

Memristör Tabanlı Negatif-Pozitif Kazanç Devresi Memristor-Based Amplifiers with Non-Inverting and Inverting Gains

Ertuğrul Karakulak^{1*}, Reşat Mutlu², Erdem Uçar³

¹Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye
ekarakulak@nku.edu.tr

²Çorlu Mühendisli Fakültesi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye
rmutlu@nku.edu.tr

³Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trakya Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye
erdemucar@trakya.edu.tr

Öz

Memristörler, doğrusal ve zamanla değişmeyen devre elemanları kullanılarak yapılamayacak bazı analog uygulamalar için büyük bir potansiyel vaat eden non-lineer devre elemanlarıdır. Bilimsel literatürde bazı memristör tabanlı filtreler ve yükselteçler gibi analog uygulamalar incelenmiştir. Eviren ve evirmeyen memristör tabanlı yükselteçler de literatürde incelenmiştir. Bu çalışmada, literatürde bir ilk olarak, hem negatif hem de pozitif kazanç verebilen, opamp ve memristör tabanlı bir devre önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Memristör, Memristif Sistemler, Programlanabilir yükselteçler.

Abstract

Memristors, which are nonlinear circuit elements, have a big potential to design analog circuits that can not be made using linear time-invariant circuit elements. In literature, some analog circuit applications such as memristor based filter and amplifier circuits have already been examined. Opamp based amplifiers has either negative or positive gains. Memristor-based inverting and non-inverting amplifiers have also been inspected in literature. In this study, for the first time in literature, it is shown how to make a new memristor-based amplifier which can give not only positive but also negative gains.

Keywords: Memristor, Memristive Systems, Programmable Amplifiers.

1. Giriş

Memristörler, Dr. Leon Chua tarafından 1971 yılında bulunmamış yani kayıp dördüncü bir temel devre elemanı olarak iddia edilmişlerdir [1]. Bu tarihten sonra, 2008 senesine kadar, memristörler konusunda çok az sayıda yayın yapılmıştır. 2008 yılında, HP firmasının bir araştırma ekibi tarafından, ince TiO_x filmlerin memristif davranış gösterdikleri ortaya konmuştur [2].

Bu tarihten sonra memristörler konusundaki yayınların sayısında çok ciddi bir artış yaşanmıştır.

Memristör üzerine yapılan çalışmaların çok önemli bir kısmı memristörlü analog devre önerileridir [3-8]. Literatürde memristörlerin analog uygulamalarına dair literatür tarama makaleleri de bulunmaktadır [3,4]. Memristörlerin yükselteç devrelerinde kullanılarak, ayarlanabilir yükselteçler yapılmasına dair çalışmalar da yapılmıştır [7-11]. Opamp tabanlı yükselteçlerden pozitif kazançta sahip olanlar evirmeyen ve bunlardan negatif kazançta sahip olanlar eviren yükselteçler olarak isimlendirilmektedirler. Çalışmalarda ele alınan memristörlü yükselteç devrelerinden bazıları eviren, bazıları ise evirmeyen yükselteçler şeklinde bağlanmıştır [8-12]. Memristör tabanlı hem eviren hem de evirmeyen özellikler gösteren opamp bir yükselteç devresi ise henüz literatürde yer almamıştır. Bu çalışmada devredeki memristörün memristans (elektriksel direnç) değeri değiştirilerek ya pozitif ya da negatif kazanç verebilecek memristör tabanlı birkaç yükselteç devresi incelenmiş ve önerilmiştir. Benzetimler yapılarak, eşik gerilimi altında devrenin beklenildiği gibi çalışırken, eşik gerilimi üstünde ayarlandığı kazanç değerini kaybedeceği gösterilmiştir.

Bu makale şu şekilde düzenlenmiştir; ikinci bölümde eşik gerilimine sahip bir memristör modeli ve modele ait akım-gerilim histeresis eğrisi verilmiştir, üçüncü bölümde memristör tabanlı fark yükselteç devreleri açıklanmıştır, dördüncü bölümde söz konusu devrelerin eşik gerilimi altında ve üstündeki davranışları benzetimler kullanarak incelenmiştir. Makale beşinci ve son bölüm olan tartışma ve sonuç bölümüyle tamamlanmıştır.

2. Nonlineer sürüklenme hızlı ve eşik gerilimli bir memristör modeli

Memristörün Dr.Chua tarafından ortaya konan sembolü Şekil 1'de görülebilir.



Şekil 1. Memristör Sembolü

Akım bağımlı ve nonlinear iyon sürüklenme hızlı memristör modelleri literatürde bulunmaktadır [6,13,14]. Memristörün rezistansı yani memristans değeri $R(x)$ şeklinde gösterilir ve anlık memristans değeri memristörün durum değişkeni x 'e ya da içinden akan yüke (q) bağlıdır. Denklem (1)'de görüldüğü haliyle memristörün uçsal matematik modeli yazılabilir.

$$V(t) = R(x) i(t) \quad (1)$$

Ayrıca memristörün memristans değeri maksimum (R_{off}) ve minimum (R_{on}) değerler arasında değişmektedir:

$$R_{off} \leq R(x) \leq R_{on} \quad (2)$$

Bu çalışmada kullanılacak nonlinear sürüklenme hızlı ve eşik gerilimli memristör modeli ref [13]'ten alınmıştır. Bu model bir pencere fonksiyonuna sahiptir. Bu pencere fonksiyonu sayesinde memristörün fiziksel sınır noktalarında iyon sürüklenme hızlarının farklı olması modellenebilmektedir. Ayrıca memristör üzerindeki gerilim memristör eşik gerilimini aştığında, memristörün memristansı değişmektedir. Eşik gerilimi altında ise memristörün memristansı değişmemektedir. Simetrik eşik gerilimli bu modele ait durum değişkeninin parçalı fonksiyonu denklem (3)'te verilmiştir.

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} \frac{\mu_v i(t) R_{on}}{D^2} f(x, i) & , \quad V_{TH} \leq abs(V(t)) \\ 0 & , \quad abs(V(t)) < V_{TH} \end{cases} \quad (3)$$

Denklem (3)'te D memristörün fiziksel uzunluğu, μ_v mobilite katsayısı, $i(t)$ memristör akımı, R_{on} memristörün minimum memristans değeri, V_{TH} memristörün eşik gerilimi, $V(t)$ ise memristör gerilimidir. Bu denklemde verilen durum değişkeni $x=w/D$ 'ye eşittir ve memristörün okside olmuş kısmının normalize edilmiş uzunluğunu göstermektedir. Durum değişkeni x sıfır ile bir arasında değişmektedir. w memristörün okside olmuş kısmının fiziksel uzunluğudur. Şekil 2'de memristörün fiziksel yapısı görülebilir. D ve w uzunlukları Şekil 2'de gösterilmiştir.

Denklemde $f(x, i)$ pencere fonksiyonudur ve denklem (4)'te verilmiştir. Bu fonksiyon iki değişkene bağlıdır ve bu değişkenlerden birisi memristör akımı diğeri de memristör durum değişkenidir.

$$f(x, i) = 1 - (x - stp(-i))^{2p} \quad (4)$$

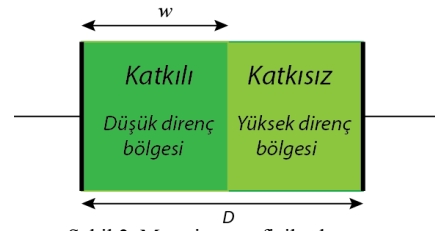
Denklemde p pencere fonksiyonunun kuvvet sabiti olup bu modelde '2' olarak alınmıştır. Memristans formülü w ya da x 'e bağlı olarak denklem (5)'teki şekilde verilebilir:

$$R(x) = R_{on} \frac{w}{D} + R_{off} \frac{D-w}{D} = \quad (5)$$

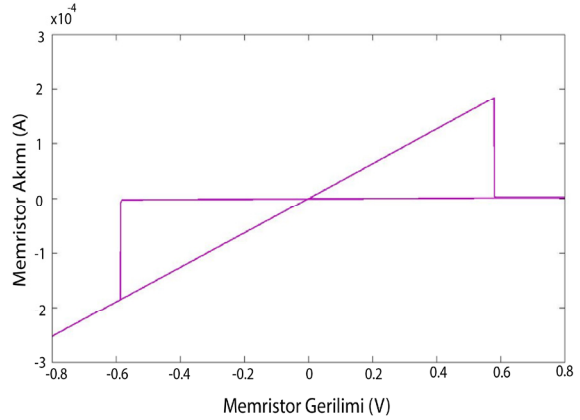
$$R_{on}x + R_{off}(1-x) =$$

$$R_{off} - (R_{off} - R_{on})x$$

Şekil 3'te bu modele sahip bir memristörün çimdiklenmiş sıfırdan geçen akım-gerilim histerisis eğrisi görülebilir.



Şekil 2. Memristörün fiziksel yapısı



Şekil 3. Memristör modeli akım-gerilim histerisis eğrisi.

Kullanılan memristör modelinin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

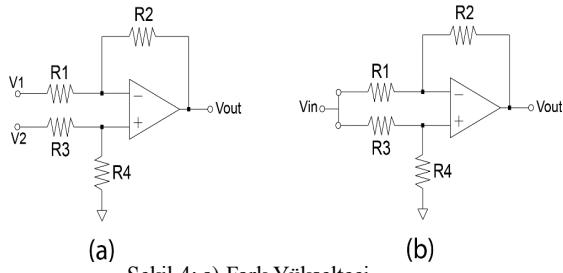
Tablo 1. Memristör modeline ait parametreler.

Memristörün Minimum Memristans Değeri	R_{on}	3.16 kΩ
Memristörün Maksimum Memristans Değeri	R_{off}	316 kΩ
Pencere Fonksiyonu Kuvveti	p	2
Memristörün İyon Mobilite Katsayısı	μ_v	0.0017827 $\frac{m^2}{V.s}$
Memristör Fiziksel Uzunluğu	D	0.13 μm
Memristör Eşik Gerilimi	V_{TH}	0.58 Volt

3. Modifiye edilmiş fark yükseltici

Bir eviren yükseltcin kazancı negatif, evirmeyen yükseltcin kazancı ise pozitiftir. Literatürde bazı memristör tabanlı opampli yükselteç devreleri önerilmesine ve incelenmesine rağmen, hem negatif hem de pozitif kazanç üreten memristör tabanlı opampli yükselteç devresi henüz yer almamıştır.

Şekil 4.a'da opampli bir fark yükseltci devresi görülmektedir. Şekil 4.a'daki devrenin girişlerinin birleştirilmesi ile Şekil 4.b elde edilir. Her iki devre de sabit dirençlere sahip oldukları için kazançları sabittir.



Şekil 4: a) Fark Yükseltici
b) Girişleri birleştirilmiş fark yükseltici.

Şekil 4.a'daki yükselticinin çıkış gerilimi Denklem (6)'daki haliyle verilebilir.

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) V_2 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) V_1 \quad (6)$$

Eviren ve evirmeyen fark yükseltici girişlerinin birbirine bağlanması ($V_1=V_2=V_{in}$) ve R_1 ile R_2 direncinin eşit seçilmesiyle ($R_1=R_2$) denklem (6) denklem (7)'ye dönüşecektir.

$$V_{out} = \left(\frac{R_4 - R_3}{R_4 + R_3}\right) V_{in} \quad (7)$$

Bu devrenin kazancı denklem (8)'de görülebilir.

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_4 - R_3}{R_4 + R_3} \quad (8)$$

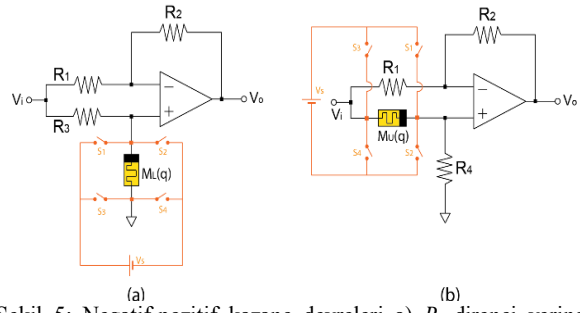
R_4 direnç değerinin R_3 direnç değerinden büyük olduğu durumlarda ($R_4 > R_3$) yükselteç kazancı pozitif olmakta ve R_3 direnç değerinin R_4 direnç değerinden büyük olduğu durumlarda ($R_3 > R_4$) ise yükselteç kazancı negatif olmaktadır. Söz konusu yükselteç devresi bundan sonra negatif-pozitif kazanç devresi olarak adlandırılacak ve bu kısımdan sonra NPGA olarak kısaltılacaktır. NPGA devresinin parametrik analizi için R_4 direnç değerinin R_3 direnç değerine oranı γ olarak ifade edelim. Bu durumda denklem (8) denklem (9)'a dönüşecektir.

$$G = \frac{(R_4 - R_3)/R_3}{(R_4 + R_3)/R_3} = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (9)$$

Memristör tabanlı NPGA devresindeki R_3 ve R_4 dirençleri memristörler ile değiştirilerek Şekil 5'teki devreler elde edilebilir. Şekil 5.a'daki yükselteç aşağı memristörlü NPGA devresi ve Şekil 5.b'teki yükselteç yukarı memristörlü NPGA devresi olarak isimlendirilmiştir. M_L veya M_U memristörlerinin memristans değerleri memristör eşik gerilim değerinden yüksek gerilime sahip darbeler kullanılarak kolayca ayarlanabilir [15,16]. Şekil 5'te memristörün değerini ayarlamak için kullanılacak, anahtarlı kazanç ayar devreleri de gösterilmiştir. Bu anahtarlar yerine farklı transistör tiplerinden, amaca en uygun olanlar seçilebilir.

Şekil 5.a'da verilen devrenin kazanç denklemi denklem (10)'da görülebilir.

$$G = \frac{\frac{M_L}{R_3} - 1}{\frac{M_L}{R_3} + 1} = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (10)$$



Şekil 5: Negatif-pozitif kazanç devreleri a) R_4 direnci yerine memristör bağlanmış devre ve kazanç ayar devresi b) R_3 direnci yerine memristör bağlanmış devre ve kazanç ayar devresi.

Şekil 5.b'deki memristör tabanlı yükselticinin kazanç eşitliği ise denklem (11)'de görülebilir.

$$G = \frac{\frac{R_4}{M_U} - 1}{\frac{R_4}{M_U} + 1} = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (11)$$

Şekil 5.a'da R_3 ve Şekil 5.b'de R_4 direnci lineer zamanla değişmeyen dirençlerdir ve bu dirençlerin değeri iyi bir başarımla için doğru şekilde seçilmelidir. Bu makalede R_3 veya R_4 dirençlerinin memristör memristansının maksimum ve minimum değerlerinin geometrik ortalaması olarak seçilmesi önerilmiştir. Yani, Şekil 5.a'daki yükselteç için R_3 direnç değeri:

$$R_3 = \sqrt{R_{off} \cdot R_{on}} \quad (12)$$

ve Şekil 5.b'deki yükselteç için R_4 direnç değeri:

$$R_4 = \sqrt{R_{off} \cdot R_{on}} \quad (13)$$

olarak alınacaktır.

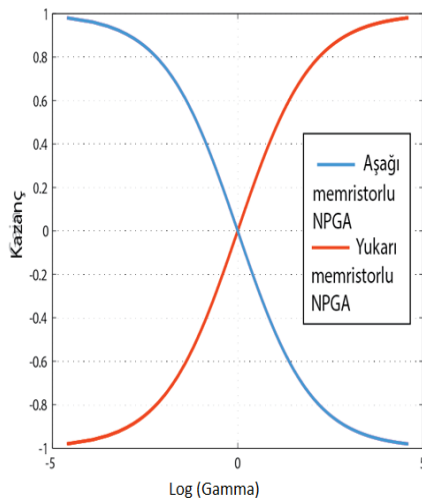
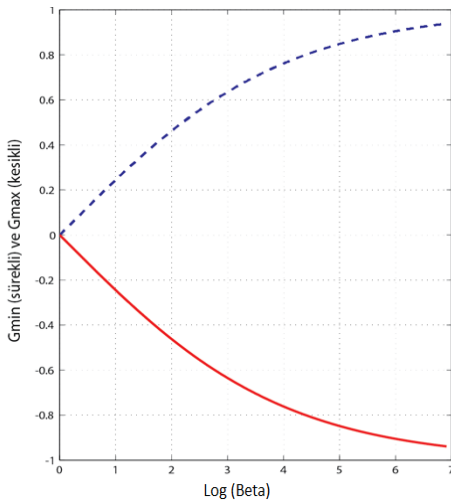
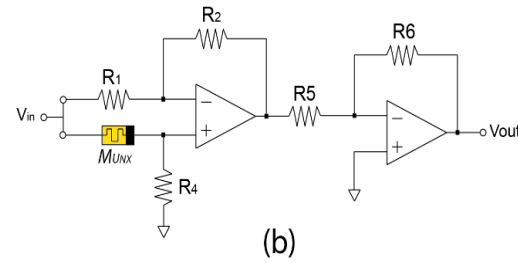
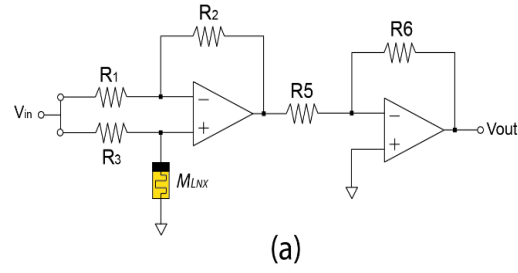
Şekil 5'teki devrelerin maksimum ve minimum kazançları Tablo 2'de verilmiştir. Denklemde β parametresi parametrik analiz için kullanılmıştır ve maksimum memristansın minimum memristansa oranı olarak tanımlanmıştır [6].

$$\beta = \frac{R_{OFF}}{R_{ON}} \quad (14)$$

Bu parametre özellikle memristör tabanlı bilgisayar belleklerinin modellenmesinde kullanılmaktadır ve bu tip belleklerin başarımlarının bir ölçüsü olarak ele alınmaktadır [17]. Verilen β parametresi için Şekil 5'teki devre topolojilerinin kazanç denklemleri Tablo 2'de verilmiştir. Önerilen negatif-pozitif kazanç devresinin γ parametresine bağlı kazanç eğrisi Şekil 6.a'da görülebilir. Her iki NPGA devresinin kazancının β parametresine bağlı değişimi ise Şekil 6.b'de görülebilir. Şekil 6.b'de görüldüğü gibi β sonsuza giderken yükselticinin kazancı -1 ile +1 aralığında değişmektedir. Burada kazançlar G_{min} ve G_{max} olarak ifade edilmiştir. Memristöre eşik gerilim değerinin üzerinde gerilim darbeleri uygulayarak memristörlerin memristans değerleri değiştirilebilir [15,16]. Eğer daha yüksek kazançlar istenirse, Şekil 7'de görüldüğü gibi ardışıl bir yükselteç kaskat bağlanarak bu kazanç değerleri elde edilebilir. Bu durumda kazanç değerleri $G_{min}R_6/R_5$ ile $G_{max}R_6/R_5$ aralığında olacaktır.

Tablo 2. β parametresine bağlı maksimum ve minimum kazanç denklemleri.

NPGA'nın Tipi	Maksimum Kazanç	Minimum Kazanç
Aşağı memristörlü NPGA devresi (Şekil 5.a)	$G_{max} = \frac{\beta - \sqrt{\beta}}{\beta + \sqrt{\beta}}$	$G_{min} = \frac{1 - \sqrt{\beta}}{1 + \sqrt{\beta}}$
Yukarı memristörlü NPGA devresi (Şekil 5.b)	$G_{max} = \frac{\sqrt{\beta} - 1}{\sqrt{\beta} + 1}$	$G_{min} = \frac{\sqrt{\beta} - \beta}{\sqrt{\beta} + \beta}$

Figure 6. a) NPGA devrelerinin γ 'ya bağlı olarak değişen kazanç eğrileri.Figure 6.b) NPGA devrelerinin β parametresine bağlı olarak minimum ve maksimum kazançlarının değişimi.

Şekil 7: a) Alt memristörlü NPGA devresinin ardışıl kazanç devresi ile kazanç aralığının artırılması. b) Üst memristörlü NPGA devresinin ardışıl kazanç devresi ile kazanç aralığının artırılması.

4. Eşik gerilimi altı ve üstündeki gerilimler için NPGA devrelerinin davranışı

4.1 Eşik gerilimi altı ve üstündeki gerilimler için aşağı memristörlü NPGA devresinin davranışı

$M_L=R(x)$ alınarak ve memristörün gerilimi gerilim bölücünden hesaplanarak, Şekil 5.a'daki aşağı memristörlü NPGA devresi yükselticinin dinamik denklemleri Denklem (15)-(18)'teki halde verilebilir.

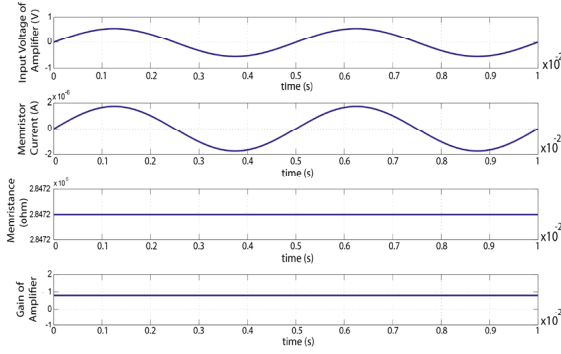
$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} \frac{\mu_v i(t) R_{on}}{D^2} f(x, i), & V_{TH} \leq \text{abs} \left(\frac{R(x) V_i(t)}{R(x) + R_3} \right) \\ 0, & \text{abs} \left(\frac{R(x) V_i(t)}{R(x) + R_3} \right) < V_{TH} \end{cases} \quad (15)$$

$$V(t) = R(x) i(t) \quad (16)$$

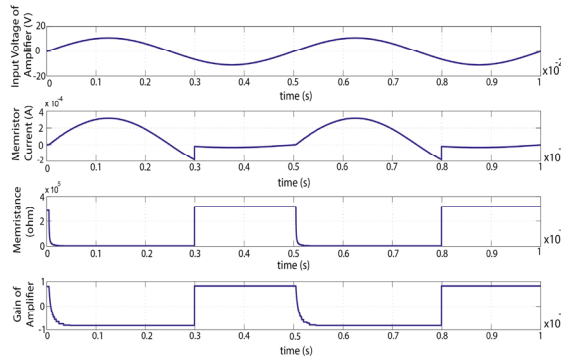
$$R(x) = R_{off} - (R_{off} - R_{on})x \quad (17)$$

$$V_{out} = \left(\frac{R(x) - R_3}{R(x) + R_3} \right) V_{in} \quad (18)$$

Bu dinamik modelin memristör geriliminin eşik geriliminden alçak ve yüksek olacağı giriş gerilimi değerleri için benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9 'da görülebilir. Şekil 8'de memristöre uygulanan sinüsoidal giriş gerilimi memristörün üzerinde eşik gerilimini geçmeyen bir gerilime neden olmaktadır. Bundan dolayı memristörün memristansı değişmemekte ve akımı sinüsoidal olmakta ve yükseltcin kazancı sabit kalmaktadır. Şekil 9'da memristöre uygulanan sinüsoidal giriş gerilimi memristörün üzerinde eşik gerilimini geçen bir gerilime neden olmakta ve bundan dolayı memristörün memristansı değişmekte ve akımı sinüsoidal olmamaktadır. Sonuç olarak memristans değişimine bağlı olarak kazanç da değişmektedir. Memristörün bazı aralıklarda doyuma gittiği de görülmektedir. Doyumda olan bir memristörün memristansı R_{off} ya da R_{on} olmaktadır.



Şekil 8: Aşağı memristörlü NPGA devresine genliği $V_m=0.55V$ olan bir sinüsoidal gerilim uygulaması ($V_i=V_m\sin(\omega t)$).



Şekil 9: Aşağı memristörlü NPGA devresine genliği $V_m=10V$ olan bir sinüsoidal gerilim uygulaması ($V_i=V_m\sin(\omega t)$).

4.2 Eşik gerilimi altı ve üstündeki gerilimler için üst memristörlü NPGA devresinin davranışı

$M_i=R(x)$ alınarak ve memristörün gerilimi gerilim bölücünden hesaplanarak, Şekil 5.b'daki Üst memristörlü NPGA devresi yükseltecinin dinamik modeli Denklem (19)-(22)'de görüldüğü gibi verilebilir.

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} \frac{\mu_v i(t) R_{on}}{D^2} f(x, i), & V_{TH} \leq \text{abs} \left(\frac{R(x)V_i(t)}{R(x) + R_4} \right) \\ 0, & \text{abs} \left(\frac{R(x)V_i(t)}{R(x) + R_4} \right) < V_{TH} \end{cases} \quad (19)$$

$$V(t) = R(x)i(t) \quad (20)$$

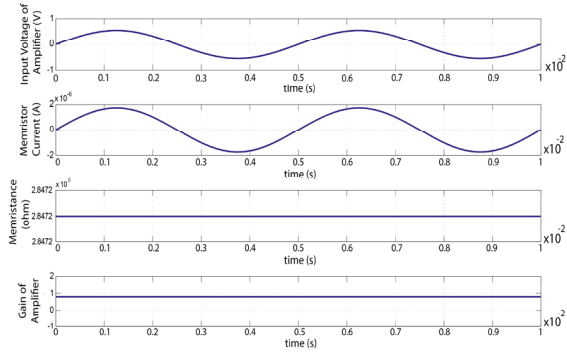
$$R(x) = R_{off} - (R_{off} - R_{on})x \quad (21)$$

$$V_{out} = \left(\frac{R_4 - R(x)}{R_4 + R(x)} \right) V_{in} \quad (22)$$

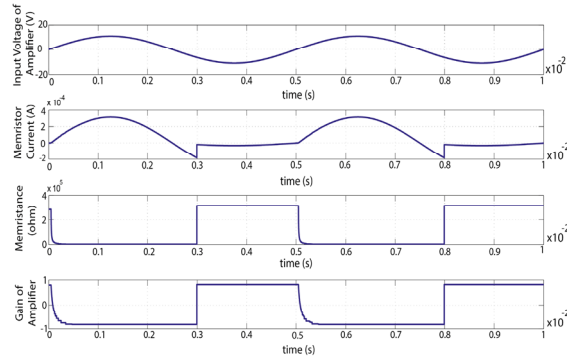
Bu dinamik modelin, memristörün geriliminin eşik geriliminden alçak ve yüksek olacağı giriş gerilimi değerleri için benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçları Şekil 10 ve Şekil 11'de görülebilir. Şekil 10'da memristöre uygulanan sinüsoidal giriş gerilimi memristörün üzerinde eşik gerilimini geçmeyen bir gerilime neden olmaktadır. Bundan dolayı memristörün memristansı değişmemekte ve akımı sinüsoidal olmaktadır. Şekil 11'de ise memristöre uygulanan sinüsoidal giriş gerilimi memristörün üzerinde eşik gerilimini geçen bir gerilime neden olmakta ve bundan dolayı memristörün memristansı değişmekte ve akımı sinüsoidal olmamaktadır. Buna bağlı olarak devrenin

kazancı da değişmektedir. Memristörün bazı aralıklarda doyuma gittiği de görülmektedir.

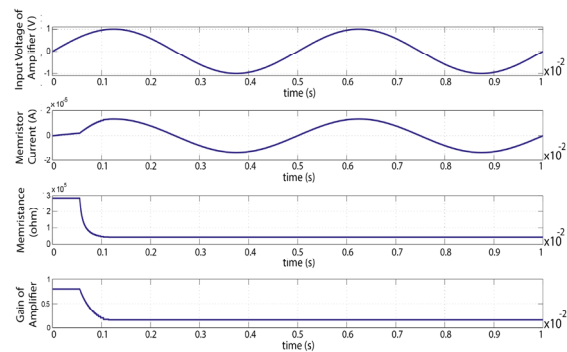
Şekil 12'de ise kaynak gerilimi, önce memristörün değerinin yalnızca belirli bir aralıkta eşik gerilimini geçmesine neden olmakta, memristörün memristansı minimum memristans değerine düşmektedir. Memristör memristansının Bu minimum memristans değerine düşmesi sebebiyle başlangıçtaki yükselteç kazanç değeri kaybedilmektedir. Gerilim bölücü direnç üzerinde düşen gerilim sebebiyle memristör üzerine daha az gerilim düşmektedir. Bu sebeple üzerinde eşik gerilimini aşan gerilim oluşmayan memristörün memristansı minimum memristans değerinde kalmaktadır. Devrenin kazancı minimum kazanç değerinde sabitlenmektedir.



Şekil 10: Üst memristörlü NPGA devresine genliği $V_m=0.55V$ olan bir sinüsoidal gerilim uygulaması ($V_i=V_m\sin(\omega t)$).



Şekil 11: Üst memristörlü NPGA devresine genliği $V_m=10V$ olan bir sinüsoidal gerilim uygulaması ($V_i=V_m\sin(\omega t)$).



Şekil 12: Üst memristörlü NPGA devresine genliği $V_m=1V$ olan bir sinüsoidal gerilim uygulaması ($V_i=V_m\sin(\omega t)$).

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada literatürde ilk defa hem negatif hem de pozitif kazanç değerleri verebilen memristör tabanlı NPGA devreleri önerilmiştir. Bu devrelerin çalışma prensipleri ve tasarım kriterleri ortaya konmuştur.

Yükselteçlerde istenen kazanç değerlerinin elde edilmesi için memristans değerlerinin memristörlere uygulanacak eşik gerilimini aşan gerilim darbeleri ile değiştirilmesi gerekmektedir. Normal operasyon esnasında uygulanacak gerilimler memristörün geriliminin eşik gerilimini geçmesine neden olamayacak genlikte seçilmelidir. Memristörün geriliminin eşik gerilimini geçmesi, yükselteç kazancının istenmeyen şekilde ayarlandığı değerden kaymasına neden olmaktadır. Benzetimler yapılarak bu durumlar incelenmiş ve sonuçlar verilmiştir. NPGA devreleri gelecekte yapay sinir ağlarının ağırlık faktörlerinin ayarlanmasında, otomatik kontrol devrelerinde ve kaos devreleri gibi uygulamalarda yer alabilir.

Kaynaklar

- [1] Chua, L.O., "Memristor - the missing circuit element", IEEE Trans Circuit Theory, 18, pp. 507-519, 1971.
- [2] Strukov, D.B. Snider, G.S., Stewart, D.R., Williams, R.S., "The missing memristor found", Nature, 453, pp. 80-83, 2008.
- [3] 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.
- [4] Y. V. Pershin, J. Martinez-Rincon, M. Di Ventra, "Memory circuit elements: from systems to applications", the Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol.8, p.p. 441- 448, 2011.
- [5] Berdan, R. , T. Prodromakis, and C. Toumazou. "High precision analogue memristor state tuning." Electronics letters 48.18, 1105-1107, 2012.
- [6] Wei Yi, Frederick Perner, "Feedback write scheme for memristive switching devices" , Applied physics A 102.4: 973-982, 2011.
- [7] S.Shin, K. Kim, S.-M. Kang, "Memristor Applications For Programmable Analog ICs", IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. 10, p.p. 266-274, 2010.
- [8] 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.
- [9] Wey, Todd A., and William D. Jemison. "Variable gain amplifier circuit using titanium dioxide memristors." IET circuits, devices & systems 5.1: 59, 2011.
- [10] Yener, Suayb Cagri, Resat Mutlu, and H. Hakan Kuntman. "A new memristor-based low-pass filter topology and its smallsignal solution using MacLaurin series." Optoelectronics and advanced materials-rapid communications, 9.1-2: 266- 273, 2015.
- [11] Yener, Şuayb Çağrı, Reşat Mutlu, and H. Hakan Kuntman. "Performance Analysis of a Memristor-Based Biquad Filter Using a Dynamic Model" Informacije Midem- Journal of microelectronics electronic components and materials, 44.2 : 109-118, 2014.

- [12] Wait, John V., Lawrence P. Huelsman, and Granino Arthur Korn. Introduction to operational amplifier theory and applications. McGraw-Hill Companies, 1975.
- [13] Biolek Z, Biolek D, Biolkova V. "SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift", Radioengineering; 18: 210–214, 2009.
- [14] Joglekar, Yogesh N., and Stephen J. Wolf., "The elusive memristor: properties of basic electrical circuits", European Journal of Physics, vol.30, no.4, p.661, 2009.
- [15] Karakulak E., Mutlu R., Uçar E., "Reconstructive sensing circuit for complementary resistive switches-based crossbar memories." Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 24.3: 1371-1383, 2016.
- [16] Berdan, R., T. Prodromakis, and C. Toumazou. "High precision analogue memristor state tuning." Electronics letters 48.18: 1105-1107, 2012.
- [17] Karakulak E., Mutlu R., Uçar E., "Sneak path current equivalent circuits and reading margin analysis of complementary resistive switches based 3D stacking crossbar memories", MIDEEM -Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials, vol. 44, pp. 235-241, 2014.



Ertuğrul Karakulak

1979 yılında Tekirdağ'da doğdu. Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi Elektronik Öğretmenliği, yüksek lisansını Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde, doktora eğitimini ise Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden tamamladı. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda Doktor Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları Memristör ve Rezistif RAM belleklerdir.



Reşat Mutlu

1973 yılında Tekirdağ'da doğdu. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği, Yüksek lisans ve doktorasını ise Rensselaer Polytechnic Enstitü'de sırasıyla 1998 ve 2004 yıllarında tamamladı. An itibariyle Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi'nde doçent olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları elektronik sistemlerin modellenmesi, memristör, memristif sistemler ve rezistif RAM belleklerdir.



Erdem Uçar

1966 yılında Edirne'de doğdu. Trakya Üniversitesi Fizik bölümünde 1990 yılında lisans eğitimini tamamladı. Yüksek lisans ve doktorasını sırasıyla 1993 ve 1996 yıllarında Trakya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Halen Trakya Üniversitesinde Profesör olarak görev yapmaktadır. Akademik çalışma alanları yönetim bilişim sistemleri ve işletim sistemleridir.