

Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı gerçekleştirimi

Jean Luck RANDRIANANTENAINA¹, Ahmet Yasin BARAN¹, Nimet KORKMAZ², Recai KILIÇ¹

¹Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ
²Kayseri Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 09.05.2022, Kabul / Accepted: 25.08.2022, Online Yayınlanma/ Published Online: 30.12.2022)

Anahtar Kelimeler

Memristor, pencere fonksiyonu, yeniden yapılandırılabilir devre uygulaması, histerezis eğrisi, Alan Programlanabilir Analog Dizi (FPAA).

Öz: Bu çalışmada gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin karakteristik akım-gerilim ilişkisinin deneysel olarak gözlemlenebilmesi amacıyla, Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog gerçekleştirimi sunulmaktadır. Bahsi geçen memristör elemanının gerçekleştirimi; analog doğası, farklı doğrusal olmayan fonksiyonların eleman üzerinde kolaylıkla inşa edilebilmesi, hızlı prototiplendirme imkânı sunması ve düşük maliyeti ile dikkat çeken FPAA platformu ile yapılmıştır. Bu kapsamda, Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının nümerik benzetimi yapılmıştır. Bu benzetimlerde, memristör elemanının karakteristik dinamiği olan histerezis eğrisi gözlemlenmiştir. İlgili memristör elemanın girişine farklı frekans değerlerine ayarlanan sinüzoidal işaretler uygulanmıştır. Böylece memristör elemanının frekansa bağımlı çalışma karakteristiği gözlemlenebilmiştir. Son olarak, Tukey pencere fonksiyonunun FPAA platformundaki tasarım aşamalarının detayları ve elde edilen gerçekleştirim sonuçları sunulmuştur.

FPAA-based Implementation of the memristor device designed with the Tukey window function

Keywords

Memristor, Window function, Reconfigurable circuit implementation, Hysteresis curve, Field Programmable Analog Array (FPAA).

Abstract:

In this study, the programmable and reconfigurable analog realization of the memristor device designed with the Tukey window function is presented to observe experimentally the characteristic current-voltage relationship of the Nonlinear Ion Model that is a voltage-controlled memristor model. The realization of this memristor element has performed with the FPAA platform, which stands out with its analog nature, the ability to easily construct different nonlinear functions on this device, the possibility of rapid prototyping, and its low cost. In this context, a numerical simulation of the memristor element designed with the Tukey window function has been made. The hysteresis curve, which is the characteristic dynamic of the memristor element, is observed in these simulations. Sinusoidal signals adjusted to different frequency values are applied to the input of this memristor element. Thus, the frequency dependent operating characteristic of the memristor element is observed. Finally, the details of the design stages of the Tukey window function on the FPAA platform and the obtained implementation results are presented.

*İlgili Yazar, email: abaran@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Leon Chua, dört temel devre değişkeni olan akım, gerilim, elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki ilişkinin klasik devre teorisinin üç temel elemanı olan direnç, indüktör ve kapasitör elemanları ile tamamlanamayacağını belirtmiştir. Dört temel devre değişkeninin altı farklı kombinasyonunun olduğunu ve tanımlamalara göre sadece beş kombinasyonun ifade edildiğini, bu sebeple dördüncü bir temel pasif devre elemanının gerekli olduğunu savunmuştur. 1971 yılında matematiksel ifadelerle tanımladığı memristörü, elektriksel yük ve manyetik akı arasındaki ilişkiyi tamamlayan dördüncü temel devre elemanı olarak rapor etmiştir [1]. Chua, memristörün akım-gerilim karakteristiğinin diğer pasif devre elemanlarından farklı olarak bir histerezis eğrisi şeklinde olduğunu ve memristöre uygulanan harici gerilimin frekans değeri arttıkça, histerezis eğrisinin alanının azaldığını belirtmiştir. İki terminalli bir eleman olarak modellenen bu komponent; Stanley Williams ve Hewlett Packard (HP) Laboratuvar ekipleri tarafından fiziksel olarak ilk kez 2008 yılında üretilmiştir. Titanyum dioksit (TiO_2) malzeme kullanılarak üretilen bu elemanla ilgili olarak HP firmasının yayımladığı raporda; elemanın küçük boyut [2], düşük güç tüketimi [3], yüksek hızlı çalışma [4], kararlı ve dengeli davranış [5], çok durumlu çalışma [6] gibi dikkat çekici özelliklerinden bahsedilmiştir. Bu gelişmelerden sonra memristörler bilgisayar mimarileri, nöromorfik sistemler ve dijital devreler gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Literatürdeki bilimsel araştırmalarda ve elektronik endüstrisindeki gerçekleştirmelerde memristör elemanın farklı karakteristik özelliklerini öne çıkaran; Doğrusal İyon Sürüklenme (Linear Ion Drift) Modeli [7], Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme (Nonlinear Ion Drift) Modeli [8], Simmons Tünel Bariyer (Tunneling Barrier) Modeli [9] ve Eşik Uyarlamalı Memristör (Threshold Adaptive Memristor-TEAM) Modeli [10] gibi modeller tanımlanmıştır. Bu modellerden gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli daha belirgin akım-gerilim karakteristiği ile farklılaşmaktadır. Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modellemeleri'nde sınır değeri kısıtlamaları ile karşılaşmaktadır. Bu kısıtlamalar $f(x)$ ile tanımlanan Biölek, Prodromakis, Strukov, Joglekar ve Tukey gibi farklı pencere fonksiyonları tanımlanarak azaltılmaktadır [11-15]. Biölek pencere fonksiyonu modeli genel olarak sınır noktaları üzerinde kısıtlama koşulları problemini ortadan kaldırmaktadır. Bu fonksiyon sınır noktalarındaki kısıtlamaları çözmüş olsa da sınırlarda devamlılık gösterememekte ve süreksizliğe neden olmaktadır. Biölek pencere fonksiyonuna benzer şekilde, Prodromakis pencere fonksiyonu modelinde de sınır noktaları üzerinde kısıtlama koşulları problemi bulunmaktadır. Prodromakis pencere fonksiyonu modelinde iki kontrol parametresi vardır. Bu parametrelerin biri ile pencere fonksiyonunun biçimine karar verilirken, diğer ile pencere fonksiyonunun genliğinin skalası ölçeklendirilebilmektedir. Strukov pencere fonksiyonu modeli HP modelin sınır koşullarındaki davranışı ifade etmek için önerilmiştir. Memristör elemanın sınır koşullarının belli özel şartlarla sınırlandırılması sağlanması amaçlanmıştır. Bununla birlikte, Strukov pencere fonksiyonu modelinde hiçbir dış alan etkisi memristörün durumunu değiştirememektedir ve bu önemli bir problemidir. Joglekar pencere fonksiyonu modeli, Strukov pencere fonksiyonunun eksikliklerini telafi etmek için önerilmiştir. Joglekar pencere fonksiyonu memristörün temel karakteristiklerinden olan doğrusal olmama özelliğini karşılamakta ve bir kontrol parametresi kullanılarak model üzerinde eğrimsellik ayarı ve kontrolü yapılabilmektedir. Öte yandan, Joglekar pencere fonksiyonunun temel problemi ise sınır değerine ulaşıldığında bu pencere fonksiyonunun sıfır değerinde kalmasıdır. Memristör modellemesinde sınır kısıtlama problemi için önerilen pencere fonksiyonlarına alternatif tanımlamalardan biri de Tukey pencere fonksiyonu modelidir [16,17]. Bu model literatürde mevcut sınır fonksiyonlarının kullanımında karşılaşılan hataları daha az indirmek için önerilmiştir. Bu modelde geleneksel pencere fonksiyonlarında bulunan kontrol değişkeni gibi bir ayar parametresinin bulunmamasıdır. Böylece Tukey pencere fonksiyonu ile sınırlandırılan memristör elemanın memristans ifadesi kolaylıkla elde edilebilmektedir. Öte yandan, Tukey pencere fonksiyonu trigonometrik ifadelerle tanımlandığından dolayı özellikle gerçekleştirim çalışmalarında, literatürde mevcut diğer pencere fonksiyonlarına göre daha az tercih edilmektedir.

Memristör elemanının modelleme çalışmalarının ardından, elemanın farklı devre ve sistemlerde kullanılabilmesi amacıyla fiziksel olarak üretimine ve gerçek zamanlı elektriksel karakteristik çıkışlarına ihtiyaç duyulmuştur. HP tarafından üretilen prototipe ilaveten, memristör elemanının deneysel gerçekleştirmelerde kullanılabilmesi için farklı donanımlar kullanılarak gerçekleştirilen emülatör devreleri de ortaya konmuştur[18-27]. Son yıllarda farklı doğrusal olmayan fonksiyonlarla karakterize edilen sistemlerin elektronik donanımlarla gerçekleştirimlerinde alternatif çözümler sunan programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog ya da dijital elemanların kullanımına yönelik pek çok farklı çalışma literatüre kaydedilmiştir. Benzetim programlarının sunduğu avantajlara benzer şekilde hassas parametre ayarı yapabilmeye imkân sağlama, ayrık donanımlarla yapılan gerçekleştirimlere benzer şekilde ise gerçek zamanlı elektriksel çıktılar sunma özellikleri ile bu elemanlar oldukça dikkat çekmektedir. Literatürde memristör elemanının kullanıldığı tasarımların test edilmesi ve doğrulanması için farklı emülatör devrelerinin kullanımı yerine, analog programlanabilir donanım platformlarının tercih edildiği çalışmalar mevcuttur. Tahir ve Saif [28] akı kontrollü memristör modelini nümerik olarak simüle ettikten sonra, modelin donanım gerçekleştirimini bir alan programlanabilir analog dizi (Field Programmable Analog Array-

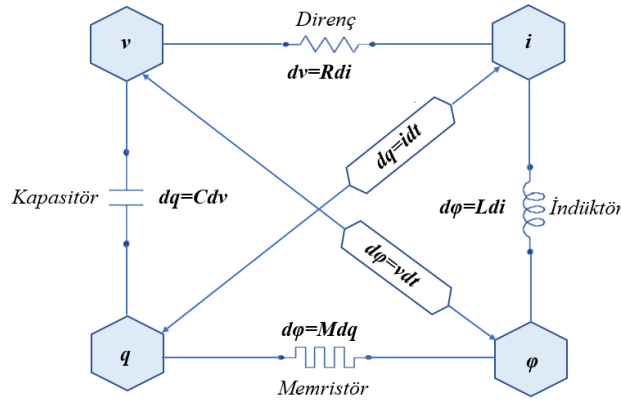
FPAA elemanı kullanılarak yapmışlardır. Arık ve Kılıç [29], memristör tabanlı kaotik sistemlerin deneysel olarak test edilmesi ve doğrulanması için alan programlanabilir analog dizi (FPAA) elemanını kullanmışlardır.

Bu çalışmada ise, gerilim kontrollü bir memristör modeli olan Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin karakteristik akım-gerilim ilişkisinin deneysel olarak gözlemlenebilmesi amacıyla, Tukey pencere fonksiyonu ile modellenen memristör elemanının programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog gerçekleştirimi sunulacaktır. Bahsi geçen memristör elemanının; analog doğası, farklı doğrusal olmayan fonksiyonların eleman üzerinde kolaylıkla inşa edilebilmesi, hızlı prototiplendirme imkânı sunması ve düşük maliyeti ile dikkat çeken FPAA elemanı ile gerçekleştirimi yapılacaktır. Böylece analog elektriksel çıkışlara ihtiyaç duyulan uygulamalar için alternatif bir gerçekleştirim yaklaşımı sunulacaktır. Memristör elemanının FPAA platformları ile emüle edilmesi sonucunda, bu elemanının kullanıldığı pek çok sistemin gerçekleştirme sürecine de katkılar sağlanacaktır.

Bu kapsamda Bölüm 2'de öncelikle memristans ve memdüktans tanımlamaları ile ilgili kısa bir girişin ardından, Tukey pencere fonksiyonu ile tanımlanan memristör elemanının nümerik benzetimi yapılacaktır. Bu benzetimlerde, memristör elemanının karakteristik eğrisi olan histerezis yapısının gözlemlenebilmesi için, elemanın girişine farklı frekans değerlerine ayarlanan sinüzoidal işaretler uygulanmıştır. Böylece memristör elemanının frekansa bağımlı çalışma karakteristiği gözlemlenebilmiştir. Bölüm 3'te Tukey pencere fonksiyonunun FPAA platformundaki tasarım aşamalarının detayları ele alınacaktır. Elde edilen FPAA tabanlı gerçekleştirim sonuçları da bu bölümde verilecektir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

2. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının nümerik benzetimi

Direnç, kapasitör ve indüktör elektronik devrelerde kullanılan iki terminalli temel pasif devre elemanlarıdır. Devre teorisinde bu komponentlerin terminallerinden akan akım (i), terminaller arasındaki potansiyel farkı voltaj (v) olarak tanımlanmaktadır. Terminalden akan akımın integrali alındığında elektriksel yük (q) ve terminaller arasındaki potansiyel farkın integrali alındığında manyetik akı (φ) değişkenleri elde edilmektedir. Direnç, terminaller arasındaki potansiyel fark ile terminaller üzerinden geçen akım arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Kapasitör, yük (q) ve voltaj (v) arasındaki ilişkiyi gösterir. İndüktör, akım (i) ve manyetik akı (φ) arasındaki ilişkiyi karşılamaktadır. Chua tarafından hafızalı direnç olarak tanımlanan memristör ise, voltaj ve akımın zamana göre integrallerinin alınmasıyla elde edilen elektriksel yük ile manyetik akı değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi dördüncü temel pasif devre elemanı olarak kabul edilmektedir.



Şekil 1. Temel devre değişkenleri ve temel devre elemanları arasındaki ilişki [7]

Elektriksel yük ile manyetik akıyı ilişkilendiren memristör, yük ve akı arasındaki ifadeye göre memristans ve memdüktans olmak üzere iki farklı şekilde tanımlanmaktadır. Burada yük ile akı arasındaki ilişki Denklem (1)'deki gibi yükün fonksiyonu olarak tanımlanırsa memristans (yük-kontrollü memristör), Denklem (2)'deki gibi akımın fonksiyonu olarak tanımlanırsa memdüktans (akı-kontrollü memristör) olarak adlandırılır.

$$v = M(q)i$$

$$M(q) = \frac{d\varphi(q)}{dq} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} i &= W(\varphi)v \\ W(\varphi) &= \frac{dq(\varphi)}{d\varphi} \end{aligned} \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2)'den görüleceği üzere herhangi bir zamanda memristörün çıkışı; giriş işareti ile memristansı ya da memdüktansı temsil eden doğrusal olmayan bir fonksiyonun çarpımına eşittir (çarpımsal transfer fonksiyonu) ve giriş sıfır olduğunda memristör çıkışı da sıfıra gitmeye zorlanır (sıfırdan geçiş). Bu tanımlama memristör elemanın karakteristik dinamiği olan histerisiz eğrisini karşılamaktadır. Denklem (1) ve Denklem (2)'deki (q) ve (φ)'nin akım ve voltaja göre integralleri $q = \int_{-\infty}^t i(\tau)d\tau$ ve $\varphi = \int_{-\infty}^t v(\tau)d\tau$ olmak üzere akım ve gerilim bağıntıları düzenlenirse, Denklem (3)'teki sonuç elde edilir:

$$\begin{aligned} v(t) &= M\left(\int_{-\infty}^t i(\tau)d\tau\right)i(t) \\ i(t) &= W\left(\int_{-\infty}^t v(\tau)d\tau\right)v(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Denklem (3), memristörün kalıcı hafıza özelliğine sahip olduğunu gösterir. Burada, memristans ve memdüktansın değeri giriş işaretinin tüm geçmiş değerlerine bağlı olarak hesaplanır. Bu nedenle giriş işareti uygulandığı sürece memristans (ya da memdüktans) değişimini korur. Giriş işareti kesilirse, tekrar giriş işareti uygulanana kadar son anda bulunduğu değerinde kalır [30].

Williams ve ekibi ilk fiziksel memristörü Hewlett-Packard laboratuvarında gerçekleştirmiştir. Doğrusal Sürüklenme Modeli veya kısaca HP modeli olarak adlandırdıkları yapıyı ince bir titanyum dioksit (TiO_2) filmi iki platin (Pt) elektrot arasına yerleştirilerek üretmişlerdir [7]. Memristöre bir uyartım işareti uygulandığında iki bölge arasındaki sınırın zamanın bir fonksiyonu olarak hareket ettiği düşünülerek, yük kontrollü memristör üzerindeki voltaj HP tarafından aşağıdaki gibi modellenmiştir:

$$v(t) = M(w)i(t) = \left[R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w(t)}{D}\right) \right] i(t) \quad (4)$$

Burada, $w(t)/D$ ifadesi (x) değişkeni ile tanımlanarak (w) değişkenini normalize etmiştir. Burada D yarı iletken kalınlığını temsil etmektedir. $x \in [0,1]$. $x(t) = 0$ durumunda $M(x) = R_{off}$ ve $x(t) = 1$ durumunda ise $M(x) = R_{on}$ değerlerine karşılık gelmektedir. Bu durumda Denklem (4) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\begin{aligned} M(x) &= R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x) \\ v(t) &= [R_{ON}x + R_{OFF}(1 - x)]i(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Memristörün elektriksel davranışı, ince bir titanyum dioksit (TiO_2) filmleri arasındaki sürüklenme ile ilgilidir ve $[0, D]$ aralığıyla sınırlıdır. Bu filmler arasındaki sınırlardaki durum, Doğrusal İyon Sürüklenme Modeli'nin önemli bir problemi olarak bilinmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için pencere fonksiyonu (window function) yaklaşımı gündeme gelmiş ve durum denklemlerindeki bu doğrusal olmama durumu Denklem (6)'daki gibi güncellenmiştir:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mu_v \frac{R_{on}}{D^2} i(t) f(x) \quad (6)$$

Memristörün yapısal dinamiğine bağlı olarak ($\mu_v R_{on}/D^2$) fiziksel parametresini sabit bir (k) parametresi olarak kabul edilirse, Denklem (6) aşağıdaki gibi güncellenebilir:

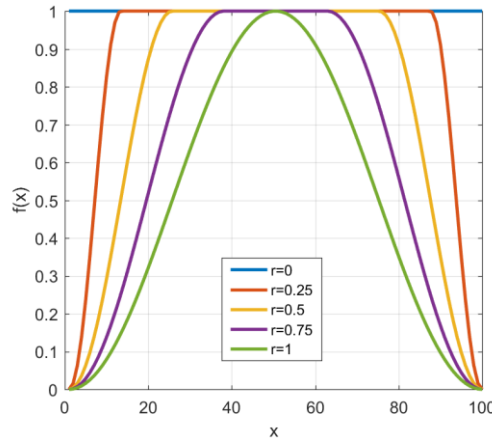
$$\frac{dx(t)}{dt} = ki(t)f(x) \quad (7)$$

Literatürde Denklem (7)'de tanımlanan $f(x)$ pencere fonksiyonu, Strukov, Joglekar, Birolek, Prodromakis ve Tukey pencere fonksiyonları gibi birçok farklı fonksiyon ile tanımlanmıştır [11-14,16,17]. Tukey pencere fonksiyonu matematiksel olarak diğer modellerden daha kompleks olduğundan ve trigonometrik ifadeler içerdiğinden daha az kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu model diğer modeller kullanıldığında karşılaşılan sınır koşul hatalarını

daha aza indirgemek için önerilmiştir. Yasuhiro Takahashi ve arkadaşları [16, 17] 2015 yılında Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin karakteristik davranışını geleneksel modellerden farklı olarak kontrol parametresi içermeyen Denklem (8)'deki Tukey pencere fonksiyonu ile modellemeyi önermişlerdir.

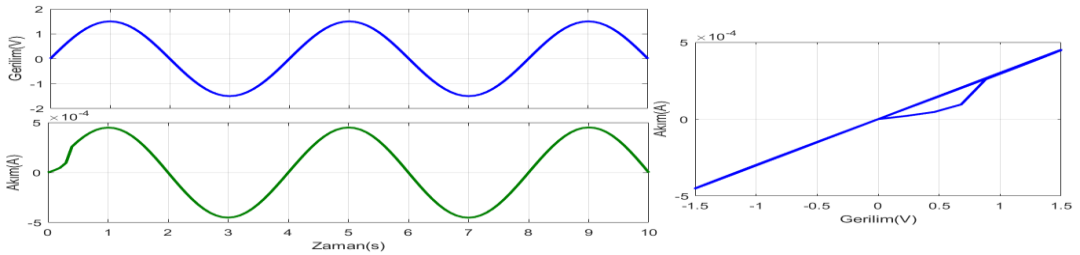
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - \frac{r}{2} \right] \right) \right); & (0 < x \leq \frac{r}{2}) \\ 1; & (\frac{r}{2} < x \leq 1 - \frac{r}{2}) \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - 1 + \frac{r}{2} \right] \right) \right); & (1 - \frac{r}{2} < x \leq 1) \end{cases} \quad (8)$$

Tukey pencere fonksiyonu zaman düzleminde düzgün karakteristiktir ve pencere zaman aralıklarının çoğunluğu için bir değerine yakındır. Şekil 2'de görüldüğü gibi pencere fonksiyonunun bir değerini koruduğu süreyi belirleyen uzunluk "Konik Uzunluk" olarak bilinir. Konik uzunluk Denklem 8'deki $f(x)$ fonksiyonunun (r) derecesinin farklı değerlerine göre değişmektedir. (r) derecesi ne kadar düşükse, konik uzunluk bir değerinde daha fazla sabit kalmaktadır.

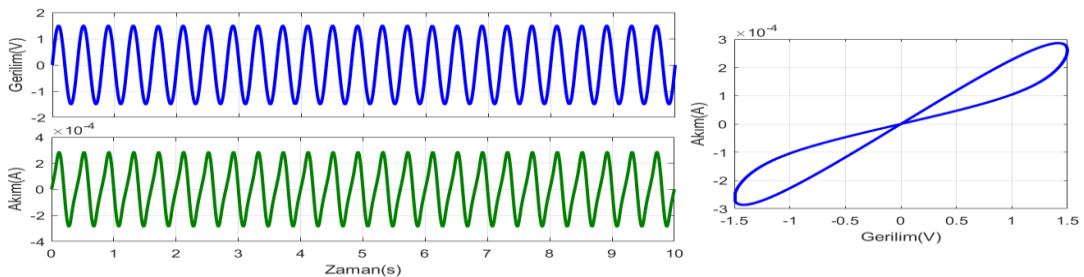


Şekil 2. Tukey penceresi fonksiyonunun farklı (r) değerleri için grafikleri.

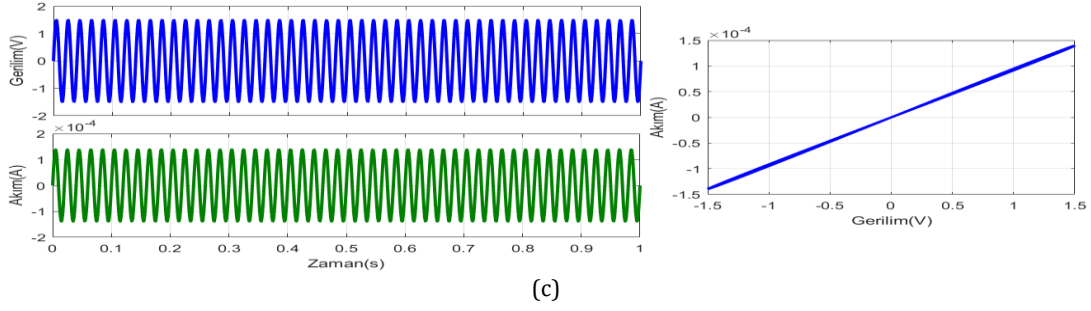
Bu çalışmada, nümerik benzetim için Denklem (6)'daki Doğrusal Olmayan İyon Sürüklenme Modeli'nin parametreleri $R_{on} = 0.1 \text{ k}\Omega$, $R_{off} = 16 \text{ k}\Omega$, $\mu_v = 30 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 / (\text{Vs})$ ve $D = 9 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ olarak ayarlanmış ve $f(x)$ fonksiyonu yerine Tukey pencere fonksiyonu kullanılmıştır. Giriş voltajı, tepe değeri 1.5V olan bir sinüs dalgası olarak seçilmiştir. Bu giriş işaretinin frekans değeri sırasıyla $\omega_1 = 0,25 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 2,5 \text{ rad/s}$ ve $\omega_3 = 50 \text{ rad/s}$ olarak ayarlanmıştır. Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak oluşturulan bu memristörün girişine bu frekans değerlerindeki sinüzoidal işaretlerin ayrı ayrı uygulanması ile elde edilen nümerik benzetim sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



(a)



(b)



Şekil 3. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanın giriş gerilimi/çıkış akımı dalga biçimleri ve a) $\omega = 0,25$ rad/s, b) $\omega = 2,5$ rad/s, c) $\omega = 50$ rad/s için V-I özellikleri

Şekil 3'te görüldüğü gibi sinüzoidal girin frekansı $\omega_1 = 0,25$ rad/s değerinde iken, memristor elemanın çıkışında ölçülen akımın fazında hemen hemen hiçbir değişiklik gözlenmemiştir. $\omega_2 = 2,5$ rad/s'de simetrik bir histerezis eğrisi gözlemlenmiştir. Son olarak, sinüzoidal giriş işaretinin frekansı $\omega_3 = 50$ rad/s olduğunda, memristor elemanı bir direnç gibi davranmış ve faz portre gösteriminde direnç gibi doğrusal bir çıkış karakteristiği gözlemlenmiştir. Buna göre, Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının karakteristik histerezis eğrisini FPAA platformunda gözlemlmek için, $\omega_2 = 2,5$ rad/s frekanslı ve $A = 1,5$ V genlikli sinüzoidal bir giriş işaretinin kullanılabilirliği belirlenmiştir.

3. FPAA tabanlı gerçekleştirim detayları

FPAA (Field Programmable Analog Array), alan programlanabilir analog diziler; analog ve hibrid devrelerin tasarımında kararlılık, doğruluk ve hızlı prototip teknikleri sunan, temel analog işlemleri içeren ve farklı analog fonksiyonları gerçeklemek için elektriksel olarak yeniden programlanabilen tümdevrelerdir. FPAA elemanı giriş çıkış portlarından, lojik kontrol biriminden ve elemanın hafızasını belirleyen ve CAB (Configurable Analog Block) adı verilen yapılandırılabilir analog bloklardan meydana gelir. Bir FPAA kartının hafızasının yetmediği tasarımlarda FPAA kartları birleştirilebilir [31]. Analog işlemler CAB blokları içerisinde gerçekleşir ve bu işlemler için anahtarlamalı kapasitör tekniği kullanılmaktadır. FPAA üzerinde gerçekleştirilmek istenen sistem, öncelikle nümerik analizlerle test edilmelidir. Bunun sebebi, FPAA elemanı ± 2 V saturasyon seviyesine sahip olmasıdır. Saturasyon seviyesini aşan parametrelere yeniden ölçeklendirme işlemi uygulanır. Ölçeklendirme işleminden sonra modeldeki fonksiyonlara karşılık gelen uygun CAM blokları belirlenir. Bu bloklar arasındaki ara bağlantılar ANADIGM DESIGNER-2 arayüz programı üzerinde oluşturulur. Modellenen sistem bir seri port aracılığı ile FPAA'ye gönderilir. Kart üzerinde bulunan giriş çıkış birimlerinden yararlanılarak, osiloskop yardımı ile gerekli ölçümler yapılır.

Bu çalışmada ANADIGM firmasının ürettiği AN231E04 platformu kullanılmıştır. ANADIGM DESIGNER-2 programında çeşitli analog fonksiyonları gerçekleştirmek için önceden tanımlı CAM (Configurable Analog Module) olarak adlandırılan yeniden yapılandırılabilir analog bloklar mevcuttur. Yeniden ölçeklendirme sonrasında Denklem (9)'daki forma dönüşen Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının FPAA tabanlı gerçekleştirimi için kullanılan CAM blokları ve bloklar arasındaki bağlantılar Şekil 4'te görülmektedir.

$$v(t) = M(x)i(t)$$

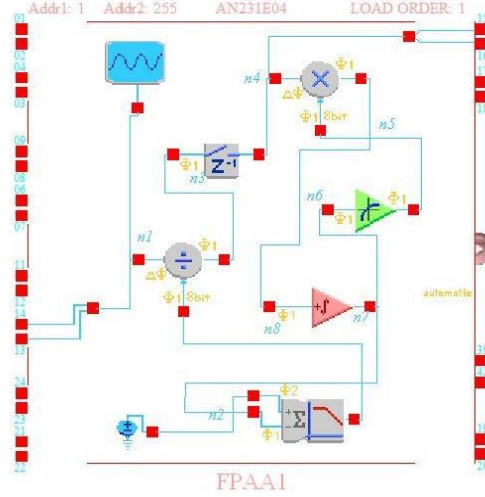
$$M(x) = 0,00625x + (1 - x)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = 2,47i(t)f(x)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - \frac{r}{2} \right] \right) \right); & \left(0 < x \leq \frac{r}{2} \right) \\ 1; & \left(\frac{r}{2} < x \leq 1 - \frac{r}{2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi}{r} \left[x - 1 + \frac{r}{2} \right] \right) \right); & \left(1 - \frac{r}{2} < x \leq 1 \right) \end{cases}$$

(9)

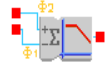

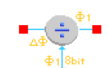

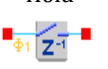

Burada SUMFILTER, TRANSFER FUNCTION, VOLTAGE, MULTIPLIER, DIVIDER, INTEGRATOR, HOLD, OSCILLATOR olarak isimlendirilen CAM blokları kullanılmıştır. TRANSFER FUNCTION bloğu kullanılarak $f(x)$ fonksiyonu elde edilmiştir. Memristans fonksiyonu, SUMFILTER bloğu kullanılarak oluşturulmuştur. $dx(t)/dt=2,47i(t)f(x)$ fonksiyonu ile tanımlanan katkılı bölge ile katkısız bölge arasındaki sınır hızı MULTIPLIER bloğu ile oluşturulmuştur. Akımı $i(t)=v(t)/M(x)$ tanımlaması ile elde etmek için bir DIVIDER bloğu kullanılmıştır. Bir OSCILATOR bloğu kullanılarak $v(t)$ sinüzoidal giriş işareti gerçekleştirilmiştir. Denklem (9)'daki diferansiyel denklemin çözümü için gerekli olan integral işlemi INTEGRATOR bloğu ile gerçekleştirilmiştir. HOLD bloğu, MULTIPLIER ve DIVIDER blokları arasındaki faz durumunu düzenlemek için kullanılmıştır. Son olarak Denklem (9)'daki sabit parametreler, bir DC gerilim kaynağı olan VOLTAGE bloğu ile gerçekleştirilmiştir.





Şekil 4. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA gerçekleştirim şeması.

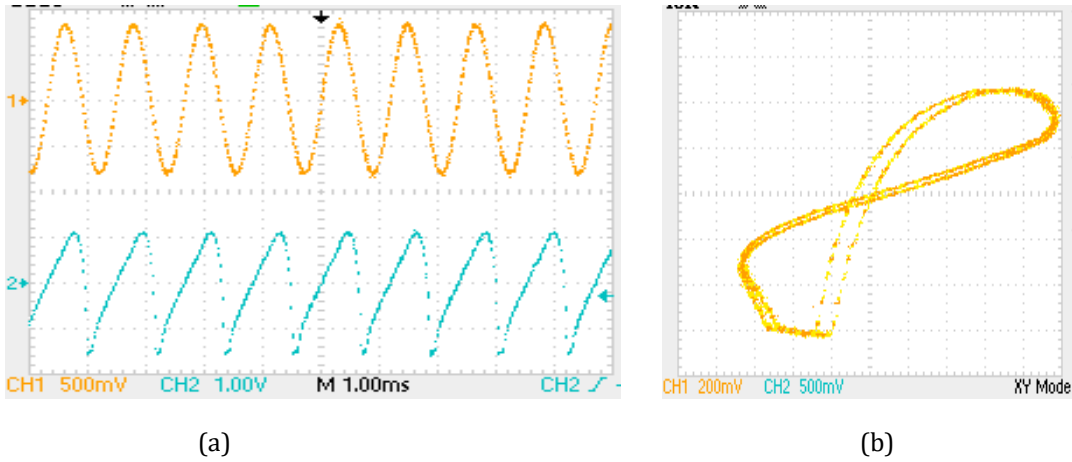
Şekil 4'te verilen Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısının FPAA tabanlı gerçekleştiriminde kullanılan bloklar ve bu blokların parametre değerleri Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1: Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanının FPAA tabanlı uygulamasında kullanılan CAM blokları için bir özet.

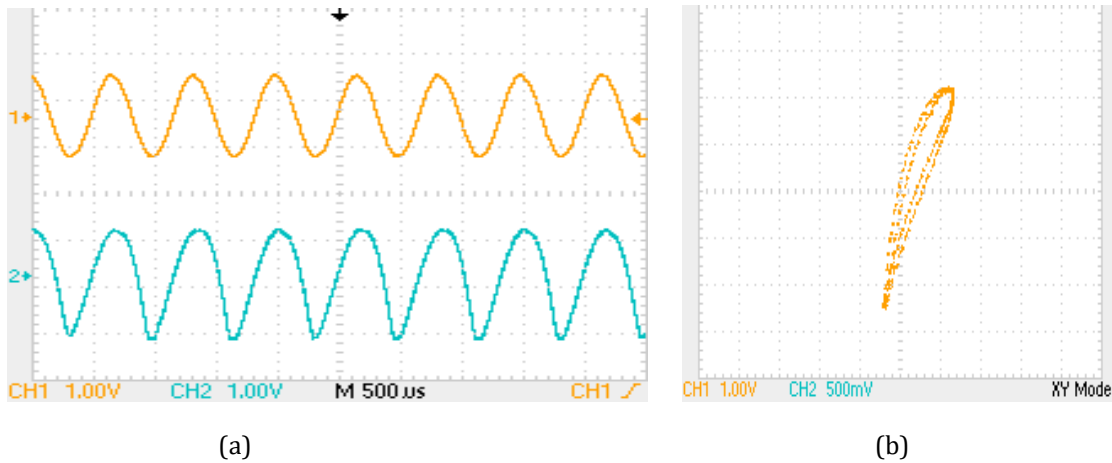
Blok adı	Seçenekler	Parametreler	Açıklamalar
SumFilter 	Çıkış Değişiklikleri: Faz 1 Giriş 1: Evirmeyen Giriş 2: Eviren Giriş 3: Kapalı	Köşe Frekansı: 0,35 kHz Kazanç 1: 1,07 Kazanç 2: 1	Bu CAM, üç girişe kadar matematiksel toplama işlemini karşılamaktadır.
Integrator 	Polarite (Kutupluk): Evirmeyen Girdi Örnekleme: Faz 1 Kontrol Karşılaştırması: Sıfırlama Yok	İntegral Alma Sabiti: [1/us]:0,05	Bu CAM, programlanabilir integral sabitine sahip bir integral alıcı bloğudur.
Divider 	Örnekle ve Bekletme: Kapalı	Bölme Sabiti: 0,34	Bu CAM matematiksel bölme işlemini karşılamaktadır.
Multiplier 	Örnekle ve Bekletme: Kapalı	Çarpım Sabiti: 0,34	Bu CAM matematiksel çarpma işlemini karşılamaktadır.
Hold 	Girdi Örnekleme: Faz 1		Bu CAM bir örnek oluşturur ve tutar.
Transfer Function 	Çıkışı Bekletme: Kapalı		Bu CAM, 256 nicelikle kullanıcı tarafından belirlenen bir voltaj aktarım işlevi uygular.

OscillatorSine 		Osilasyon Frekansı[kHz]: 0,8 Tepe genliği [V]: 1,5	Bu CAM, sinüzoidal bir çıkış oluşturur. Bu oluşturulan sinyal programlanabilir genlik ve frekansa sahiptir.
Voltage 	Polarite (Kutupluk): +2V		Bu CAM, tasarımda ihtiyaç duyulan sabit katsayıları karşılamak için kullanılmaktadır.

Arayüz programı ile modellenen Tukey pencere fonksiyonu kullanılarak tasarlanan memristör yapısı seri port ile herhangi bir dönüşüme ihtiyaç duymadan doğrudan AN231E04 kartına gömülmüştür. Ardından bir osiloskop ile deneysel ölçümler yapılmıştır. Şekil 5a'da Tukey pencere fonksiyonu memristor modelinin girişine uygulanan $v(t)$ sinüzoidal işaretini (üstteki) ile çıkışta ölçülen akım değeri (alttaki) $i(t)$ 'nin zaman domeni gösterimleri görülmektedir. Şekil 6b'de ise girişe uygulanan $v(t)$ sinüzoidal işarete karşılık çıkışta ölçülen $i(t)$ akımının oluşturduğu faz portresi gösterimi ile gözlemlenen histerezis eğrisi deneysel olarak elde edilmiştir. Böylece, Tukey pencere fonksiyonu memristör modeli FPAA platformu ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. FPAA tabanlı elde edilen gerçekleştirim sonuçları ile nümerik benzetim sonuçları birbirleriyle oldukça uyumludur.



Şekil 5. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristor modeli'nin FPAA tabanlı deneysel gerçekleştirim sonuçları (Osilasyon Frekansı[kHz]: 0,8 Tepe genliği [V]: 1,5): a) $v(t)$ giriş (üstteki) ve $i(t)$ çıkış (alttaki) işaretleri, b) $v(t)$ - $i(t)$ faz portresi gösterimi.



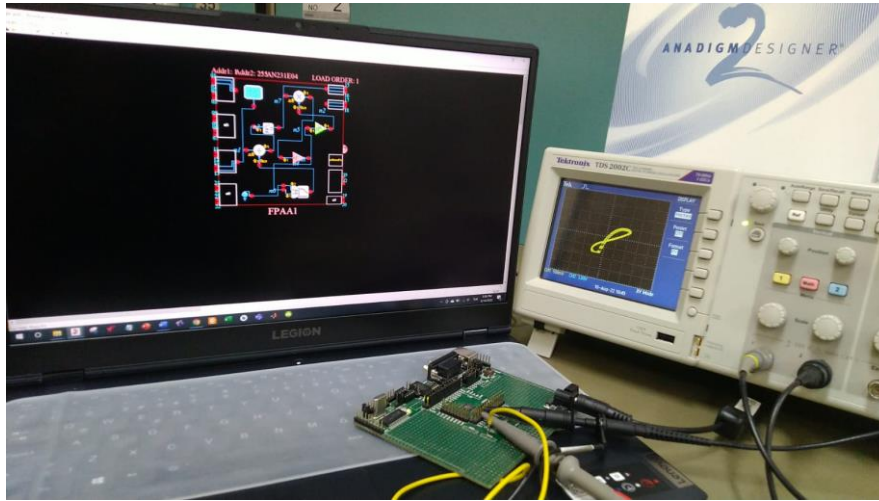
Şekil 6. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristor modeli'nin FPAA tabanlı deneysel gerçekleştirim sonuçları (Osilasyon Frekansı[kHz]: 1,5 Tepe genliği [V]: 1,5): a) $v(t)$ giriş (üstteki) ve $i(t)$ çıkış (alttaki) işaretleri, b) $v(t)$ - $i(t)$ faz portresi gösterimi.

Memristör elemanın girişine uygulanan sinüzoidal işaretin frekansı artırıldığında bu elemanın karakteristiği değişir. Frekans arttıkça giriş-çıkış eğrisinin direnç elemanın karakteristiğine benzeyen bir cevaba yaklaştığı görülmektedir. Bu durumu FPAA elemanı üzerinde gözlemlmek için Tablo 1. de görülen OscillatorSine bloğunun

frekansı 1.5 kHz olarak ayarlanmıştır. Giriş-çıkış arasındaki frekansa bağımlı değişimin sonucu Şekil 6.b'de görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Memristör elemanı elektronik bir donanımdır; fakat henüz ticari üretimi yapılmamaktadır. Bu sebeple elemanın özelliklerini karşılayacak taklit devrelerinin tasarlanması önemli bir araştırma alanıdır. Literatürde ayrıık donanımlarla yapılan taklit devrelerinin kullanımını ele alan çalışmalar mevcut olsa da Tukey pencere fonksiyonunun kompleks modeli nedeniyle bu fonksiyonun ayrıık donanımlarla gerçekleştirim süreci oldukça güçtür. Öte yandan alan programlanabilir analog diziler; analog ve hibrid devrelerin tasarımında kararlılık, doğruluk ve hızlı prototip teknikleri sunan, temel analog işlemleri içeren ve farklı analog fonksiyonları gerçeklemek için elektriksel olarak yeniden programlanabilen tümdevrelerdir. Bu çalışmada da trigonometrik tanımlamalar içermesi açısından geleneksel pencere fonksiyonlarından daha kompleks bir tanımlamaya sahip olan Tukey pencere fonksiyonu, FPAA donanımının analog yapısı ve önceden tanımlı programlanabilir CAM blokları sayesinde kolaylıkla gerçekleştirilmiştir. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanın temel karakteristiklerinin incelenmesi ve giriş işaretinin frekansına olan hassasiyetinin gözlemlenmesi için nümerik benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçları ilgili bölümde verilmiştir. Ardından, bu sistemin FPAA tabanlı gerçekleştirim sürecinde kullanılan CAM blokları ve bu blokların işlevleri ele alınmıştır. Bu sistemin FPAA tabanlı gerçekleştirimi sonucu osiloskop ile kaydedilen gerçek zamanlı çıkış sinyalleri de sunulmuştur. Böylece, Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan bu memristör elemanın FPAA platformu kullanılarak gerçekleştirimi literatürde ilk kez rapor edilmiştir. Elde edilen gerçekleştirim sonuçlarının, nümerik benzetim sonuçları ile oldukça benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bu sistem için hazırlanan deney düzeneğine ait bir gösterim Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. Tukey pencere fonksiyonu tabanlı memristör modelinin FPAA tabanlı gerçekleştirimi için hazırlanan deney düzeneğine ait bir gösterim.

Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanın FPAA tabanlı gerçekleştirimde kullanılan CAB alanları ve güç tüketimi sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Tukey pencere fonksiyonu ile tasarlanan memristör elemanın FPAA tabanlı gerçekleştirimde kullanılan CAB alanları ve güç tüketimi sonuçları.

CAB1 (kullanılan/toplam kapasite)	CAB2 (kullanılan/toplam kapasite)	CAB3 (kullanılan/toplam kapasite)	CAB4 (kullanılan/toplam kapasite)	Güç tüketim
8/8	6/8	8/8	7/8	164±49mW

Bu gerçekleştirim çalışması sonucunda elde edilen çıktılar kullanılarak, farklı pencere fonksiyonları ile tasarlanan memristör elemanlarının FPAA tabanlı gerçekleştirimlerinin de mümkün olduğu söylenebilir. Burada sunulan tasarım teknikleri kullanılarak, farklı memristör modeli uygulamalarının prototipleri hızlı bir şekilde oluşturulabilir ve bu tasarımların programlanabilir platformlarda test ve doğrulama süreci de gerçekleştirilebilir. Tukey pencerefonksiyonu memristör modelinin yeniden yapılandırılabilir platformla kullanılarak gerçekleştirme çalışması başka memristör modellerinin uygulamalarına esin kaynağı olabilir. Burada sunulan tasarım teknikleri

kullanılarak, diğer memristör modellerinin uygulamaların prototipleri hızlı bir şekilde oluşturulabilir ve bu programlanabilir platformlarda test ve doğrulama süreci yürütülebilir. Bu çalışmada elde edilen Tukey pencere fonksiyonu memristör modelinin analog gerçekleştirimin deneysel sonuçları gelecekteki çalışmalarda da kullanılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2022-11759 proje kodu ile desteklenmektedir.

Kaynakça

- [1] Chua, L. 1971. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transaction on Circuits Theory*, 18(5), 507-519.
- [2] Waser, R., Dittmann, R., Staikov, G., Szot, K. 2009. Redox Based resistive switching memories-nanoionic mechanisms, prospects, and challenges. *Advanced Materials*, 21(25-26), 2632-2663.
- [3] Schindler, C., Weides, M., Kozicki, M.N., Waser, R. 2008. Low current resistive switching in Cu-SiO₂ cells. *Applied Physics. Letter*, 92, 1-4.
- [4] Jo, S.H., Lu, W. 2008. CMOS compatible nanoscale nonvolatile resistance switching memory. *Nano Lett*, 8(2), 392-397.
- [5] Jo, S.H., Kim, K.H., Lu, W. 2009. High-density crossbar arrays based on a Si memristive system. *Nano Letters*, 9(2), 870-874.
- [6] Wang, S.Y., Huang, C.W., Lee, D.Y., Tseng, T.Y., Chang, T.C. 2010. Multilevel resistive switching in Ti/Cux O/Pt memory devices. *Journal of Applied Physics*, 108(11), 114110.
- [7] Strukov, D.B., Snider, G.S., Start, D.R., Williams, R.S. 2008. The missing memristor found. *Nature*, 453(7191), 80-83.
- [8] Kavehei, O., Iqbal, A., Kim, Y. S., Eshraghian, K., Al-Sarawi, S. F., Abbott, D. 2010. The fourth element: characteristics, modelling and electromagnetic theory of the memristor. In *Proceeding of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 466(2120), 2175-2202.
- [9] Pickett, M.D., Strukov, D.B., Borghetti, J.L., Yang J.J., Snider G.S., Stewart, D.R. 2009. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices. *Journal of Applied Physics*, 106, 074508.
- [10] Kvatinsky, S., Friedman E.G., Kolodny, A., Weiser, U.C. 2013. TEAM: Threshold adaptive memristor model. *IEEE Transactions on Circuits and System I: Regular Papers*, 60, 211-21.
- [11] Biolek, Z., Biolek, D., Biolek, Z., Biolková, V. 2009. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift. *Radioengineering*, 18(2).
- [12] Prodromakis, T., Peh, B.P., Papavassiliou, C., Toumazou, C. 2011. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58, 3099-3105.
- [13] Biolek, D., Biolek, Z., Biolkova, V. 2009. SPICE modeling of memristive, memcapacitative and meminductive systems. *ECCTD 2009 - European Conference on Circuit Theory and Design Conference Program*, 249-52.
- [14] Joglekar, Y.N., Wolf, S.J. 2009. The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits. *European Journal of Physics* 30(4), 661-675.
- [15] Singh, J., Raj, B. 2019. An accurate and generic window function for nonlinear memristor models. *Journal of Computational Electronics*, 18(2), 640-647.

- [16] Yasuhiro T., Toshikazu S., Michio Y. 2015. Memristor SPICE Model with Tukey Window Function for Stable Analysis. International Microsystem, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference. IEEE Catalog Number: CFP1459B-ART, ISBN: 978-1-4799-7727-7.
- [17] Yasuhiro T., Toshikazu S., Michio Y. 2015. SPICE model of memristive device using Tukey window function. IEICE Electronics Express, 12,(5), 1-7.
- [18] Karakulak, E., Mutlu, R. 2009. Mühendislik Eğitiminde Kullanılabilecek Bir Memristör (Hafızalı Direnç) Taklit Devresi. 13th National Congress of Electrical, Electronics, Computer and Biomedical Engineering, 4-7.
- [19] Pershin, Y. V., Di Ventra, M. 2009. Practical approach to programmable analog circuits with memristors.
- [20] Valsa, J., Biolek, D., Biolek, Z. 2010. An analogue model of the memristor. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 24(4), 400-408.
- [21] Kim, H., Sah, M.P., Yang, C., Cho, S., Chua, L.O. 2012. Memristor emulator for memristor circuit applications. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 59(10):2422-2431.
- [22] Sodhi, A., Gandhi, G. 2010. Circuit mimicking TiO₂ memristor: a plug and play kit to understand the fourth passive element. International Journal of Bifurcation and Chaos, 20(08), 2537-2545.
- [23] Sah, M.P., Yang, C., Kim, H., Chua, L. 2012. A voltage mode memristor bridge synaptic circuit with memristor emulators. Sensors 2012, 12(3), 3587-3604.
- [24] Wang, X.Y., Fitch, A.L., Herbert, H.C.I., Sreeram, V., Qi, W.G. 2012. Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor. Chinese Physics B, 21(10), 108501.
- [25] Abuelma'Atti, M.T., Khalifa, Z.J. 2015. A continuous-level memristor emulator and its application in a multivibrator circuit. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 69(4), 771-775.
- [26] Abuelma'Atti, M.T., Khalifa, Z.J. 2014. A new memristor emulator and its application in digital modulation. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 80(3), 577-584.
- [27] Sanchez-Lopez, C., Mendoza-Lopez, J., Carrasco-Aguilar, M.A., Muniz-Montero, C. 2014. A floating analog memristor emulator circuit. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 61(5), 309-313.
- [28] Tahir, F., Ramadhan, S. 2018. Analog Programmable Circuit Implementation for Memristor. Iraq Journal of Electronic Engineering, 14(1), 1-9.
- [29] Arik, S., Kiliç, R. 2014. Reconfigurable hardware platform for experimental testing and verifying of memristor based chaotic systems. Journal of Circuits, System and Computer, 23(10), 1450145.
- [30] Oster, G. F., Auslander, D. M. 1973. The memristor: A new bond graph element. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control.
- [31] Anadigm Designer. www.anadigm.com (Accessed date: May 06, 2022).