

Ters-Paralel Bağlı Schottky Diyot Dizisi Tabanlı Van der Pol Osilatörü Devresinin Modellenmesi ve LTspice ve Simulink Kullanarak Analizi

Modeling an Anti-Parallel-Connected Schottky Diode String-Based Van der Pol Oscillator Circuit and its Analysis Using LTspice and Simulink

Kübra Çakır^{1*}, Reşat Mutlu¹, Ertuğrul Karakulak²



¹Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye

²Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

*1218123101@nku.edu.tr
rmutlu@nku.edu.tr
ekarakulak@nku.edu.tr

Öz

Van der Pol Osilatörü 1926 yılında, Philips'te çalışan elektrik mühendisi ve fizikçi Dr. Balthasar Van der Pol tarafından keşfedilmiştir. Bu osilatör çeşidinin oldukça zengin dinamikleri mevcuttur. İlk yapılan Van der Pol Osilatörü'nde bir triyot kullanılmıştır. Günümüzde Van der Pol Osilatörü, farklı yarı iletken elemanları kullanılarak yapılabilmektedir. Bu çalışmada, nonlinear devre elemanı olarak Schottky diyotlar kullanılmıştır. Bir endüktör, bir kondansatör, ters-paralel bağlı Schottky diyot dizisi ve paralel bağlanmış negatif direnç devresinden oluşan bu yeni Van der Pol Osilatörü'nün devre denklemleri türetilmiş ve benzetimi yapılarak incelenmiştir. Benzetimlerde devrenin sınır döngüsü, devre elemanlarının akımları ve devrenin gerilimi LTspice devre analizi programı ve Matlab'in Simulink paket programı kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nonlinear Osilatörler, Van der Pol Osilatörü, Schottky Diyot, Sınır Döngüsü, Devre Dinamikleri, Devre Modellemesi.

Abstract

The Van der Pol Oscillator was discovered in 1926 by electrical engineer and physicist Dr. Balthasar Van der Pol. This oscillator type has very rich dynamics. A triode is used in the original Van der Pol Oscillator. Nowadays, a Van der Pol Oscillator can be made using different semiconductor circuit elements. In this study, Schottky diodes are used as the nonlinear circuit elements. The circuit equations of the new Van der Pol Oscillator which consists of an inductor, a capacitor, anti-parallel connected Schottky diode strings, and a negative resistor circuit connected in parallel are derived and it is examined using simulations. The limit cycle of the circuit, the currents of the circuit elements and the voltage of the circuit were obtained using LTspice circuit analysis program and Simulink toolbox of Matlab.

Keywords: Nonlinear Oscillators, Van der Pol Oscillator, Schottky Diode, Limit Cycle, Circuit Dynamics, Circuit Modeling.

1. Giriş

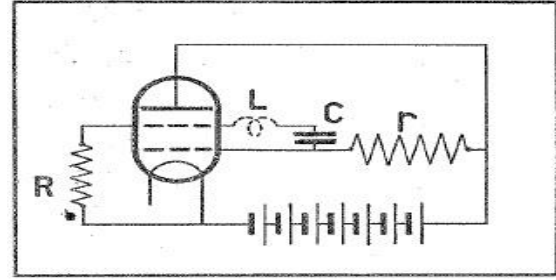
1920'li ve 1930'lu yıllarda haberleşme alanında mühendis olarak çalışan Balthasar Van der Pol'ün triyot vakum tüpleri ile yaptığı çalışmalar sonucunda artık kendi ismi ile bilinen Van der Osilatörü'nü (VDPO) bulmuştur [1-4]. Bu devreyi tanımlayan kübik nonlineerliğe sahip ikinci dereceden diferansiyel denklemler artık kendi ismi ile bilinmektedir [5-6]. Van Der Pol denklemi Liénard denkleminin özel bir hâlidir [7]. Bu devre modern salınım dinamiklerini bir çalışma sahası olarak ortaya çıkarmıştır. Bu konuda yayınlanan binlerce makale mevcuttur [8]. VDPO'nun bulunduğu zamanlarda transistör henüz bulunmamıştı ve bu yüzden triyot vakum tüpü kullanılarak yapılmıştı [9]. VDPO deterministik kaotik sistemlere bir örnektir [10]. 1962 yılında bir VDPO seri RLC devresinde nonlineer direnç olarak negatif diferansiyel direnç özelliği gösteren tünel diyot kullanılarak modellenmiştir [11]. 2008 yılında bir optik rezonans tünel diyotu kullanarak bir Liénard denklemi ile tanımlanabilen bir VDPO [12]'de teşhis edilmiştir. 2011 yılında ise tünel diyot kullanarak Van der Pol Osilatörü modellenmiş ve bu modelleme sayesinde rezonant tünelleme diyot bazlı mikrodalga kaynakları elde edilmiştir [13]. Ters-paralel bağlı diyotlu Wien Osilatörleri VDPO yaklaşımı ile çözülebilir [14]. 2018 yılında ise nonlineer kondansatör içeren bir Bonhoeffer Van der Pol Osilatörü sisteminin incelenmesi yapılmıştır [15]. [16]'da FPGA kullanılarak bir VDPO yapılmıştır. [17]'de doğrusal bir endüktör ve memristör ile VDPO devresi modellenmiş, histerezis döngüsü ve sınır döngüsü incelenmiştir. Van der Pol Osilatörü devresi günümüzde transistör, op-amp, tünel diyot, köprü diyot ve daha birçok farklı devre elemanı kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Yaptığımız literatür taramasına göre henüz Schottky diyot kullanarak yapılan bir VDPO bulunmamaktadır. Bu çalışmada ters-paralel bağlı Schottky diyot dizisi ve negatif direnç dönüştürücü kullanılarak gerekli nonlineer direnç elde edilmiş ve elde edilen bu negatif direnç, bir kondansatör ve bir endüktör bir araya getirilerek bir VDPO yapılacağı gösterilmiştir. Bu yeni osilatörün denklemleri türetilmiş ve hem LTspice hem de Simulink programlarında yapılan benzetimler ile incelenmiştir.

Bu makale şu takip eden sırayla düzenlenmiştir. İkinci bölümde bu çalışmada yapılan VDPO devresi verilmiştir. Üçüncü bölümde bu osilatörün VDPO olduğu devrenin diferansiyel denklemleri kullanılarak gösterilmiştir. Dördüncü bölümde bu VDPO devresinin LTspice ve Simulink programları ile elde edilen benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde çalışma sonuçları özetlenmiştir.

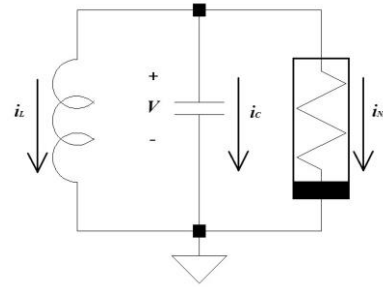
2. Ters-paralel Bağlı Schottky Diyot Dizisi Kullanan Van der Pol Osilatörü Devresi

Şekil 1'de 1926 yılındaki Van der Pol tarafından bulunan Osilatör Devresi görülebilir [2]. Bu devre birer triyot, direnç, kondansatör, endüktör ve gerilim kaynağından oluşmaktadır. Zamanla Van der Pol Osilatörü devresini gerçeklemek için triyot yerine başka elemanlar kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2'de jenerik bir Van der Pol Osilatörü görülebilir. Bu çizimde

genel bir nonlineer direnç kullanılmıştır. Bu nonlineer direnç çeşitli diyot türleri ve memristörler kullanılarak elde edilebilir [11, 12, 17-21]. Önemli olan VDPO sisteminin istenildiği gibi çalışmasını sağlayacak devre elemanlarının kullanılmasıdır.

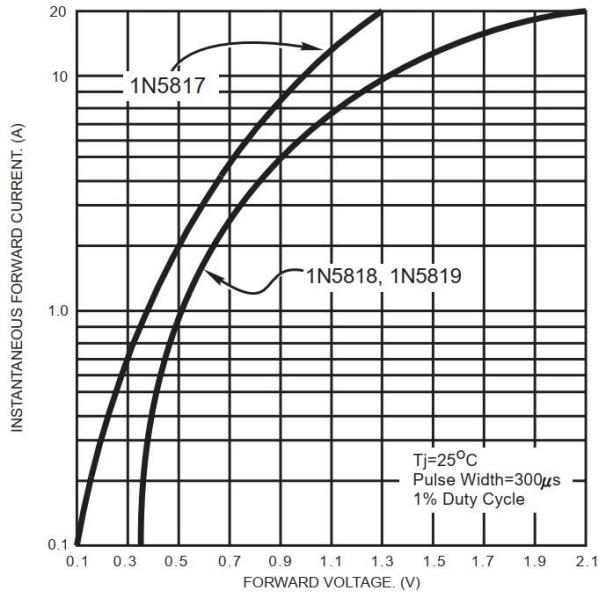


Şekil 1: 1926 yılında yapılan Van der Pol Osilatörü Devresi [2].



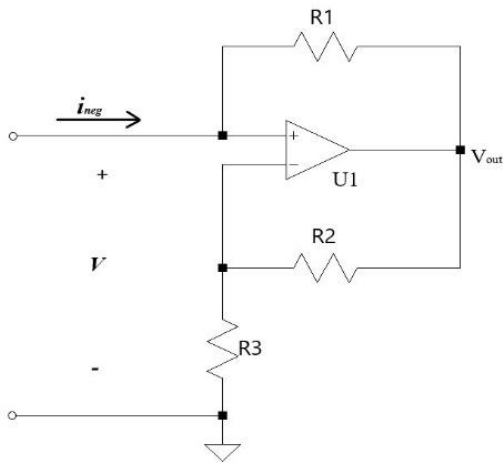
Şekil 2: Genel (Jenerik) Van der Pol Osilatörü Devresi.

Bu çalışmada Schottky diyotlar kullanılarak bir VDPO yapılacaktır. Schottky diyotların yaklaşık eşdeğer devresi ideal bir diyot ve bir kondansatörün paralel olarak bağlanmasıyla elde edilebilir [22]. Düşük frekanslarda bu kondansatörün etkisi ihmal edilebilir. Schottky diyot ve silikon diyotun içinden akım geçerken, bu 2 çeşit diyotun üzerlerine düşen gerilimler kıyaslanırsa, Schottky diyot üzerine düşen gerilim 0.15-0.45 V arasında değişirken, silikon diyot üzerine düşen gerilim 0.6-0.7 V arasında değişir [23-24]. Bu gerilim farkından dolayı Schottky diyot ile silikon diyota göre çok daha hızlı anahtarlama sağlanır. Bu yüzden Schottky diyotlar genellikle bilgisayar ve radyo frekans devrelerinde kullanılırlar. Ama kullanım alanları bunlarla sınırlı değildir. Yüksek hız gerektiren çok çeşitli devrelerde de yine Schottky diyot kullanılmaktadır. Örnek olarak çok hızlı Schottky diyotlar kullanılarak MHz mertebesindeki frekanslarda salınan kaotik osilatörler yapılabilir [25]. Şekil 3'te bu çalışmada kullanılan 1N5817 Schottky diyotunun $v-i$ karakteristiğine yer verilmiştir [26].

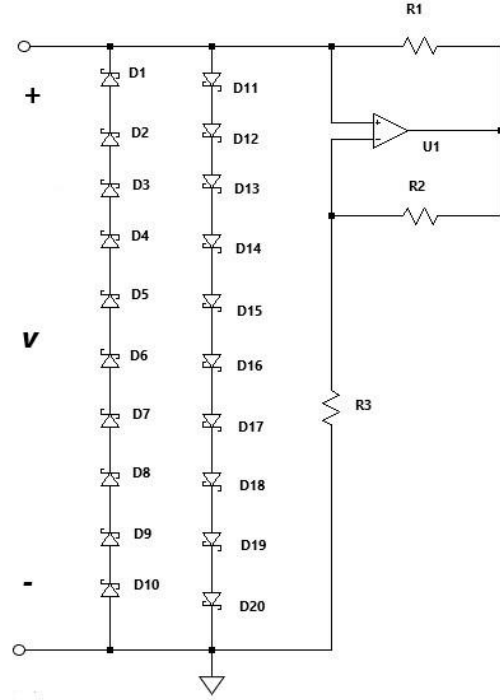


Şekil 3: 1N5817 Schottky diyotunun 25 °C'taki $v-i$ karakteristiği [26].

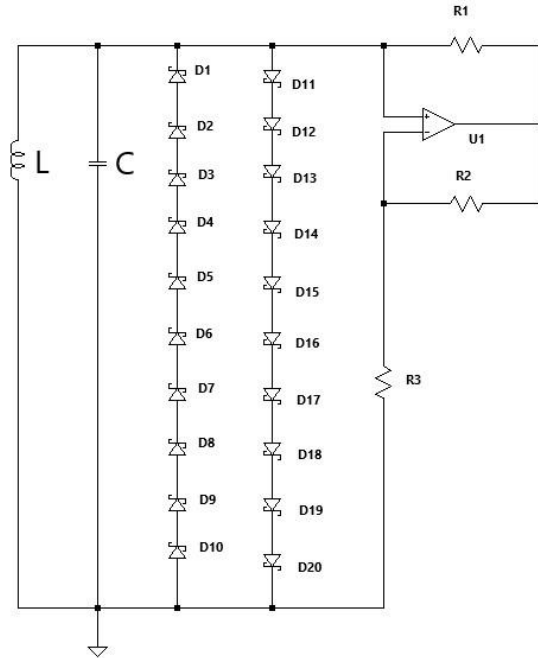
Negatif empedans ya da negatif direnç dönüştürücü negatif direnç yapımında kullanılan devrelere verilen isimdir. Bu çalışmada kullanılan op-amp tabanlı negatif direnç dönüştürücü Şekil 4'te gösterilmiştir. Ters-paralel Schottky diyot dizisi ve negatif direnç dönüştürücü devresinin paralel bağlanmasıyla elde edilen VDPO'da kullanılan negatif direnç devresi Şekil 5'te görülebilir. Çok sayıda diyotun seri olarak kullanılması nedeni Schottky diyotun eşik geriliminin düşük olmasıdır. Bu negatif direncin Şekil 2'deki jenerik VDPO'da yerine konulması ile Şekil 6'da görülen ve bu çalışmada önerilen VDPO elde edilmiş olur.



Şekil 4: VDPO Devresinde Kullanılan Negatif Direnç Dönüştürücü



Şekil 5: VDPO Devresindeki Eşdeğer Negatif Direncin Gösterimi



Şekil 6: Ters-paralel Bağlı Schottky Diyot Dizisi Kullanılarak Yapılan Paralel Van der Pol Osilatörü Devresi

3. Ters-paralel Schottky Diyot Dizisi Tabanlı Van der Pol Osilatörü'nün Devre Denklemleriyle Analizi

Liénard denklemi

$$\frac{d^2x}{dt^2} + f(x)\frac{dx}{dt} + g(x) = 0 \quad (1)$$

olarak verilir [8]. Van der Pol denklemi Liénard denklemi'nin özel bir hâlidir ve

$$\frac{d^2V}{dt^2} - \frac{a}{c}(1 - V^2)\frac{dV}{dt} + \frac{1}{LC}V = 0 \quad (2)$$

olarak verilir ve bir VDPO'yu tanımlar. Burada $V(t)$ Şekil 2'de görülen VDPO'daki devre elemanlarının gerilimini tanımlar. Şekil 6'da görülen devre elemanları paralel bağlı olduğundan, kondansatörün, endüktörün, ters-paralel Schottky diyot dizisinin ve negatif direnç dönüştürücü devresinin gerilimleri birbirine eşittir:

$$V = V_c = V_L = V_N = V_{Dizi} \quad (3)$$

Burada endüktörün gerilimi V_L , kondansatörün gerilimi V_c , negatif direnç dönüştürücünün gerilimi V_N , ters-paralel Schottky diyot dizisinin gerilimi V_{Dizi} 'dir.

Bir Schottky diyotun genel akım denklemi, Shockley diyot denklemi ile verilir [22]:

$$i_D = i_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (4)$$

Burada V_D Schottky diyot gerilimi, i_D Schottky diyot akımı, i_s Schottky diyotun tıkama akımı, n Schottky diyotun ideallik katsayısı ve V_T termal gerilimdir.

Ters-paralel bağlı bir Schottky diyot çiftinin toplam akımı, N tane ters-paralel diyot çifti seri bağlanırsa;

$$i_{Dizi} = i_{D1} - i_{D2} = i_s \left(e^{\frac{V_{Dizi}}{nV_T}} - e^{-\frac{V_{Dizi}}{nV_T}} \right) \quad (5)$$

$$i_{Dizi} = i_{D1} - i_{D2} = 2i_s \sinh \left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right) \quad (6)$$

olarak yazılabilir.

Denklem (6)'daki sinh terim Maclaurin serisine açılır ve sadece ilk 2 terim alınırsa:

$$\sinh \left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right) \approx \frac{V_{Dizi}}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right)^3}{3!} \quad (7)$$

bulunur. Böylece ters-paralel Schottky diyot dizisinin akımı

$$i_{Dizi} \approx 2i_s \left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V_{Dizi}}{nV_T} \right)^3}{3!} \right) \quad (8)$$

olarak elde edilir.

Negatif direnç dönüştürücü devresinin giriş akımı

$$i_{neg} = i_N = g_N V_N = -V_N \frac{R_2}{R_1 * R_3} \quad (9)$$

olarak verilir.

Ters-paralel bağlı Schottky diyot dizisinden ve negatif direnç dönüştürücü devresinden oluşan nonlineer negatif direncin akım denklemi:

$$i_{Nr} = i_{Dizi} + i_N \quad (10)$$

olarak verilir. Lineer zamanla değişmeyen endüktörün akım denklemi:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t V_L dt + i_L(0) \quad (11)$$

olarak verilir. Kondansatörün uç denkleminin

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (12)$$

olduğu hatırlanır ve Kirchoff'un Akımlar Kanunu kullanılırsa:

$$i_c + i_{Nr} + i_L = 0 \quad (13)$$

Denklemi elde edilir. Denklem (13)'te devre elemanlarının uç denklemleri yerine yazılır ve yeniden düzenlenirse;

$$C \frac{dV}{dt} + \left(2i_s \left(\frac{V}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V}{nV_T} \right)^3}{3!} \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} V \right) + \frac{1}{L} \int_0^t V dt + i_L(0) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{C} \left(2i_s \left(\frac{V}{nV_T} + \frac{\left(\frac{V}{nV_T} \right)^3}{3!} \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} V \right) + \frac{1}{LC} \int_0^t V dt + \frac{1}{C} i_L(0) = 0 \quad (15)$$

Denklem (15)'in türevi alınır ve yeniden düzenlenirse

$$\frac{d^2V}{dt^2} + \frac{1}{C} \left(2i_s \left(\frac{1}{nV_T} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{nV_T} \right)^2 V^2 \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) \right) \frac{dV}{dt} + \frac{1}{LC} V = 0 \quad (16)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -\frac{1}{C} \left(2i_s \left(\frac{1}{nV_T} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{nV_T} \right)^2 V^2 \right) - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) \right) \frac{dV}{dt} - \frac{1}{LC} V \quad (17)$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -\frac{1}{C} \left(\left(\frac{2i_s}{nV_T} - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) + i_s \left(\frac{1}{nV_T} \right)^3 V^2 \right) \frac{dV}{dt} - \frac{1}{LC} V \quad (18)$$

eşitliği elde edilir. Sadeleştirme için takip eden parametreler tanımlanacaktır:

$$c = \frac{2i_s}{nV_T} \quad (19)$$

$$a = -\left(c - \frac{R_2}{R_1 * R_3} \right) \quad (20)$$

$$b = i_s \left(\frac{1}{nV_T} \right)^3 \quad (21)$$

Bu parametreleri kullanarak Denklem (18) yeniden yazılırsa:

$$\frac{d^2V}{dt^2} = -\left(-\frac{a}{C} + \frac{bV^2}{C} \right) \frac{dV}{dt} - \frac{1}{LC} V \quad (22)$$

elde edilir.

İlaveten şu takip eden parametreler tanımlanacaktır:

$$\beta = \frac{b}{a} = 1 \quad (23)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (24)$$

$$\tau = \omega_1 t \quad (25)$$

$$\omega_1^2 = \frac{1}{LC} \quad (26)$$

μ , doğrusal olmayan sönümlenmenin, gücünü gösteren skaler parametredir [18] ve

$$\mu = \frac{a}{\omega_1 C} = \frac{a}{\frac{1}{\sqrt{LC}} C} = \frac{a}{\frac{C}{\sqrt{L}}} = a \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (27)$$

olarak verilir. Denklem (22) yeni tanımlanan parametrelerle yeniden düzenlenirse;

$$\frac{d^2 V}{d\tau^2} - \frac{a}{\omega_1 C} (1 - \beta V^2) \frac{dV}{d\tau} + V = 0 \quad (28)$$

$$\frac{d^2 V}{d\tau^2} = \mu(1 - V^2) \frac{dV}{d\tau} - V \quad (29)$$

$$\frac{d^2 V}{d\tau^2} - \mu(1 - V^2) \frac{dV}{d\tau} + V = 0 \quad (30)$$

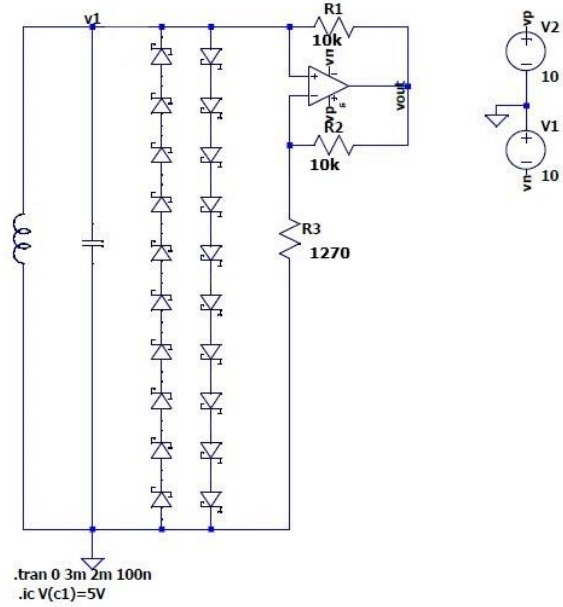
elde edilir. Denklem (30) bu çalışmada incelenen VDPO sisteminin ölçeklenmiş zaman yani τ cinsinden 2. dereceden bir denklem olarak ifadesidir. Van der Pol'ün tanımladığı denklemlerle uygun devreler Van der Pol Osilatörü olarak adlandırıldığından, bu çalışmada incelenen devrenin bir VDPO'yu tanımladığı gösterilmiştir.

4. VDPO Devresinin Benzetimi

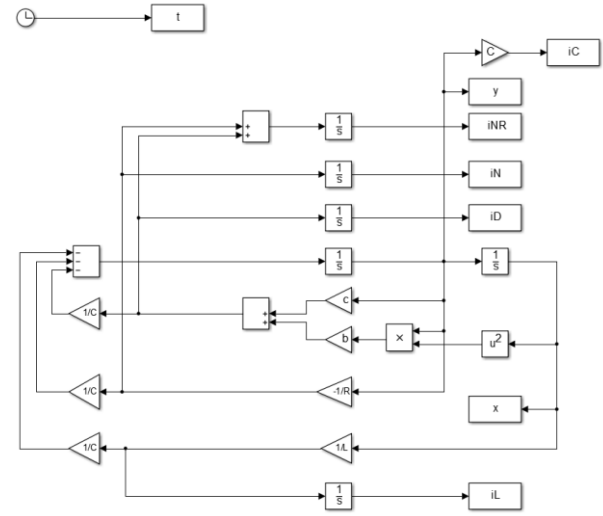
Bu bölümde LTspice kullanarak Şekil 7'de görülen VDPO devresinin ve Simulink kullanarak Şekil 8'de görülen blok diyagramı ile üçüncü bölümde türetilen VDPO denkleminin benzetimi yapılmıştır. LTspice kütüphanesinde mevcut olan 1N5817 Schottky diyotu benzetimlerde kullanılmıştır. Tablo 1'de VDPO'nun LTspice ile benzetiminde kullanılan parametreler verilmiştir. Tabloda verilen parametreler kullanılarak $\mu = 4,92$ olarak hesaplanmıştır. Ters-paralel bağlı aktif diyot çifti sayısı, $N = 10$ seçildiğinden, toplamda 20 adet Schottky diyot kullanılmıştır. Denklem (22)'de a ve b değerlerinin birbirine eşit ($a = b$) olması için R_1, R_2 ve R_3 uygun şekilde seçilmiştir.

Tablo 1. Van der Pol Osilatörü Devresinin Parametreleri

Devre Parametresi	Değeri
i_s	31,7 μA (25 °C'ta)
R_s	0,051 Ohm
C_{jo}	190 pF
N	10
n	1,373
V_T	26 mV (25 °C'ta)
C	2 nF
L	100 mH
R_1	10 kOhm
R_2	10 kOhm
R_3	1,27 kOhm



Şekil 7: Paralel Van der Pol Osilatörü'nün LTspice ile Modellenmesi

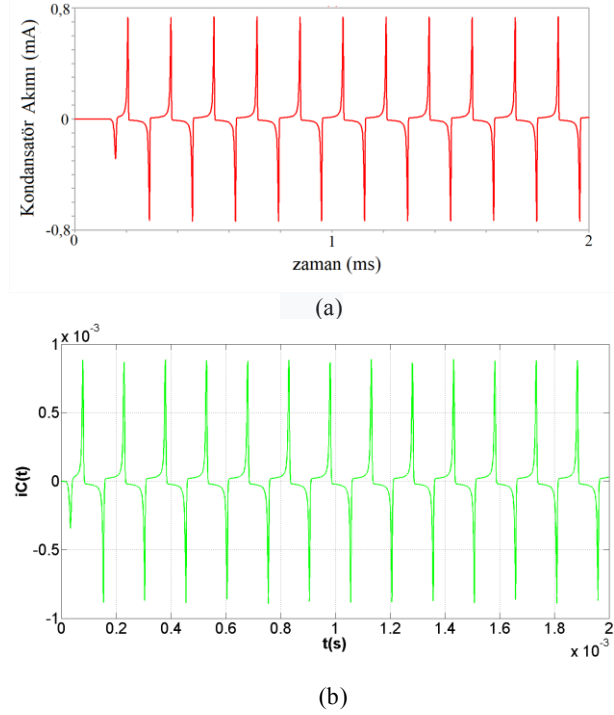


Şekil 8: Paralel Van der Pol Osilatörü'nün Simulink ile Modellenmesi

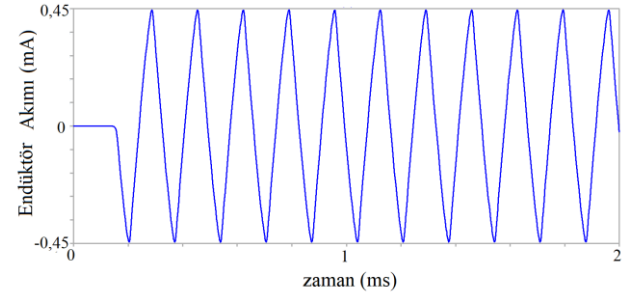
Devrenin benzetimi her iki programda da 2ms için yapılmıştır. Her iki programda yapılan benzetimler sonucunda elde edilen devre elemanlarının akımlarının ve gerilimlerinin zamana göre değişimleri, devredeki değişkenlerin sınır döngüleri, bazı devre elemanlarının $v-i$ karakteristikleri takip eden şekillerde verilmiştir. Şekil 9-12'deki grafiklerde VDPO'nun geçici durumdan çıkarak kalıcı duruma geçtiği görülmektedir. Periyodik kararlı hâlde akımların ve gerilimin içinde harmonikler olduğu görülmektedir.

Tablo 1’de 1N5817 Schottky diyotun kontak direnci R_s ve eklem kapasitansı C_{jo} da verilmiştir. Bu parametreler üçüncü bölümde VDPO’nun analizinde kullanılmamıştır. Bu değerlerden dolayı Simulink’te ve LTspice’ta yapılan benzetim sonuçları arasında farklar bulunmaktadır.

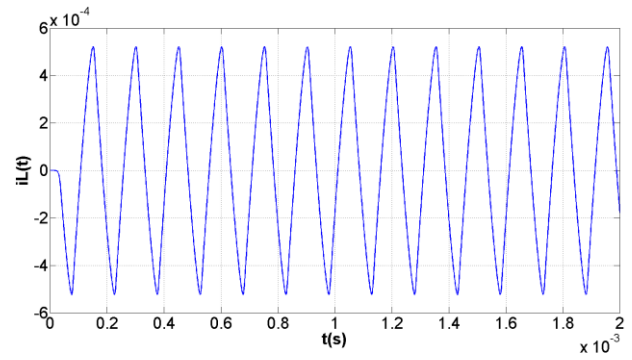
VDPO’nun kondansatör akımının zaman göre değişimi Şekil 9’da verilmiştir. Simulink’te bulunan kondansatör akımı LTspice’ta bulunandan neredeyse % 25 daha yüksektir ama Şekil 10’da verilen VDPO’nun endüktör akımı her iki program için de hemen hemen aynı değere sahiptir. Şekil 11’de görülen VDPO gerilimi Simulink’te neredeyse % 30 daha yüksek bulunmuştur. Şekil 12’de Schottky diyot dizilerinin akımları verilmiştir. Simulink’te elde edilen Schottky diyot dizi akımı hemen hemen % 35 daha yüksektir. Şekil 12.a’da LTspice’tan elde edilen benzetim sonucunda Schottky diyot dizilerinde her bir kolun sadece bir yöne akım geçirmekte olduğu görülebilir. Her iki programda elde edilen tüm dalga şekilleri birbirine benzerdir ancak genlikleri farklıdır.



Şekil 9: VDPO Kondansatörünün a) LTspice Programında ve b) Simulink’te Elde Edilen Akımı

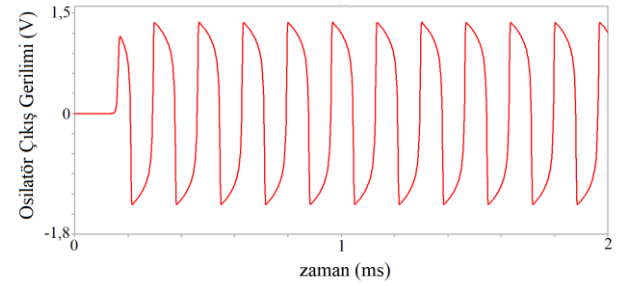


(a)

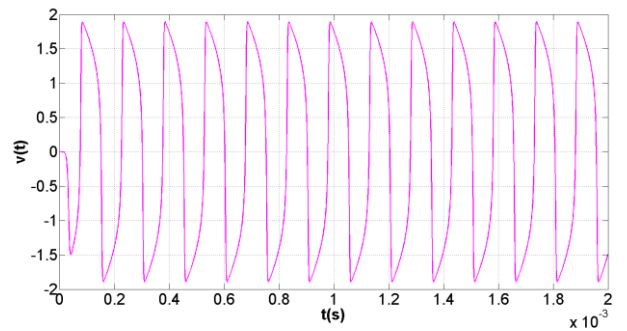


(b)

Şekil 10: VDPO Endüktörünün a) LTspice Programında ve b) Simulink’te Elde Edilen Akımı

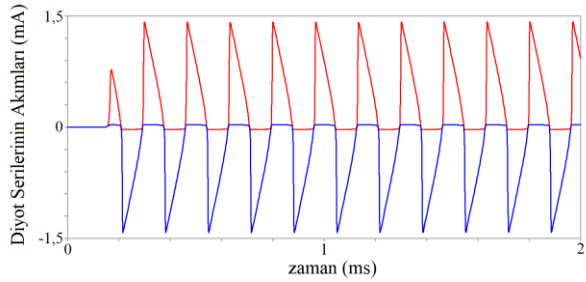


(a)

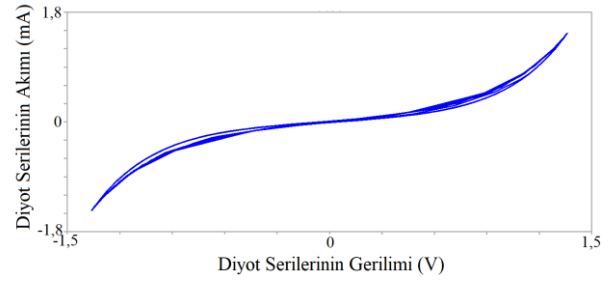


(b)

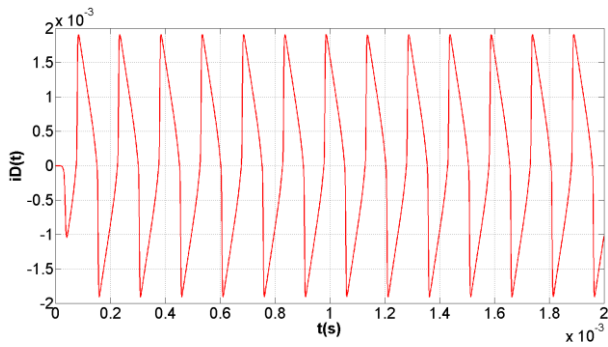
Şekil 11: Devre Geriliminin a) LTspice Programında ve b) Simulink’te Elde Edilen Zamana Göre Değişimi



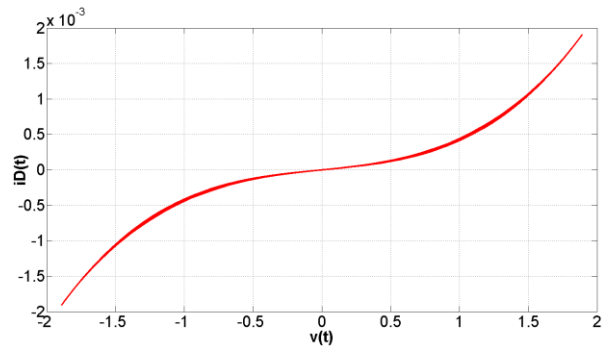
(a)



(a)



(b)

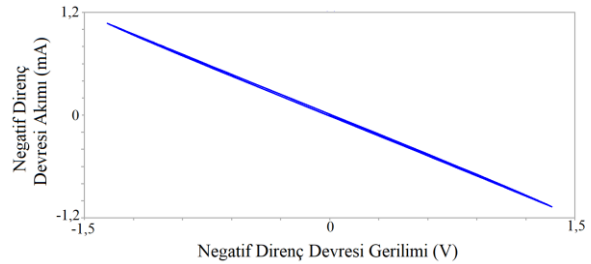


(b)

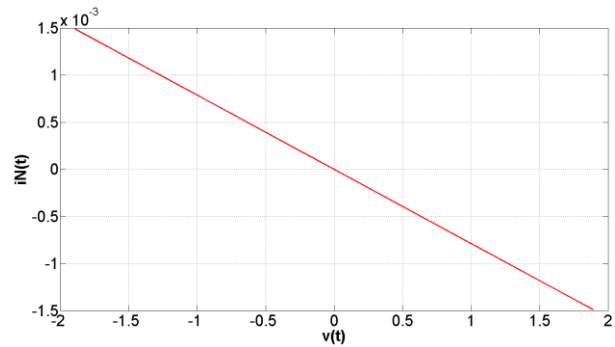
Şekil 12: VDPO Schottky Diyot Dizisinin a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen Akımı

Şekil 13: Ters-paralel Schottky Diyot Dizisinin a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen $V-I$ Karakteristiği

Şekilde 13'te görüldüğü üzere LTspice'teki diyot karakteristiği ile ideal diyot denkleminin verdiği diyot karakteristiği aynı değildir. Bu LTspice'ta 1N5817 Schottky diyotunun üçüncü bölümde kullanılan daha gelişmiş bir modeli olmasından kaynaklanmaktadır. Buna rağmen Şekil 13'te görüldüğü gibi ters-paralel Schottky diyot dizisinin geriliminin akımına göre değişimi grafiği sinüs hiperbolik fonksiyonu andırmaktadır. Şekil 14'te görüldüğü üzere negatif direnç dönüştürücü karakteristiği her iki program için de aynıdır. Şekil 15'te görüldüğü üzere diyot modelinden kaynaklı olarak eşdeğer negatif direnç karakteristikleri birbirinden farklıdır. Buna rağmen Şekil 15.a'da LTspice kullanılarak elde edilen nonlinear negatif direncin $v-i$ karakteristiği kübik bir fonksiyona benzemektedir. Üçüncü bölümde sinh fonksiyonunun Maclaurin serisinden alınan ilk iki terim ile modellenen nonlinear negatif direncin $v-i$ karakteristiği ise bir kübik fonksiyondur. Şekil 15.b'de Simulink'te elde edilen $v-i$ karakteristiği geçici hâl analizinden ve programdaki sayısal analiz hatalarından dolayı kübik fonksiyonun eğrisi civarında kalmaktadır.

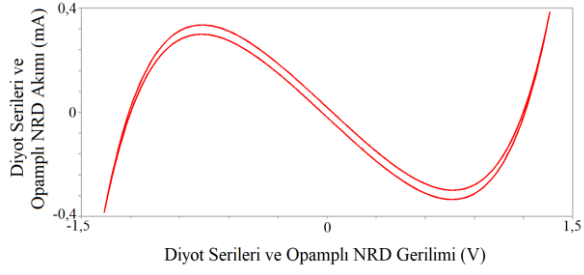


(a)

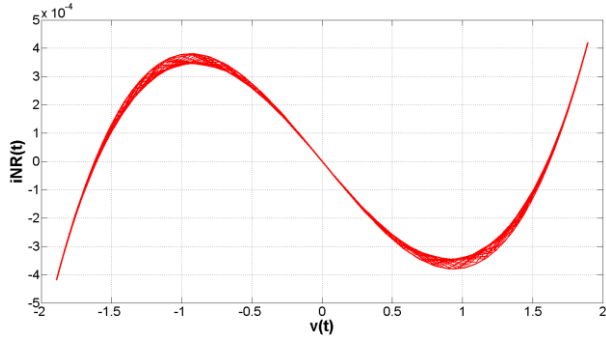


(b)

Şekil 14: Negatif Direnç Dönüştürücünün a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen $V-I$ Karakteristiği



(a)

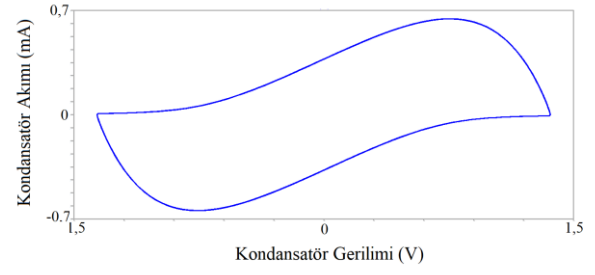


(b)

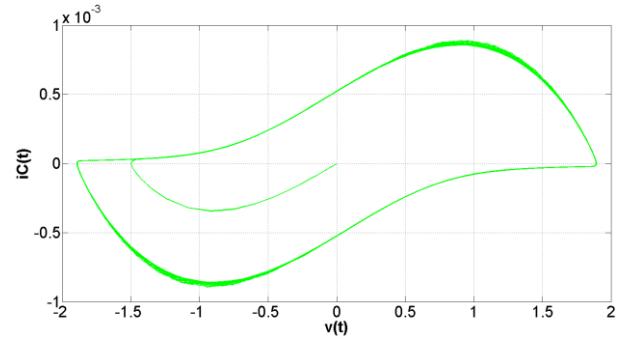
Şekil 15: Nonlineer Negatif Direncin a) LTspice Programında ve b) Simulink'te Elde Edilen $V-I$ Karakteristiği

Kalıcı hâlde sınır döngüsüne erişildiği Şekil 16 ve 17'de görülebilir. Şekil 16'da verilen her iki programda elde edilen VDPO gerilimi ve kondansatör akımı sınır döngüleri benzer şekillere sahiptir ama bu değişkenlerin genlikleri farklıdır. Şekil 17'de verilen her iki programda elde edilen VDPO gerilimi ve endüktör akımı sınır döngüleri de benzer şekillere sahiptir ama farklı genliklere sahiptir.

Daha önce belirtildiği üzere her iki programda elde edilen tüm dalga şekilleri birbirine benzemesine rağmen genlikleri farklıdır. Bu farklılıkların temelde nedeninin kullanılan diyotun modellenmesinde Shockley diyot denkleminin yetersiz kalmasından kaynaklandığı söylenilebilir. Hatanın bir diğer nedeni ise üçüncü bölümde yapılan analizde hesaba katılmayan ama 1N5817 Schottky diyotlarının sahip olduğu eklem kapasitansı ve kontak dirençleridir. LTspice'ta hesaba katılan bu parametrelerden dolayı LTspice'ta bulunan diyot dizisinin gerilimi ve akımı daha düşüktür. Farklılıkların diğer bir nedeni ise üçüncü bölümde diyotun akımı Maclaurin serisine açılıp sadece ilk iki terim alınmış olmasıdır. Gerçekte ters-paralel bağlı diyot dizisinin akımı hemen hemen sinh fonksiyonudur. Diyot dizisinin gerilimi arttığında Maclaurin serisinin alınmayan terimleri benzetim sonuçları arasında farklılık olmasına neden olmaktadır.

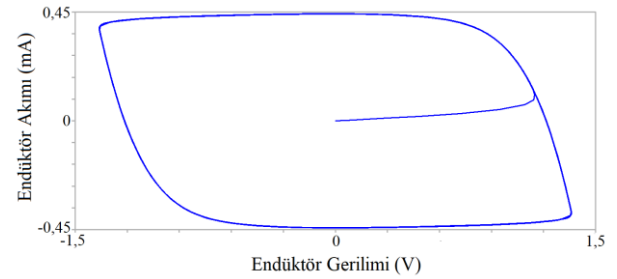


(a)

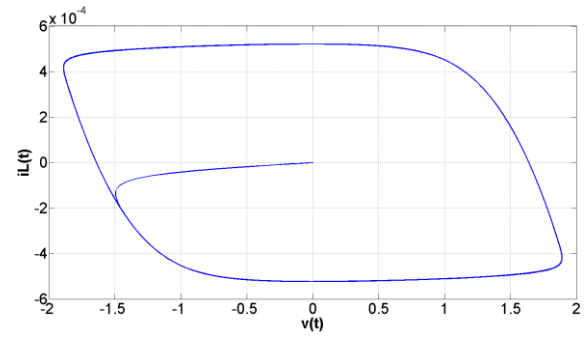


(b)

Şekil 16: a) LTspice programında ve b) Simulink'te Elde Edilen VDPO Gerilimi ve Kondansatör Akımı Sınır Döngüsü



(a)



(b)

Şekil 17: a) LTspice programında ve b) Simulink'te Elde Edilen VDPO Gerilimi ve Endüktör Akımı Sınır Döngüsü

5. Sonuç

Van der Pol Osilatörü, transistör, op-amp, tünel diyot, Schottky diyot, köprü diyot devre elemanları ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada Van der Pol Osilatörü'nün nonlineer direncini elde etmek için ters-paralel Schottky diyot dizisi ve negatif direnç dönüştürücüsüne sahip bir topoloji kullanılmıştır. Van der Pol Osilatörü bu nonlineer direnci, endüktörü ve kondansatörü paralel bağlayarak oluşturulmuştur. Devrenin diferansiyel denklemleri türetilmiş ve VDPO olarak çalıştığı gösterilmiştir. VDPO'nun benzetimi LTspice ve Simulink programlarında yapılmıştır. Benzetim sonucunda, VDPO devre elemanlarının akımlarının ve geriliminin zamana göre değişimleri, devre elemanlarının $v-i$ grafikleri ve sınır döngüsü verilmiş, Schottky diyotlar kullanılarak da VDPO yapılabileceği gösterilmiştir. Schottky diyotların modelinin üçüncü bölümde kullanılan modelden daha karmaşık olmasından dolayı LTspice ve Simulink benzetimlerinden elde edilen akım ve gerilimlerin genlikleri arasında % 30 civarı bir fark bulunmaktadır. Bu fark daha gerçekçi bir diyot modeli kullanılarak azaltılabilir.

Kaynaklar

- [1] B. van der Pol, "A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations", *Radio Review*, 1, pp. 701–710, 754–762, 1920.
- [2] B. Van der Pol, LXXXVIII. On "relaxation-oscillations", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 978-992, 1926.
- [3] B. Van der Pol, J. Van Der Mark, "Frequency demultiplication", *Nature*, 120(3019), 363-364, 1927.
- [4] B. van der Pol, "The nonlinear theory of electric oscillations", *Proc. IRE*, 22, pp. 1051–1086, 1934.
- [5] M. L. Cartwright, "Balthazar van der Pol", *J. London Math. Soc.*, 35, pp. 367–376, 1960.
- [6] M. L. Cartwright, "I. Van der Pol's Equation for Relaxation Oscillations", In *Contributions to the Theory of Nonlinear Oscillations (AM-29), Volume II*, Princeton University Press., (pp. 1-18), 2016.
- [7] A. Liénard, "Etude des oscillations entretenues," *Revue générale de l'électricité*, 23, pp. 901–912 and 946–954, 1928.
- [8] T. Marios, "Theoretical and Numerical Study of the Van der Pol equation", *Dissertation*, 2006.
- [9] J. M. Ginoux, C. Letellier, "Van der Pol and the history of relaxation oscillations: Toward the emergence of a concept", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 22(2), 023120, 2012.
- [10] J. Gleick, M. Berry, "Chaos-making a new science", *Nature*, 330, 293, 1987.
- [11] S. Ahmad, "Study of Non-linear Oscillations Using Tunnel Diode", *Doctoral dissertation*, 1962.
- [12] T. J. Slight, B. Romeira, L. Wang, J. M. Figueiredo, E. Wasige, C. N. Ironside, "A Liénard oscillator resonant tunnelling diode-laser diode hybrid integrated circuit: model and experiment", *IEEE journal of quantum electronics*, 44(12), 1158-1163, 2008.
- [13] L. Wang, "Reliable design of tunnel diode and resonant tunnelling diode based microwave sources", *Doctoral dissertation*, University of Glasgow, 2012.
- [14] J. Casaleiro, L. B. Oliveira, A. C. Pinto, "Van der Pol Approximation Applied to Wien Oscillators", *Procedia Technology*, 17, 335-342, 2014.
- [15] J. Brechtel, X. Xie, P. K. Liaw, "Investigation of chaos and memory effects in the Bonhoeffer-van der Pol oscillator with a non-ideal capacitor", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 73, 195-216, 2019.
- [16] M. Dursun, E. Kaşifoğlu, "Design and implementation of the FPGA-based chaotic van der pol oscillator", *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(3), 309-314, 2018.
- [17] Makoto Itoh, Leon O. Chua, "Dynamics of memristor circuits", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 24(05), 1430015, 2014.
- [18] J. R. M. Pone, S. Çiçek, S. T. Kingni, A. Tiedeu, M. Kom, "Passive-active integrators chaotic oscillator with anti-parallel diodes: analysis and its chaos-based encryption application to protect electrocardiogram signals", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 1-15, 2019.
- [19] K. Srinivasan, V. K. Chandrasekar, A. Venkatesan, I. R. Mohamed, "Duffing-van der Pol oscillator type dynamics in Murali-Lakshmanan-Chua (MLC) circuit", *Chaos, Solitons & Fractals*, 82, 60-71, 2016.
- [20] B. Bao, H. Wu, L. Xu, M. Chen, W. Hu, "Coexistence of multiple attractors in an active diode pair based Chua's circuit", *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 28(02), 1850019, 2018.
- [21] T. Kanamaru, "Van der Pol oscillator", *Scholarpedia*, 2(1), 2202, 2007.
- [22] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, "Electronic devices and circuit theory", *Pearson Education India*, 2009.
- [23] Electronics Tutorials, URL: https://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_4.html (Erişim Zamanı; Mart 9, 2021)
- [24] Wilderness Labs, Electronics, General Diodes, URL: http://developer.wildernesslabs.co/Hardware/Tutorials/Electronics/Part6/General_Diodes/ (Erişim Zamanı; Mart 10, 2021)
- [25] G. Mykolaitis, A. Tamaševičius, S. Bumelienė, A. Namajūnas, K. Pyragas, V. & Pyragas, "Application of ultrafast Schottky diodes to high megahertz chaotic oscillators", *Acta Physica Polonica A*, vol. 107, no. 2, p. 365, 2005.

[26] Alldatasheet,

URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/479637/LUGUANG/1N5819.html>

(Erişim Zamanı; Mayıs 13,2021)

Kübra ÇAKIR



Kübra ÇAKIR, 1999 yılında Çanakkale’de doğdu. 2019 yılında İstanbul Üniversitesi Yönetim Bilişim Sistemleri bölümünü okumaya başlamıştır. 2020 yılında Anadolu Üniversitesi Adalet bölümünü tamamladı. 2017 yılında okumaya başladığı Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünün stajlarını TEİAŞ Çanakkale İşletme ve Bakım Müdürlüğü’nde ve Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi’nde yapmıştır. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden 2021 yılında mezun olmuştur. 2021 yılında başladığı Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü yüksek lisans programında okumaktadır. Osilatör devreleri üzerine kendisini geliştirmeye devam etmektedir.

Doç. Dr. Reşat MUTLU



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

Dr. Öğr. Üyesi Ertuğrul KARAKULAK



Dr. Öğr. Üyesi 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.