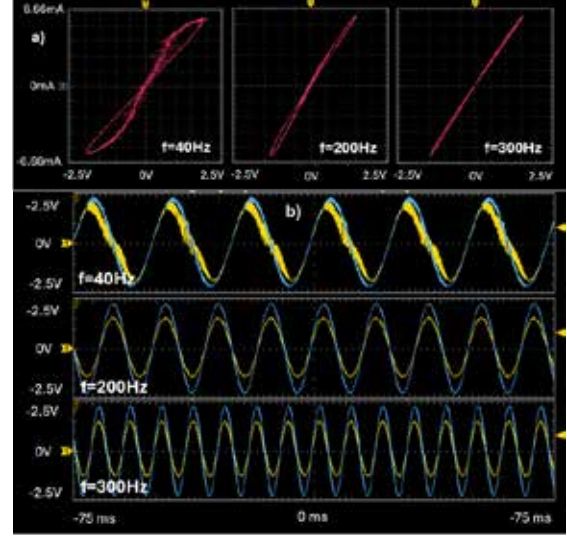




Şekil 14: Memristör emülatörünün çalışma frekansı $f = 20$ Hz olduğunda kaynak geriliminin genliği değiştirilerek elde edilen deney sonuçları: $V_{pp} = 1$ V, 3 V, 5 V, 7 V, 9 V ve 11 V için a) Histerezis eğrileri, b) Akım (Sarı) ve Gerilim (Mavi) eğrileri

Memristör emülatörünün daha yüksek çalışma frekanslarında veya daha geniş frekans aralıklarında nasıl davranabileceği Şekil 15'te yer alan ölçümlerle gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 15a'da $f = 40$ Hz için verilen orijinden geçen histerezis eğrisi orijine göre simetrik olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 15b'de verilmiş akım ve gerilim sinyallerinde belirgin bir faz farkı da göze çarpmaktadır. Fakat, Şekil 15a'da görüldüğü üzere 200 Hz ve 300 Hz gibi daha yüksek frekanslara çıkıldığında histerezis eğrisinin alanı önemli ölçüde daralmaktadır. Yani memristör emülatörünün doğrusal olmayan özellikleri giderek azalmakta ve zamanla değişmeyen doğrusal bir direnç gibi davranmaya başlamaktadır. Bu yüzden akım ise içindeki harmonikler azalarak giderek sinüzoidal bir dalga şekline dönüşmektedir.

Herhangi bir ön gerilim uygulanmamış olsaydı, emülatör v-i karakteristiğinin Şekil 11'deki doğrusal olmayan karakteristiklerin gözlemlendiği frekans değerlerindeki gibi kalacağı söylenebilir.



Şekil 15: Memristör emülatörünün yüksek çalışma frekanslarında ortaya çıkan deney sonuçları: $f = 40, 200$ ve 300 Hz için a) Histerezis eğrileri, b) Akım (Sarı) ve Gerilim (Mavi) eğrileri

Farklı genlik, frekans ve öngerilim değerleri için gerçekleştirilen deneylerde memristör emülatörü oldukça zengin bir davranış sergilemiştir. Bu emülatör, gerçek bir memristör olmasa bile bir memristif sisteminin tüm özelliklerini taşımaktadır. Deneylerle tasarlanan optoelektronik tabanlı memristör emülatörünün, memristör gibi davrandığı yani bir memristörü taklit edebildiği kanıtlanmıştır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, LED ve LDR kullanılarak el yapımı bir kapalı bir kutu içerisinde bir optokuplör yapılmıştır ve optoelektronik-tabanlı bir memristör emülatöründe kullanılmıştır. Yapılan emülatörün memristansı akısının çift fonksiyonudur. Bu optokuplörün ve emülatörün matematiksel modelleri verilmiştir. Emülatör devresinin Simulink'te modeli kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Emülatör devresi bir çalışma tahtası üzerine kurularak deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar memristörün üç parmak izine sahip olduğunu ve memristör olarak çalıştığı gösterilmiştir. Gerçek bir memristör olmasa bile bu taklitçi devrenin memristörün akı bağımlılığını ve bir memristörün sıfırdan geçen sıkıştırılmış frekans bağımlı histerezis döngüsünü gibi davranışlarını taklit edebildiği ve bir performansla çalıştığı da gösterilmiştir.

LDR yüksek frekanslarda kapasitif bir davranış gösteren devre elemanıdır. Benzetimlerde statik ölçümlerden alınan karakteristik kullanıldığından kapasitif etkiler ihmal edilmiştir. Kiloherz (kHz) bölgesindeki çalışma frekanslarına çıkıldıkça bu etkiler benzetim ve deneysel sonuçlar arasındaki hatanın artmasına neden olmaktadır. Bu kapasitif etkilerin LDR içeren optoelektronik tabanlı memristör emülatörlerine eklenmesi ileride ayrı bir çalışma konusu olabilir.

Benzetimlerle karşılaştırıldığında memristörün deneysel histerezis eğrisinin düşük ön gerilimlerde 4. Bölümde verilen sıkıştırılmış balon veya sekiz harfine benzeyen histerezis eğrisinden saptığı görülmüştür. Eşik geriliminin altında

diyotların davranışlarının etkisi yani ters toparlanma köprü diyot akımlarının ve LED eşik geriliminin etkisi yapılan benzetimlerde göz önünde bulundurulmamıştır. Hem benzetimler hem de deneysel sonuçlar öngerilim değerine bağlı olarak ayarlanabilir bir emülatör karakteristiği elde edilebildiğini göstermektedir.

Böyle bir memristör emülatörü memristör tabanlı kaotik devrelerde, osilatörlerde ve başka memristör tabanlı devrelerde kolayca kullanılabilir. Ayrıca, bu emülatör, bir jirator devresi içinde kullanılarak yapılabilen memkapasitör ve memindüktör emülatörlerinde kullanılmaya da uygundur. Bu çalışmada yapılan emülatör devresi LDR'lerin kHz frekanslarında kapasitif etkiler göstermesinden dolayı kHz bölgesinde memristör davranışını incelemek için uygun değildir [42]. Gelecekteki çalışmalarda daha yüksek çalışma frekansları elde etmek için bir LDR yerine fotodiyotlar veya fototransistörler gibi daha yüksek frekanslarda çalışan optoelektronik elemanlar içeren devre elemanları kullanılabilir. Bu çalışmada tasarlanan memristör emülatörü, yapımının kolay olması nedeniyle memristör araştırmalarında kavramları kanıtlamak ve memristör eğitimi için de devre teorisi derslerinde kullanılabilir. Bu memristör emülatörünün devre bağlantılarını değiştirerek farklı belki tek simetriye sahip memristans fonksiyonları da elde edilebilir.

LED diyot köprüsü ile beslenerek öngerilim kullanılarak LED ışığının kesilmesinin yeni LED eşik geriliminin memristör karakteristiğine etkisinin ortadan kaldırılmasına çalışılmıştır. [43]'da CMOS-tabanlı memristör emülatörlerinde kullanılan kondansatörlerin kapasitansının memristör karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Benzer şekilde bu emülatörde kullanılan kondansatör ve direnç devre elemanlarının memristör karakteristiğine etkisi de incelenebilir. Burada en büyük karakteristiğe etki eden parametrelerin nonlineer davranış gösteren LED ve LDR parametreleri olacağı umulmaktadır. Duyarlılık analizi de bu emülatörün parametrik analizinde kullanılabilir. Bu memristör kullanılarak yapılabilecek kaotik devrelerin ve osilatörlerin incelenmesini yeni bir çalışma konusu olarak öneriyoruz.

Böyle bir memristör emülatör devresi öğrenci laboratuvarlarında doğrusal olmayan devre elemanı olarak memristörlerle alakalı kavramların öğretilmesi için kullanılabilir. Ayrıca bu emülatör memristör ile alakalı araştırmalarda elinde Known memristör veya ince film memristif sistem olmayan araştırmacılar tarafından memristör veya memristör-tabanlı devrelerin incelenmesinde ve çalışma prensiplerinin ortaya çıkarılmasında kullanılabilir.

[44]'te memristör tabanlı bir Liénard Osilatörü çift memristans fonksiyonu elde etmek için iki tane memristörün ters paralel bağlanmasıyla yapılmıştır. Bu çalışmada yapılan memristör emülatörü öngerilimi yokken yani $V_b = 0$ V iken çift memristans fonksiyonuna sahip olduğundan bu memristör emülatöründen sadece bir tane kullanarak bir Liénard Osilatörü de yapılabilir. Bu Liénard Osilatörü ayrıca daha farklı bir karakteristiğe sahip olacaktır ve kaotik devrelerin incelenmesinde de kullanılabilir. Son zamanlarda Literatürde memristör tabanlı nöron devreleri çalışmaları bir artış görülmektedir [45]. Bu yapılan emülatör ayrıca memristör-tabanlı birbiri ile kuplajlı nöron devreleri yapımında da kullanılabilir.

7. Kaynaklar

[1] L. O. Chua, "Memristor - The Missing Circuit Element," IEEE Trans. Circuit Theory, vol. 18, pp. 507-519, 1971.

[2] L. O. Chua & S. M. Kang, "Memristive devices and systems," Proc. IEEE, vol. 64, pp. 209-223, 1976.

[3] S. Williams, "How we found the missing memristor," IEEE Spectrum, pp. 45(12), 28-35, 2008.

[4] S. Williams, D. B. Strukov, G. S. Snider & D. R. Stewart, "The missing memristor found," Nature (London), vol. 453, pp. 80-83, 2008.

[5] Y. V. Pershin and M. Di Ventra, "Memory effects in complex materials and nanoscale systems," Adv. Phys., vol. 60, pp. 145-227, Apr. 01, 2011.

[6] Y. Pershin, J. Martinez-Rincon & M. Di Ventra, "Memory circuit elements: from systems to applications," Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 8(3), pp. 441-448, 2011.

[7] P. Adhikari, M. P. Sah, H. Kim, and L. O. Chua, "Three fingerprints of memristor," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 60, no. 11, pp. 3008-3021, 2013.

[8] S. Vongehr, X. Meng, "The missing memristor has not been found", Scientific reports, 5(1), 11657, 2015.

[9] Y. Pershin, M. Di Ventra, "Practical Approach to Programmable Analog Circuits with Memristors", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol. 57, p.p. 1857 - 1864, 2010.

[10] L. Chua, "Resistance switching memories are memristors," Appl. Phys. A, vol. 102, pp. 765-783, Mar. 01, 2011.

[11] T. Prodromakis, C. Toumazou "A Review on Memristive Devices and Applications "Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 17th IEEE International Conference on, pp. 934 - 937, 2010.

[12] R. Marani, G. Gelao, and A. G. Perri, "A review on memristor applications," International Journal of Advances in Engineering & Technology, 8(3), 294. 2015.

[13] Bednarz, K. and Gardá, B., "Measurement and Modeling of Self-Directed Channel (SDC) Memristors: An Extensive Study", Energies, 17(21), p.5400, 2024.

[14] Dalmiş, C., Mutlu, R., & Karakulak, E., "Existence of Capacitive Effects in a Tungsten-based SDC Memristive System", Electronic Components and Materials, 53(3), 121-135, 2023.

[15] Parlar, İ., & Almalı, M. N., "Memristör taklit devresi kullanılarak yeni bir işlemsel yükselteç modeli ve faz kaydırmalı osilatör devresine uygulanması", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 39(3), 1963-1972, 2024.

[16] Özgüvenç, A., Mutlu, R., Karakulak, E., "Sawtooth signal generator with a memristor", 1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences, 2016.

[17] Babacan, Y., Kaçar, F., & Gürkan, K., "A spiking and bursting neuron circuit based on memristor", Neurocomputing, 203, 86-91, 2016.

[18] M. T. Abuema'atti & Z. J. Khalifa, "A new memristor emulator and its application in digital modulation", Analog Integrated Circuits Signal Processing, pp. 80, 577-584, 2014.

[19] M. T. Abuema'atti & Z. J. Khalifa, "A continuous-level memristor emulator and its application in a multivibrator circuit", International Journal of Electronics and Communications, pp. 69, 771-775, 2015.

- [20] O. A. Olumodeji & M. Gottardi, "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, 2016.
- [21] R. Mutlu & E. Karakulak, "Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi", Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, 2009.
- [22] Gupta, R. K., Choudhry, M. S., Saxena, V., & Taran, S., "A single MOS-memristor emulator circuit", Circuits, Systems, and Signal Processing, 43(1), 54-73, 2024.
- [23] Ş. Yener & H. Kuntman, "CMOS DDCC Temelli Memristör Gerçeklemesi ve Kaotik Haberleşme Uygulaması", ELECO Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 2012.
- [24] Yeşil, A., Babacan, Y., & Kaçar, F., "A new DDCC based memristor emulator circuit and its applications", Microelectronics Journal, 45(3), 282-287, 2014.
- [25] A. I. Hussein & M. E. Fouda, "A simple MOS realization of current controlled memristor emulator", International Conference on Microelectronics (ICM), p. 1-4, 2013.
- [26] Z. Cam & H. Sedef, "A new floating memristance simulator circuit based on second generation current conveyor", Journal of Circuits, Systems, and Computers, pp. 26(2), 1750029-1-1750029-15, 2017.
- [27] R. Mutlu & E. Karakulak, "Analog Çarpıcı Kullanılarak Yapılmış Lineer Sürüklenme Hızlı TiO₂ Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi", In Electrical, Electronics and Computer Engineering (ELECO), 2009.
- [28] B. Muthuswamy, "Implementing memristor based chaotic circuits", International Journal of Bifurcation and Chaos, pp. 20(5), 1335-1350, 2010.
- [29] Güloğlu, A., Yener, Ş. Ç., & Mutlu, R., "A Power Factor Corrector Boost Converter Based Memristor Emulator", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 48(2), 803-815, 2024.
- [30] Zakhidov, A. A., Jung, B., Slinker, J. D., Abruña, H. D., & Malliaras, G. G., "A light-emitting memristor", Organic Electronics, 11(1), 150-153, 2010.
- [31] Wang, T.Y., Meng, J.L., Li, Q.X., He, Z.Y., Zhu, H., Ji, L., Sun, Q.Q., Chen, L. and Zhang, D.W., "Reconfigurable optoelectronic memristor for in-sensor computing applications", Nano Energy, 89, p.106291, 2021.
- [32] Xue, W., Ci, W., Xu, X. H., & Liu, G., "Optoelectronic memristor for neuromorphic computing", Chinese Physics B, 29(4), 048401, 2020.
- [33] Hu, L., Yang, J., Wang, J., Cheng, P., Chua, L. O., & Zhuge, F., All-optically controlled memristor for optoelectronic neuromorphic computing. *Advanced Functional Materials*, 31(4), 2005582, 2021.
- [34] Shrivastava, S., Keong, L. B., Pratik, S., Lin, A. S., & Tseng, T. Y., "Fully photon controlled synaptic memristor for neuro-inspired computing", *Advanced Electronic Materials*, 9(3), 2201093, 2023.
- [35] Wang, X. Y., Fitch, A. L., Iu, H. H., Sreeram, V., & Qi, W. G., "Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor", *Chinese Physics B*, 21(10), 108501, 2012.
- [36] Wang, X., Wang, G., & Wang, X., "Dynamic character analysis of a LDR, memristor-based chaotic system", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 23(06), 1450085, 2014.
- [37] Tulumbacı, F., & Mutlu, R., "An optoelectronic-based memristor emulator circuit with a rational memristance function", *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*, 2021.
- [38] Arapi, M., Karakulak, E., & Mutlu, R., "A Microcontroller Controlled Optocoupler-Based Memristor Emulator and Its Usage in a Low-Pass Filter", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 1-13, 2024.
- [39] Raj, N., Ranjan, R. K., & Khateb, F., "Flux-controlled memristor emulator and its experimental results", *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 28(4), 1050-1061, 2020.
- [40] Korkmaz, R. T., Mert, O., & Mutlu, R., "Examination of Resistive Switching Energy of Some Nonlinear Dopant Drift Memristor Models", *Informacije MIDEM: Journal of Microelectronics, Electronic Components & Materials*, 53(4), 2023.
- [41] Arapi, M., & Mutlu, R., "An optocoupler-based Biryukov oscillator design", *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6(1), 1-7, 2023.
- [42] Tulumbacı, F., "Işığa bağlı direnç ve led kullanılarak yapılmış bir memristör emülatör devresi", (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi, 2017.
- [43] Köymen, I., Glaros, K. N., & Drakakis, E. M. "Class A and Class AB CMOS-Only Nanopower Memristive Dynamics Emulators.", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 26(08), 1650127, 2016.
- [44] Çakır, K., "Memristör Tabanlı Bir Liénard Osilatörü Tasarımı", (Yüksek Lisans Tezi), Namık Kemal Üniversitesi, 2024.
- [45] Altan, M. A., Orman, K., Babacan, Y., & Yesil, A. "Special Memristor and Memristor-Based Compact Neuron Circuit", *Journal of Circuits, Systems & Computers*, 33(5), 2024.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

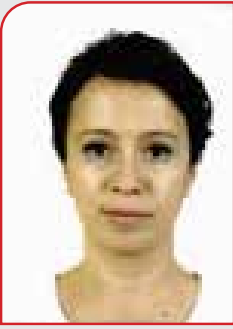
Yazar Katkıları

Reşat Mutlu (RM) literatür incelemesi, modelleme, RM, Meltem Apaydın Üstün (MAÜ), Arif Kıvanç Üstün (AKÜ) bilimsel yayının hazırlanması, MAÜ, AKÜ Deneyler, AKÜ benzetimler, RM, MAÜ, AKÜ çalışma konsepti ve tasarım, taslağın oluşturulması, revizyon konularında katkı sağlamıştır.

Özgeçmişler



Arif Kıvanç ÜSTÜN lisans eğitimini 2009 yılında Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde, yüksek lisans ve doktora eğitimini de Texas A&M Üniversitesi'nde sırasıyla 2014 ve 2021 yıllarında tamamladı. Halen Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesinde doktor öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Araştırma alanları arasında yarı iletken ve MEMS cihaz tasarımı ve fabrikasyonu, ultrasonik ve fotoakustik tahribatsız muayene ve tomografi sistemleri ve çeşitli algılama ve transdüser sistemleri yer almaktadır.



Meltem Apaydın ÜSTÜN, lisans eğitimini 2009 yılında Anadolu Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. Yüksek lisansını Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi ve Texas A&M Üniversitesi'nde sırasıyla 2012 ve 2014 yıllarında ve doktora eğitimini de Texas A&M Üniversitesi'nde 2021 yılında tamamladı. 2022 yılından itibaren Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesinde doktor öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları optimizasyon, iki seviyeli optimizasyon, makine öğrenmesi ve onun yaşam bilimlerindeki uygulamalarıdır.



Reşat Mutlu, 1973 yılında Tekirdağ'da doğdu. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde, Yüksek lisans ve doktorasını ise Rensselaer Polytechnic Enstitü'de sırasıyla 1998 ve 2004 yıllarında tamamladı. An itibarıyla Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi'nde profesör olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları Elektronik sistemlerin modellenmesi, Memristör, Memristif sistemler, Rezistif RAM bellekler, Güç hattı haberleşme sistemleri, Rezistif sinterleme sistemleri ve kablolardır.