

Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi

Reşat Mutlu¹ ve Ertuğrul Karakulak²

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü¹,
Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu, Tekirdağ

Elektronik Bölümü, Meslek Yüksekokulu²,
Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ

*Sorumlu yazar (R. Mutlu);
e-posta: rmutlu@corlu.edu.tr;
Telefon: 0090 2822643513;
Faks: 0090 282 652 93 72

Özet- 1971 yılında Dr. Leon Chua tarafından Resistör, Endüktör ve kapasitöre ilave olarak dördüncü temel devre elemanının olması gerektiği, bunun direnç gibi güç harcayan bir eleman olduğu, diğer devre elemanları tarafından modellenemeyeceği, değerinin yüküne bağlı olarak gerilimin akıma oranı ile ifade edilebileceği iddia edildi. Dr. Chua bu elemanı Memristör diye isimlendirdi. Hep matematiksel bir kabullenme olarak düşünülen Memristör yaklaşık 36 yıl sonra bir HP araştırma timi tarafından gerçekleştirildi. Ticari olarak piyasada bulunmayan ve ilginç uygulama alanlarına sahip olacağı iddia edilen, henüz pek çok elektrik ve elektronik mühendisi tarafından varlığı bilinmeyen, memristör elektrik, elektronik, biyomedikal ve bilgisayar öğrencilerine öğretilmelidir. Temel devre elemanları öğrencilere teorik öğretildikleri gibi deneyler ile de öğretilmeli ve gösterilmelidir. Memristör henüz piyasada bulunmadığı için satın alınıp, devre laboratuvarlarında gösterilemeyeceğinden, bir memristör taklitçisi (emulator) yapılarak, öğrencilere gösterilebilir. Çok kolay bulunabilen elemanlar kullanılarak bir memristör taklitçisi yapıldı. Lyscaous eğrisi kullanılarak memristör taklitçisinin memristör gibi davrandığı doğrulandı. Üniversitelerde devre laboratuvarı dersini alan öğrencilere gösterilmesi önerildi.

Anahtar Kelimeler- Memristör, Emulator, Histeresis Loop, Elektrik Devreleri.

1. Giriş

1971 yılında, teorik olarak L. O. Chua tarafından dördüncü temel devre elemanı olarak, rezistör, endüktör ve kapasitöre ilave olarak, hafızalı direnç (memory resistor) yani kısaca memristör diye isimlendirdiği, değeri elektrik yüküne bağlı olan, gerilimin akıma oranı olarak ifade edilebilen, dolayısıyla bir hafıza özelliği gösteren başka bir temel devre elemanının var olması gerektiği ortaya atıldı.

Chua bu elemanın sahip olduğu özelliği de memristans diye isimlendirdi (rezistansa benzer şekilde). Elemanı M veya $M(q)$ ile gösterdi. $M(q)$ elemanın elektrik yüküne bağlılığını gösteriyor. Memristans aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

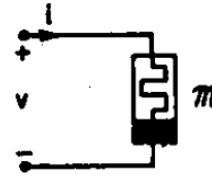
$$M(q) = \frac{d\lambda}{dq} = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (1)$$

Bu formülde;

$v(t)$ ve $i(t)$ Memristör voltaj ve akımlarıdır. Memristans formülünde görülen λ , memristör akı-dolanımı ya da memristör voltajının integralidir. q ise memristörün yükü ya da memristör akımının integralidir.

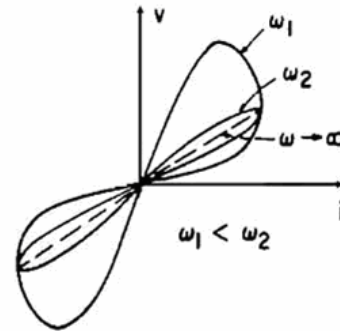
Chua memristörü Şekil 1'de gözüken devre sembolü ile gösterdi. Memristör direnç gibi güç harcayan bir

elemandır. Memristörün değeri, memristör akımının değeri değiştiğinde, memristör akımı değiştiğinden değişmektedir.



Şekil 1: Memristör Sembolü [1].

1976 yılında, nonlineer devre teorisinin babalarından kabul edilen Chua öğrencisi Kang ile memristif sistemler kavramını geliştirdi ve AC akım kaynağı ile beslenen memristör voltaj ve akımının, sıfır geçiş histeresis özelliğine uyması gerektiğini de ortaya koydu [2]. Şekil 2'de Chua'nın tahmini histeresis eğrisi çizimi görülmektedir [2]. Chua aynı zamanda frekans arttıkça memristörün rezistör gibi davranmaya başladığını göstermişti.



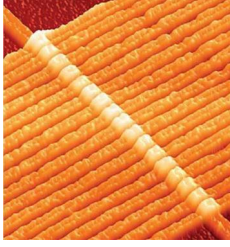
Şekil 2: Leon Chua'nın tahmini Memristör histeresis (Lyscaous) eğrisi [2].

Hodgkin-Huxley sinir sistemi ve termistorler gibi pek çok sistemin memristör kullanarak uygulanabileceğini iddia eden Chua ve Kang, memristif sistemlerin nasıl modellenebileceği de makalelerinde gösterdiler [2].

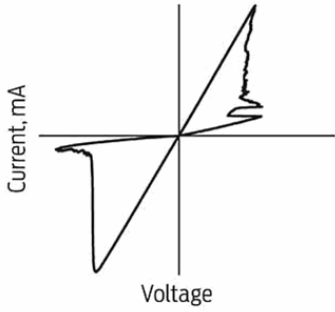
Memristörün uzun zaman sırf teorik ve matematiksel estetikten kaynaklanan bir eleman olduğu ve gerçekte mevcut olmadığı düşünüldü. 2008 yılında, Stanley Williams tarafından yönetilen HP araştırma ve geliştirme timi tarafından bulunduğu ilan edildi [3]. Williams ve timi memristans mekanizmasını da açıkladı ve denklemini de verdiler.

Şekil 3'te Platinyum kontakları arasında titanyumoksit (TiO₂) kullanarak yapılan memristör görülmektedir. Şekil 4'te deneyde bulunan histeresis eğrisi görülebilir. Williams ve ekibi aynı zamanda buldukları tip memristörlerin Chua'nın tahmin edemediği bir doyma mekanizmasına sahip

olduğunu, yani belirli bir yük değerinde memristörün yüke bağımlılığını kaybedip direnç gibi davrandığını buldular. Deneysel memristörün lissajous eğrisi şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3: HP laboratuvarlarında R. Stanley Williams tarafından alınan TiO₂ Memristor imajı [3].



Şekil 4: R. Stanley Williams'ın Deneysel Histeresis (Lyscaous) Eğrisi[4].

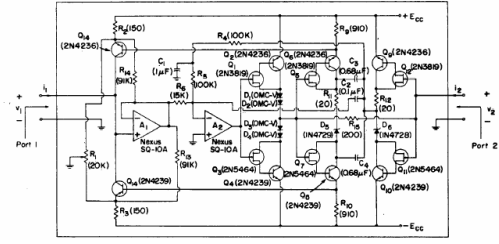
Kendisinden yeni tip hafızaların yapılabileceği düşünülen Memristor hakkında giderek daha fazla makale basılmak, memristörler ile ilgili alınan patentlerin sayısı artmaktadır [4-7]. Memristörün bulunması Chua tarafından bir paradigma kayması olarak adlandırılmaktadır. Giderek daha fazla insanın memristörü dördüncü devre elemanı olarak kabul ettiği hızlı bir internet araştırması ile görülebilir. Belki de bir gün devre alanında çalışan tüm insanların bu kabullenışı yapacağı bir zaman gelebilir.

Yazarların memristör hakkında konuştuğu bazı mühendislik öğretim üyeleri ve öğrencileri başlangıçta memristörü kavramakta zorluk çektiler. Öğrenciler memristörü bir deneyde görmek ve onun dalga şekillerini incelemek istiyorlardı. Maalesef piyasa da Memristör bulunmadığından onların bu isteğini yerine getiremedik. Chua 1971'de yazdığı artık meşhur olmuş makalesinde, O da memristöre sahip olmadığından, bir flux-dolanım ve elektrik yükü karakteristiği üretip, bu karakteristiği işlemsel kuvvetlendirici, transistor vb. devre elemanları kullanarak yaptığı taklitçi devreyi (emulator) kullanarak böyle bir memristör olsaydı taklitçi devresinin deneysel akı-dolanım ve elektrik yükü karakteristiği [1].

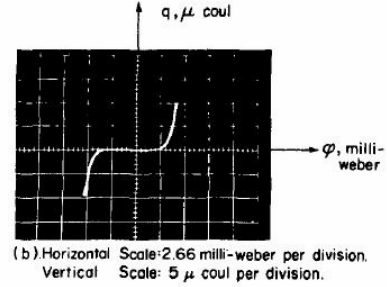
Bu makalede, biz bir memristor taklitçisinin az sayıda ve daha ucuz devre elemanları kullanarak yapılabileceğini göstereceğiz.

2. Memristör Taklitçisi Devre

Bir memristör taklitçisi aynı zamanda bir memristif sistemdir ve memristör benzeri özellikler taşır. Chua'nın verdiği memristif sistem tanımlarına uyar [2]. Chua'nın Memristor taklitçisi Şekil 5'te görülebilir. Chua'nın integral alıcı bir devre kullanarak bulduğu taklitçi devresinin deneysel akı-dolanım ve elektrik yükü karakteristiği Şekil 6'da gösterilmiştir.

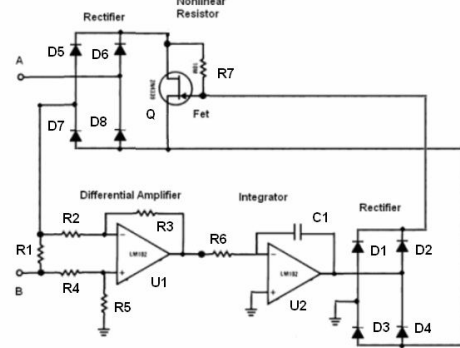


Şekil 5: Chua'nın kullandığı M-R Mutator diye adlandırdığı taklitçi devre.



Şekil 6: Chua'nın integral alıcı bir devre kullanarak bulduğu taklitçi devresinin deneysel akı-dolanım ve elektrik yükü karakteristiği.

Chua'nın taklitçi devresi pek çok elemanlardan oluşmakta ve uygulandığı zaman alıcı gözükmetedir. Taklitçi devre eğer gelen döneme yetiştirilmek isteniyorsa, daha az eleman ile daha basit şekilde yapılabilir. Şekil 7'de görülen devreyi Memristör taklitçisi için kullandık. Şimdi Şekil 7'deki hangi elemanın hangi amaçla kullanıldığını açıklayacağız.



Şekil 7: Yeni Memristör Taklitçisinin Şeması.

Memristör elektrik yüküne bağlı olduğu için memristör elektrik yükünün hesaplaması gerekmektedir. Memristans burada yüke bağlı olan ve olmayan olarak iki kısma ayrılmıştır. Yüke bağlı olmayan kısım şeklindeki R1 direncidir. Uçlarındaki voltaj ohm kanunundan dolayı akımının değeri ile orantılıdır. Eğer i(t) A'dan B'ye akan akım ise, R1'in uçlarındaki voltaj takip edene eşittir:

$$V_{R1} = i(t)R_1 \quad (2)$$

Bu voltaj devredeki bir opamp (G1) ve dört dirençten oluşan (R2, R3, R4, R5) fark kuvvetlendirici tarafından okunabilir. Fark alıcının çıkış voltajı takip edene eşittir:

$$V_{U1} = -\frac{R_3}{R_2} V_{R1} \quad (3)$$

Akımın integralinin negatifi ile orantılı bir voltaj G2 opampı ve R6 direnci ve C1 kapasitöründen oluşan integral alıcı devre ile alınabilir. Integral alıcının çıkış voltajı şu takip edene eşittir;

$$V_{u2} = V_c(t) = -\frac{1}{R_6 C_1} \int_{t=0}^t V_{u1} dt + V_{c1}(0) \quad (4)$$

Bu voltajda Memristör taklitçisinin yükü ile orantılıdır. Yani;

$$Q(t) = \int_{t=0}^t i(t) dt + Q(0) \quad (5)$$

$$V_{GS} = \frac{R_1 R_2}{R_2 R_6 C_1} |Q(t)| \quad (6)$$

Akımın integrali, yani elektrik yükü, ile doğru orantılı bir voltajın mutlak değeri bu, integral alıcının çıkışlarına D1-D2-D3-D4 diyotlarını kullanarak sağlandı. Bu devre negatif yük değerine izin vermemektedir. Devrenin yük bağımlı elemanı olarak bir FET seçildi. Bu FET'in iletim direnci bu doğrultucu ile sürüldüğünden devre akımı değişikçe ve integral alıcı opamp doymadıkça değişmektedir. Yani FET uçlarındaki voltaj ve akım gate ve source uçlarındaki voltaja dolayısı ile devreden geçmiş olan yük ile bağlantılıdır. FET'in voltaj-akım denklemi

$$I_D = K((V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - V_{DS}^2/2) \quad (7)$$

Burada;

I_D Drainden geçen FET akımıdır.

V_{DS} Drain ve source arasındaki FET voltajıdır.

V_{GS} FET'in kapısı ve source bacakları arasındaki voltajdır.

V_{TH} FET eşik voltajıdır.

K FET sabitidir.

FET direnci değişikçe FET DC voltaj ile sürülebilirsin ve içinden DC akım geçsin diye, D5-D6-D7-D8 diyotlarından oluşan köprü doğrultucu kullanıldı. Drain ve Gate arasına R7 direnci atıldı. Gate ve source arası ilk doğrultucu çıkış uçları ile sürüldü. Böylece A-B uçları arasında geçen akımın fonksiyonu olarak değişen bir direnç D5-D6-D7-D8 diyotlarından oluşan köprü doğrultucunun AC tarafından görülür hale geldi. AB uçlarından akan akım;

$$i(t) = I_D \text{sign}(V(t)) \quad (8)$$

Yukarıda sign işaret (signum) fonksiyonudur. V(t) ise memristör taklitçisi voltajıdır.

(2)'den (6)'ya kadar olan formüller memristör taklitçisi akımının memristör taklitçisi yüküne ve voltajına bağlı olduğunu göstermektedir;

$$i(t) = f(Q(t), V(t)) \quad (9)$$

Bu ifade FET denkleminde dolayı nonlineerdir. Bu denklemde gözükmeyen ama Memristör taklitçisinin sahip olduğu diğer bir nonlineerlik ise diyot gerilim düşümlerinden kaynaklanmaktadır.

Diyot gerilim düşümleri ihmal edilirse ve eğer V_{DS} küçük ise ve diyot gerilim düşümleri ihmal edilirse, FET akım-voltaj ilişkisi lineer kabul edilebilir;

$$I_D \cong K(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} \quad (10)$$

FET iletkenliği;

$$G_{DS} = \frac{I_D}{V_{DS}} \cong K(V_{GS} - V_{TH}) \quad (11)$$

FET rezistansı;

$$R_{DS} = \frac{1}{G_{DS}} = \frac{1}{K(V_{GS} - V_{TH})} \quad (12)$$

FET voltajı;

$$V_{DS} = R_{DS} I_D \quad (13)$$

Böylece, memristör takipçisi voltajı;

$$V(t) = V_{DS} + R_1 i(t) \quad (14)$$

$$V(t) = \left(\frac{1}{K(V_{GS} - V_{TH})} + R_1 \right) i(t) \quad (15)$$

$$V(t) = \left(\frac{1}{K \left(\frac{R_1 R_2}{R_2 R_6 C_1} |Q(t)| - V_{TH} \right)} + R_1 \right) i(t) \quad (16)$$

Buradan AB uçlarından görülen Memristans değeri

$$M(q) = \frac{V(t)}{i(t)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K \left(\frac{R_1 R_2}{R_2 R_6 C_1} |Q(t)| - V_{TH} \right)} + R_1 \right)} \quad (17)$$

olarak bulunur. Ama gerçekte, (8)'in de ifade ettiği gibi Memristör takipçisi akımı aslında AB uçlarındaki voltaja da nonlineer olarak bağlıdır.

Memristör 2 uçlu bir eleman olmasına rağmen bu taklitçi devre opamp besleme voltajlarından dolayı 5 uçludur. Eşlenik bir güç kaynağı memristör takipçisini enerjilemek için kullanıldı. Pil ile de beslenebilen taşınabilir memristör takipçileri de yapılabilir. Aslında bu eşlenik voltajlar opampların doyma voltajlarını belirlemekte ve böylece dolaylı olarak Memristör Taklitçisi karakteristiğini de belirlemektedir.

Devre protoboard'a kuruldu ve A-B uçlarından alınan deneysel sonuçlar bir sonraki bölümde verildi.

3. Deneysel Sonuçları

Memristör taklitçisinin Memristör gibi davrandığını doğrulamak için deney yapıldı. Protoboard'a kurulan memristör taklitçisi Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9: Protoboard'a Yapılmış Memristör Taklitçisi.

Deneyde Memristör taklitçisi sinyal jeneratöründen elde edilen sinusoidal voltajla beslendi. Memristör benzeri davranışta bulunduğu görüldü. 60 Hz Sinüsoidal voltajla beslenen Memristör taklitçisinin Lysecaous eğrisi Şekil 10'de görülmektedir. Tıpkı gerçek bir memristörün akım ve geriliminin aynı anda sıfırdan geçtiği gibi, bu histeresis eğrisinde de akım ve gerilim aynı anda sıfırdan geçmektedir. Sinüsoidal voltajla beslenen Memristör taklitçisinin akım ve gerilimi Şekil 10'da görülmektedir.

Frekans arttıkça memristörler direnç gibi davranmaya başlar. Memristör taklitçisi 600 Hz'de nonlinear bir direnç gibi davranmaktadır ve bu durum Şekil 11'de görülebilir.

Voltaj artırılınca histeresis eğrisinin aldığı biçim Şekil 12'de görülebilir ve memristör taklitçisinin saturasyonu ve saturasyonda direnç gibi davrandığı görünür. Memristör taklitçisi HP memristörüne benzer şekilde saturasyona girmektedir.

Tümüyle Williams'ın memristörü gibi davranmasa da memristör taklitçisi memristör benzeri davranmaktadır.

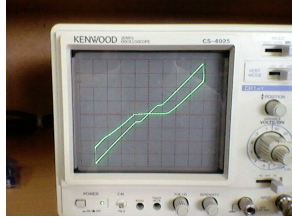
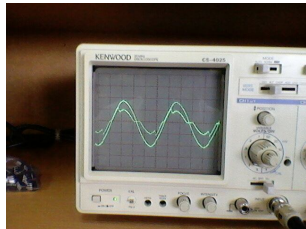
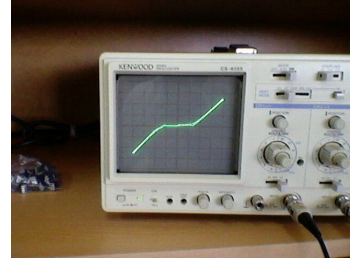


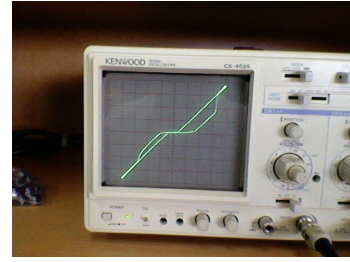
Figure 9: Sinusoidal Voltajla Beslenen Memristör Taklitçisi Lysecaous Eğrisi.



Şekil 10: Sinusoidal Voltajla Beslenen Memristör Taklitçisinin Akım ve Gerilimi.



Şekil 11: Yüksek Frekansta Lysecaous Eğrisi.



Şekil 12: Voltaj Arttırılınca Histeresis Eğrisinin Aldığı Biçim. Memristör Taklitçisinin Saturasyonu Görünüyor.

5. Sonuç

Bir memristör taklitçisi aktif ve pasif az sayıda devre elemanları kullanılarak yapıldı. Taklitçinin nasıl çalıştığı açıklandı. Gerçek bir memristör olmasa da, memristif bir sistem olduğundan, yüke bağımlılık, memristör saturasyonu ve histeresis gibi memristör davranışlarını mimmikleyebildiği doğrulandı. Bu veya benzeri memristör taklitçisi devreler laboratuvarlarında memristör olmayan ve memristörleri öğrencilerine öğretmek isteyen mühendislik bölümleri tarafından kullanılabilir. Burada aynı zamanda her elektrik, elektronik, haberleşme ve bilgisayar mühendisliği öğrencilerinin devre dersinin altında memristörü de görmelerinin öneminin altını çiziyoruz. Üniversitelerin veya diğer eğitim kurumlarının memristör ihtiyaçları için küçük bile olsa bir Pazar ortaya çıkabilir ve bu ihtiyacı gidermek için faaliyet gösteren şirketleri pek yakında piyasaya görebiliriz. Memristör çok pahalı bir eleman olarak piyasaya çıkarsa fazla bütçesi olmayan üniversiteler hala memristör taklitçilerini eğitim için kullanabilirler.

Kaynaklar

- [1] L. O. Chua, "Memristor - The Missing Circuit Element," IEEE Trans. Circuit Theory, vol. 18, pp. 507-519, 1971.
- [2] L. O. Chua and S. M. Kang, "Memristive devices and systems," Proc. IEEE, vol. 64, pp. 209-223, 1976.
- [3] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, "The missing memristor found," Nature (London), vol. 453, pp. 80-83, 2008.
- [4] J. J. Yang, M. D. Pickett, X. Li, D. A. A. Ohlberg, D. R. Stewart, and R. S. Williams, "Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices," Nature Nanotechnology, vol. 3, pp. 429-433, 2008.
- [5] Yu. V. Pershin and M. Di Ventra, "Spin memristive systems: Spin memory effects in semiconductor spintronics," Phys. Rev. B, Condens. Matter, vol. 78, p. 113309/1-4, 2008.
- [6] T. Driscoll, H.-T. Kim, B.-G. Chae, M. Di Ventra, and D. N. Basov, "Phase-transition driven memristive system," arXiv:0901.0899, 2009.
- [7] Yu. V. Pershin, S. La Fontaine and M. Di Ventra, "Memristive model of amoeba's learning," arXiv:0810.4179, 2008.