



Realization of memristor based chaotic rossler circuit

Zehra Gulru Cam Taskiran¹, Herman Sedef¹

Department of Electronics and Communications Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, 34220, Turkey

Highlights:

- A new simple analog circuit design for Rossler dynamical system
- A new memristor emulator circuit design
- Suitable implementation by using commercially available integrated circuits for TRNGs

Keywords:

- Memristor
- Memristor Emulator
- Chaotic Oscillator
- Rossler Circuit
- Bifurcation

Article Info:

Research Article
Received: 23.01.2019
Accepted: 10.09.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.516656

Graphical/Tabular Abstract

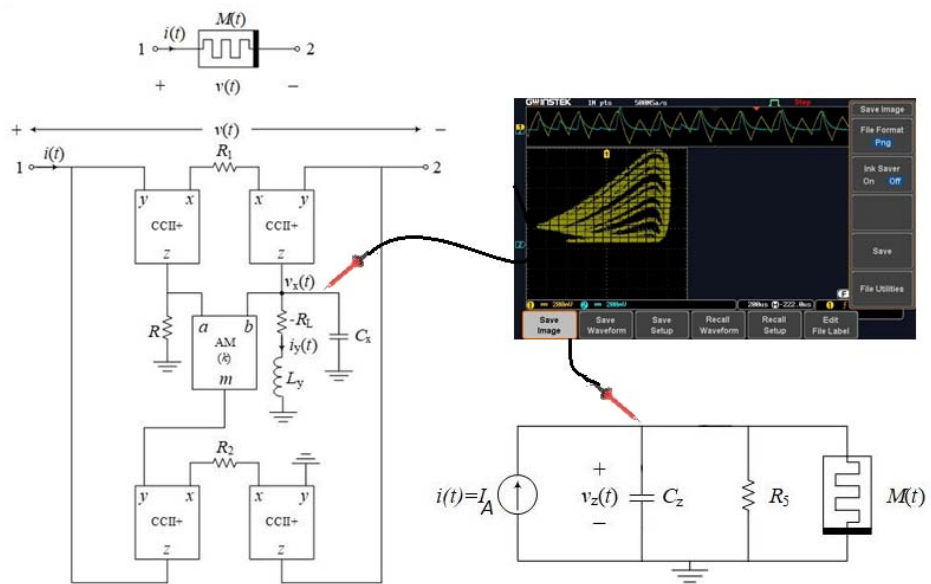


Figure A. Circuit schematic of the realized memristive chaotic Rossler circuit and its oscillogram

Correspondence:

Author:
Zehra Gülru Çam Taşkıran
e-mail: zgcam@yildiz.edu.tr
phone: +90 212 383 58 96

Purpose: A new memristive analog circuit is designed to realize the original Rossler dynamical system, and also a new memristor emulator circuit which provides needed nonlinear flux-charge relationship is designed.

Theory and Methods:

Designed circuits are analyzed mathematically, and simulated results are showed that all results are compatible with each other. Proposed circuits are implemented on board by using commercially available integrated circuits. Phase portraits for the memristive chaotic circuit are obtained by using an analog and a digital oscilloscope.

Results:

Experimental results validated the accuracy of theoretical and simulation results.

Conclusion:

Proposed circuit ideally composed of only three parallel connected basic circuit elements and one DC current source. Thus, mathematical analysis and implementation of the circuit structure are quite simple. Most of the studies that propose a Rossler-based circuit involve FPGA or microcontroller implementations. Because these studies based on an algorithmic process, they can not be used as entropy sources of TRNG circuits. There are not many studies on analog implementation of Rossler attractor in the literature. Because the proposed circuit is analog and noise-effected, it can be used as an entropy source of a TRNG.



Memristör tabanlı kaotik rössler devresi gerçekleştirilmesi

Zehra Gülru Çam Taşkiran*^{ID}, Herman Sedef^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34220, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Rössler dinamik sisteminin gerçekleştirilmesi için yeni bir basit analog devre tasarımı
- Yeni bir memristör emülatörü devresi tasarımı
- Ticari olarak temin edilebilen tümleşik devrelerle TRNG'lere uygun gerçekleştirme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.01.2019

Kabul: 10.09.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.516656

Anahtar Kelimeler:

Memristör,
memristör emülatörü,
kaotik osilatör,
rössler devresi,
çatallanma

ÖZET

Bu çalışmada kaotik Rössler diferansiyel denklem kümesinin elektronik gerçekleştirilmesi için memristör tabanlı yeni bir analog devre önerilmiştir. Kaotik faz portreleri ve çatallanma diyagramları için matematiksel analizler ve SPICE simülasyonları yapılmıştır. Önerilen sistem ticari olarak piyasada bulunan aktif ve pasif elemanlar kullanılarak bord üzerinde gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışma yürütülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçlar, matematiksel analizler ve simülasyon sonuçları ile uyumludur. İhtiyaç duyulan memristans karakteristiğini sağlayacak olan bir memristör emülatörü devresi önerilmiş, ve ona ait non-lineer dinamikler frekansa bağlı çimdiklenmiş histeresis eğrileri incelenerek memristif yapısı doğrulanmıştır

Realization of memristor-based chaotic rössler circuit

H I G H L I G H T S

- A new simple analog circuit design for Rossler dynamical system
- A new memristor emulator circuit design
- Suitable implementation by using commercially available integrated circuits for TRNGs

Article Info

Research Article

Received: 23.01.2019

Accepted: 10.09.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.516656

Keywords:

Memristor,
memristor emulator,
chaotic oscillator,
rössler circuit,
bifurcation

ABSTRACT

In this study, a memristor-based analog circuit is proposed to realize Rössler differential equation set. Mathematical analysis and SPICE simulations are given for phase portraits and bifurcation diagrams. The proposed system is implemented on board by using commercially available active and passive components and it is seen that experimental results are in good agreement with theoretical and simulation results. A memristor emulator circuit which provides the needed memristive characteristics in proposed chaotic circuit is designed and its nonlinear dynamics are validated by examining frequency dependent pinched hysteresis loops

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: zgcam@yildiz.edu.tr, sedef@yildiz.edu.tr / Tel: +90 212 383 58 96

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Pasif lineer devreler lineer direnç, endüktör, kondansatör, ideal transformatör ve jiratorlar kullanılarak modellenirken, lineer olmayan devreler için temel devre elemanları lineer olmayan dirençler, kondansatörler ve memristörlerdir [1]. Chua'nın kaotik çift çekir devresinde Chua diyotunun yerine memristör elemanının kullanılmasından sonra [2], aynı devre içerisinde farklı memristör elemanları kullanılarak farklı memristif kaotik çift çekir devreler gerçekleştirilmiştir [3-5]. Ayrıca farklı memristif devre yapıları ile torus ya da kalp şekilli yeni dinamik sistemler de üretilmiştir [6-9]. Bu çalışmada, bunlardan farklı olarak matematiksel olarak iyi bilinen Rössler dinamik sistemi, yeni bir memristör tabanlı kaotik devre kullanılarak tasarlanmıştır.

Memristör, akı ile yük arasında lineer olmayan bir bağlantı sağlayan iki uçlu pasif devre elemanıdır [10]. Karakteristik davranışı sinaps davranışına oldukça yakın olduğu için, en yaygın araştırma alanı sinaps ve yapay sinir ağı gerçeklemeleridir [11, 12]. Sensörler [13], hafıza elemanları [14] ve analog devreler [15-17] diğer potansiyel kullanım alanlarındandır.

Karmaşık kaotik davranış sergilemesi beklenen kaos üreticilerinin fiziksel olarak gerçekleştirilmelerinde karşılaşılan teknik zorluklardan dolayı, bu osilatörlerin endüstrideki kullanımları sınırlıdır. Memristör, nano boyutları ve farklı dinamik davranışı ile bu geleneksel araştırma alanına önemli katkılar sağlamaktadır. Bir diferansiyel denklem kümesinin kaotik davranış sergilemesi için en az üç durum değişkenine ve bir lineer olmayan terime ihtiyacı vardır [18]. Bu ihtiyaç duyulan lineer olmayan terimi memristör elemanı ile üretmek oldukça pratik, kapladığı alan ve maliyet açısından ise avantajlı bir yaklaşımdır. Memristör elemanının Chua'nın 1971'de önerdiği gibi iki uçlu pasif bir eleman olarak üretilmesi ile birlikte, memristif kaotik devreler, birbirine paralel ya da seri bağlanmış pasif elemanlar ve bağımsız kaynaklardan oluşan basit devreler olarak kolaylıkla gerçekleştirilebilir hale gelecektir.

Rössler diferansiyel denklem kümesi 1976'da İsviçreli bilimadamı Otto Rössler tarafından bulunmuştur [19]. Bu diferansiyel denklem kümesi Eş. 1'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -y - z \\ \dot{y} &= x + \alpha y \\ \dot{z} &= b + z(x - c) \end{aligned} \quad (1)$$

Fiziksel Rössler dinamik sisteminin bir çok potansiyel uygulama alanı olmasına rağmen literatürde bu sistem fiziksel gerçekleştirilmesi üzerine çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Rassal sayı üretici tasarımı bir yöntem olarak kaos sistemlerinden faydalanılmaktadır [20]. Eğer Rössler sistemi fiziksel ve analog olarak gerçekleştirilebilirse bir gerçek rassal sayı üreticinin (TRNG) tasarımının temel entropi kaynağı olarak kullanılabilir [21, 22]. Çünkü sözde rassal sayı üreticileri, FPGA ya da bir

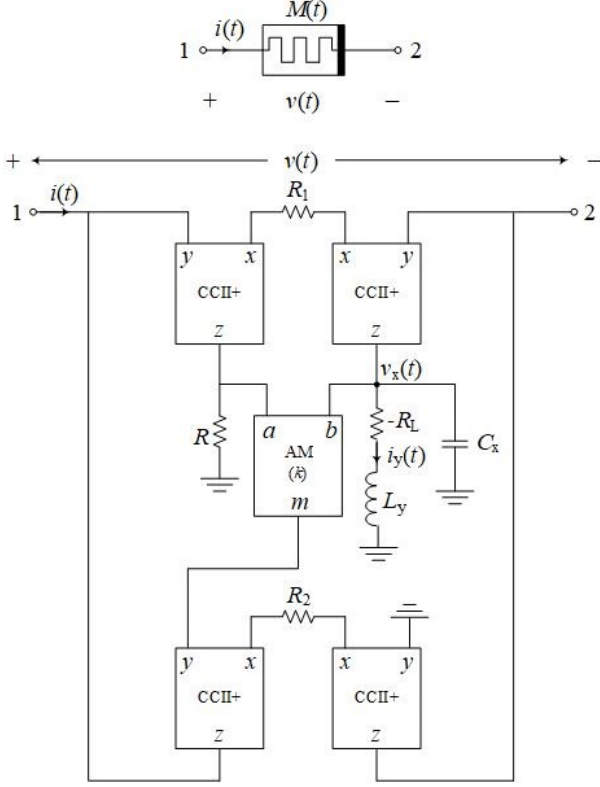
mikrodenetleyici üzerindeki bir algoritmik süreç sonunda rassal görünen diziler üretirken, gerçek rassal sayı üretimi için, çevresel gürültüden etkilenebilen, sonsuz hassasiyetteki analog düzenlere ihtiyaç vardır [23, 24]. Sinyal gizleme ya da kaydırmalı anahtarlama modeli gibi farklı güvenli haberleşme modelleri de içlerinde kaotik süreçlere ihtiyaç duyarlar [25, 26]. Güvenli haberleşme sistemlerinde verinin korunması için Rössler denklemlerini kullanan sistemler mevcuttur [27, 28]. Bazı kriptoloji sistemleri içerisinde Rössler haritalarını kullanır [29, 30]. Rössler sisteminin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ile bu uygulamalar da gerçekleştirilebilir hale gelecektir. Rössler sisteminin bu zamana kadarki gerçekleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar arasında 2017 yılında yayınlanan bir çalışma içerdiği 26 aktif eleman ile güç tüketimi ve eleman sayısı açısından dezavantajlı durumdadır [31]. Benzer bir çalışma yine 13 aktif eleman ile aynı dezavantaja sahiptir [32]. Bir başka çalışmada parçalı lineer bir fonksiyon üretilerek Rössler çekicisine benzer bir yapı oluşturulabilmiştir, fakat bu da orijinal Rössler çekicisi değildir [33]. 2006 yılında 5 aktif eleman ile gerçekleştirilen devre ise yine aynı şekilde orijinal Rössler denklemlerini değil, benzer bir yapıyı gerçeklemektedir [34]. Bu makalede önerilen, 1976 yılında önerilen orijinal Rössler sisteminin oldukça basit bir şekilde bir sabit akım kaynağına paralel bir kondansatör, bir lineer direnç ve bir memristör elemanından oluşan analog gerçekleştirilmesidir. Orijinal Rössler denklem takımındaki değişkenler, endüktör ve kondansatör dinamik elemanlarının durum değişkenlerine karşılık düşürülerek, aynı denklem takımı elde edilmeye çalışılmıştır. 2. kısımda önerilen emülatör devresi açıklanmış, matematiksel analizler ile devrenin bir memristör emülatörü olduğu doğrulanmıştır. 3. kısımda bu memristör emülatörü kullanılarak tasarlanan kaotik Rössler devresi ve orijinal Rössler deklemlerinin takımındaki katsayılar ile pasif devre elemanlarının değerleri arasındaki dönüşüm verilmiştir. Önerilen devrenin dinamikliği faz portresi ve çatallanma diyagramları teorik olarak incelenmiş ve SPICE simülasyonları ile doğrulanmıştır. 4. kısımda devre tümleşik devre elemanları ile gerçekleştirilmiş deneysel sonuçlar verilmiştir. 5. kısım ise sonuçları içermektedir.

2. ÖNERİLEN MEMRİSTÖR EMÜLATÖRÜ DEVRESİ (PROPOSED MEMRISTOR EMULATOR CIRCUIT)

Şekil 1'de verilen devre Rössler sistemi gerçekleştirilmesinde kullanılması önerilen memristör emülatörünün lineer olmayan davranışını sergileyen bir aktif memristör emülatörü devresidir. Bu devre daha önce önerilmiş bir devrenin, Rössler sisteminde ihtiyaç duyulan fonksiyonu gerçekleyebilecek şekilde değiştirilmiş halidir [35].

Bu devrede Şekil 2'deki devre empedans çevirici devresi negatif direnç olarak $R_{eq} = -R_L$ şeklinde ve Şekil 3'teki endüktans simülatörü devresi [36] de endüktör elemanı olarak $L_y = R_3 R_4 C_y$ şeklinde kullanılmıştır. Bu yapıların kullanılması memristör emülatörü ile aynı tür aktif

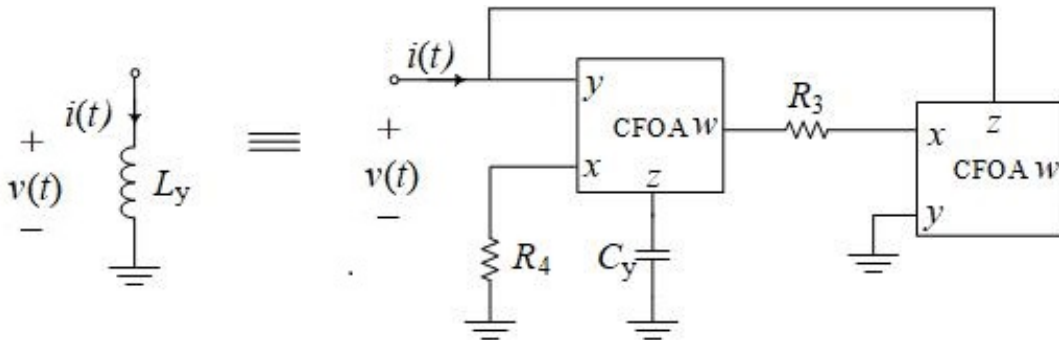
elemanları içermeleri sebebiyle devrenin tümleştirilmeye uygun olması sebebiyle tercih edilmiştir. Çünkü hem CFOA (Akım Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendirici) hem de CCII+ (II. Nesil Akım Taşıyıcı), AD844 entegre devresi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [37].



Şekil 1. Önerilen modifiye edilmiş memristör emülatörü devresi (Proposed modified memristor emulator circuit)

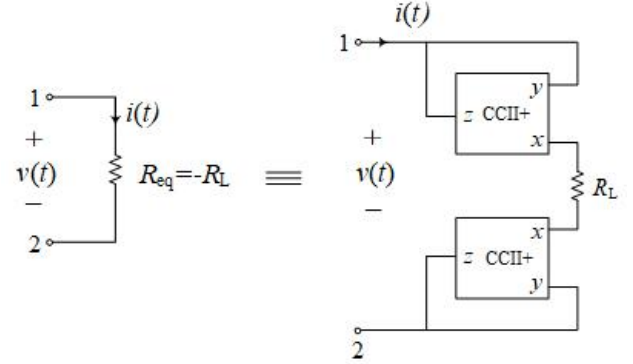
Bir elemanın memristör olarak tanımlanması için sağlaması gereken 3 adet koşul vardır [38]:

- Akım ve gerilim dalga şekilleri eş sıfır geçiş noktalarına sahip olmalı, yani aynı anda sıfır değerini almalı,
- Periyodik bir gerilim kaynağı ile sürüldüğünde akım-gerilim eğrisi çimdiklenmiş bir histeresis eğrisi şeklinde olmalı,



Şekil 3. Endüktans simülatörü devresi (Inductance simulator circuit)

- Süren gerilim kaynağının frekansı arttıkça, histeresis alanı monolitik olarak azalmalı, kaynak frekansı sonsuza gittiğinde çimdiklenmiş histeresis döngüsü tek değerli bir fonksiyona yakınsayarak lineer bir doğru parçası haline gelmeli.

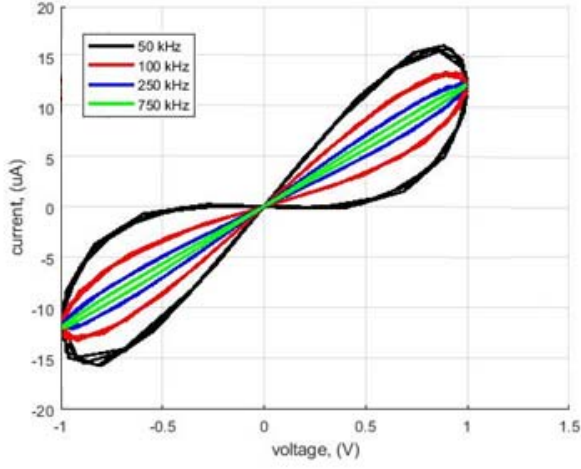


Şekil 2. Negatif empedans çevirici devresi (Negative impedance converter circuit)

Bu özellikler memristör devresine $v(t) = A \cos(\omega t)$ giriş işareti uygulanarak test edilebilir. Bu gerilimin Şekil 1’de önerilen memristör emülatörü devresine uygulandığı varsayılırsa, önerilen devrenin durum değişkenleri cinsinden devrenin davranışını tanımlayan diferansiyel denklemler Eş. 2’deki gibi elde edilir. Burada v_x , C_x kondansatörünün üzerindeki gerilim, ve i_y L_y endüktörünün içinden geçen akımdır. Eş. 2, başlangıç koşulu olarak $v_x(0) = 0,05 V$, $i_y(0) = 0 A$ ve giriş geriliminin genliği $A = 1 V$ alınarak Runge-Kutta yöntemi ile farklı frekanslardaki sinüzoidal gerilim kaynakları için çözümlerse [36, 37], Şekil 4’teki daralan histeresis eğrileri elde edilir. Bu histeresis eğrileri ile memristörlerin 3 parmak izini sağladığı görsel olarak gösterilmiştir ve önerilen elemanın memristör emülatörü olarak adlandırılabilir. Emülatör devresinde kullanılan eleman değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \frac{1}{C_x} i_y(t) - \frac{1}{C_x R_1} v(t) \\ \dot{i}_y &= \frac{1}{L} v_x(t) + \frac{R_L}{L_y} i_y(t) \\ v(t) &= A \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$i(t) = \frac{v(t)}{M(t)} = -\frac{kRv_C(t)v(t)}{R_1R_2} \quad (3)$$



Şekil 4. Artan frekanslara göre karakteristik v - i histeresis eğrileri
(Characteristic v - i hysteresis loops according to increasing frequencies)

Tablo 1. Memristör emülatörü devresinde kullanılan eleman değerleri.
(Element values used in memristor emulator circuit)

Eleman	Değer
R	290 Ω
R_1	600 Ω
R_2	200 Ω
C_x	100 nF
R_L	390 Ω
L_y	390 mH
R_3	5 k Ω
R_4	7,8 k Ω
C_y	10 nF

k , V^{-1} boyutunda reel sabit bir katsayı olmak üzere memristör emülatörü girişinden akan akım Eş. 3'teki gibi hesaplanır. İki terimin çarpımını içeren bu büyüklük diferansiyel denklem takımındaki lineer olmayan terimi gerçeklemek için kullanılacaktır.

3. ÖNERİLEN KAOTİK RÖSSLER DEVRESİ (PROPOSED CHAOTIC ROSSLER CIRCUIT)

Eş. 1'de verilen Rössler sistemini fiziksel olarak gerçeklemek için önerilen devre Şekil 5'te verilmiştir. Bu devrede lineer olmayan terimi gerçeklemek için kullanılan eleman Şekil 1'de verilen memristör emülatördür. Devrenin durum değişkenleri v_x , i_y ve v_z , Rössler sisteminin durum değişkenleri x , y ve z 'ye karşılık gelmektedir. Bu devre idealde 3 temel pasif devre elemanı ve bir adet bağımsız DC akım kaynağının paralel bağlanmasından oluşan bir devredir.

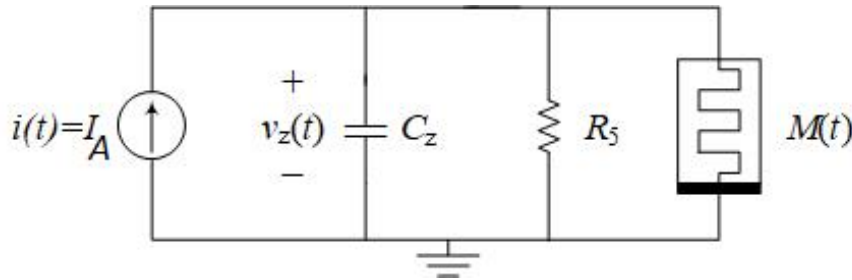
Bu devrede, memristör emülatörünün içerisindeki durum değişkenlerine ek olarak, v_z , C_z kondansatörü üzerindeki gerilim olmak üzere, devrenin analiz edilmesi ile elde edilen Rössler sistemi diferansiyel denklem takımı Eş. 4'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= -\frac{1}{C_x} i_y(t) - \frac{1}{R_1 C_x} v_z(t) \\ i_L &= \frac{1}{L_y} v_x(t) - \frac{R_L}{L_y} i_y(t) \\ \dot{v}_z &= \frac{I_A}{C_z} - \frac{1}{R_5 C_z} v_z(t) + \frac{Rk}{R_1 R_2 C_z} v_x(t) v_z(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Bu devredeki her bir durum değişkeninin, orjinal Rössler diferansiyel denklem setindeki bir durum değişkenine karşılık gelmesini sağlamak için, kullanılan elemanların akım ve gerilim sınırlarına uygun şekilde, her bir Rössler durum değişkeninin belli bir oranı devredeki akım ya da gerilim değerlerine karşı gelecek şekilde devre denormalize edilmelidir. Yani W , Y ve Q reel sabit katsayılar olmak üzere, Eş. 1'de $x \rightarrow Wv_x$, $y \rightarrow Yi_y$ ve $z \rightarrow Qv_z$ yazılarak Eş. 5 elde edilir. Kullanılan aktif elemanların akım ve gerilim sınır değerlerine de dikkat edilerek bu ölçekleme yapılmalıdır.

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= -\frac{Y}{W} i_y(t) - \frac{Q}{W} v_z(t) \\ i_y &= \frac{W}{Y} v_x(t) + a i_y(t) \\ \dot{v}_z &= \frac{b}{Q} + v_z(t)(Wv_x(t) - c) \end{aligned} \quad (5)$$

Eğer bu devre bir k_A genlik ölçekleme katsayısı ve k_F frekans ölçekleme katsayısı kullanılarak denormalize edilirse, devredeki pasif eleman değerleri $C_x = \frac{W}{Yk_Ak_F}$, $R_1 = \frac{Yk_A}{Q}$, $L_y = \frac{Yk_A}{Wk_F}$, $R_L = \frac{ak_A Y}{W}$, $R_5 = \frac{1}{ck_F C_z}$, $R = \frac{WYk_Ak_FR_2C_z}{kQ}$, $I_A = \frac{bk_FC_z}{Q}$, şeklinde hesaplanır. C_z ve R_2 keyfi olarak seçilebilir.



Şekil 5. Önerilen Rössler çekicisi devresi (Proposed Rössler attractor circuit)

Rössler dinamik sistemini kaosa soktuğu bilinen parametreler olarak $a=0,2$, $b=0,45$ ve $c=5,7$ [41], denormalizasyon parametreleri olarak $k_A=300$, $k_F=5000$, $W=2,12$, $Y=13,8$ ve $Q=6,76$ seçilirse, Rössler çekicisi devresinde Tablo 1'deki elemanlara ek olarak kullanılması gereken eleman değerleri Tablo 2'dekiler olarak hesaplanır.

Tablo 2. Memristör emülatörü devresinde kullanılan eleman değerleri.

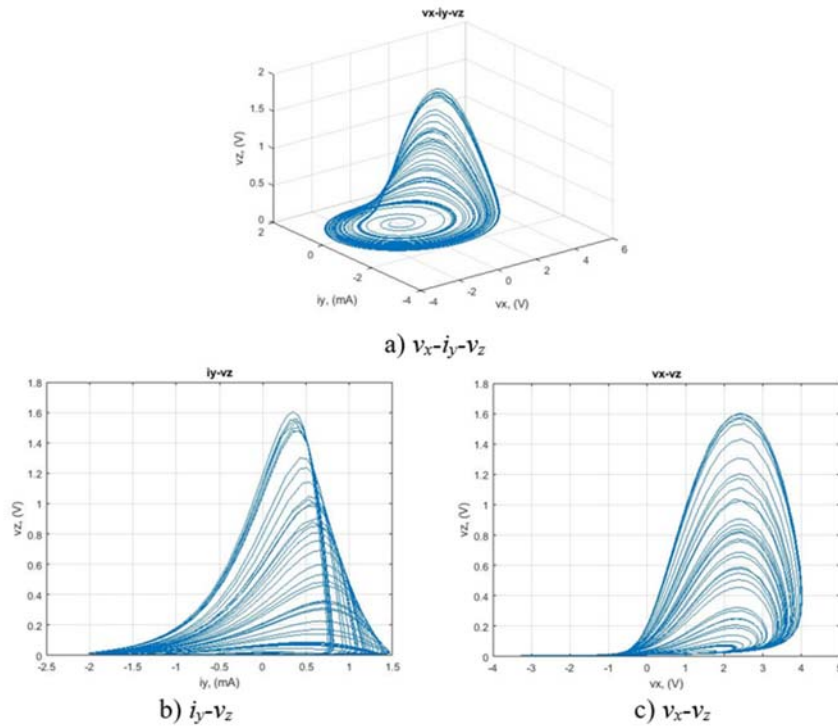
(Element values used in memristor emulator circuit)

Eleman	Değer
C_z	20 nF
I_A	6,67 μ A
R_5	1,7 k Ω

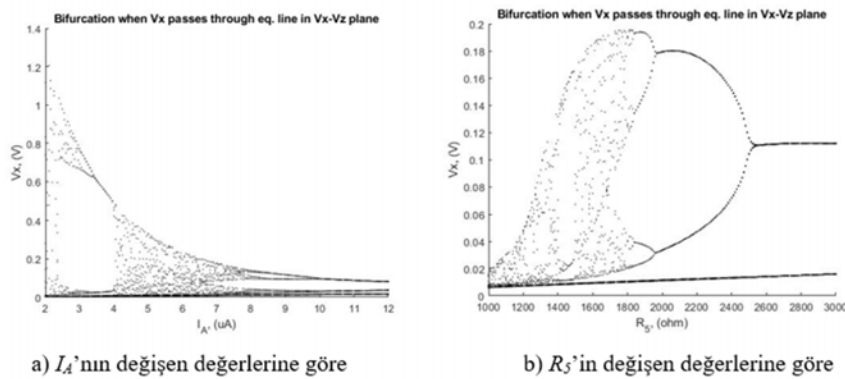
Bu eleman değerlerini kullanarak Eş. 4 Runge Kutta yöntemi ile 80 ms için çözüldüğünde matematiksel olarak elde edilen faz portreleri Şekil 6'da verilmiştir.

Diğer tüm parametreler sabitken R_5 direnci ve I_A sabit akım kaynağının değişen değerleri için v_x - v_z düzleminde v_x değişkeninin kestiği noktaları gösteren benzetimler kullanılarak elde edilen çatallanma diyagramları da Şekil 7'de verilmiştir. Bu çatallanma diyagramlarından önerilen Rössler sisteminin periyodik, sözde periyodik ve kaotik gibi farklı dinamikleri gerçekleyebileceği görülebilir.

Önerilen devrenin, seçilen aktif elemanların makromodelleri kullanılarak SPICE benzetimleri yapıldığında elde edilen faz



Şekil 6. Önerilen Rössler çekicisi devresinden MATLAB kullanılarak matematiksel olarak elde edilen faz portreleri (Mathematically obtained phase portraits from proposed memristor-based Rössler circuit by using MATLAB)



Şekil 7. Önerilen memristör tabanlı Rössler devresinden benzetimler kullanılarak elde edilen akım kaynağı I_A 'ya ve direnç R_5 'e bağlı çatallanma diyagramları

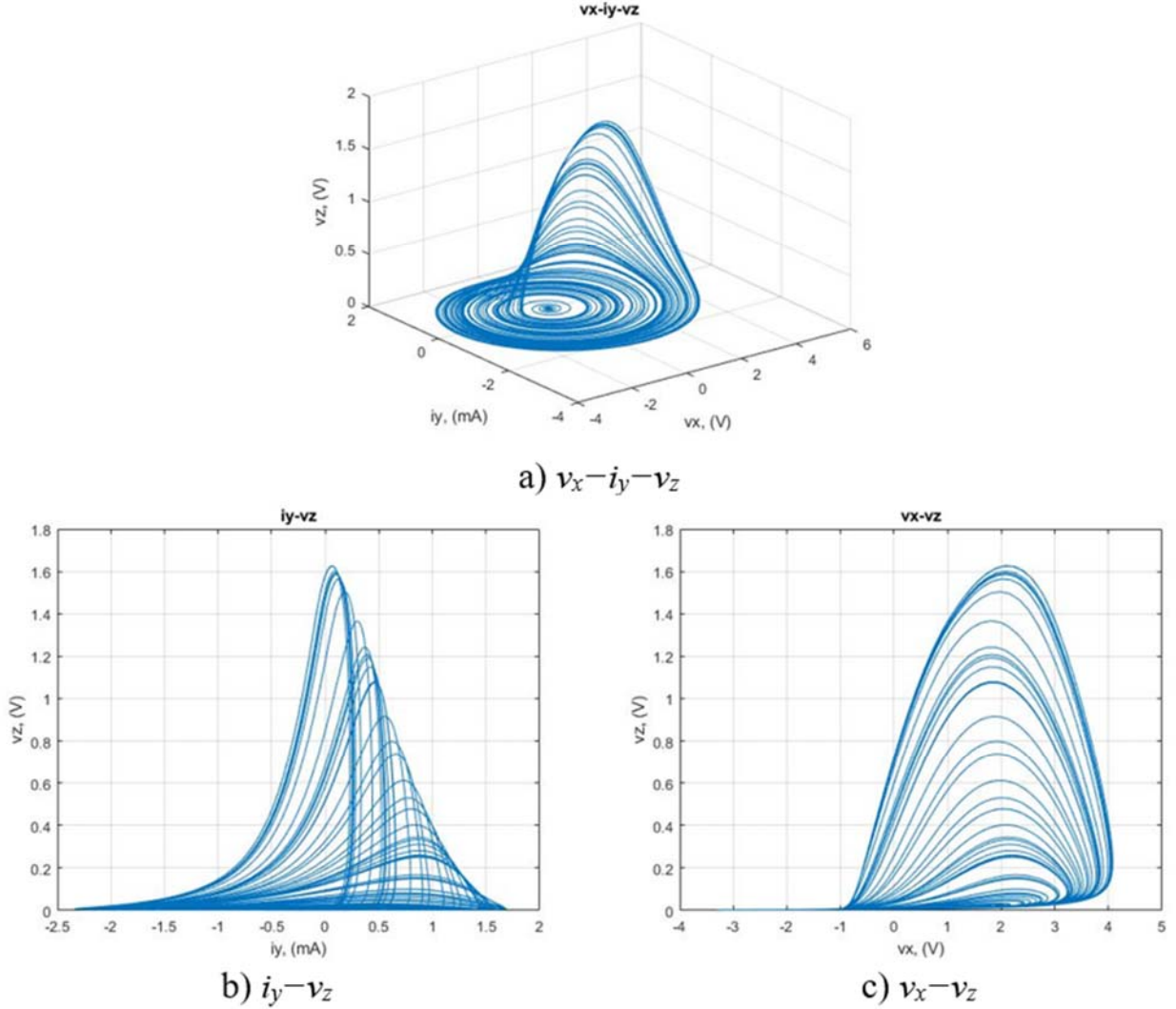
(Obtained bifurcation diagrams of proposed memristor-based Rössler circuit according to constant current source I_A and resistor R_5 by using simulations)

portreleri de Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 8’deki faz portrelerinin birbirine oldukça benzer olduğu görülebilir.

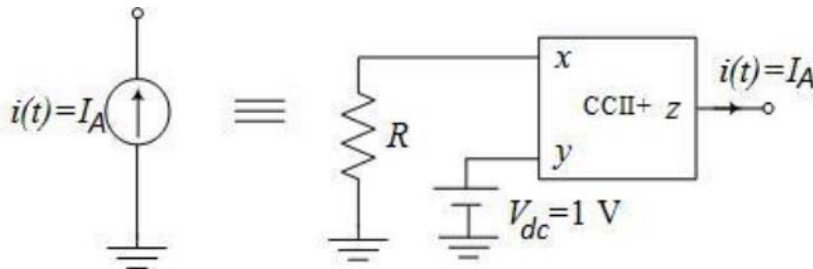
4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Devrenin bord üzerinde gerçekleşmesinde piyasada bulunan tümleşik devreler kullanılmıştır. $k=0,1 \text{ V}^{-1}$ katsayısına sahip AD633 tümleşik devresi [39], X_2 , Y_2 ve Z -Summing Input uçlarını topraklanarak analog çarpıcı olarak kullanılmıştır.

Ayrıca AD844 CFOA tümleşik devresi [37] w çıkış ucunu açık devre bırakarak CCII+ olarak kullanılmıştır. Sabit DC akım kaynağı AD844 ile Şekil 9’daki gibi devrede kullanılmıştır. Seçilen $I_A = 6,67 \text{ uA}$ akımını elde etmek için $R = 150 \text{ k}\Omega$ kullanılmıştır. Osilogramlar, hem dalga şekillerini net bir şekilde ayırt edebilmek için analog osiloskopa, hem de kaotik yörüngeleri seçebilmek için dijital osiloskopa elde edilmiştir. Şekil 10’dan görülebildiği gibi, elde edilen deneysel sonuçlar, matematiksel sonuçlar ve

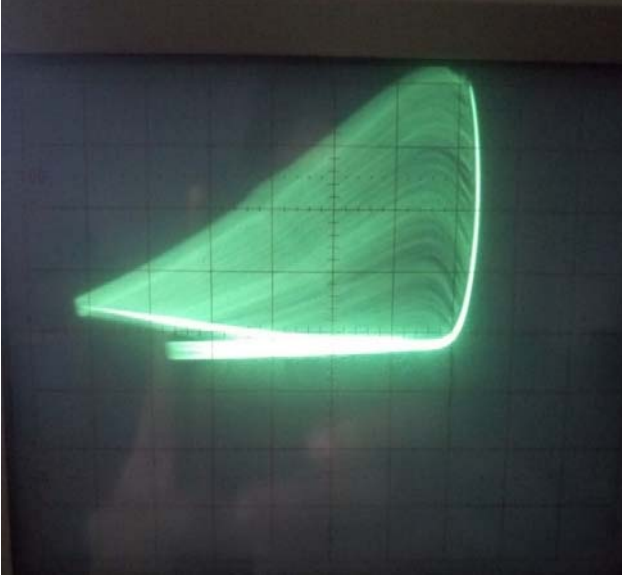


Şekil 8. Önerilen memristör tabanlı Rössler çekicisi devresinden SPICE kullanılarak elde edilen $v_x - i_y - v_z$, $i_y - v_z$ and $v_x - v_z$ faz portreleri (Simulated $v_x - i_y - v_z$, $i_y - v_z$ and $v_x - v_z$ phase portraits obtained from proposed memristor-based Rössler circuit by using SPICE)

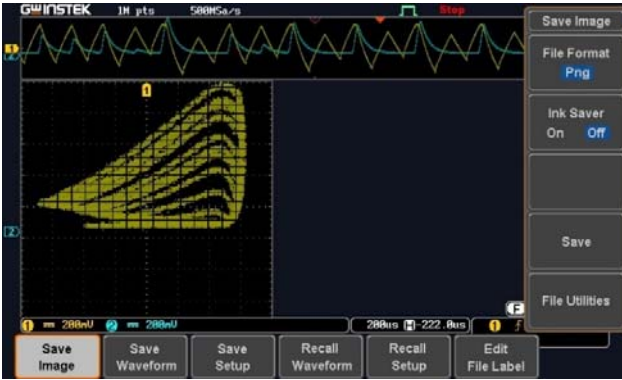


Şekil 9. Sabit DC akım kaynağı devresi (Constant DC current source circuit)

benzetim sonuçları ile uyum içerisindedir. Deneysel çalışma sırasında negatif empedans çevirici için 2 adet, endüktans simülatörü için 2 adet, memristör emülatörü devresi için 5 adet, 1 adet akım kaynağı için olmak üzere toplamda 10 CFOA elemanı kullanılmıştır. Bu sayı literatürde önerilen diğer Rössler devresi gerçeklemelerinde kullanılan aktif eleman sayılarından daha düşüktür [31, 32]. Aktif eleman sayısını azaltmak için pasif endüktör elemanı kullanarak 8 CFOA ile de devrenin aynı davranışı sergilediği görülmüştür.



a) Analog osiloskop ile



b) Dijital osiloskop ile

Şekil 10. Önerilen memristör tabanlı Rössler çekicisi devresinden deneysel olarak elde edilen v_x-v_z faz portreleri (Experimentally obtained v_x-v_z phase portraits from proposed memristor-based Rössler circuit)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Rössler dinamik sisteminin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi için yeni bir memristör tabanlı analog devre önerilmiştir. Faz portreleri ve çatallanma diyagramları matematiksel olarak elde edilmiş, SPICE benzetimleri piyasada bulunan tümleşik devrelerin makromodelleri

kullanılarak yapılmıştır. Bu devreyi gerçeklemek için gerekli olan lineer olmayan terimi üretmesi için bir memristör elemanı tanımlanmış, istenen memristif davranışı gerçekleyecek bir memristör emülatörü devresi önerilmiştir. Tüm önerilen devreler ticari olarak bulunabilen aktif ve pasif elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçların teori ve benzetim ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde Rössler sistemini temel alan çoğu çalışma, fiziksel gerçekleştirilmesinde FPGA ya da mikrodenetleyiciler kullanılmaktadır [43-45]. Bu çalışmalardaki dinamik sistemin çıkışı, tamamen algoritmik bir sürece bağlı olduğu için, bu dinamik sistemler entropi kaynağı olarak TRNG çalışmalarında kullanılamazlar. Rössler sisteminin analog gerçekleştirilmesi üzerine çok sayıda çalışma bulunmamaktadır. Var olan çalışmalar ise klasik integral alıcı ve toplayıcı yapılarının peşpeşe bağlanmasından oluşmaktadır [22, 32, 46, 47]. Bu devreler çok büyük ve karmaşık devreler olup, ayrıca bir kısmı deneysel gerçekleştirilmez [47]. Bunlara karşın bu çalışmada önerilen devre, memristör elemanının Chua tarafından önerildiği gibi iki uçlu bir pasif eleman olarak piyasaya sürülmesinden sonra, oldukça basit bir şekilde, bir DC akım kaynağına paralel bağlı 3 temel pasif devre elemanından oluşan bir devre haline gelecektir. Bu devrenin yapısı ve matematiksel analizleri oldukça basittir. Analog, çevresel gürültülere açık bir entropi kaynağı haline gelen bu basit devre, TRNG çalışmaları için ve güvenli haberleşme sistemleri için literatüre yeni bir araştırma alanı sunmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Chua, L. O., 1969, Introduction to nonlinear network theory, McGraw-Hill.
2. Muthuswamy, B., Implementing memristor-based chaotic circuits, International Journal of Bifurcation and Chaos, 20 (05), 1335–1350, 2010.
3. Yener, S. C., and Kuntman, H. H., Fully cmos memristor based chaotic circuit, Radioengineering, 23 (4), 1140–1149, 2014.
4. Bao, B., Xu, L., Wu, Z., Chen, M., Wu, H., Coexistence of multiple bifurcation modes in memristive diode-bridge based canonical chuas circuit, International Journal of Electronics, 105(7), 1159–1169, 2018.
5. Chen, M., Yu, J., Yu, Q., Li, C., Bao, B., A memristive diode bridge-based canonical chuas circuit, Entropy, 16 (12), 6464–6476, 2014.
6. Wu, J., Wang, L., Chen, G., Duan, S., A memristive chaotic system with heart-shaped attractors and its implementation, Chaos, Solitons & Fractals, 92, 20–29, 2016.
7. Wang, L., Drakakis, E., Duan, S., He, P., Liao, X., Memristor model and its application for chaos generation, International Journal of Bifurcation and Chaos, 22 (08), 1250205, 2012.
8. Hu, X., Chen, G., Duan, S., Feng, G., A memristor-based chaotic system with boundary conditions, InMemristor Networks, Springer, 351–364, 2014.

9. Fonzin, T. F., Srinivasan, K., Kengne, J., Pelap, F., Coexisting bifurcations in a memristive hyper-chaotic oscillator, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2018.
10. Chua, L., Memristor-the missing circuit element, *IEEE Transactions on circuit theory*, 18 (5), 507–519, 1971.
11. Kim, H., Sah, M. P., Yang, C., Roska, T., Chua, L. O., Neural synaptic weighting with a pulse-based memristor circuit, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 59 (1), 148–158, 2012.
12. Yakopcic, C., Hasan, R., Taha, T. M., Flexible memristor based neuromorphic system for implementing multi-layer neural network algorithms, *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 33 (4), 408–429, 2018.
13. Hadis, N. S. M., Manaf, A. A., Ngalim, S. H., Herman, S. H., Fabrication and characterisation of fluidic based memristor sensor for liquid with hydroxylgroup, *Sensing and Bio-Sensing Research*, 14, 21–29, 2017.
14. Ebong, I. E., Mazumder, P., Self-controlled writing and erasing in a memristor crossbar memory, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 10 (6), 1454–1463, 2011.
15. Saha, G., Pasumarthy, R., Khatavkar, P., Towards analog memristive controllers, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 62 (1), 205–214, 2015.
16. Varghese, D., Gandhi, G., 2009, Memristor based high linear range differential pair, In *Communications, Circuits and Systems, ICCAS 2009, International Conference on, IEEE*, 935–938, 2009.
17. Yener Ş.Ç., Mutlu R., Kuntman H., Memristor based sallen-key filters, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (2), 173-184, 2015.
18. Hirsch, M. W., Smale, S., *Differential equations, dynamical systems and linear algebra*. Academic Press college division, 1973.
19. Rössler, O. E., An equation for continuous chaos, *Physics Letters A*, 57(5), 397–398, 1976.
20. Akkaya S., Pehlivan İ., Akgül A., Varan M., The design and application of bank authenticator device with a novel chaos based random number generator, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 33 (3), 1171-1182, 2018.
21. Stoyanov, B., Szczypiorski, K., Kordov, K., Yet another pseudorandom number generator, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 63(2), 195–199, 2017.
22. Canals, V., Morro, A., Rossello, J. L., Random number generation based on the rossler attractor, *IEICE Proceeding Series*, 1, 272–275, 2014.
23. Bonilla, L. L., Alvaro, M., Carretero, M., Chaos-based true random number generators, *Journal of Mathematics in Industry*, 7 (1), 1, 2016.
24. Fidan C.B., Tuna M., A Study on the importance of chaotic oscillators based on FPGA for true random number generating (TRNG) and chaotic systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 473-491, 2018.
25. Çavuşoğlu Ü., Uyaroğlu Y., Pehlivan İ., Design of a continuous-time autonomous chaotic circuit and application of signal masking, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (1), 79-87, 2014.
26. Yardım F., Afacan E., Simulation of a communication system using lorenz-based differential chaos shift keying (DCSK) model, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (1), 101-110, 2010.
27. Chantov, D., A chaos-based two-level securecommunication system on the basis of two different pairs of synchronized chaotic systems, *International Journal on Information Technologies & Security*, 4 (1), 2012.
28. Frunzete, M., Popescu, A. A., Barbot, J.-P., Dynamical discrete-time rössler map with variable delay, In *International Conference on Computational Science and Its Applications*, Springer, 431–446, 2015.
29. Abundiz-Perez, F., Cruz-Hernandez, C., Murillo-Escobar, M., Lopez-Gutierrez, R., Arellano-Delgado, A., A fingerprint image encryption scheme based on hyperchaotic rössler map, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016.
30. Al-Najjar, H. M., Digital image encryption algorithm based on multi-dimensional chaotic system and pixels location, *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 4 (3), 357, 2012.
31. Dar, M. R., Kant, N. A., Khanday, F. A., Realization of integrable incommensurate-fractional-order-rössler-system design using operational transconductance amplifiers (otas) and its experimental verification, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 27 (05), 1750077, 2017.
32. Liao, T.-L., Chen, C.-K., Design and circuit simulation of observer-based chaotic synchronization and communication systems, *International journal of electronics*, 86 (12), 1423–1440, 1999.
33. Wei-Qing, L., Jing-Fa, D., Jing-Hua, X., Experimental observation of a multirhythmic pattern in chains of rossler circuits, *Chinese Physics B*, 21 (12), 128701, 2012.
34. Murguia, J. S., Campos-Cantón, E., Wavelet analysis of chaotic time series. *Revista mexicana de fisica*, 52 (2), 155-162, 2006.
35. Cam, Z. G., Sedef, H., A new floating memristance simulator circuit based on second generation current conveyor, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 26 (02), 1750029, 2017.
36. Recai, K., *A practical guide for studying Chua's circuits*, 71, World Scientific, 2010.
37. Analog Devices, 60 MHz, 2000V/s, Monolithic Op Amp with Quad Low Noise., Rev. G., 2017.
38. Adhikari, S. P., Sah, M. P., Kim, H., Chua, L. O., Three fingerprints of memristor, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60 (11), 3008–3021, 2013.

39. Kutta, W., Beitrag zur näherungsweise integration totaler differentialgleichungen, 1901.
40. Runge, C., Über die numerische auflösung von differentialgleichungen, *Mathematische Annalen*, 46 (2), 167–178, 1895.
41. Zambrano, S., Marino, I. P., Sanjuan, M. A., Controlling crisis-induced intermittency using its relation with a boundary crisis, *New Journal of Physics*, 11 (2), 023025, 2009.
42. Analog Devices, Low Cost Analog Multiplier. Rev. K., 2015.
43. Sadoudi, S., Azzaz, M. S., Hardware implementation of the rössler chaotic system for securing chaotic communication, In *Proceedings of 5th International Conference of Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications*, 2009.
44. Eroğlu, C., Implementation of synchronized chaotic systems by field programmable gate array, Master's thesis, Izmir Institute of Technology, 2008.
45. Chiu, R., Mora-Gonzalez, M., Lopez-Mancilla, D., Implementation of a chaotic oscillator into a simple microcontroller, *IERI Procedia*, 4, 247–252, 2013.
46. Larptwee, S., San-Um, W., Implementation of rössler chaotic system through inherent exponential nonlinearity of a diode with two-channel chaotic synchronization applications, In *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2013 Fourth International Conference on, IEEE*, 787–791, 2013.
47. Itoh, M., Yamamoto, N., Synthesis of linear and nonlinear circuits, In *Nonlinear Dynamics of Electronic Systems*. World Scientific, 95–99, 2000.