152099

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK DEVRELERDE YÜKSEK FREKANSLI KAOTİK OSİLATÖRLERİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ

Tezi Hazırlayan
Fatma YILDIRIM

Tezi Yöneten
Prof. Dr. Mustafa ALÇI

152099

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2004
KAYSERİ

Bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

..26../.07../2004

JÜRİ:

Üye : Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN

Üye : Prof. Dr. Mustafa ALÇI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ...28.-07.-2004..... tarih ve .....4.....g..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../2004

Prof. Dr. İlhan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü
Mühür ve İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen ve tez danışmanlığımı yürüten hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa ALÇI' ya, tezin hazırlanması sırasında, görüş ve yardımlarına başvurduğum Sayın Doç. Dr. Recai KILIÇ' a teşekkürlerimi sunarım

Geç saatlere kadar bana eşlik eden, zaman zaman çalışmalarıma yardımcı olan arkadaşlarım Arş. Gör. İlker DALKIRAN' a ve Arş. Gör. Nurettin ÜSTKOYUNCU' ya şükranlarımı sunarım.

Beni bu günlere getiren, maddi-manevi desteğini esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.

ELEKTRONİK DEVRELERDE YÜKSEK FREKANSLI KAOTİK OSİLATÖRLERİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİMİ

ÖZET

Biyoloji, tıp, mühendislik gibi bir çok bilim dalında ortaya çıkan kaos, başlangıç şartlarına aşırı derecede bağlı olan, zaman domeninde bir rastgelelik sergileyen ve sınırlı yineleyen hareket olarak adlandırılmaktadır. Başka bir deyişle kaos, kısaca düzensizliğin düzeni olarak da tanımlanmaktadır. Geçmişten günümüze kadar gerçekleştirilen elektronik devrelerde, karşılaşılan kaotik davranışlar tanımlanamamış ve çoğu zaman bu davranışlar matematiksel olarak modellenemediği için gürültü olarak nitelendirilmiştir.

1983' de Kaliforniya Üniversitesinde görev yapan Prof. Dr. Leon O.Chua' nın kendi ismiyle anılan ve kaotik osilasyonlar üreten Chua devresini geliştirmesiyle elektronik devrelerde kaosun varlığı ortaya konmuştur. Chua devresi, kaosun matematiksel ve deneysel olarak ispatlandığı ilk fiziksel sistem olmuştur.

Kaotik osilatör; sınırlı, periyodik olmayan, gürültü benzeri osilasyon yapan, girişinde bir işaret olmasa bile rastgele davranıyormuş gibi görünen deterministik bir sistem olarak tanımlanabilir. Kaotik osilatörler, kaotik LC ve RC osilatörleri olmak üzere iki alt grupta incelenebilir. Bu çalışmada kaotik LC osilatörü olarak Chua osilatörü, akım geribeslemeli işlemsel kuvvetlendirici (Current Feedback Operational Amplifier, CFOA)-tabanlı Chua diyodu kullanılarak gerçekleştirilen Chua osilatörü, diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan kaotik Wien köprü osilatörü, kaotik Colpitts osilatörü, FET kullanılarak gerçekleştirilen kaotik Colpitts osilatörü ve dört boyutlu kaotik osilatör devreleri incelenmiştir. Kaotik RC osilatörü olarak ise Wien köprü-tabanlı Chua osilatörü, FET-C konfigürasyonu kullanılan CFOA-tabanlı Wien köprü osilatörü ve basit kaotik RC osilatörü üzerinde durulmuştur.

Bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedilen osilatör tiplerinin özellikle yüksek frekans performansları hem nümerik çözümlerle hem de PSpice benzetimleri ile incelenmiş, bu yapılar, deneysel olarak gerçekleştirilerek performanslarında mümkün olan iyileştirilmeler yapılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde kaosun tanımı yapılmış, elektronik devrelerde kaos açıklanmış, kaotik osilatörlerle ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve tezin amacı verilmiştir.

İkinci bölümde, sinüzoidal osilatörler ve doğrusal osilatörden doğrusal olmayan osilatörlere geçişten bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, literatürde yer alan kaotik osilatör tipleri tanıtılmış, bu osilatörlerin kaotik davranışları hem PSpice benzetimleri hem de nümerik çözümleri gerçekleştirilerek incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise tezin amacına yönelik olarak yapılan çalışmalar sunulmuştur. Bu bölümde üçüncü bölümde incelenen devrelerden bazılarının yüksek frekanslarda tatmin edici bir performans gösterebilmeleri için bazı iyileştirmeler yapılarak uyarlanan devreler tanıtılmıştır. Bu devrelerin kaotik davranışları, yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlara dayalı olarak verilmiştir.

Tezin beşinci ve son bölümünde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Kaos, Kaotik Osilatörler, Yüksek Frekanslı Kaotik Osilasyon, VOA, CFOA.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF HIGH FREQUENCY CHAOTIC OSCILLATORS IN ELECTRONIC CIRCUITS

SUMMARY

Chaos occurs in most of the scientific areas like biology, medicine and engineering, is extremely related with starting conditions, also behaviors randomly in time domain and is a restricted repeated motion. In other words chaos is shortly regularity of irregularity. Chaotic behaviors, in electronic circuits which have been realized up to now haven't described and these behaviors generally haven't modeled mathematically hence have identified as a noise.

In 1983, Prof. Dr. Leon O. Chua at California University developed a circuit that generated chaotic oscillations and is called with his name, "Chua's circuit". Dependent to this in electronic circuits the existence of chaos was exposed. Chua's circuit is the first physical system in which existence of chaos was proved both mathematically and experimentally.

Chaotic oscillator makes limited, non-periodic, and noise-like oscillations, is a deterministic system which looks like behaving randomly while there is no signal at its input. Chaotic oscillators can be fallen into two sub-groups which are LC and RC oscillators. In this thesis, Chua' s oscillator, Chua' s oscillator with Current Feedback Operational Amplifier (CFOA)-based Chua' s diode, chaotic Wien bridge oscillator with diode-inductor composite, chaotic Colpitts oscillator, chaotic Colpitts oscillator with FET and four dimensional chaotic oscillator are examined as chaotic LC oscillators. Wien bridge-based Chua' s oscillator, CFOA-based Wien bridge oscillator with FET-C composite and simple RC chaotic oscillator are also investigated as chaotic RC oscillators.

In this thesis, especially high frequency performances of oscillator types mentioned above are investigated with both numerical analyses and PSpice simulations. These structures are realized experimentally and any improvements are made on their performance if it is possible.

In the first chapter, the meaning of chaos, chaos in electronic circuits, works on chaotic oscillators in literature, the aim of this thesis, are explained.

In the second chapter, sinusoidal oscillators and the crossing from linear oscillator to nonlinear oscillators are mentioned.

In the third chapter chaotic oscillator types in literature are introduced and chaotic behaviors of these oscillators are investigated with both numerical analyses and PSpice simulations.

In the fourth chapter, studies suitable for the aim of this thesis are proposed. In addition some circuits mentioned in third chapter are modified to achieve adequate performance and these modified circuits are presented. Chaotic behaviors of these circuits are given due to experimental studies.

In the fifth and the last chapter, achieved results are discussed and any possible further studies are proposed.

Key Words: Chaos, Chaotic oscillators, High Frequency Chaotic Oscillations, VOA, CFOA.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	**I**
TEŞEKKÜR	**II**
ÖZET	**III**
SUMMARY	**V**
İÇİNDEKİLER	**VII**
KISALTMALAR	**X**
TABLOLAR LİSTESİ	**XI**
ŞEKİLLLER LİSTESİ	**XII**
BÖLÜM 1	
1. GİRİŞ	**1**
1.1. Kaos Nedir?	**1**
1.2. Elektronik Devrelerde Kaos	**2**
1.3. Literatür Taraması	**2**
1.4. Çalışmanın Amacı	**4**
BÖLÜM 2	
2. OSİLATÖRLER	**5**
2.1. Giriş	**5**
2.2. Sinüzoidal Osilatörler	**6**
2.2.1. Wien Köprü-Tabanlı Sinüzoidal Osilatörler	**7**
2.2.1.1. Wien Köprü-Tabanlı Sinüzoidal Osilatörün PSpice Benzetimi	**8**
2.2.2. Colpitts Osilatörü	**9**
2.2.2.1. Colpitts Osilatörün PSpice Benzetimi	**9**
2.2.3. RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatör	**10**
2.2.3.1. RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatörün PSpice Benzetimi	**11**

2.3. Doğrusal Osilatörlerden Doğrusal Olmayan Osilatörlere Geçişte Kullanılan Yöntemler 12
2.3.1. Diyot-İndüktör (D-L) Konfigürasyonu 13
2.3.2. FET-Kapasitör (FET-C) Konfigürasyonu 14

BÖLÜM 3

3. KAOTİK OSİLATÖRLER 16

3.1. Giriş 16
3.2. Kaotik LC Osilatörler 16
3.2.1. Kaotik Chua Osilatörü 16
3.2.2. CFOA-Tabanlı Chua Diyodu Kullanılan Chua Osilatörü 18
3.2.3. Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü 22
3.2.4. Kaotik Colpitts Osilatörü 25
3.2.5. FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörü 29
3.2.6. 4 Boyutlu Kaotik Osilatör 32
3.3. Kaotik RC Osilatörler 35
3.3.1. Wien Köprü-Tabanlı Chua Osilatörü 35
3.3.2. FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü 39
3.3.3. Basit Kaotik RC Osilatör 43

BÖLÜM 4

4. KAOTİK OSİLATÖRLERİN YÜKSEK FREKANS UYARLAMALARI VE DENEYSEL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ 47

4.1. Giriş 47
4.2. Yüksek Frekanslı Çalışma Moduna Uyarlanan Kaotik Osilatörler 47
4.2.1. RC-1 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi 47
4.2.2. RC-2 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi 49
4.2.3. RC-3 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi 53
4.2.4. RC-4 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi 55
4.2.5. RC-5 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi 58
4.2.6. RC-6 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi 60

BÖLÜM 5

5. SONUÇ **66**

KAYNAKLAR **69**

ÖZGEÇMİŞ **73**

KISALTMALAR

N_R	Doğrusal Olmayan Direnç, Chua Diyodu
CFOA	Akım Geribeslemeli İşlemsel Kuvvetlendirici (Current Feedback Operational Amplifier)
VOA	Voltaj Modlu İşlemsel Kuvvetlendirici (Voltage-Mode Operational Amplifier)
OTA	İşlemsel Geçiş İletkenliği Kuvvetlendiricisi (Operational Transconductance Amplifier)
CCII	İkinci Kuşak Akım Taşıyıcı (The Second Generation Current Conveyor)
FTFN	Dört Terminalli Değişken Nullor (Four Terminal Floating Nullor)
FET-C	FET-Kapasitör (FET-Capacitor)
BJT	İki Eklemli Transistör (Bipolar Junction Transistor)
NIC	Negatif İmpedans Dönüştürücü (Negative Impedance Converter)

TABLOLAR LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 3.1	Kaotik Osilatör Devrelerinin Birbirleri ile Karşılaştırılması	46
Tablo 4.1	İncelenen Kaotik Osilatörlerin Birbirleri ile Karşılaştırılması	65

ŞEKİLLER LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Sinüzoidal Osilatör Yapısının Blok Diyagramı	6
Şekil 2.2	Klasik Wien Köprü Osilatörü	7
Şekil 2.3	Wien Köprü Osilatör Devresi	8
Şekil 2.4	Wien Köprü Osilatör Devresinin $V_o(t)$ Devre Dinamiği	8
Şekil 2.5	Klasik Colpitts Osilatörü	9
Şekil 2.6	Colpitts Osilatör Devresi	10
Şekil 2.7	Colpitts Osilatör Devresinin $V_o(t)$ Devre Dinamiği	10
Şekil 2.8	Klasik RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatör	10
Şekil 2.9	RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatör Devresi	11
Şekil 2.10	RC-Tabanlı Osilatör Devresinin $V_i(t)$, $V_o(t)$ Devre Dinamikleri	12
Şekil 2.11	Diyot-İndüktör (D-L) Konfigürasyonları	14
Şekil 2.12	FET-C Konfigürasyonları	15
Şekil 3.1	Chua Osilatörünün (a) Devre Şeması, (b) Chua Osilatöründeki Doğrusal Olmayan Direncin Üç Parçalı Doğrusal Karakteristiği	17
Şekil 3.2	CFOA-Tabanlı Chua Devresinin (a) Devre Şeması, (b) DC Karakteristiği	19
Şekil 3.3	CFOA-Tabanlı Chua Osilatörünün Nümerik Çözümü	20
Şekil 3.4	CFOA-Tabanlı Chua Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $I_L(t)$ Kaotik Devre Dinamikleri, (b) (V_{C1}-V_{C2}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, (c) $V_{C1}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu	21
Şekil 3.5	Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü	22
Şekil 3.6	Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü	24

	Osilatörün Nümerik Çözümü	
Şekil 3.7	Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatör Devresinin, Kaotik $V_{C1}(t)$, $I_L(t)$ Devre Dinamikleri	24
Şekil 3.8	Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatör Devresinin, (a) (V_{C1}-I_L) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (b) $V_{C1}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu	25
Şekil 3.9	Kaotik Colpitts Osilatörünün (a) Devre Şeması, (b) Eşdeğer Devresi	26
Şekil 3.10	Kaotik Colpitts Osilatörünün Nümerik Çözümü	27
Şekil 3.11	Kaotik Colpitts Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $V_{CE}(t)$, $V_{BE}(t)$, $I_L(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (V_{CE}-V_{BE}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) $V_{BE}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu	28
Şekil 3.12	FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatör	29
Şekil 3.13	FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörün Nümerik Çözümü	30
Şekil 3.14	FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (V_{C1}-V_{C2}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) $V_{C1}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu	31
Şekil 3.15	4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresi	32
Şekil 3.16	4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresinin, (a) (Z-X) Düzlemindeki Nümerik Çözümü, (b) (Y-W) Düzlemindeki Nümerik Çözümü	33
Şekil 3.17	4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresinin, (a) (I_{L1}-V_{C1}) Düzlemindeki Çeker Gösterimi, (b) (V_{C2}-I_{L2}) Düzlemindeki Çeker Gösterimi	34
Şekil 3.18	4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresinin Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $I_{L1}(t)$ Devre Dinamikleri	35
Şekil 3.19	Wien Köprü-Tabanlı Chua Osilatörü	36
Şekil 3.20	Wien Köprü-Tabanlı RC Yapı İle Gerçekleştirilen Chua Osilatörünün Nümerik Çözümü	37
Şekil 3.21	Wien Köprü-Tabanlı Chua Devresinin (a) Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $V_{C3}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) Çift Çeker Yapısı, (c)	38

	$V_{C2}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu	
Şekil 3.22	FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü	39
Şekil 3.23	FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörün Nümerik Çözümü	41
Şekil 3.24	FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $V_{C3}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (V_{C2}-V_{C3}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çeker Yapısı	42
Şekil 3.25	Basit Kaotik RC Osilatör Devresi	43
Şekil 3.26	Basit Kaotik RC Osilatör Devresinin (a) *F(v)* Doğrusal Olmayan Devre Bloğu, (b) Devrenin DC Karakteristiği	44
Şekil 3.27	Basit Kaotik RC Osilatörün Nümerik Çözümü	44
Şekil 3.28	Basit Kaotik RC Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $v(t)$, $\dot{v}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (v-$\dot{v}$) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, (c) $\dot{v}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu	45
Şekil 4.1	RC-1 Osilatör Devresi	48
Şekil 4.2	RC-1 Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri, Üstteki İşaret V_{C1} (500 mV/div), Alttaki İşaret V_{C2} (500 mV/div), Time/div:5 µs/div, (b) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni:500 mV, Y-Ekseni:500 mV, (c) $V_{C2}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu	50
Şekil 4.3	RC-2 Osilatör Devresi	51
Şekil 4.4	RC-2 Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri, Üstteki İşaret V_{C1} (500 mV/div), Alttaki İşaret V_{C2} (1 V/div), Time/div:5 µs/div, (b) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni: 500 mV, Y-Ekseni: 500 mV, (c) $V_{C2}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu	52
Şekil 4.5	RC-3 Osilatör Devresi	53
Şekil 4.6	RC-3 Osilatör Devresinin Kaotik Devre Dinamikleri, (a) I_L (1 kΩ' luk Direnç İle) (50 mV/div), (b) V_{C1} (500 mV/div), Time/div: 10 µs/div	54
Şekil 4.7	RC-3 Osilatör Devresinin (a) (V_{C1}-I_L) Düzlemindeki Çeker	55

	Yapısı, X-Ekseni: 500 mV, Y-Ekseni: 50 mV, (b) $V_{C1}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu	
Şekil 4.8	RC-4 Osilatör Devresi	56
Şekil 4.9	RC-4 Osilatör Devresinin (a) $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$ Kaotik Devre Dinamikleri, (b) (V_{C1}-V_{C2}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) Kaotik Frekans Spektrumu	57
Şekil 4.10	RC-5 Kaotik Osilatör Devresinin, (a) Devre Şeması, (b) Devredeki L_2' nin Yerine Kullanılan İndüktör Simülatörü, (c) Devredeki L_1' in Yerine Kullanılan İndüktör Simülatörü	59
Şekil 4.11	RC-5 Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri, Üstteki İşaret V_{C2} (1 V/div), Alttaki İşaret V_{C1} (1 V/div), Time/div: 5 µs/div, (b) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni: 2 V, Y-Ekseni: 1 V, (c) $V_{C2}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu	61
Şekil 4.12	RC-6 Kaotik Osilatör Devresinin (a) Devre Şeması, (b) *F(v)* Doğrusal Olmayan Devre Bloğu	62
Şekil 4.13	RC-6 Kaotik Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri, Üstteki İşaret v (2 V/div), Alttaki İşaret ($-\dot{v}$) (200 mV/div), Time/div: 20 µs/div, (b) v-($-\dot{v}$) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni: 2 V, Y-Ekseni: 200 mV	63
Şekil 4.14	RC-6 Kaotik Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin Kaotik Frekans Spektrumu	64

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Kaos Nedir?

Biyoloji, tıp, mühendislik gibi bir çok bilim dalında ortaya çıkan kaos, başlangıç şartlarına bağlı olan, zaman domeninde bir rastgelelik sergileyen ve sınırlı yineleyen hareket olarak adlandırılmaktadır [1]. Başka bir deyişle kaos, kısaca düzensizliğin düzeni olarak da tanımlanmaktadır.

Mühendisliğin hemen hemen bütün dallarında ve diğer farklı bilim dallarında kaos varlığının ortaya konması ve konuyla ilgili çalışmalar yapılması sonucu kaos ve kaotik sistemlerle ilgili bir çok uygulama alanı ortaya çıkmıştır. Kaos ve kaotik sistemlerle ilgili ortaya çıkan uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir [2]:

- Kaotik paralel dağılımlı işleme,
- Deterministik doğrusal olmayan tahmin,
- Kimliklendirme ve doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi,
- Doğrusal olmayan filtreleme,
- Biyomedikal ve tıbbi uygulamalar,
- Dinamik bilgi sıkıştırma ve kodlama,
- Kaotik güvenilir haberleşme,
- Hassas desen tanıma,
- Kaotik dinamiklerin müzik ve sanat amaçlı kullanımı,
- Kaotik salınımların yapay olarak oluşturulması,
- Kaotik sistemlerin elektronik, optik ve optoelektronik olarak gerçekleştirimi,
- Kaotik titreşim ve osilasyonların belirlenmesi ve kontrol edilmesi.

1.2. Elektronik Devrelerde Kaos

Daha önceleri, gerçekleştirilen elektronik devrelerde, karşılaşılan kaotik davranışlar tanımlanmamış ve çoğu zaman bu davranışlar matematiksel olarak modellenemediği için gürültü olarak nitelendirilmiştir. Bu duruma en iyi örnek, Hollandalı elektrik mühendisi ve fizikçisi Van der Pol' ün harici kaynakla sürülen bir neon lamba osilatörü üzerinde yaptığı deneysel çalışmadır. Van der Pol, 1927 yılında Nature Magazine adlı dergide [1] çıkan makalesinde, bu devreyle ilgili çalışmaları sırasında sıklıkla düzensiz bir davranış gözlemlediğini ve kendisi için bu davranışın anlamsız olduğunu ifade etmiş, üzerinde daha fazla durmaya gerek görmemiştir. Van der Pol' ün gürültü olarak adlandırdığı ve ilgilenmediği bu davranışların daha sonraları kaotik bir devre dinamiği olduğu anlaşılacaktır [3].

1983' de Kaliforniya Üniversitesinde görev yapan Prof. Dr. Leon O.Chua' nın kendi ismiyle anılan ve kaotik osilasyonlar üreten Chua devresini geliştirmesiyle elektronik devrelerde kaosun varlığı ortaya konmuştur [4]. Chua devresi, kaosun matematiksel ve deneysel olarak ispatlandığı ilk fiziksel sistem olmuştur.

Elektronikte kaos ve kaotik işaretlerin konu edildiği çok sayıda araştırma ve çalışma yapılmış olup, bu alanda birçok uygulama gerçekleştirim aşamasına gelmiştir. Bunlar:

- Güvenli haberleşme sistemleri,
- Kaotik modülatör ve demodülatör,
- Sayısal filtreler,
- Anahtarlamalı kapasitör devreleri,
- PLL' li yapılar,
- Adaptif filtreler,
- Beyaz gürültü üreteci ile işaret işleme,
- Güç devreleri

gibi pek çok elektronik devre ve sistem kaotik davranış sergilemektedir [5].

1.3. Literatür Taraması

Kaotik olgu üzerinde, bir çok araştırmacı tarafından oldukça uzun zamandan beri çalışılmaktadır ve bu çalışmalar halen kapsamlı bir şekilde devam etmektedir. Yapılan

bu çalışmaları geliştirmek için fiziksel kurallara çok uygun olan ve deneysel gerçekleştirimi kolaylıkla yapılabilen elektronik devre tasarımları çok önemlidir. Bu yüzden kaos ile ilgili yapılan çalışmalar, tasarlanan kaotik devrelerin gerçekleştirilebilmesi açısından da son derece önemlidir.

Diğer bir deyişle mühendislik açısından bakıldığında kaotik osilatör devrelerinin kullanıldığı kaotik haberleşme sistemleri, kaos kontrolü, kaotik şifreleme sistemi, kaos tabanlı gürültü üreteçleri gibi bir çok uygulamalar ile çok sayıda araştırmacı ilgilenmektedir.

Kaotik davranış sergileyen elektronik devreler ve bu devreler arasında kaos olayının anlaşılmasında büyük bir rol oynayan kaotik osilatör devreleri değişik kriterlere göre sınıflandırılabilir. Bu tez çalışmasında kaotik osilatörler, LC kaotik osilatörler ve RC kaotik osilatörler olmak üzere iki ana grupta incelenmiştir. LC kaotik osilatörlere Chua osilatörü, Colpitts osilatörü örnek olarak verilebilir. RC kaotik osilatörlere ise örnek olarak RC-tabanlı osilatörler, Wien köprü osilatörler verilebilir.

LC osilatörlerden kaotik Chua osilatörü, basit bir devre yapısına sahip olmasından dolayı kaos ve kaotik işaret uygulamalarında model devre olarak kabul edilmektedir [4]. Literatürde Chua devresinin çok sayıda alternatif tasarımı ve gerçekleştirimi yer almaktadır. Bu tasarım ve gerçekleştirimlerde kullanılan yöntemler, iki temel kategoriye ayrılabilirler. İlk yaklaşım, Chua devresindeki doğrusal olmayan direnci (N_R) gerçekleştirmek için çeşitli devre topolojilerini içermektedir. İkinci yaklaşımdaki temel fikir ise, Chua devresinin indüktörsüz olarak gerçekleştirimidir. Bu gerçekleştirimlerde çalışılan frekans sahası 3 kHz~827 kHz arasında değişmektedir [6-13].

LC osilatörlerden bir diğeri olan Kaotik Colpitts Osilatörü, basit yapısı ve yüksek frekanslarda sergilediği kaotik davranıştan dolayı dikkat çeken ve üzerinde çalışılan osilatör türü olup bu osilatörlerin gerçekleştiriminde aktif eleman olarak hem aktif bölgede hem de kesim bölgesinde çalışan iki kutuplu (bipolar) transistör veya akım geribeslemeli işlemsel kuvvetlendiriciler (Current Feedback Operational Amplifier, CFOA) kullanılmıştır [14-17].

Literatürde yer alan RC kaotik osilatörlerden biri Wien köprü tabanlı osilatördür. Bu osilatör, basit bir devre yapısına sahip olup, devreye eklenen değişik elemanlar

sayesinde (diyot-indüktör ve FET-C konfigürasyonu) farklı özellikte kaotik davranışlar sergilemektedir. Bu tip osilatörlerin gerçekleştiriminde aktif eleman olarak voltaj modlu işlemsel kuvvetlendirici (Voltage-Mode Operational Amplifier, VOA), işlemsel geçiş iletkenliği kuvvetlendirici (Operational Transconductance Amplifier, OTA), CFOA, ikinci kuşak akım taşıyıcı (The Second Generation Current Conveyor, CCII) tabanlı devre topolojileri kullanılmıştır [18-26].

Literatürde yer alan ve incelenecek olan bir diğer RC osilatör tipi de kaotik RC-tabanlı osilatördür. RC-tabanlı osilatörler, kaotik Chua osilatörü gibi basit bir devre yapısına sahip olup, gerçekleştirimlerinde aktif eleman olarak VOA, CFOA ve dört terminalli değişken nullor (Four Terminal Floating Nullor, FTFN)-tabanlı yapılar kullanılmıştır [27-29].

1.4. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, yüksek frekanslı kaotik osilatörlerin incelenmesi ve performanslarının iyileştirilmesine dönük tasarım ve deneysel gerçekleştirimi içeren çalışmaların yapılmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda tezin ikinci bölümünde doğrusal osilatörler ve doğrusal osilatörlerden doğrusal olmayan osilatörlere geçişten bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, literatürde yer alan kaotik osilatör tipleri ele alınarak, bu osilatörlerin kaotik davranışları hem PSpice benzetimi ile hem de nümerik çözümü gerçekleştirilerek incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, yüksek frekanslarda iyi performans sergileyecek tarzda tasarlanmış ve tasarımında düzenlemeler yapılmış değişik kaotik osilatör yapıları üzerinde durulmuştur. Ele alınan yapıların yüksek frekans performansları gerek bilgisayar benzetimleri ve gerekse de laboratuar deneyleri ile incelenmiştir.

Tezin beşinci ve son bölümünde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

BÖLÜM 2

OSİLATÖRLER

2.1.Giriş

Literatürde osilatör kavramı çeşitli şekillerde tanımlanmıştır. Osilatör, kararsız DC kutuplama noktasına sahip kuvvetlendirici olarak tanımlandığı gibi herhangi bir giriş işareti olmaksızın, çıkışında periyodik olan yada olmayan bir işaret üreten devre olarak da adlandırılabilir [30, 31]. Osilatör tasarımında, gürültü oranının düşük olması, yüksek hassasiyet, sıcaklık kararlılığı, band genişliği, düşük maliyet ve güvenilirlik gibi özellikler dikkate alınır. Genel olarak bir osilatör, üç ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar; kuvvetlendirici olarak davranan aktif bir eleman, sisteme pozitif geri besleme sağlayan geribesleme devresi ve genliği kararlı hale getirmek amacıyla kullanılan doğrusal olmayan kontrol mekanizmasıdır [31].

Osilatör devresinde kuvvetlendirici olarak kullanılan aktif eleman, girişine uygulanan elektriksel bir işareti distorsiyonsuz bir şekilde kuvvetlendirerek çıkışa aktarır. Bu elemanlar, kuvvetlendiricilerin yanı sıra, analog bilgisayarlarda, akım-gerilim ve gerilim-akım dönüştürücülerinde, gerilim takipçilerinde, aktif filtrelerde, hassas AC-DC dönüştürücülerde, tepe dedektörlerinde, A/D ve D/A dönüştürücülerde de yaygın olarak kullanılmaktadır [32].

Kuvvetlendiriciler, genel olarak, voltaj ve akım modlu olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. Bunlar da kendi içlerinde alt gruplara ayrılırlar. İncelenen devrelerde, blok veya tümdevre olarak VOA' lar ve CFOA' lar kullanılmıştır.

VOA' lar, tümdevrelerin gerçekleştirildiği ilk zamanlardan günümüze kadar analog devre tasarımında temel yapı bloğu olarak kullanılmaktadır. Ancak, voltaj modlu kuvvetlendiricilerin kazanç-band genişliği çarpımının sabit olması ve değişim hızlarının (slew rate) sınırlı olması yüksek frekanslı çalışmalarda bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Bu yüzden VOA' lara göre daha üstün avantajlar sunan CFOA' ların son zamanlarda gerçekleştirilen tasarımlarda, kullanımı artmıştır. CFOA' nın kazanç-band genişliği çarpımı kapalı çevrim kazancından bağımsız olup bu yapılar sabit band genişliğine (60MHz' in üzerinde) ve tipik olarak giriş işaretindeki 2000V/μs civarında yüksek değişim hızını algılayabilecek kabiliyete sahiptir [33].

Bu çalışmada üzerinde durulan kaotik osilatörler, iki veya daha yüksek dereceli deterministik sistemlerdir. Kaotik sistem davranışı, başlangıç şartlarına ve eleman değerlerinin değişimine hassas bir şekilde bağlıdır [1]. Kaotik osilatörler 3. Bölümde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

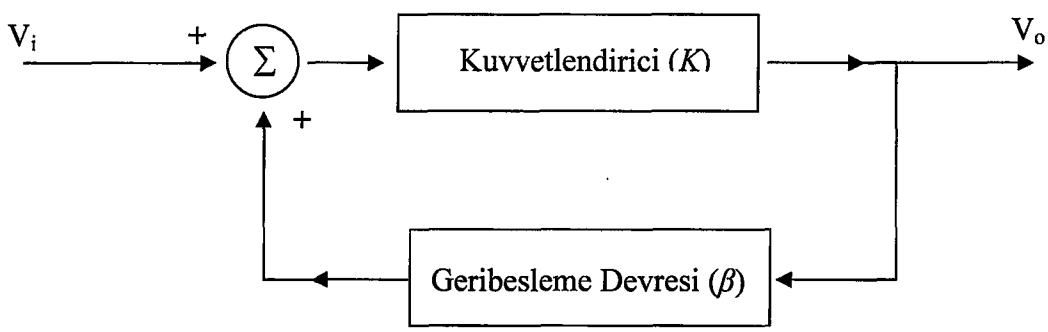
2.2. Sinüzoidal Osilatörler

Blok diyagramı Şekil 2.1' de verilen sinüzoidal osilatörler, temel olarak bir kuvvetlendiriciden ve bir pozitif geribesleme devresinden oluşmaktadır. Verilen yapının geribesleme kazancı;

$$K_f = \frac{K}{1-\beta K} \tag{2.1}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada K_f, kuvvetlendiricinin geribesleme kazancı, β, geribesleme oranı, K, geribeslemesiz transfer kazancıdır.

Denklem (2.1)' de (βK) çarpımı, çevre kazancı veya kapalı çevrim kazancı olarak adlandırılır. Denklemde $|\beta K|=1$ olduğu zaman K_f, sonsuza gider. Bu durum, sistem girişine bir işaret uygulanmadığında bile sistem çıkında bir işaret görülebileceğini



Şekil 2.1. Sinüzoidal Osilatör Yapısının Blok Diyagramı.

göstermektedir. Bir osilatör devresinin sinüzoidal işaret üretmesi için gerekli olan şart, osilatörün çevre kazancının $|\beta K|=1$ olması ve çevrenin toplam faz farkının sıfır veya 2π' nin tam katları şeklinde olmasıdır. Buna Barkhausen Kriteri denir [34].

Literatürde çalışması ve devre yapısı iyi tanımlanmış olan Colpitts ve Wien köprü osilatörleri gibi osilatör yapılarında kaotik davranışlar gözlendiği için takip eden bölümde bu osilatör yapılarına kısaca göz atılacaktır.

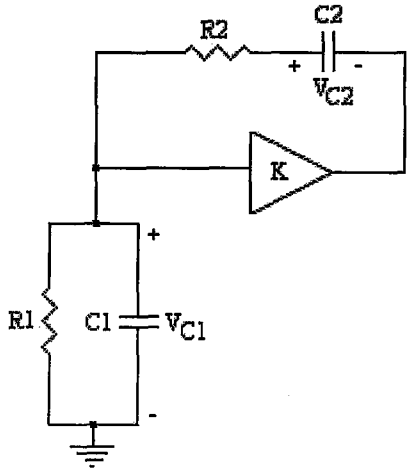
2.2.1. Wien Köprü-Tabanlı Sinüzoidal Osilatörler

Şekil 2.2' deki klasik Wien köprü osilatör yapısı, standart Wien köprü osilatör devresi olarak kullanılmaktadır. Bu klasik yapı, K kazancı ile evirmeyen voltaj kontrollü voltaj kaynağından oluşmaktadır. Devredeki kapasitörler eşit seçilerek ($C_1=C_2=C$) Denklem (2.2)' deki durum denklemleri tanımlanmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \end{bmatrix} = \frac{1}{C}\begin{bmatrix} \frac{K-1}{R_2}-\frac{1}{R_1} & \frac{-1}{R_2} \\ \frac{K-1}{R_2} & \frac{-1}{R_2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix}. \tag{2.2}$$

Osilasyon durumu, aşağıdaki denklem ile belirlenir:

$$\frac{1}{R_2 C} = \frac{1}{R_2 C}\left(K-1-\frac{R_2}{R_1}\right) \Rightarrow K = 2+\frac{R_2}{R_1} \tag{2.3}$$

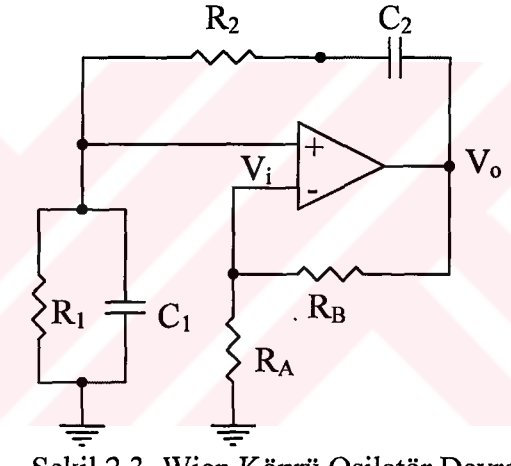


Şekil 2.2. Klasik Wien Köprü Osilatörü.

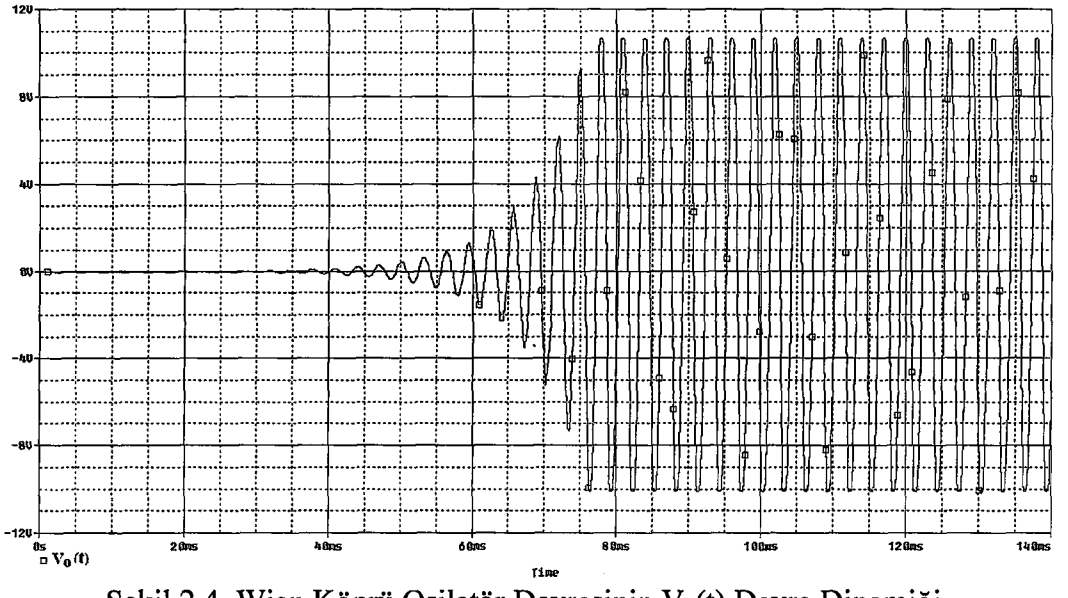
şeklinde ifade edilir. Basitçe *R1=R2* seçilerek osilasyonun başlaması için istenilen teorik kazanç, *K=3* olarak bulunur.

2.2.1.1. Wien Köprü-Tabanlı Sinüzoidal Osilatörün PSpice Benzetimi

PSpice programı ile benzetimi yapılan Şekil 2.3' deki devrede, $R_1=R_2=10$ kΩ, $C_1=C_2=0.047$ μF, $R_A=200$ Ω, $R_B=470$ Ω olarak alınmıştır [34]. Gerçekleştirimde aktif yapı bloğu olarak ±12V ile kutuplanan AD712 tipi VOA kullanılmıştır. PSpice benzetiminden elde edilen çıkış karakteristiği Şekil 2.4' de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Wien Köprü Osilatör Devresi.



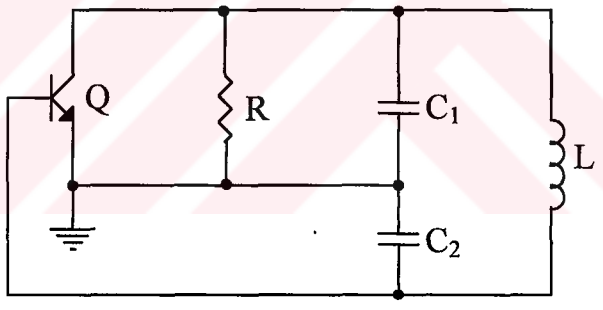
Şekil 2.4. Wien Köprü Osilatör Devresinin $V_o(t)$ Devre Dinamiği.

2.2.2. Colpitts Osilatörü

Şekil 2.5' de LC osilatörlerden biri olan Colpitts osilatör devresi gösterilmektedir. Transistörün kollektörü ile beyzi arasına bağlanan, birbirine paralel konumdaki L ve C_1-C_2 elemanları aracılığıyla devre voltajının bir kısmı emitere beslenir. Colpitts osilatörde bu geribesleme, kapasitif elemanlardan oluşan bir gerilim bölücü devre ile gerçekleştirilir. Devrede R direnci, kayıpsız indüktörü, osilatörün yük direncini ve transistörün çıkış direncini ifade eder [31].

Transistör kapasitelerinin ihmal edildiği durumda, devrenin çalışma frekansı çok düşük ise osilasyon frekansı, paralel devrenin rezonans frekansı ile belirlenebilir. Colpitts osilatörün osilasyon frekansı Denklem (2.5) ile tanımlanmaktadır.

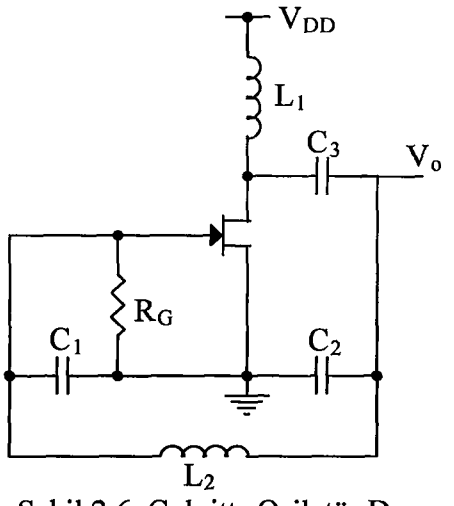
$$w_o = \frac{1}{\sqrt{L(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2})}} \tag{2.5}$$



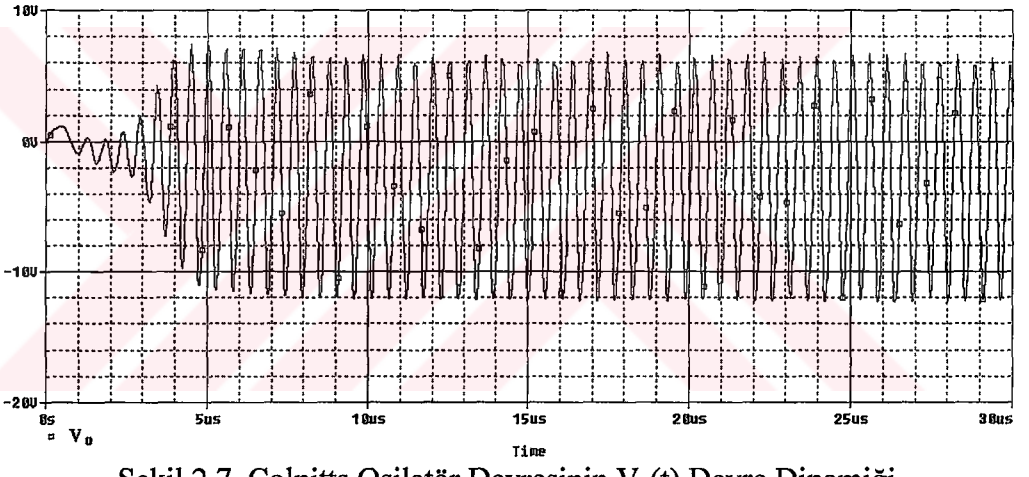
Şekil 2.5. Klasik Colpitts Osilatörü.

2.2.2.1. Colpitts Osilatörün PSpice Benzetimi

PSpice benzetimi ile incelenen Şekil 2.6' daki devrede, V_{DD}=10 V, R_G=750 kΩ, C_1=750 pF, C_2=2.5 nF, C_3=2 nF, L_1=0.2 mH, L_2=40 μH alınarak gerçekleştirilmiştir [35]. Gerçekleştirimde R_N=750 Ω, V_p=-0.7 V parametrelerine sahip 2N4338 tipi JFET kullanılmış olup PSpice benzetim sonucu Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



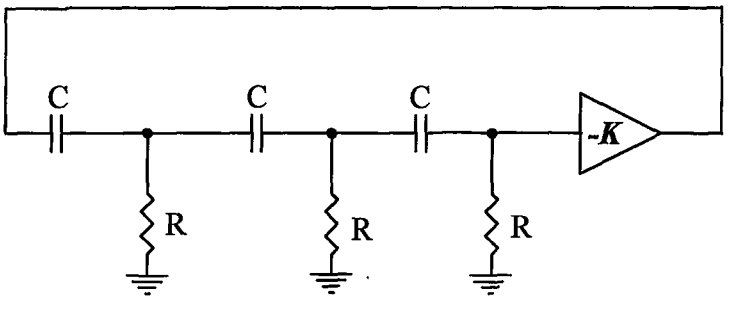
Şekil 2.6. Colpitts Osilatör Devresi.



Şekil 2.7. Colpitts Osilatör Devresinin $V_o(t)$ Devre Dinamiği.

2.2.3. RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatör

Şekil 2.8' de faz kaymalı osilatör olarak da adlandırılan op-amp ile gerçekleştirilmiş RC osilatör devresi gösterilmektedir [34]. Geribesleme birimi, üç katlı RC faz kaydırma



Şekil 2.8. Klasik RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatör.

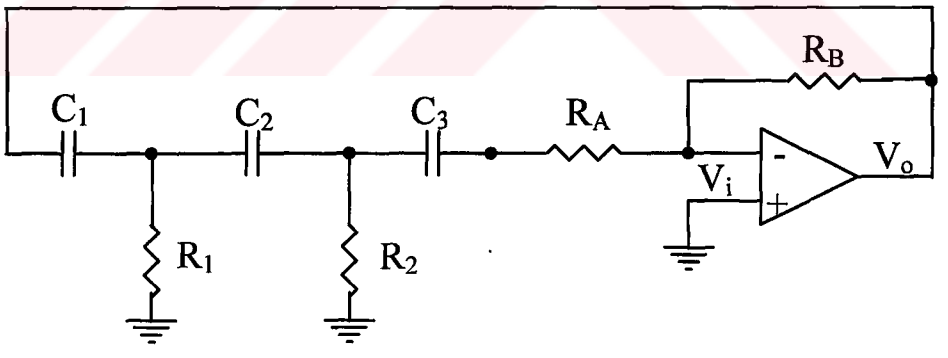
devresinden oluşmaktadır. Devrenin $-K$ kazancına sahip olmasının nedeni, op-ampın girişindeki işaret ile çıkışındaki işaretin arasında 180° faz farkı olmasıdır. Yani op-amp evirici bir kuvvetlendirici gibi davranır. Dirençler ve kapasitörler eşit değerlere sahip olduğunda faz kaydırıcı devresindeki faz, 180° daha kayar. Böylece devrede 180° RC elemanları ile 180° de op-ampla olmak üzere toplam faz kayması sıfır (360°) olur. Devrenin osilasyon frekansı aşağıda tanımlanmaktadır:

$$w_o = \frac{1}{RC\sqrt{6}} \tag{2.6}$$

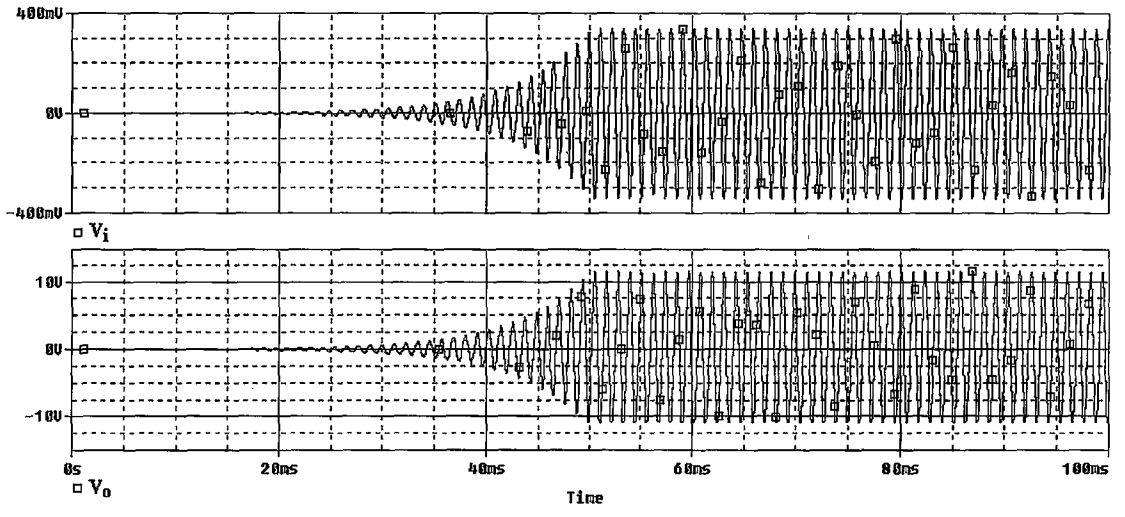
$|\beta K| \geq 1$ olması için $|K| \geq 29$ olmalıdır. Aksi halde osilasyon meydana gelmez.

2.2.3.1. RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatörün PSpice Benzetimi

PSpice benzetimi ile incelenen Şekil 2.9' daki devrede, $R_1=R_2=R_A=6.8$ kΩ, $C_1=C_2=C_3=0.01$ μF, $R_B=197.2$ kΩ alınarak gerçekleştirilmiştir [34]. Gerçekleştirimde, aktif yapı bloğu olarak ±12V ile kutuplanan AD712 tipi VOA kullanılmıştır. PSpice benzetiminden elde edilen giriş ve çıkış karakteristikleri Şekil 2.10' da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. RC-Tabanlı Sinüzoidal Osilatör Devresi.



Şekil 2.10. RC-Tabanlı Osilatör Devresinin $V_i(t)$, $V_o(t)$ Devre Dinamikleri.

Yukarıda bahsedilen osilatörler, sinüzoidal osilatörler tiplerinden bazılarıdır. Bu osilatör yapılarında aktif eleman olarak op-amp ve transistör kullanılmıştır. Kısım 2.1' de sunulan bazı sebeplerle kullanılan op-ampların çalışma frekanslarının sınırlı olmasından dolayı Wien köprü osilatörünün ve RC-tabanlı osilatör devresinin çalışma frekansı yaklaşık birkaç yüz Hz~ birkaç yüz kHz arasında değişmektedir. Akortlu Colpitts osilatörün çalışma frekansı ise MHz' ler mertebesinde değişmektedir.

2.3. Doğrusal Osilatörlerden Doğrusal Olmayan Osilatörlere Geçiş

Literatürde yer alan sinüzoidal osilatörlerin büyük çoğunluğu ikinci derecedendir. Bu osilatör devrelerinin kaotik bir davranış sergileyebilmesi için ilave bir enerji depolayıcı elemana ihtiyaç vardır. Dolayısıyla doğrusal osilatörlerden daha kompleks davranış sergileyen osilatörlere geçişte bazı tasarım teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler, doğrusal olmayan konfigürasyon yapılarının, osilatör devresine uygun bir şekilde bağlanmasıyla gerçekleştirilir. Bu amaçla geliştirilen tekniklerden birisi olan yarı-sistematik tekniği, FET-kapasitör ve diyot-indüktör konfigürasyonları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu tekniğin tasarım işlemi üç adımda verilmiştir [19, 30]:

(1) Pasif eleman yapısı, akortlanabilirliği, duyarlılığı ve aktif yapı bloğu açısından duyulan gereksinimleri karşılayan sinüzoidal osilatör devresi tasarlanmalıdır.
(2) Osilatörün yapısı incelenerek basit doğrusal olmayan eleman veya konfigürasyonlar, devrenin uygun bir yerine eklenmelidir. Tasarlanan sinüzoidal

osilatörün derecesi üçten az ise ilave bir enerji depolayıcı eleman devrenin uygun bir yerine eklenmelidir.

(3) Birinci basamakta tanımlanan akortlama parametresi, sinüzoidal osilatörün osilasyon şartını sağlaması için aynı değerler civarında ayarlanmalıdır.

Literatürde, yukarıda işlem adımları verilen tekniği kullanarak çeşitli kaotik osilatörler tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirimlerde VOA, CFOA, CCII gibi farklı aktif yapı blokları kullanılmıştır [16, 18-21].

Yukarıda verilen adımlar takip edilerek bir sinüzoidal osilatöre aşağıda yer alan konfigürasyonlar eklendiğinde osilatör devresi daha kompleks davranış sergilemektedir.

2.3.1. Diyot-İndüktör Konfigürasyonu

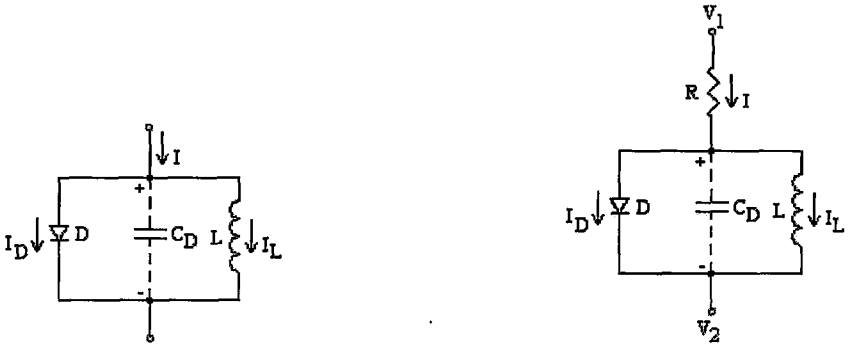
Diyot-indüktör konfigürasyonları Şekil 2.11(a) ve (b)' de gösterilmektedir [19]. Şekilden de görüldüğü gibi bu konfigürasyon, diyot ile indüktör elemanının paralel birleşiminden oluşmuştur. Diyot-indüktör konfigürasyonunun ikinci dereceden durum denklemi aşağıda tanımlanmaktadır:

$$L\frac{dI_L}{dt} = V_{CD} \tag{2.7}$$

$$C_D\frac{dV_{CD}}{dt} = I - I_L - I_D \tag{2.8}$$

burada C_D, parazitik geçiş kapasitansı, V_{CD}, C_D kapasitansının üzerine düşen voltaj, I, konfigürasyon akımı, I_L, indüktör akımı ve I_D, Denklem (2.9) ile modellenen diyot akımıdır.

$$I_D = \frac{1}{R_D}\begin{cases} V_{CD} - V_D & V_{CD} \geq V_D \\ 0 & V_{CD} < V_D \end{cases} \tag{2.9}$$



(a) (b)

Şekil 2.11. Diyot-İndüktör Konfigürasyonları.

Burada V_D ve R_D, sırasıyla diyodun ileri yönde voltaj düşümü ve iletim rezistansıdır.

Şekil 2.11(b)' de gösterilen sinüzoidal osilatörde, kullanılan diyot-indüktör konfigürasyonuna seri olarak bir direnç eklenmiştir. Bu konfigürasyon için konfigürasyon akımı Denklem (2.10)' da tanımlanmıştır:

$$I = \frac{V_1 - V_{CD} - V_2}{R} \tag{2.10}$$

2.3.2. FET-Kapasitör (FET-C) Konfigürasyonu

Şekil 2.12' de FET-C konfigürasyon yapıları gösterilmektedir. Şekil 2.12(a)' daki FET-C konfigürasyon yapısı, iki uçlu eleman gibi çalışması için bağlanan bir FET ile kapasitörün seri olarak birleşimidir [19]. Bu konfigürasyon yapısı Denklem (2.11) ile tanımlanmıştır:

$$C\frac{dV_C}{dt} = I_N \tag{2.11}$$

burada I_N, doğrusal olmayan FET akımı olup Denklem (2.12) ile tanımlanmıştır:

$$I_N = \frac{1}{R_N}\begin{cases} V_{GS} & V_{GS} \geq V_P \\ V_P & V_{GS} < V_P \end{cases} \tag{2.12}$$

burada V_P, kısılma (pinch-off) voltajı, V_{GS}, kapı-kaynak voltajı ve R_N, çalışma noktasındaki FET' in küçük işaret direncidir.

FET, voltaj kontrollü direnç gibi çalıştığı için sinüzoidal osilatörde kullanılan FET-C konfigürasyonuna, iki değişik şekilde seri RC kolu eklenmiştir. Şekil 2.12(b)' deki birinci yapıda FET-C_3 konfigürasyonuna paralel olarak C_1 kapasitörü bağlanmıştır. Bu yapı Denklem (2.13) ve (2.14) ile tanımlanmaktadır:

$$C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = I_N \tag{2.13}$$

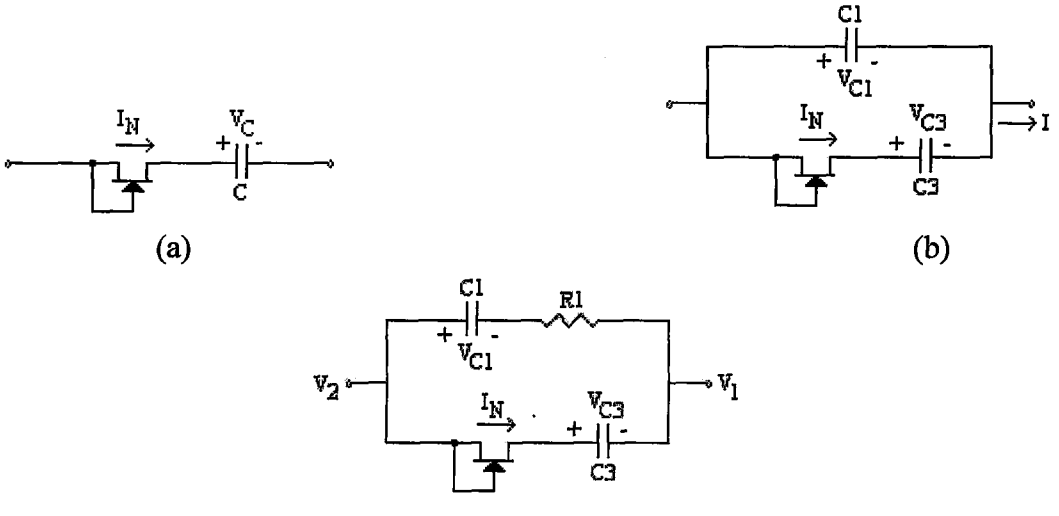
$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = I - I_N \tag{2.14}$$

burada I, konfigürasyondan akan toplam akım ve I_N, $V_{GS} = V_{C1} - V_{C3}$ ile Denklem (2.12)' de tanımlanmıştır. Şekil 2.12(c)' deki diğer yapıda seri R_1C_1 kolu, FET-C_3 konfigürasyonuna paralel olarak bağlanmıştır. Bu yapının durum denklemleri Denklem (2.15) ve (2.16) ile verilmiştir:

$$C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = I_N \tag{2.15}$$

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{V_2 - V_{C1} - V_1}{R_1} \tag{2.16}$$

burada I_N, $V_{GS} = V_2 - V_{C3} - V_1$ ile Denklem (2.12)' de tanımlanmıştır.



(a) (b) (c)

Şekil 2.12. FET-C Konfigürasyonları.

BÖLÜM 3

KAOTİK OSİLATÖRLER

3.1. Giriş

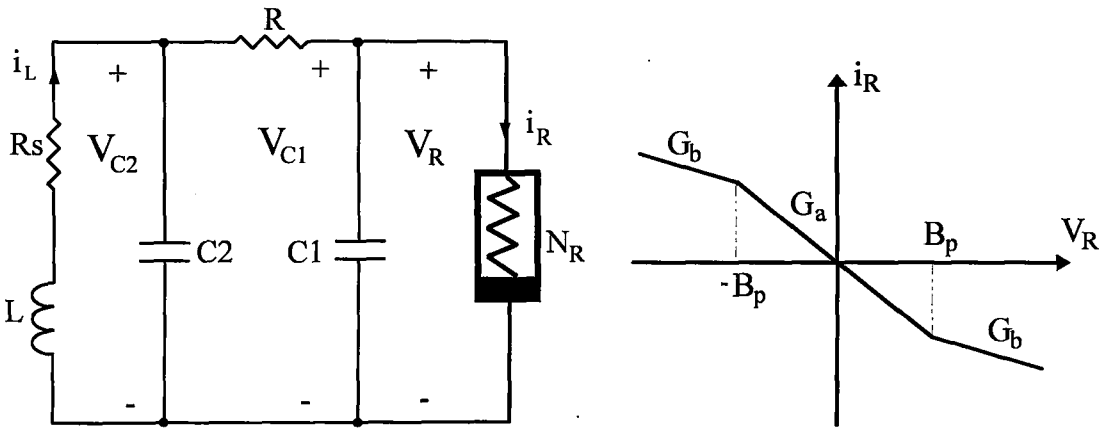
Son yıllarda kaos ve kaotik osilatörler ile ilgili çalışmalar artmıştır. Kaotik osilatörler, en genel şekilde LC ve RC osilatörler olarak ikiye ayrılırlar. Bu bölümde kaotik LC osilatörü olarak Chua osilatörü, CFOA-tabanlı Chua diyodu kullanılarak gerçekleştirilen Chua osilatörü, diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan Wien köprü osilatörü, Kaotik Colpitts Osilatörü, FET kullanılarak gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörü ve 4 boyutlu kaotik osilatör devreleri incelenmiştir. Kaotik RC osilatörü olarak ise Wien köprü-tabanlı Chua osilatörü, FET-C konfigürasyonu kullanılan CFOA-tabanlı Wien köprü osilatörü ve basit kaotik RC osilatörü üzerinde durulmuştur. Bu devrelerin sergiledikleri kaotik davranışlar, hem PSpice benzetimi hem de nümerik çözümü yapılarak ortaya konmuştur. Ayrıca bölümün sonunda, incelenen kaotik osilatör devrelerinin çeşitli kriterlere göre yapılan mukayeseleri tablo halinde sunulmuştur.

3.2. Kaotik LC Osilatörler

Takip eden alt bölümlerde, yukarıda isimleri sayılan kaotik Chua osilatörü, CFOA-tabanlı Chua diyodu kullanılarak gerçekleştirilen kaotik Chua osilatörü, diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan kaotik Wien köprü osilatörü, Kaotik Colpitts Osilatörü, FET kullanılarak gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörü ve 4 boyutlu kaotik osilatör devreleri incelenmiştir.

3.2.1. Kaotik Chua Osilatörü

Bugüne kadar tasarlanan kaotik devreler arasında kaotik Chua osilatörünün özel bir yeri vardır [4]. Basit bir devre yapısına sahip olması ve kaotik davranış sergilemesi



(a) (b)

Şekil 3.1. Chua Osilatörünün (a) Devre Şeması, (b) Chua Osilatöründeki Doğrusal Olmayan Direncin Üç Parçalı Doğrusal Karakteristiği.

dolayısıyla Chua devresi, kaos ve kaotik işaret uygulamalarında model devre olarak kabul edilmektedir [36].

Şekil 3.1' de gösterilen Chua devresi, üç adet enerji depolayıcı elemandan, bir adet doğrusal dirençten ve bir adet Chua diyodu olarak adlandırılan N_R doğrusal olmayan dirençten oluşmaktadır. Chua devresi Denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) durum denklemleriyle tanımlanmaktadır ($V_{C1}=V_R$):

$$C_1 \frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{R}\left(V_{C2} - V_R\right) - f\left(V_R\right) \tag{3.1}$$

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = i_L - \frac{1}{R}\left(V_{C2} - V_R\right) \tag{3.2}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_{C2} - i_L \cdot R_S \tag{3.3}$$

Şekil 3.1(b)' de grafiksel olarak gösterilen $f(V_R)$, parçalı doğrusal bir fonksiyon olup,

$$i_R = f\left(V_R\right) = G_b V_R + \frac{1}{2}\cdot\left(G_a - G_b\right) \times \left(\left|V_R + B_p\right| - \left|V_R - B_p\right|\right) \tag{3.4}$$

ile tanımlanır. Burada G_a ve G_b, sırasıyla iç ve dış bölgelerdeki eğimler olup $\pm B_P$, kırılma noktalarını belirtmektedir.

Literatürde Chua osilatörünün çok sayıda alternatif tasarımı ve gerçekleştirimi bulunmaktadır. Bu tasarım ve gerçekleştirimlerde kullanılan yöntemler, iki temel kategoriye ayrılabilirler. İlk yaklaşımda, Chua osilatöründeki doğrusal olmayan direnci (N_R) gerçekleştirmek için çeşitli devre topolojileri düşünülmüştür. Chua diyodu ile ilgili yapılan ilk tasarımlarda, diyotlar, op-amplar, transistörler ve OTA' lar gibi devre elemanları kullanılmıştır [37]. VOA' ların ideal olmama ve sınırlı frekans cevabı özelliklerinden dolayı VOA ile gerçekleştirilen Chua osilatör yapılarının çalışma frekansı sınırlanmaktadır. Bu yüzden son zamanlarda CFOA ile gerçekleştirilen Chua diyodu kullanılmaya başlanmıştır.

İkinci yaklaşımdaki temel fikir ise, Chua osilatörünün indüktörsüz olarak gerçekleştirimidir. Bu amaçla, değişik indüktör simülatörleri ve RC yapıları, Chua osilatöründeki indüktörün ve LC resonatörünün yerine kullanmıştır. Gerçekleştirimlerin bir çoğunda kullanılan indüktör simülatörleri, genel olarak Op-Amp ve OTA-tabanlıdır [7-10]. Son zamanlarda indüktörsüz Chua devresi ve diğer kaotik devrelerin gerçekleştiriminde CFOA-tabanlı indüktör simülatörleri ve FTFN-tabanlı indüktör simülatörleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [13, 36, 38, 39].

Bu bölümde Chua osilatörünün CFOA-tabanlı Chua diyodu kullanılan tasarımı ve Wien köprü-tabanlı tasarımı incelenmiştir.

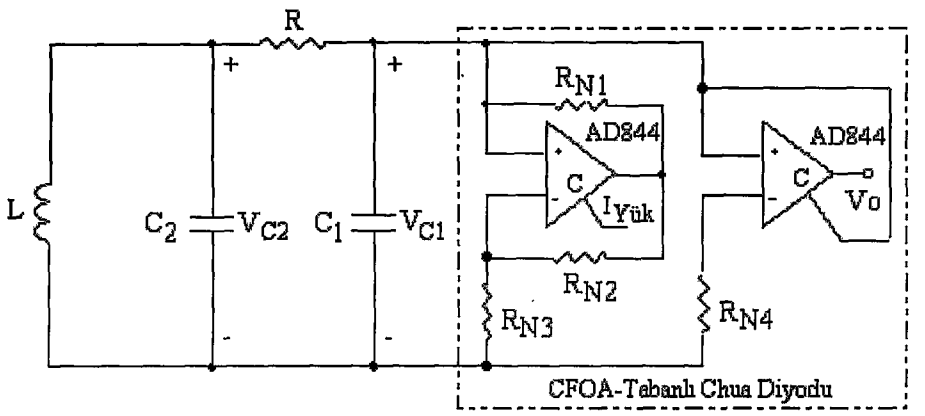
3.2.2. CFOA-Tabanlı Chua Diyodu Kullanılan Chua Osilatörü

Şekil 3.2(a)' da, CFOA-tabanlı doğrusal olmayan direnç [11] ile gerçekleştirilen CFOA tabanlı Chua osilatörü ve Şekil 3.2(b)' de ise devrenin dc karakteristiği gösterilmektedir. Doğrusal olmayan direnci gerçekleştirmek için ±9V ile kutuplanmış iki adet AD844 tipi CFOA ve dört adet direnç kullanılmıştır.

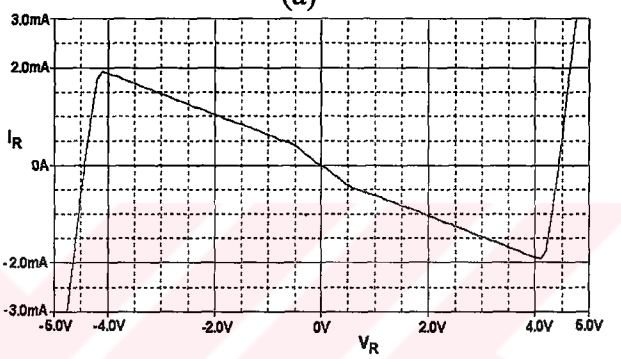
Devrenin nümerik çözümünün gerçekleştirilebilmesi için Denklem (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4), aşağıdaki kabuller yapılarak Denklem (3.5)' deki boyutsuz forma dönüştürülmüştür.

$X=V_{C1}=V_R$, $Y=V_{C2}$, $Z=i_L$,

$$\alpha=\frac{1}{C_1}=\frac{1}{RC_1},\ \beta=\frac{1}{C_2}=\frac{1}{RC_2},\ K=\frac{1}{L},\quad a=G_a,\quad b=G_b,\quad c=B_p$$



(a)



(b)

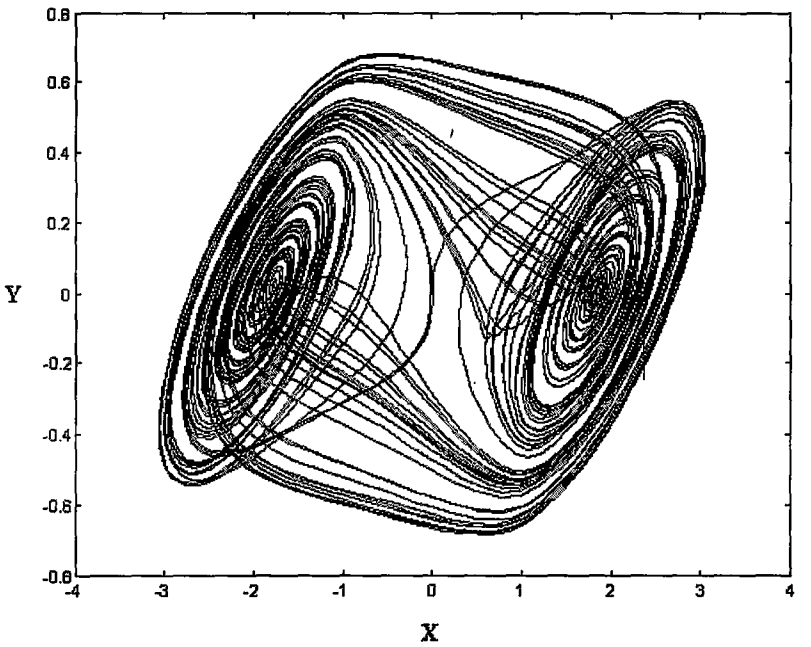
Şekil 3.2. CFOA-Tabanlı Chua Devresinin (a) Devre Şeması, (b) DC Karakteristiği.

$$\dot{X} = \alpha(Y - X - f(X))$$
$$\dot{Y} = \beta(Z - Y + X) \qquad (3.5)$$
$$\dot{Z} = -KY$$
$$f(X) = bX + 0.5(a-b)(|X+c| - |X-c|)$$

burada α, β, K, a, b ve c sabittirler.

α=10, β=1, K=14.87, a=-1.27, b=-0.68 ve c=1 alınarak Denklem (3.5)' in çözülmesiyle X-Y düzleminde elde edilen grafiği Şekil 3.3' de gösterilmektedir.

Şekil 3.2(a)' daki devrenin PSpice benzetiminin yapılması için, kapasitör ve dirençlerin farklı değerleri ile çalışmalar yapılmıştır. Bu devrenin benzetim çalışması süresince doğrusal olmayan direncin parametre değerleri aşağıdaki gibi sabit alınmıştır: R_{N1}=R_{N2}=22 kΩ, R_{N3}=500 Ω ve R_{N4}=2.2 kΩ.

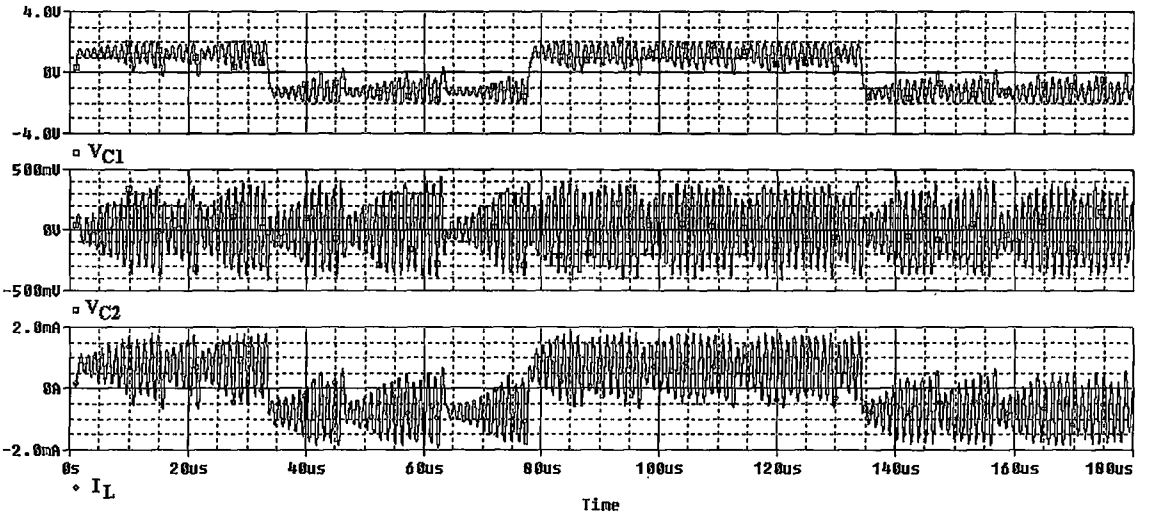


Şekil 3.3. CFOA-Tabanlı Chua Osilatörünün Nümerik Çözümü.

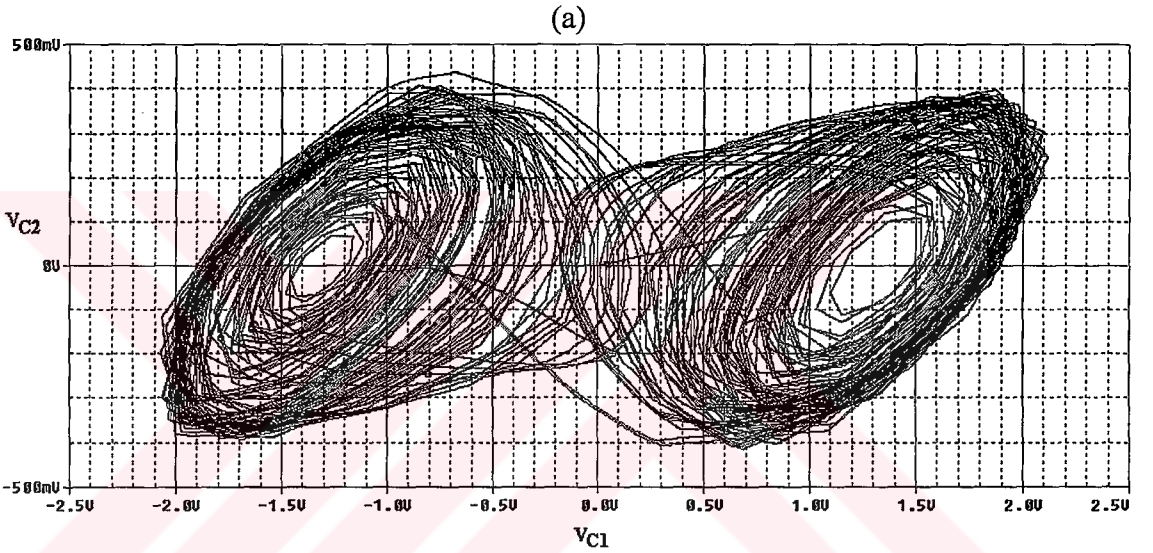
Farklı frekans sahalarında, özellikle de yüksek frekanslarda devrenin çalışmasını göstermek için devrenin geri kalan parametreleri üç grupta toplanmıştır. İlk parametre grubu olarak L=18mH, C_1=10 nF, C_2=100 nF ve R=1.7 kΩ değerleri alınmış ve yapılan benzetim çalışmasında CFOA-tabanlı Chua devresinin 3 kHz civarında temel bir frekans bileşenine sahip orijinal kaotik davranışını gösterdiği tespit edilmiştir.

CFOA-tabanlı devrenin yüksek frekanslarda çok iyi performans sergilediğini doğrulamak amacıyla çalışma frekansını genişletmek için indüktörün ve kapasitörlerin değerlerinin küçültüldüğü ikinci ve üçüncü parametre grupları kullanılarak devre incelenmiştir. İkinci parametre grubunda indüktörün ve kapasitörlerin değerlerinin 200 kat küçültülmesiyle Şekil 3.2(a)' daki devreye ilişkin parametreler C_1=50 pF, C_2=0.5 nF, R=1.7 kΩ ve L=90 μH olarak belirlenmiştir. Bu çalışma modu için kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 548 kHz civarında olduğu görülmüştür.

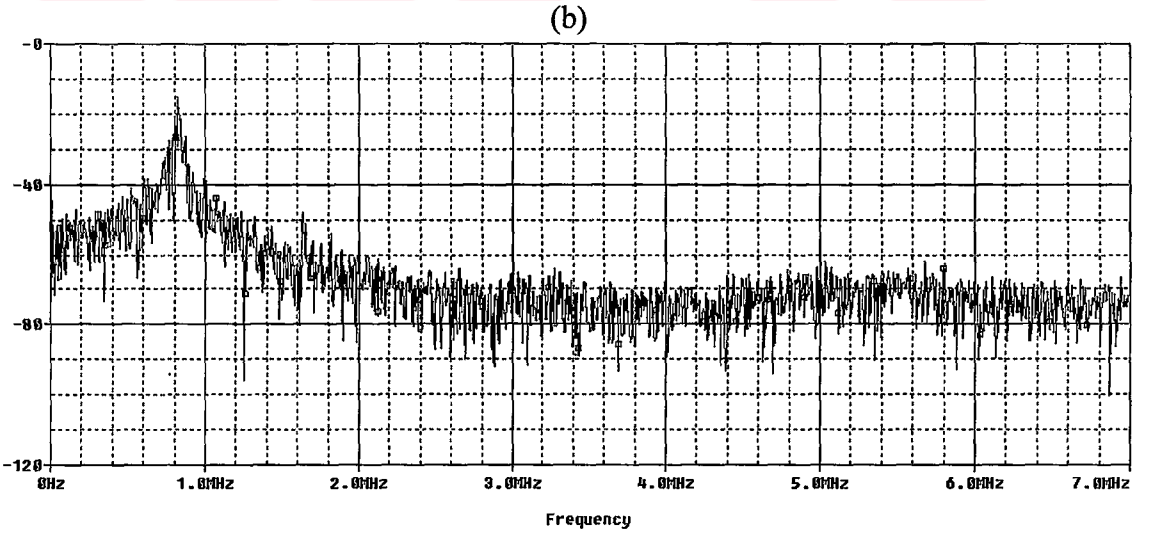
İndüktörün ve kapasitörlerin değerlerinin 300 kat küçültüldüğü üçüncü parametre grubunda Şekil 3.2(a)' daki devreye ilişkin parametreler C_1=33 pF, C_2=333 pF, R=1.7 kΩ ve L=60 μH olarak belirlenmiştir. Bu çok yüksek frekans sahasındaki çalışma için $V_{C1}(t)$,$V_{C2}(t)$, $i_L(t)$ devre dinamikleri, (V_{C1}-V_{C2}) düzlemindeki çift çeker yapısı, kaotik frekans spektrumu sırasıyla Şekil 3.4(a), (b) ve (c)' de gösterilmektedir. Şekil 3.4(c)' de



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.4. CFOA-Tabanlı Chua Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $I_L(t)$ Kaotik Devre Dinamikleri, (b) (V_{C1}-V_{C2}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, (c) $V_{C1}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu.

gösterildiği gibi çalışma frekans sahası, daha yüksek frekans sahası için genişlemiştir ve kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 827 kHz civarında olduğu tespit edilmiştir.

3.2.3. Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü

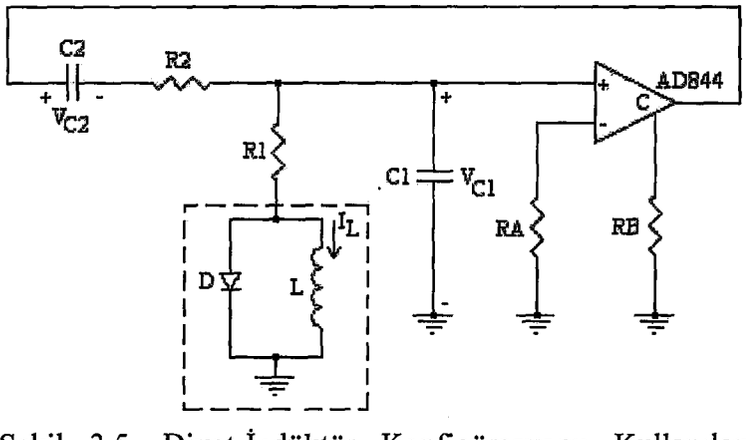
Diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan yüksek frekanslı kaotik Wien köprü osilatör, Şekil 3.5' de gösterilmiştir [18]. Yüksek frekanslı kaotik osilatör tasarımında sınırlı kazanç-band genişliği çarpımına sahip olmamasından ve yüksek frekans performansının çok iyi olmasından dolayı aktif yapı bloğu olarak AD844 tipi CFOA tercih edilmektedir. Bu tasarımda, paralel diyot-indüktör konfigürasyon yapısı R_1 direncine seri bağlanarak kaotik osilasyona uygunlaştırılmıştır. İndüktör üzerindeki voltaja bağlı olarak diyot, ON-OFF anahtarlanır ve bu voltaj, diyodun parazitik geçiş kapasitansı C_D üzerinde görünür.

Diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan bu osilatör, Denklem (3.6), (3.7), (3.8) ve (3.9)' da verilen durum denklemleri ile tanımlanmaktadır:

$$R_2 C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = \left(K - 1 - \frac{R_2}{R_1} \right) V_{C1} - V_{C2} + \frac{R_2}{R_1} V_{CD} \tag{3.6}$$

$$R_2 C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = (K-1) V_{C1} - V_{C2} \tag{3.7}$$

$$R_1 C_D \frac{dV_{CD}}{dt} = V_{C1} - V_{CD} - R_1 (I_L + I_D) \tag{3.8}$$



Şekil 3.5. Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü.

$$L\frac{dI_L}{dt} = V_{CD} \tag{3.9}$$

burada I_D, diyot akımıdır ve bu akım denklemi Denklem (3.10)' da verilmiştir:

$$I_D = \frac{1}{R_D}\begin{cases} V_{CD} - V_D & V_{CD} \geq V_D \\ 0 & V_{CD} < V_D \end{cases} \tag{3.10}$$

Şekil 3.5' deki devrenin nümerik çözümünün gerçekleştirilebilmesi için Denklem (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) ve (3.10), aşağıdaki kabuller yapılarak Denklem (3.11)' deki boyutsuz forma dönüştürülmüştür.

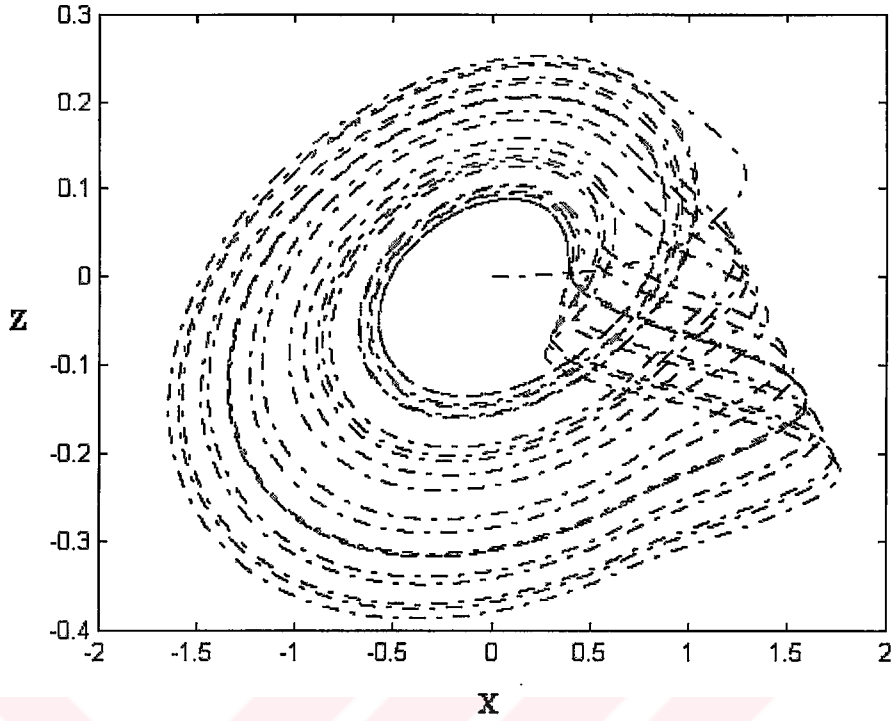
$R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$, $t_n=t/RC$, $X=V_{C1}/V_\gamma$, $Y=V_{C2}/V_\gamma$, $Z=RI_L/V_\gamma$, $W=V_{CD}/V_\gamma$, $\varepsilon=C_D/C$, $\alpha=R/R_D$, $\beta=R^2C/L$

$$\begin{aligned} \dot{X} &= (K-2)X - Y + W \\ \dot{Y} &= (K-1)X - Y \\ \dot{Z} &= \beta W \\ \varepsilon\dot{W} &= X - Z - (1+a)W + a \\ a &= \begin{cases} a = \alpha, & W \geq 1 \\ a = 0, & W < 1 \end{cases} \end{aligned} \tag{3.11}$$

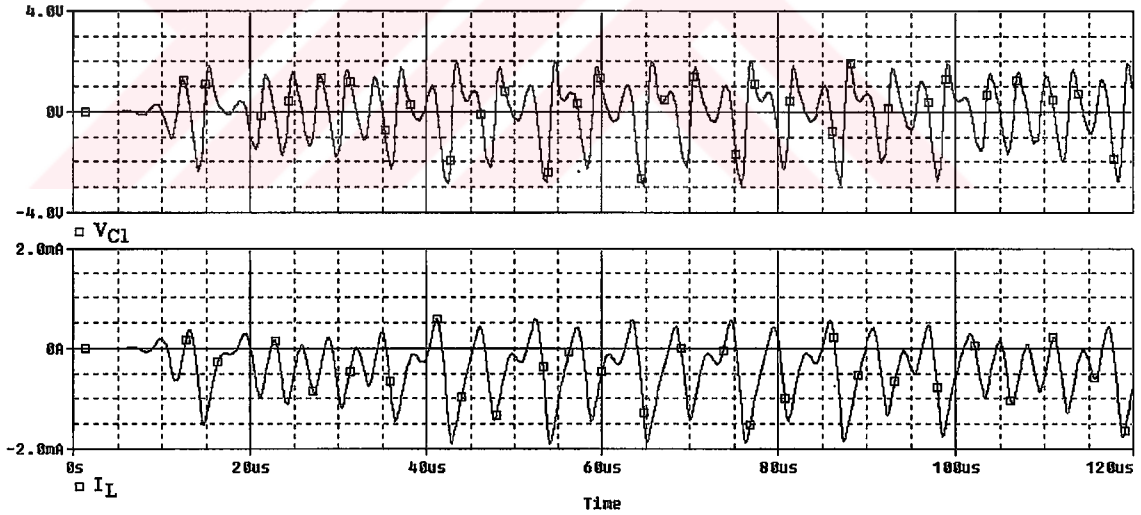
burada α, ε, β ve K birer sabittir.

$\alpha=15$, $\beta=0.21$, $\varepsilon=0.004$ ve $K=2.15$ alınarak Denklem (3.11)' in çözülmesiyle X-Z düzleminde elde edilen grafiği Şekil 3.6' da gösterilmektedir.

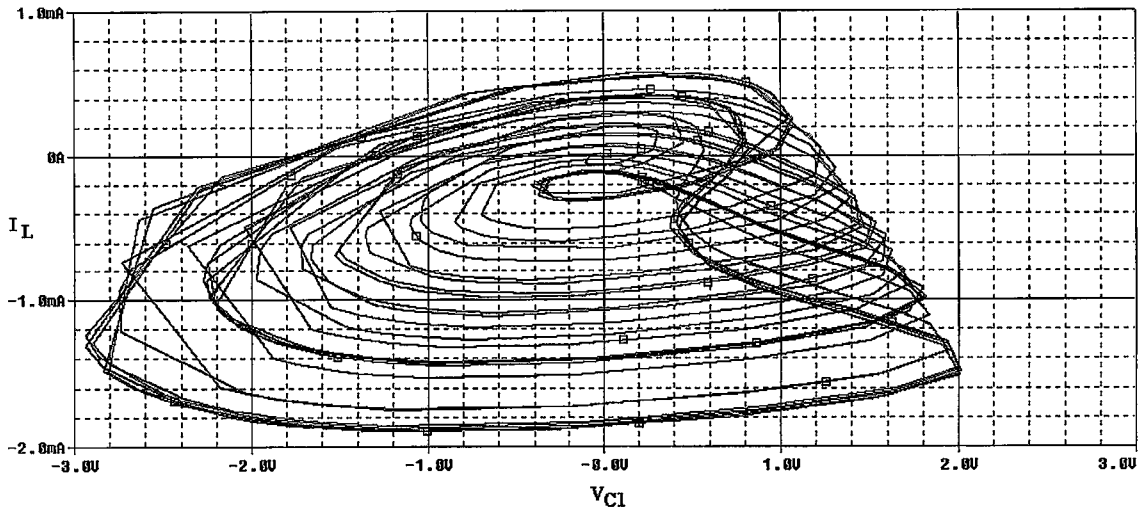
Şekil 3.5' deki devrenin PSpice benzetimi, $C_1=C_3=330$ pF, $R_1=R_2=500$ Ω, L=1 mH, $R_3=1$ kΩ, $R_4=2070$ Ω alınarak, ±9V ile kutuplanan AD844 tipi CFOA ve [19]' da verilen 1N914 diyodu kullanılarak incelenmiştir. Bilgisayar benzetimlerinden elde edilen $V_{C1}(t)$, $I_L(t)$ kaotik davranışlar Şekil 3.7' de, (V_{C1}-I_L) düzlemindeki kaotik çeker, Şekil 3.8(a)' da ve $V_{C1}(t)$' nin frekans spektrumu ise Şekil 3.8(b)' de gösterilmiştir. Şekil 3.8(b)' de gösterildiği gibi devrenin kaotik spektrumunun temel frekansı 360 kHz civarındadır.



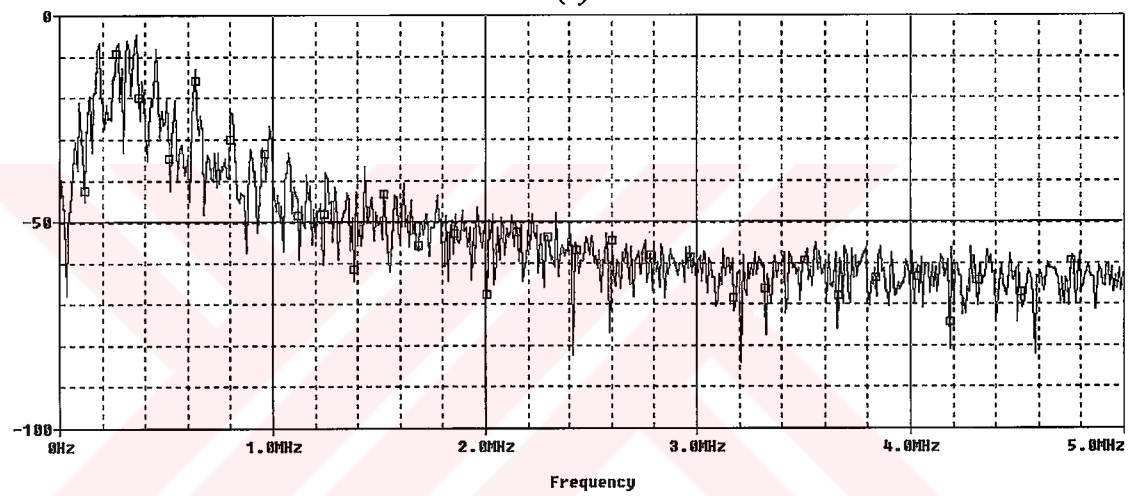
Şekil 3.6. Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörün Nümerik Çözümü.



Şekil 3.7. Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatör Devresinin, Kaotik $V_{C1}(t)$, $I_L(t)$ Devre Dinamikleri.



(a)



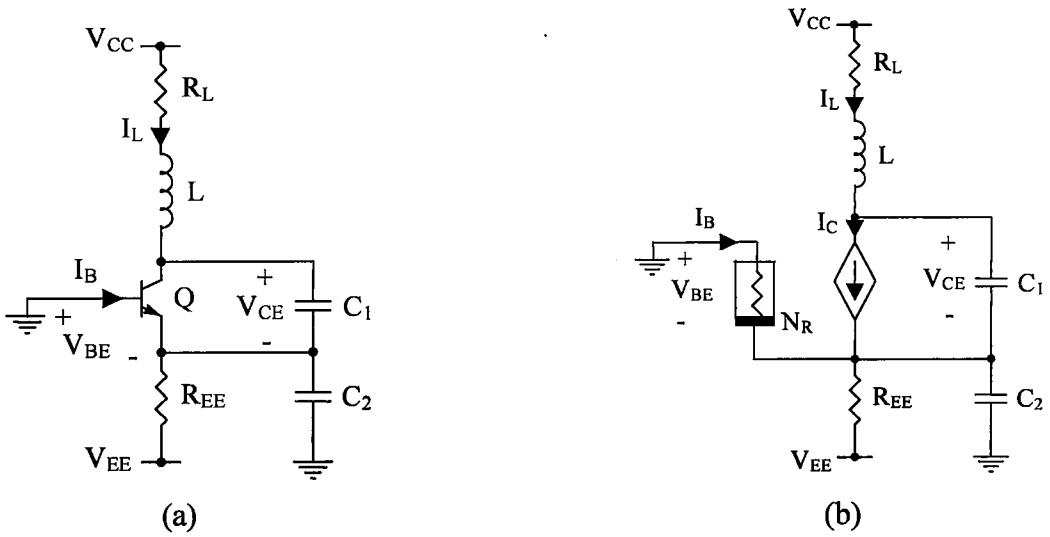
(b)

Şekil 3.8. Diyot-İndüktör Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatör Devresinin, (a) (V_{C1}-I_L) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (b) $V_{C1}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu.

3.2.4. Kaotik Colpitts Osilatörü

Literatürde yer alan klasik sinüzoidal osilatörlerden olan Colpitts osilatörünün üzerinde yapılan değişiklikler neticesinde kaotik davranış sergilediği kanıtlanmış ve bu konu hakkındaki incelemeler son yıllarda artmıştır [14-17]. Şekil 3.9' da gösterilen Kaotik Colpitts Osilatörü, aktif bölgede V_{EE}, R_{EE} ve V_{CC} ile kutuplanan bir adet iki jonksiyonlu (eklemli) transistörden (Bipolar Junction Transistor, BJT) oluşmaktadır [14].

Geri besleme devresi ise R_L direnci ile seri bağlanan L indüktöründen ve transistörün kollektörü ile emiter uçları arasına paralel bağlanan C_1 kapasitesi ve transistörün emiteri



Şekil 3.9. Kaotik Colpitts Osilatörünün, (a) Devre Şeması, (b) Eşdeğer Devresi.

ile negatif besleme arasına bağlanan R_{EE} direncine paralel konumdaki C_2 kapasitesinden meydana gelen kapasite grubundan oluşmuştur.

Şekil 3.9' daki BJT, doğrusal olmayan direnç elemanı gibi davranır ve devre Denklem (3.12), (3.13), (3.14), (3.15) ve (3.16)' da verilen durum denklemleri ile tanımlanır:

$$C_1 \frac{V_{CE}}{dt} = I_L - I_C \tag{3.12}$$

$$C_2 \frac{V_{BE}}{dt} = -\frac{V_{EE} + V_{BE}}{R_{EE}} - I_L - I_B \tag{3.13}$$

$$L \frac{I_L}{dt} = V_{CC} - V_{CE} + V_{BE} - I_L R_L \tag{3.14}$$

$$I_B = \begin{cases} 0 & V_{BE} \le V_{TH} \\ \dfrac{V_{BE} - V_{TH}}{R_{ON}} & V_{BE} > V_{TH} \end{cases} \tag{3.15}$$

$$I_C = \beta_F I_B \tag{3.16}$$

burada V_{TH}, eşik voltajı ($\cong 0.75V$), β_F, elemanın ileri yöndeki akım kazancı ve R_{ON}, beyz-emiter jonksiyonunun küçük işaretli iletim direncidir. Burada BJT, aktif ve kesim bölgesi olmak üzere iki farklı bölgede çalışmaktadır.

Devrenin nümerik çözümün gerçekleştirilebilmesi için Denklem (3.12), (3.13) ve (3.14), aşağıda yer alan kabulleri kullanarak Denklem (3.17)' deki boyutsuz forma dönüştürülmüştür.

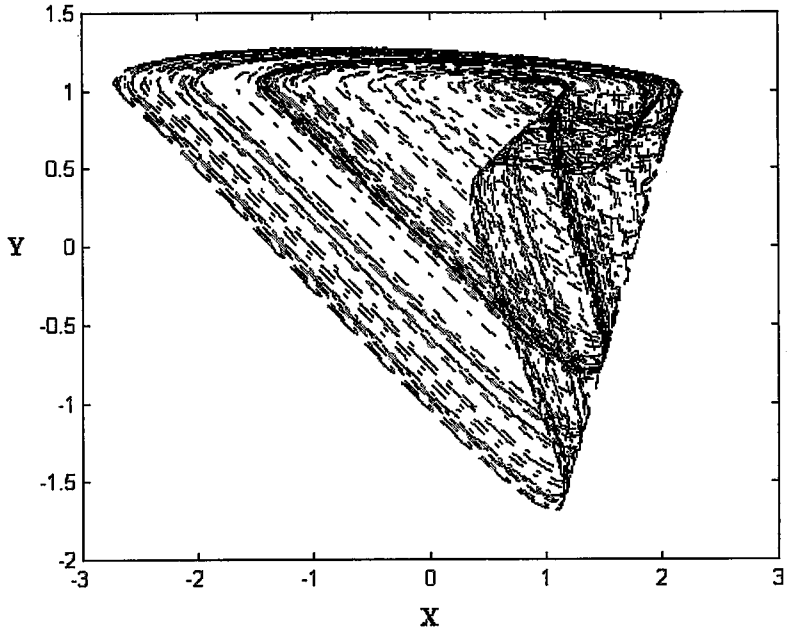
$X=V_{CE}$, $Y=V_{BE}$, $Z=I_L$

$$\begin{aligned}
\dot{X} &= Z - aF \\
\dot{Y} &= Z - d \\
\dot{Z} &= c - X - bZ - Y \\
F &= \begin{cases} -(Y+1), & Y < -1 \\ 0 & Y > 1 \end{cases}
\end{aligned} \tag{3.17}$$

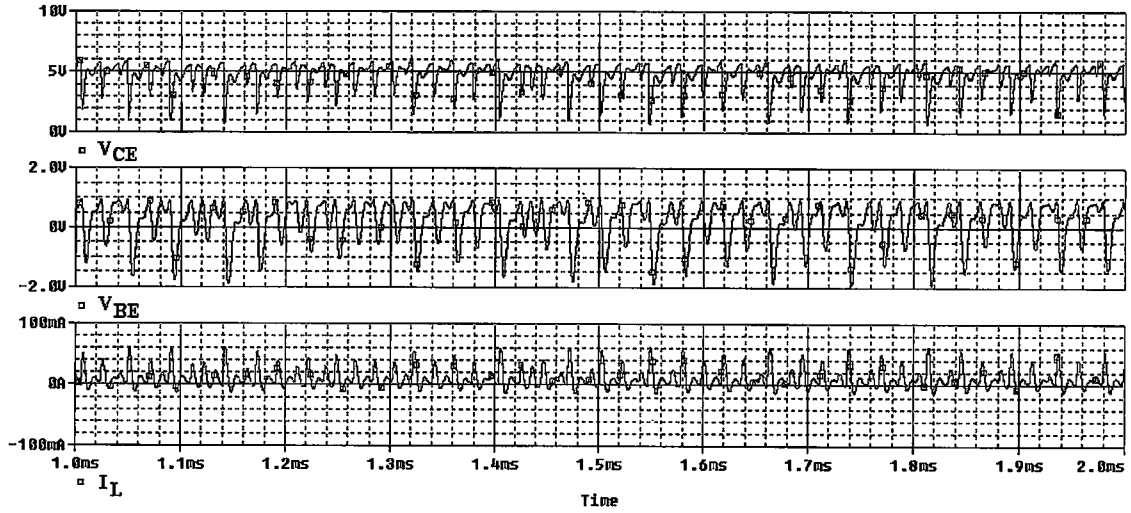
burada a=30, b=0.8, c=20 ve d=0.6 olan birer sabittir.

Şekil 3.10' da Denklem (3.17)' in çözülmesiyle X-Y düzleminde elde edilen grafik gösterilmektedir.

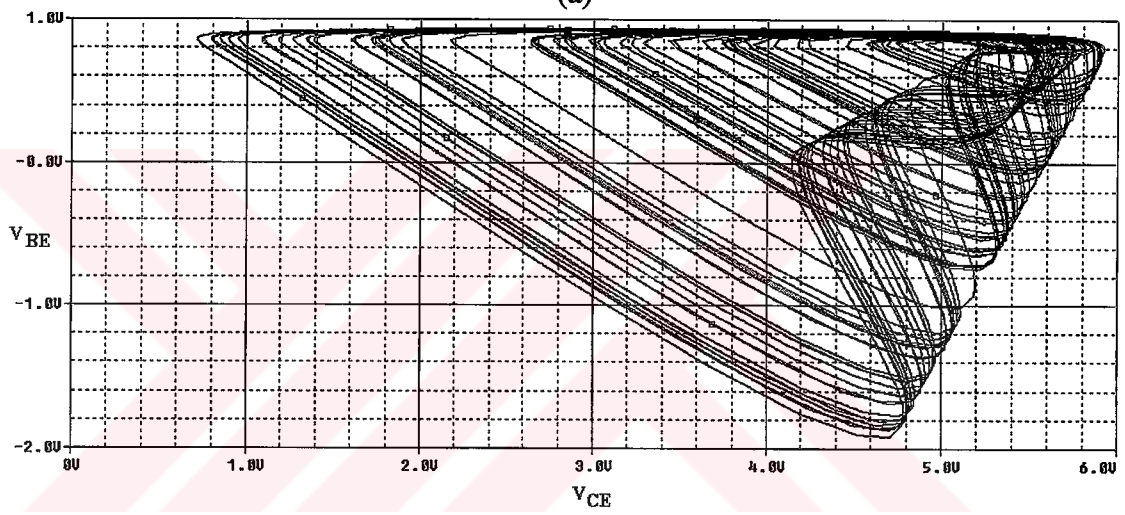
PSpice benzetimi ile incelenen Şekil 3.8' deki devre yapısı, V_{CC}=5 V, R_L=35 Ω, L=98.5 µH, C_1=C_2=54 nF, R_{EE}=400 Ω ve V_{EE}=-5 V alınarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımda kullanılan BJT, 2N2222 tipi BJT' dir. PSpice benzetiminden elde edilen kaotik davranışlar ve kaotik çeker sırasıyla Şekil 3.11(a) ve (b)' de, frekans spektrumu ise Şekil 3.11(c)' de gösterilmiştir. Devrenin kaotik spektrumunun temel frekansı, 42 kHz civarındadır.



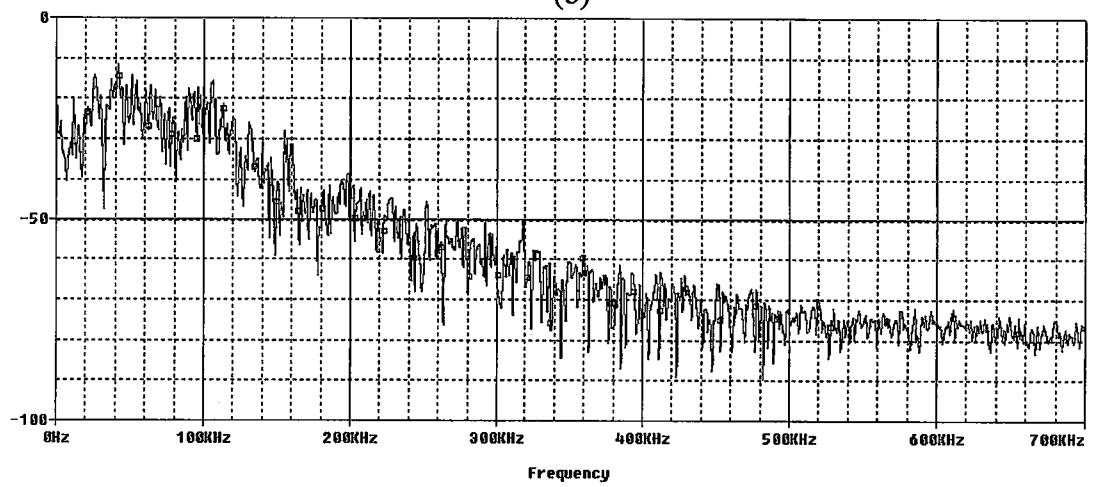
Şekil 3.10. Kaotik Colpitts Osilatörünün Nümerik Çözümü.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.11. Kaotik Colpitts Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $V_{CE}(t)$, $V_{BE}(t)$, $I_L(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (V_{CE}-V_{BE}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) $V_{BE}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu.

3.2.5. FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörü

Şekil 3.9(a)' da görüldüğü gibi Kaotik Colpitts Osilatörü' nde doğrusal olmayan eleman olarak BJT kullanılırken, Colpitts osilatörünün ürettiği işaretlere benzer işaretler üreten Şekil 3.12' deki devrede FET kullanılmıştır [16]. Bu devre, iki adet kapasitörden, üç adet dirençten, bir adet 2N4338 tipi JFET' den ile ±9V ile kutuplanmış AD844 tipi CFOA' dan oluşmaktadır.

Şekil 3.12' deki osilatör devresi Denklem (3.18) ve (3.19) ile tanımlanmaktadır:

$$C_1 \frac{V_{C1}}{dt} = I_J - I_L \tag{3.18}$$

$$C_2 \frac{V_{C2}}{dt} = I_J \tag{3.19}$$

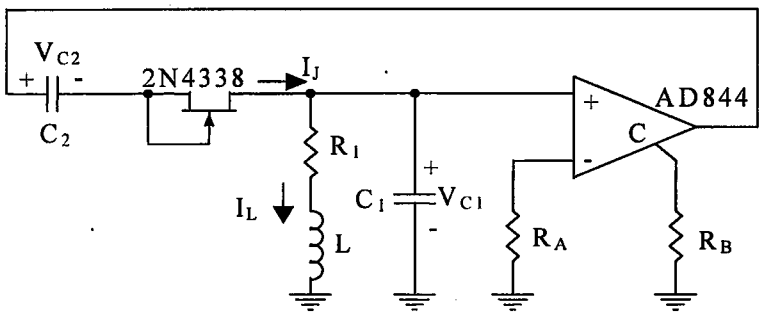
$$L \frac{I_L}{dt} = V_{C1} - R_1 I_L \tag{3.20}$$

$$I_J = \frac{1}{R_J} \begin{cases} (K-1)V_{C1} - V_{C2} & (K-1)V_{C1} - V_{C2} \geq V_P \\ V_P & (K-1)V_{C1} - V_{C2} < V_P \end{cases} \tag{3.21}$$

Yukarıdaki denklemler, nümerik çözümün gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki kabuller yapılarak Denklem (3.22)' deki boyutsuz forma dönüştürülmüştür.

$X=V_{C1}/V_P$, $Y=V_{C2}/V_P$, $Z=R_1 I_L/V_P$, $\tau=t/R_1C_1$, $\alpha=R_1/R_J$, $\beta=R_1^2C_1/L$ ve $C_1=C_2=C$

$$\begin{aligned} \dot{X} &= a(K-1)X - aY - Z + b \\ \dot{Y} &= a(K-1)X - aY + b \\ \dot{Z} &= \beta(X - Z) \end{aligned} \tag{3.22}$$



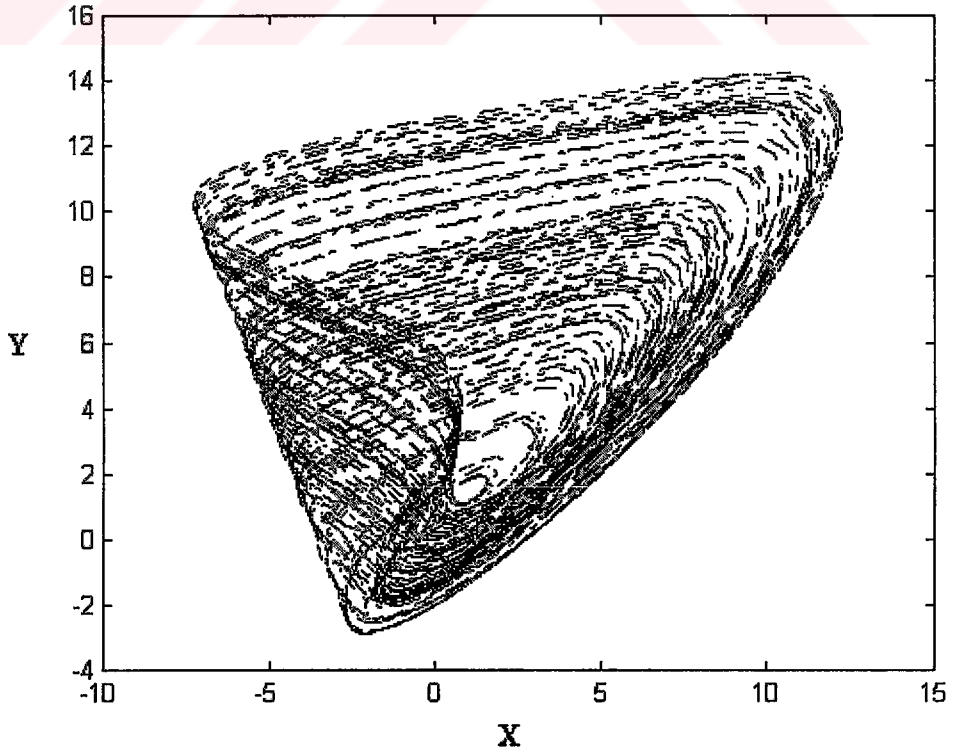
Şekil 3.12. FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatör.

$$(a,b)=\begin{cases} a=\alpha, b=0 & (K-1)X-Y\le 1 \\ a=0, b=\alpha & (K-1)X-Y>1 \end{cases}$$

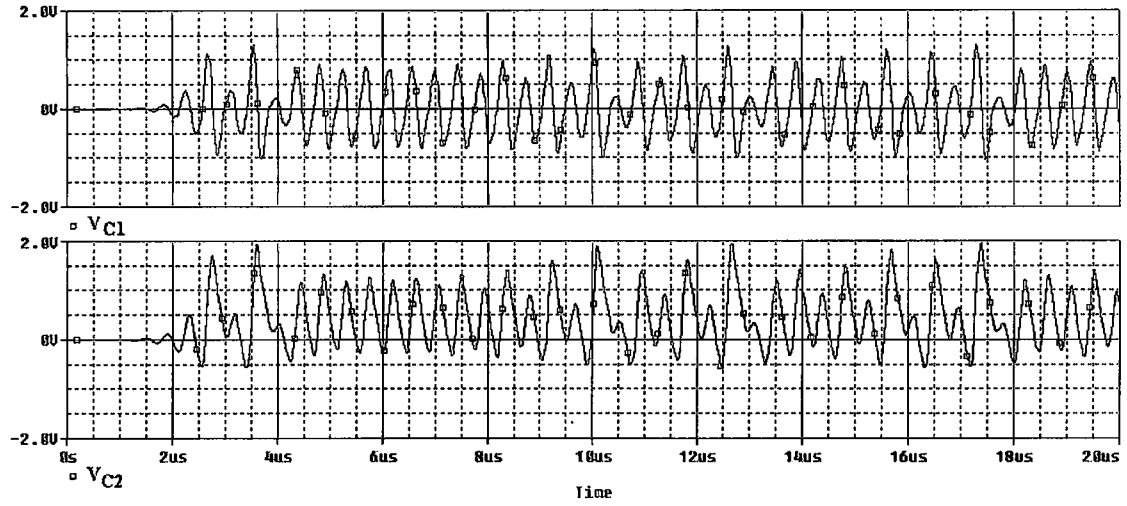
burada α, β ve K sabittirler.

Şekil 3.13' de gösterilen X-Y düzlemindeki grafik, Denklem (3.22)' ün çözülmesiyle $\alpha=1.2$, $\beta=0.45$ ve $K=2.37$ alınarak elde edilmiştir.

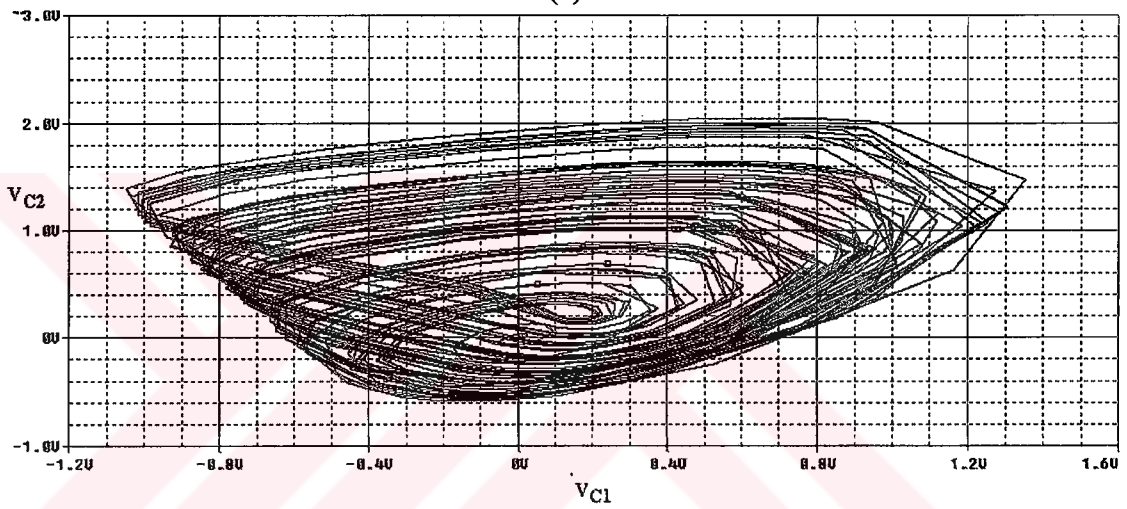
Şekil 3.12' de gösterilen devrede $C_1=C_2=50$ pF, $R_1=750$ Ω, L=50 μH, $R_3=1$ kΩ, $R_4=2.85$ kΩ alınarak, ±9V ile kutuplanan AD844 tipi CFOA ve $R_N=750$ Ω, $V_p=-0.7$ V parametrelerine sahip 2N4338 tipi JFET kullanılarak yapılan PSpice benzetimleri ile devrenin yüksek frekanstaki kaotik davranışları incelenmiştir. Bilgisayar benzetimlerinden elde edilen $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$ kaotik davranışlar ve (V_{C1}-V_{C2}) düzlemindeki kaotik çeker, sırasıyla Şekil 3.14(a) ve (b)' de, $V_{C1}(t)$' nin frekans spektrumu ise Şekil 3.14(c)' de gösterilmiştir. Şekil 3.14(c)' de gösterildiği gibi kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 2.3 MHz civarında olduğu tespit edilmiştir.



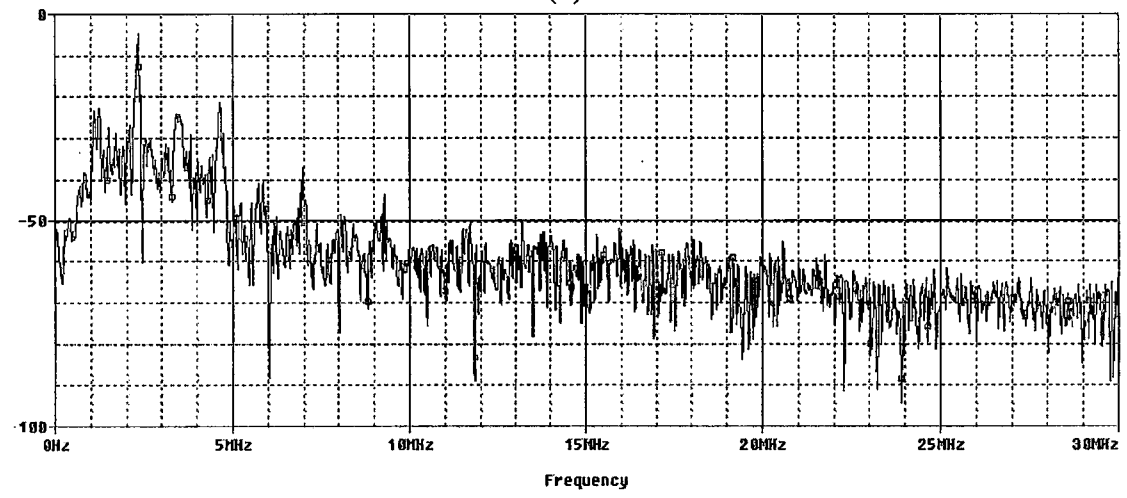
Şekil 3.13. FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörün Nümerik Çözümü.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.14. FET Kullanılarak Gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (V_{C1}-V_{C2}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) $V_{C1}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu.

3.2.6. 4 Boyutlu Kaotik Osilatör

Şekil 3.15' deki 4 boyutlu (4D) kaotik devre, kendi içerisinde paralel ve seri şekilde bağlanmış LC devresini (L_1C_1-L_2C_2), bir VOA' yı ve doğrusal olmayan eleman olarak kullanılan bir diyodu içermektedir [27]. Bu devredeki VOA, hem R_1, R_2, R_3 dirençleri ile birlikte negatif impedans dönüştürücü (Negative Impedance Converter, NIC) hem de çıkış kuvvetlendiricisi görevi yapmaktadır.

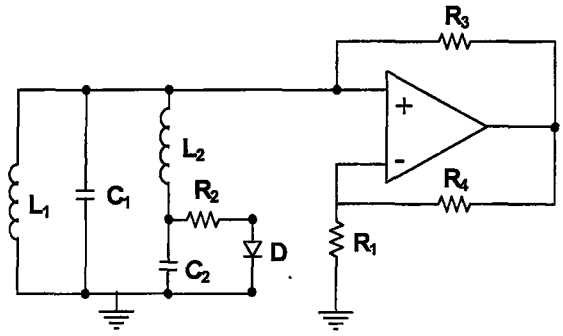
Şekil 3.15' deki osilatör devresi Denklem (3.23) ile tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned}
\frac{dV_{C1}}{dt} &= aV_{C1}(t) - I_{L1}(t) - I_{L2}(t) \\
\frac{dV_{C2}}{dt} &= e[I_{L2}(t) - b(V_{C2}(t) - 1)H(V_{C2}(t) - 1)] \\
\frac{dI_{L1}}{dt} &= V_{C1}(t) \\
\frac{dI_{L2}}{dt} &= d(V_{C1}(t) - V_{C2}(t))
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Yukarıdaki denklemler, nümerik çözümün gerçekleştirilebilmesi için aşağıda yer alan dönüşümler yapılarak Denklem (3.24)' deki boyutsuz bir forma dönüştürülür.

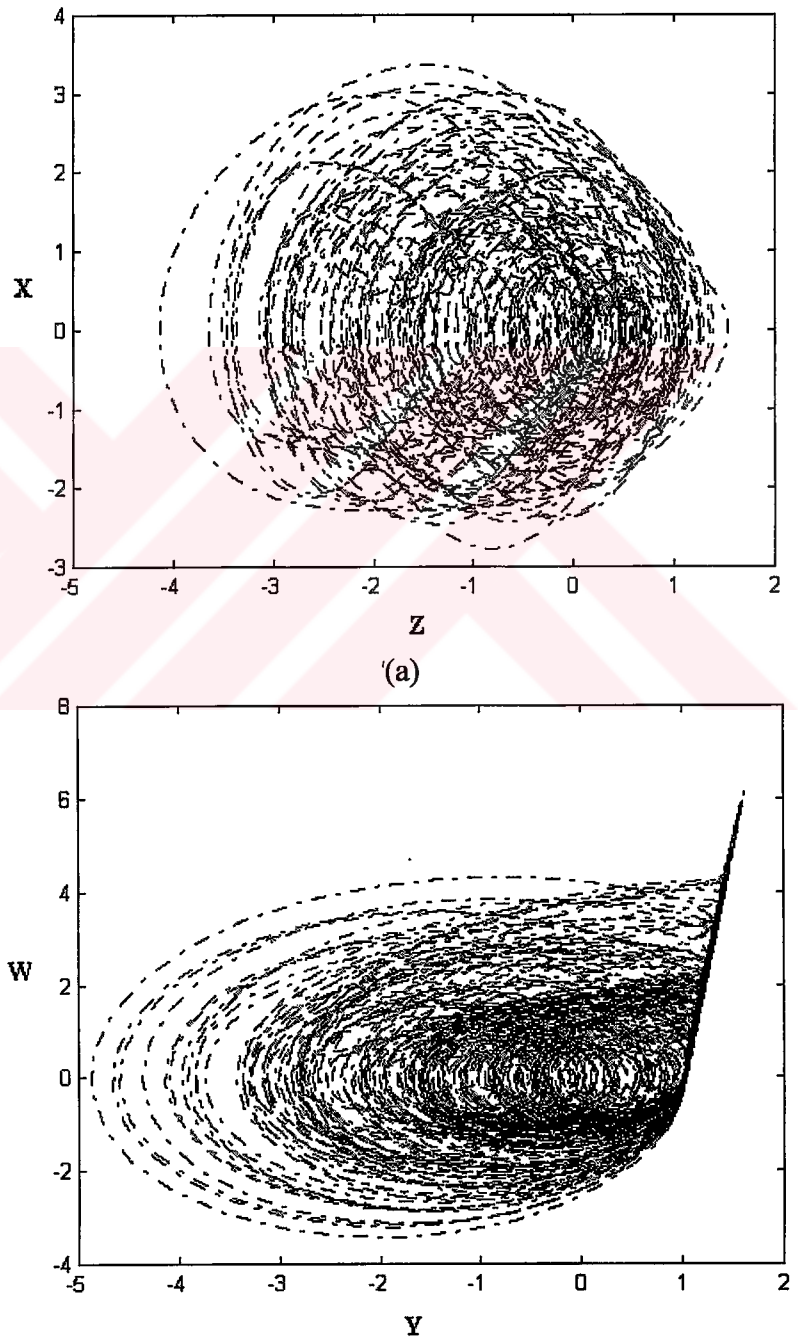
$X=V_{C1}$, $Y=V_{C2}$, $Z=I_{L1}$, $W=I_{L2}$

$$\begin{aligned}
\dot{X} &= aX - Z - W \\
\dot{Y} &= e[W - b(Y-1)H(Y-1)] \\
\dot{Z} &= X \\
\dot{W} &= d(X - Y)
\end{aligned} \tag{3.24}$$



Şekil 3.15. 4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresi.

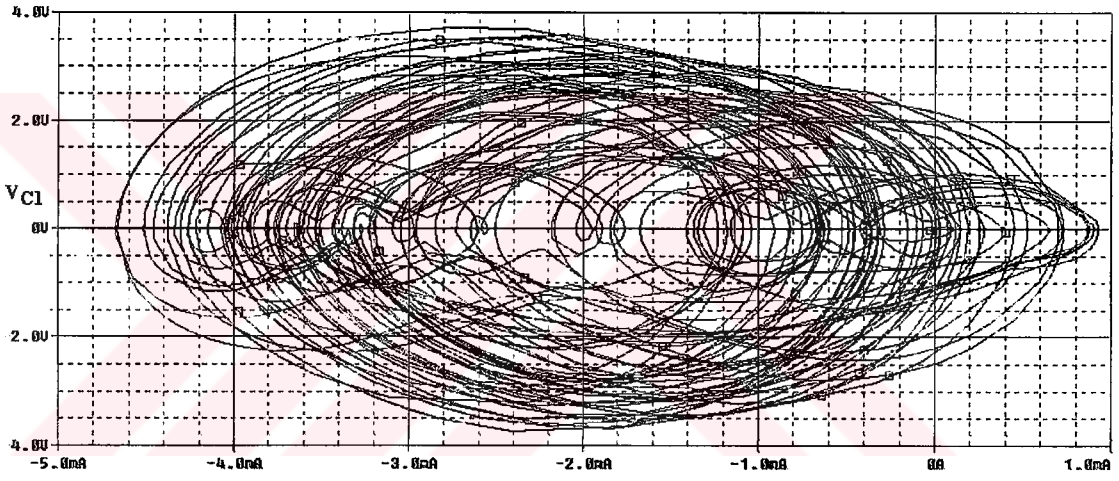
buradaki nümerik sabitler, $a=0.7$, $b=10$, $c=e=3$ değerinde olup, H(u); sürekli olmayan adım fonksiyonunu göstermektedir ve H(u<0)=0 veya H(u≥0)=1'dir [19]. Şekil 3.14' deki kaotik devrenin nümerik çözümün grafik gösterimleri, Şekil 3.16(a) ve (b)' de verilmiştir.



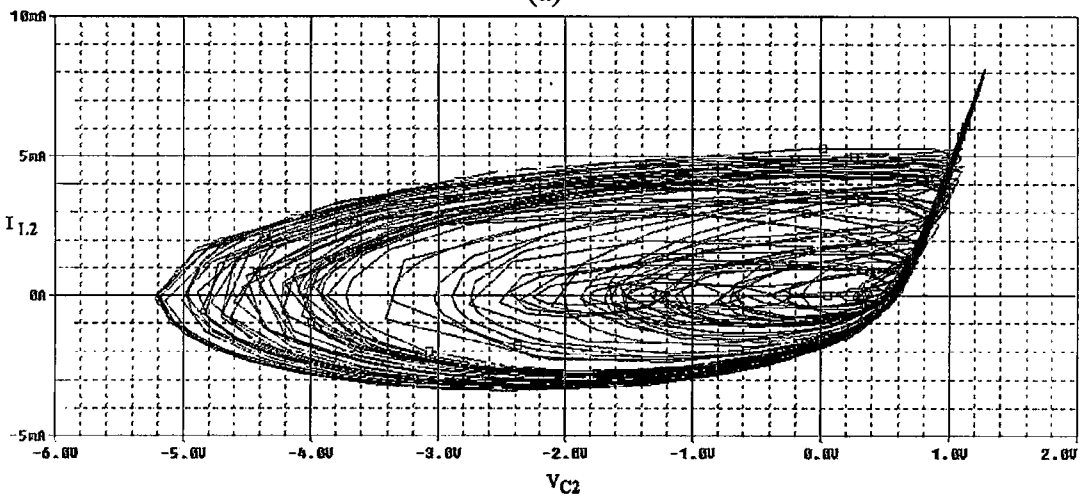
Şekil 3.16. 4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresinin, (a) (Z-X) Düzlemindeki Nümerik Çözümü, (b) (Y-W) Düzlemindeki Nümerik Çözümü.

Şekil 3.15'deki devrenin PSpice benzetiminin yapılması için, R_1=1 kΩ, R_2=70 Ω, R_3=4 kΩ, R_4=4 kΩ, C_1=30 nF, C_2=10 nF, L_1=30 mH, L_2=10 mH olarak sabit alınmıştır ve 1N4148 diyodu ile ±12 V olarak kutuplandırılmış AD712 VOA tümdevresi kullanılmıştır.

VOA-tabanlı 4 boyutlu kaotik osilatör devresinde kapasitör ve bobin değerlerinin küçültülmesiyle çalışma frekansının 6.17 kHz' den 175 kHz' e kadar arttığı görülmüştür. 175 kHz' den büyük çalışma frekanslarında, devrenin orijinal kaotik dinamik davranışı bozulmuştur. Kaotik devrenin çeker yapısı, Şekil 3.17(a) ve (b), kaotik davranışları ise Şekil 3.18' de verilmiştir.

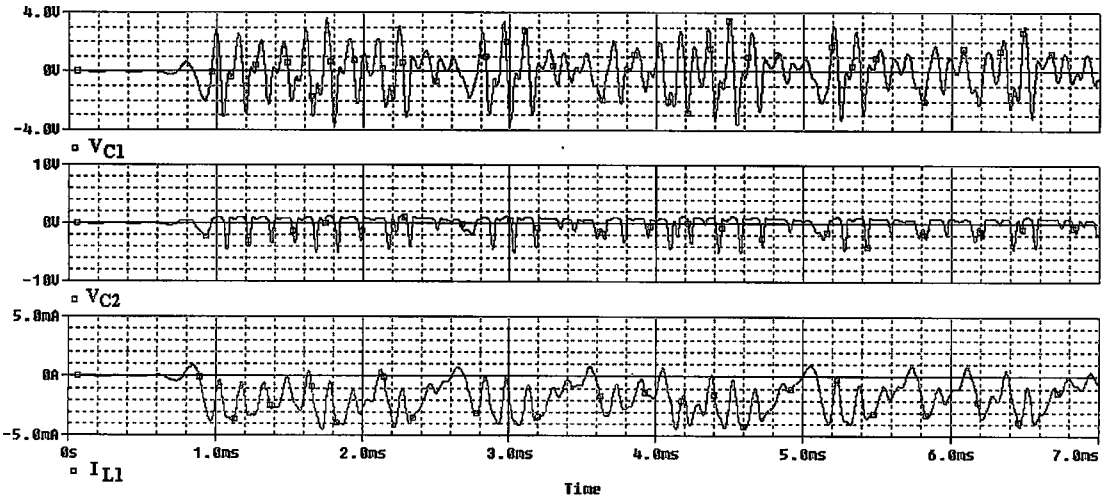


(a)



(b)

Şekil 3.17. 4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresinin, (a) (I_{L1}-V_{C1}) Düzlemindeki Çeker Gösterimi, (b) (V_{C2}-I_{L2}) Düzlemindeki Çeker Gösterimi.



Şekil 3.18. 4 Boyutlu Kaotik Osilatör Devresinin Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $I_{L1}(t)$ Devre Dinamikleri.

3.3. Kaotik RC Osilatörler

Bu bölümde, kaotik Wien köprü-tabanlı Chua devresinin, FET-C konfigürasyonu kullanılan Wien köprü osilatörünün ve basit kaotik RC osilatörünün üzerinde durulmuştur.

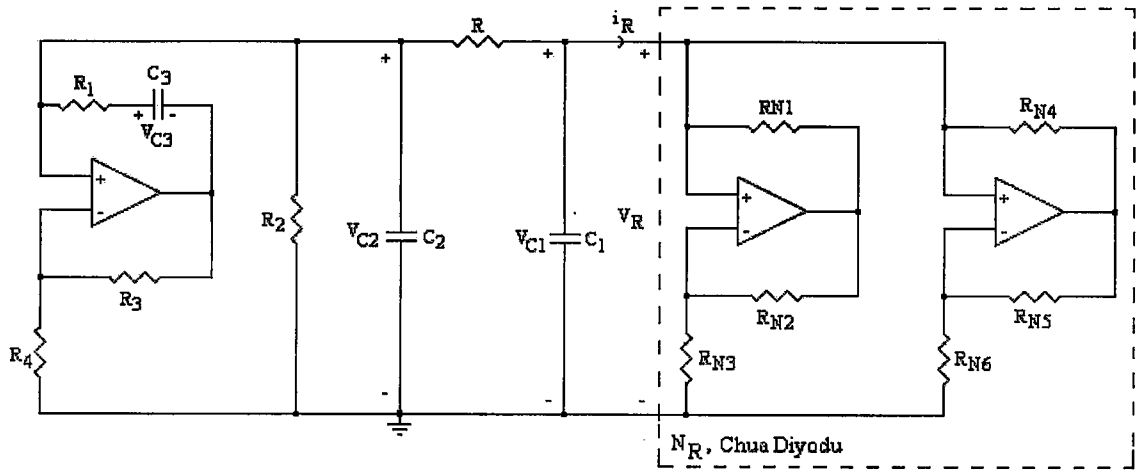
3.3.1. Wien Köprü-Tabanlı Chua Devresi

Şekil 3.19' da Wien köprü-tabanlı yapı ile gerçekleştirilen Chua osilatörü gösterilmektedir [23]. Bu tasarım, paralel iki adet voltaj kontrollü NIC' lerin bağlanmasıyla oluşan VOA-tabanlı doğrusal olmayan direnci ve VOA-tabanlı Wien köprü-tabanlı yapıyı içermektedir. Wien köprü-tabanlı Chua osilatörünün durum denklemleri Denklem (3.25), (3.26) ve (3.27)' de tanımlanmaktadır:

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = -\frac{V_{C1}}{RC_1} + \frac{V_{C2}}{RC_1} - \frac{f(V_R)}{C_1} \tag{3.25}$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{V_{C1}}{RC_2} - \frac{V_{C2}}{R_xC_2} + \frac{V_{C3}}{R_1C_2} \tag{3.26}$$

$$\frac{dV_{C3}}{dt} = -\frac{R_3V_{C2}}{R_1R_4C_3} - \frac{V_{C3}}{R_1C_3} \tag{3.27}$$



Şekil 3.19. Wien Köprü-Tabanlı Chua Osilatörü.

burada $f(V_R)$, Denklem (3.4) ile tanımlanmıştır. Bu gerçekleştirimde VOA-tabanlı doğrusal olmayan direnç yapısı kullanılmıştır [8]. Denklem (3.26)' daki R_x parametresi, Denklem (3.28)' de tanımlanmaktadır:

$$R_x = \frac{RR_1R_2R_4}{R(R_1R_4 - R_2R_3) + R_1R_2R_4} \tag{3.28}$$

Denklem (3.25), (3.26) ve (3.27)' i kullanarak devrenin nümerik çözümü için aşağıdaki kabuller yapılarak, Denklem (3.29)' daki boyutsuz forma dönüştürülür:

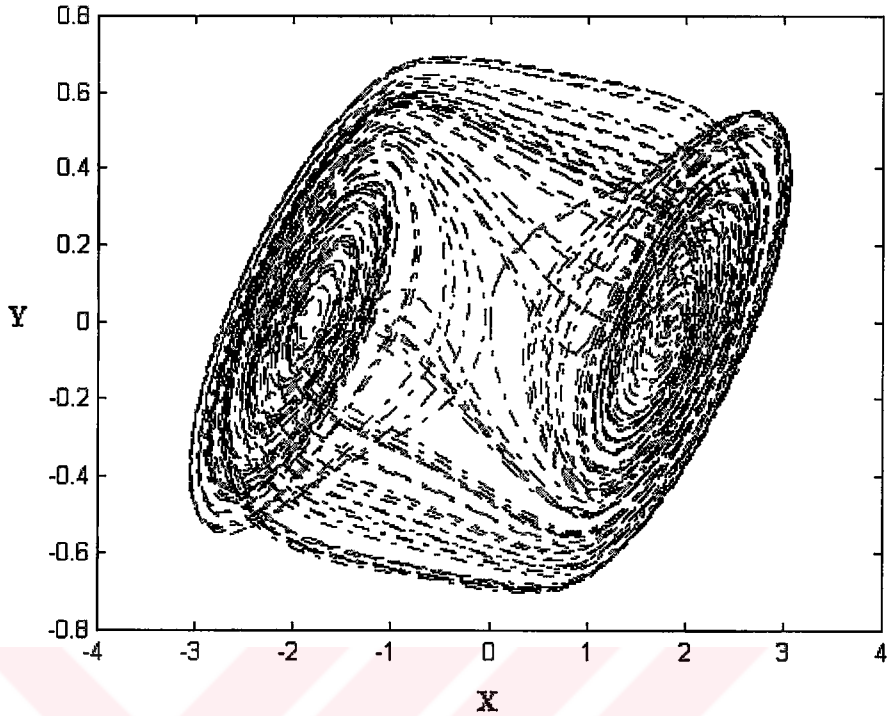
$V_{C1}=X$, $V_{C2}=Y$, $V_{C3}=Z$,

$$\alpha = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{RC_1},\ \beta = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{RC_2} = \frac{1}{R_XC_2},\ K = \frac{R_3}{R_1R_4C_3},\ a=G_a,\ b=G_b,\ c=B_p$$

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \alpha(Y - X - f(X)) \\ \dot{Y} &= \beta(X - Y + Z) \\ \dot{Z} &= -KY \\ f(X) &= bX + 0.5(a-b)(|X+c| - |X-c|) \end{aligned} \tag{3.29}$$

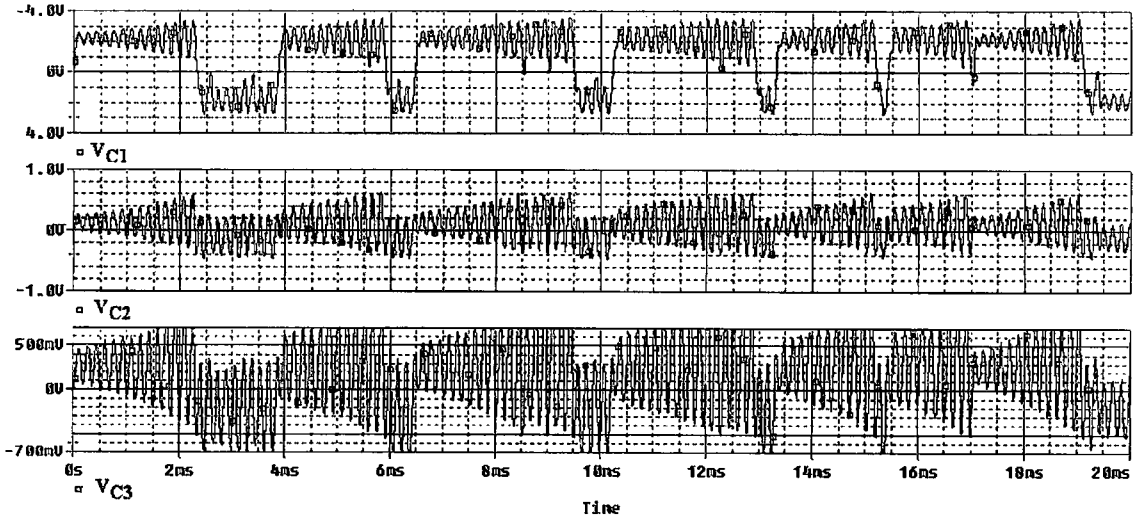
burada α, β, K, a, b ve c birer sabittir.

α=10, β=1, K=14.42, a=-1.27, b=-0.68 ve c=1 alınarak Denklem (3.29)' un çözülmesiyle X-Y düzleminde elde edilen grafiği Şekil 3.20' de gösterilmektedir.

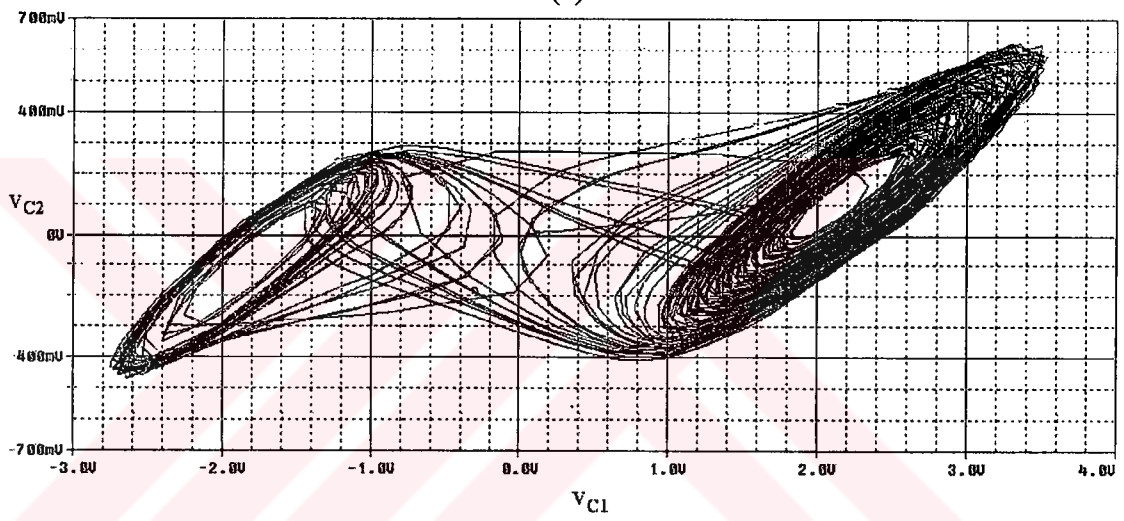


Şekil 3.20. Wien Köprü-Tabanlı RC Yapı İle Gerçekleştirilen Chua Osilatörünün Nümerik Çözümü.

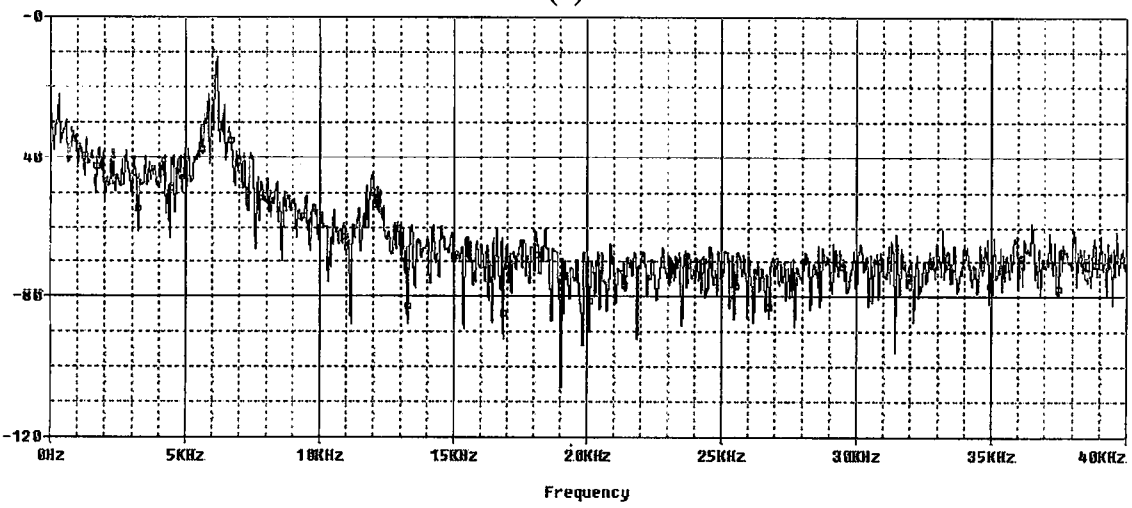
Şekil 3.19' daki devrenin PSpice benzetimi, farklı değerlerde kapasitör ve dirençler ile gerçekleştirilmiştir. Bu devrenin benzetim çalışması süresince doğrusal olmayan direncin parametre değerleri aşağıdaki gibi sabit alınmıştır: $R_{N1}=R_{N2}=220\ \Omega$, $R_{N3}=2.2\ k\Omega$, $R_{N4}=R_{N5}=22\ k\Omega$ ve $R_{N6}=3.3\ k\Omega$. Aktif eleman olarak da ±9V ile kutuplanan LF351 tipi VOA kullanılmıştır Devrenin geri kalan parametreleri ise $R_1=R_2=R_4=100\ \Omega$, $R_3=204\ \Omega$, $R=1631\ \Omega$, $C_1=2.2$ nF ve $C_2=C_3=220$ nF olarak belirlenmiştir. Devrenin $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $V_{C3}(t)$ devre dinamikleri Şekil 3.21(a)' da, çift çeker yapısı, Şekil 3.21(b)' de gösterilirken, kaotik frekans spektrumu da Şekil 3.21(c)' de gösterilmektedir. Şekilde de gösterildiği gibi Wien köprü-tabanlı Chua devresinin kaotik spektrumunun temel frekans bileşeninin yaklaşık 6.17 kHz civarında olduğu tespit edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.21. Wien Köprü-Tabanlı Chua Devresinin, (a) Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $V_{C3}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) Çift Çeker Yapısı, (c) $V_{C2}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu.

3.3.2. FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü

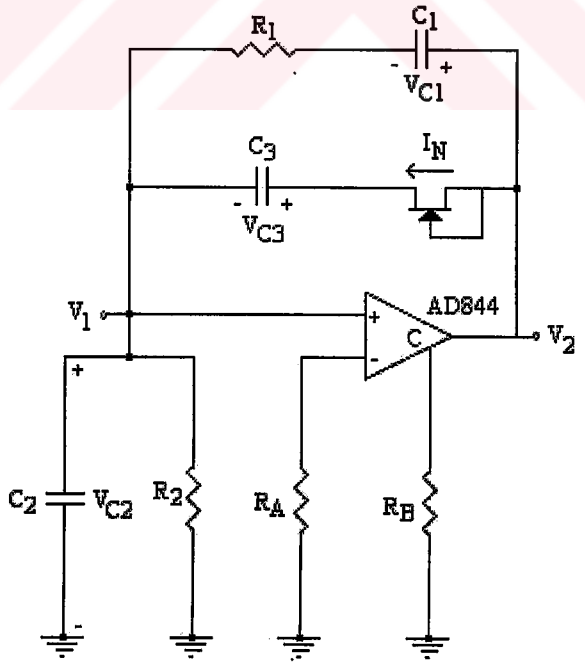
FET-C konfigürasyonu kullanılan Wien köprü osilatörünün devre yapısı Şekil 3.22' de gösterilmiştir [19]. Bu tasarımda Wien köprü osilatörün kuvvetlendirici bloğu, $K = \frac{R_B}{R_A}$ kazancı ile evirmeyen voltaj kontrollü voltaj kaynağı olarak yapılandırılan CFOA ile gerçekleştirilmiştir. Bu osilatör, Denklem (3.30), (3.31), (3.32) ve (3.33) durum denklemleri ile tanımlanmaktadır:

$$C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = I_N \tag{3.30}$$

$$C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{V_2 - V_{C1} - V_1}{R_1} - \frac{V_{C2}}{R_2} + I_N \tag{3.31}$$

$$C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{V_2 - V_{C1} - V_1}{R_1} \tag{3.32}$$

$$I_N = \frac{1}{R_N} \begin{cases} V_2 - V_{C3} - V_1 & V_2 - V_{C3} - V_1 \geq V_P \\ V_P & V_2 - V_{C3} - V_1 < V_P \end{cases} \tag{3.33}$$



Şekil 3.22. FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörü.

Denklem (3.31), (3.32) ve (3.33), devrenin nümerik çözümünün gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki kabuller yapılarak Denklem (3.34)' deki boyutsuz forma dönüştürülmüştür.

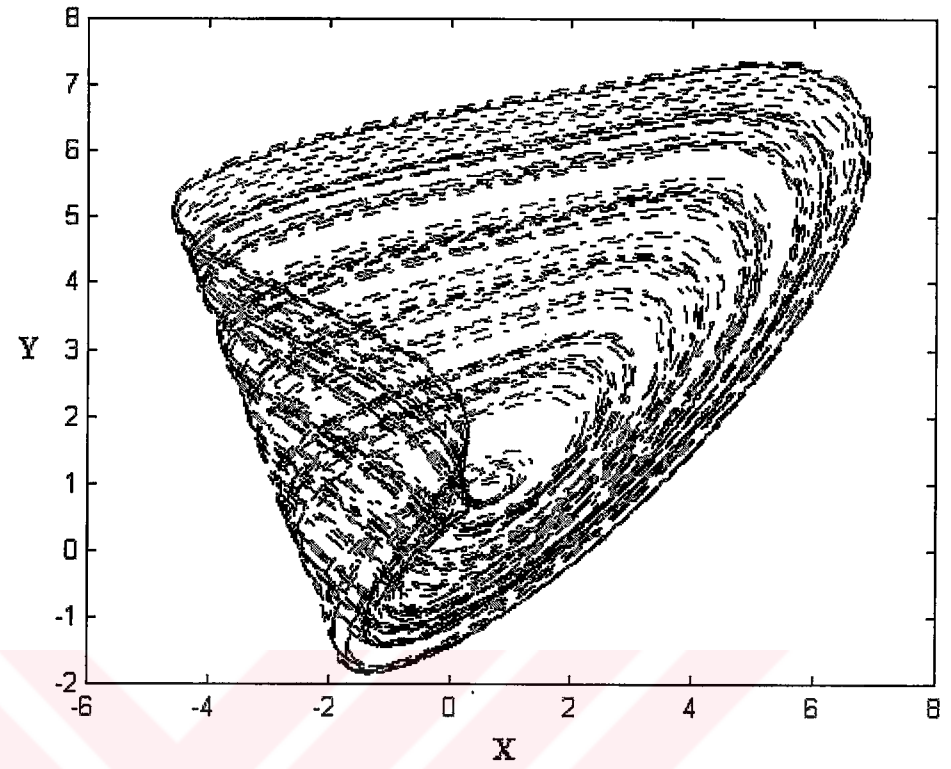
$X=V_{C1}/V_P$, $Y=V_{C2}/V_P$, $Z=V_{C3}/V_P$,

$V_2-V_1=(K-1)V_{C2}$, $R_1=R_2=R_N=R$, $C_1=C_2=C_3=C$, $\tau=t/RC$

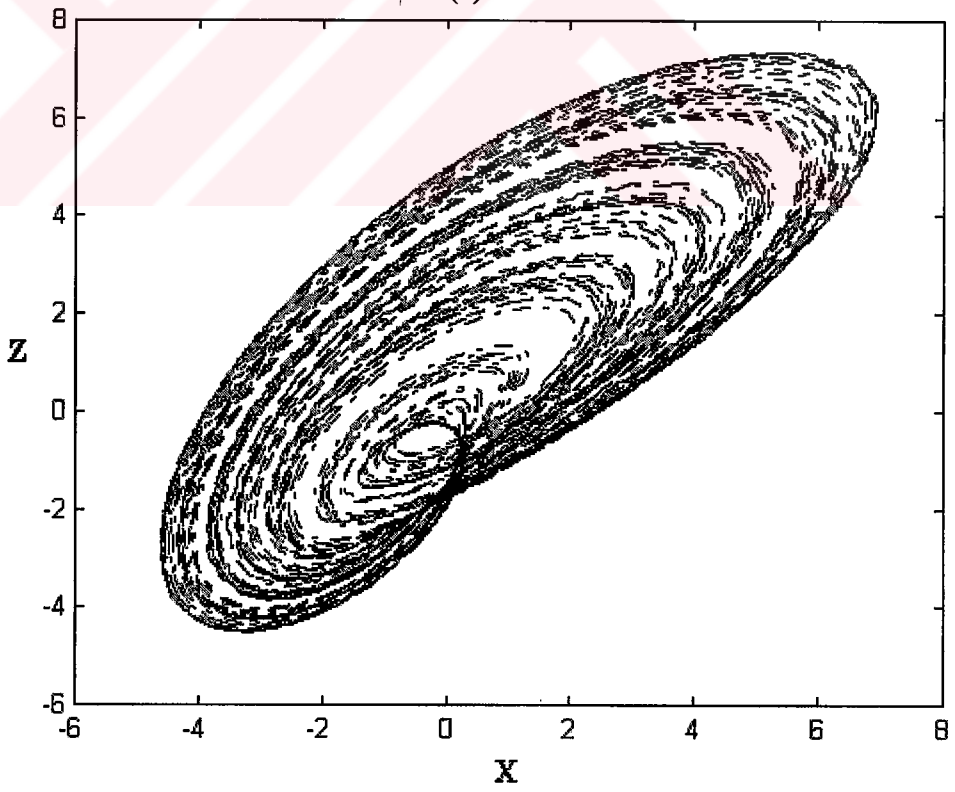
$$\begin{aligned}
\dot{X} &= (K-1)X - Z \\
\dot{Y} &= (-2-a+(1+a)K)X - aY - Z + b \\
\dot{Z} &= a(K-1)X - aY + b \\
(a,b) &= \begin{cases} a=1, b=0, & (K-1)Y - Z \le 1 \\ a=0, b=1, & (K-1)Y - Z > 1 \end{cases}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

Osilasyonun başlaması için gerekli olan kazanç, 2' den büyük olmalıdır. Bu devrede $K=2.38$ olarak seçilmiştir. Denklem (3.34)' in çözülmesiyle (X-Y) ve (X-Z) düzlemlerinde elde edilen grafikler sırasıyla Şekil 3.23(a) ve (b)' de gösterilmektedir.

PSpice benzetimi yapılan Şekil 3.22' deki devre, $R_1=R_3=750\ \Omega$, $C_1=C_2=C_3=1$ nF, $R_A=1$ kΩ, $R_B=5$ kΩ pot alınarak incelenmiştir. Benzetimde doğrusal olmayan eleman olarak 2N4338 tipi JFET ve aktif yapı bloğu olarak ±9V ile kutuplanan AD844 tipi CFOA kullanılmıştır. Kullanılan JFET' in çalışma noktasındaki küçük işaret direnci, $R_N=750\ \Omega$ ve kısılma voltajı ise $V_p=-0.7$ V' dur. Kazancı $K=2.5$ olacak şekilde R_B değeri ayarlanmıştır. PSpice benzetiminden elde edilen $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $V_{C3}(t)$ kaotik davranışlar, Şekil 3.24(a)' da verilirken (V_{C2}-V_{C3}) düzlemindeki kaotik çeker, Şekil 3.24(b)' de ve (V_{C2}-V_{C1}) düzlemindeki kaotik çeker ise Şekil 3.24(c)' de gösterilmiştir.

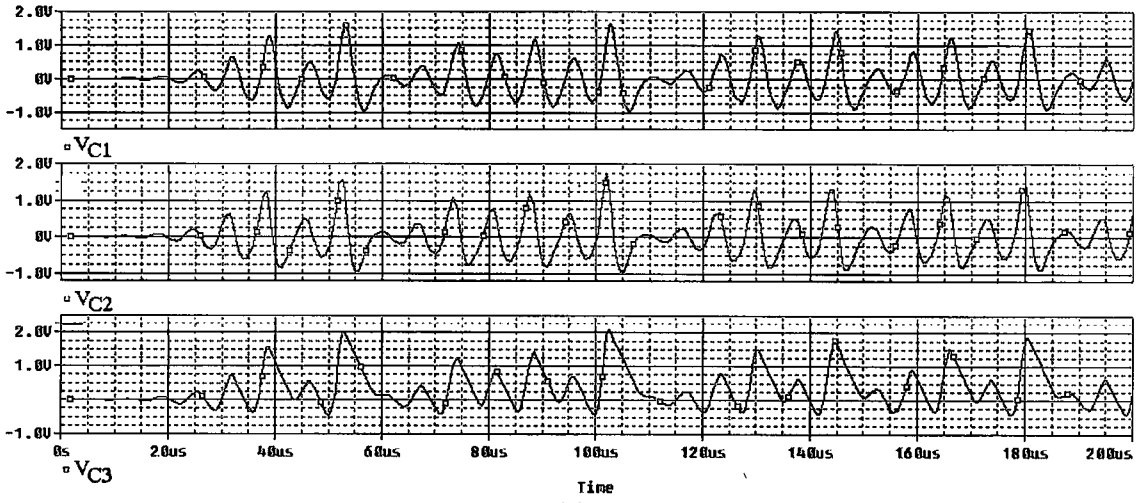


(a)

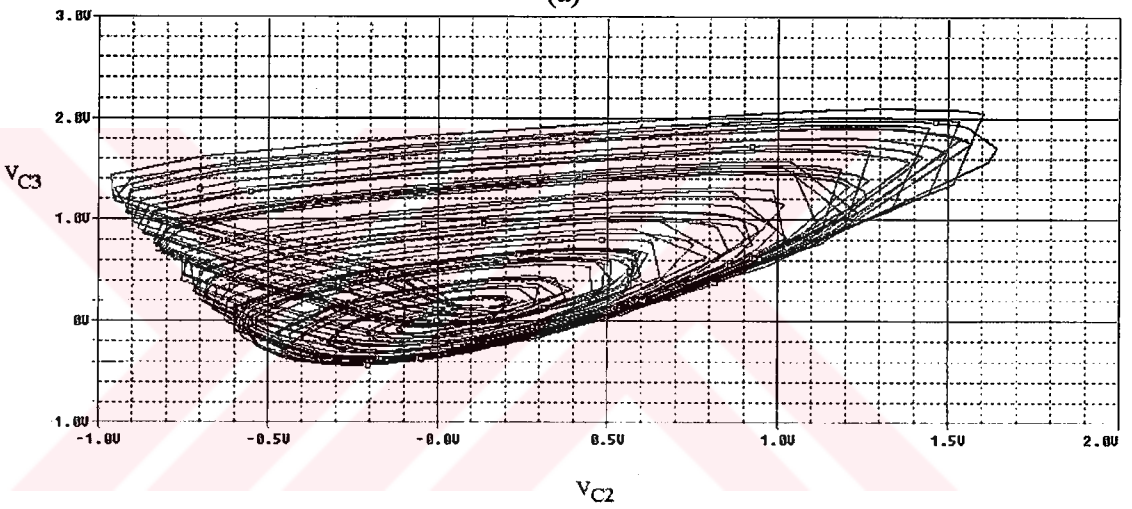


(b)

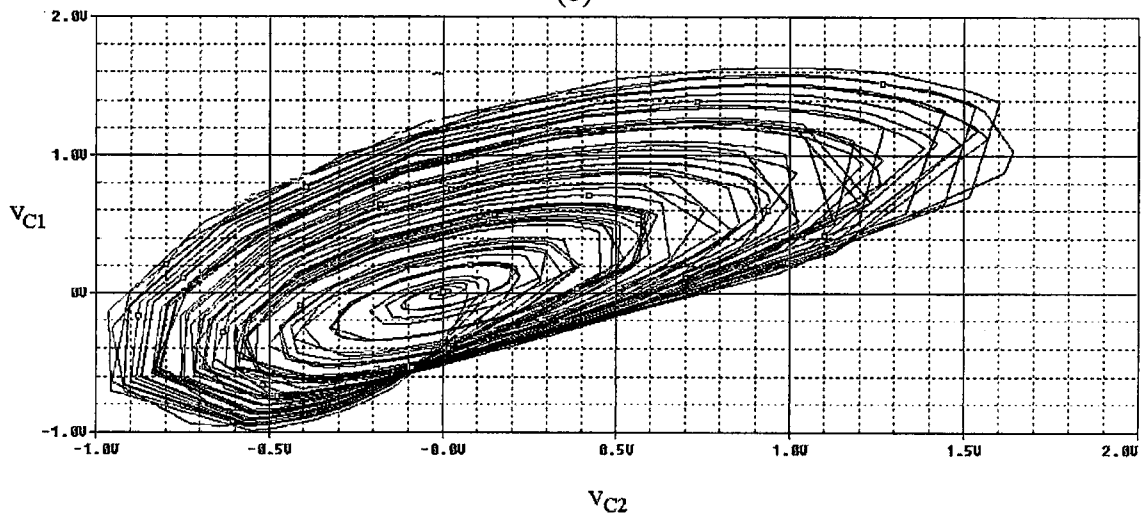
Şekil 3.23. FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatörün Nümerik Çözümü.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.24. FET-C Konfigürasyonu Kullanılan Wien Köprü Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$, $V_{C3}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (V_{C2}-V_{C3}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çeker Yapısı.

3.3.3. Basit Kaotik RC Osilatör

Şekil 3.25' deki VOA-tabanlı kaotik devre, üç adet kapasitör, üç adet direnç, iki adet VOA ve *F(v)* fonksiyonu ile gösterilen doğrusal olmayan bir devre bloğu içermektedir [28]. Bu devre, "Jerk Denklemi" olarak adlandırılan üçüncü dereceden bir diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır:

$$\dddot{v} + A\ddot{v} + \dot{v} = F(v) \tag{3.35}$$

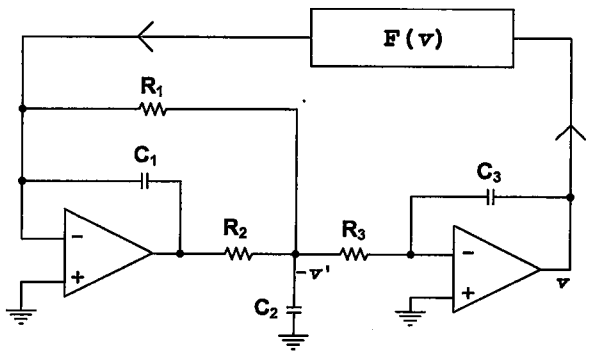
Burada A, 0.6'ya eşit veya biraz büyük olan nümerik bir sabittir. *F(v)*, parçalı doğrusal olmayan bir fonksiyondur ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [29]:

$$F(v) = -1.2v + 2\,\mathrm{sgn}(v) \tag{3.36}$$

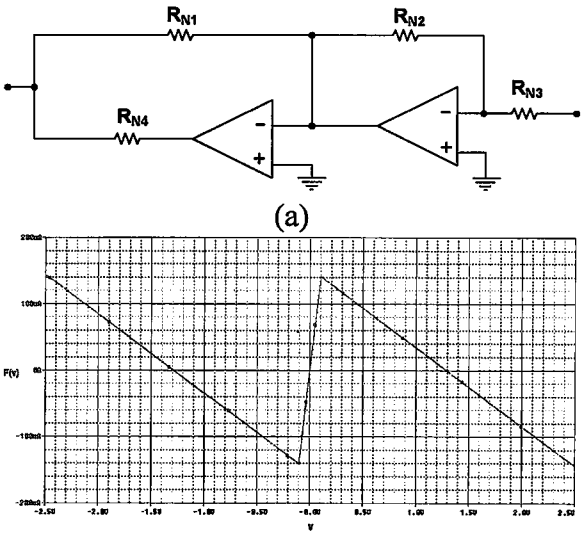
Denklem (3.36) ile tanımlanan doğrusal olmayan devre bloğunun şekli ve benzetimi yapılmış dc karakteristiği sırasıyla Şekil 3.26(a) ve (b)' de verilmiştir.

Bu devrenin Denklem (3.35), (3.36) çözülerek nümerik çözümü yapılmış olup elde edilen çeker yapıları Şekil 3.27' de verilmiştir.

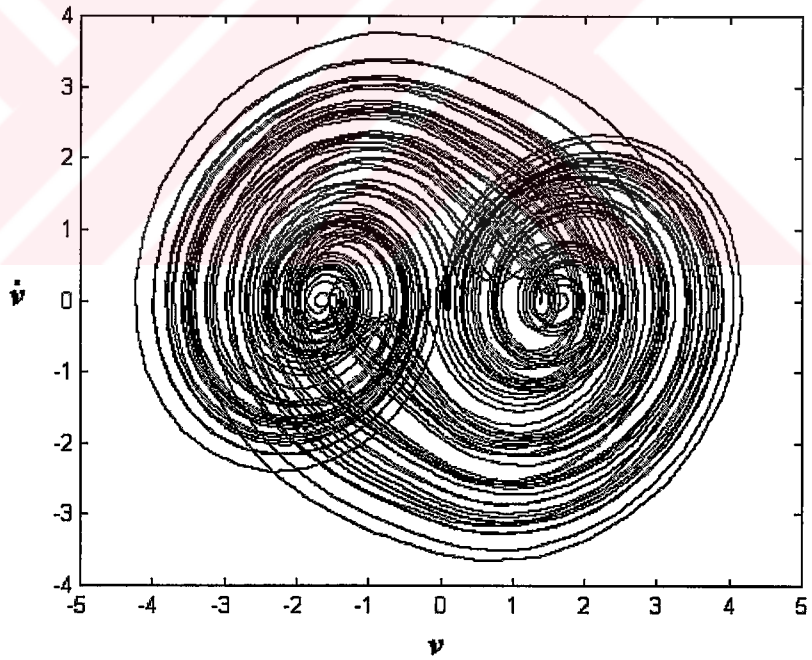
PSpice programı ile benzetimi yapılan Şekil 3.25' deki devrenin parametre değerleri, R_1=R_2=R_3=1 kΩ, C_1=0.02 μF, C_2=0.5 μF, C_3=0.01 μF olarak seçilmiş iken Şekil 3.26' daki *F(v)* doğrusal olmayan bloğun parametre değerleri, R_{N1}=8333 Ω, R_{N2}=R_{N3}=1 kΩ, R_{N4}=45 kΩ olarak belirlenmiştir [28]. Bu devrede kullanılan AD712 tümdevresi, ±9V ile kutuplanmıştır.



Şekil 3.25. Basit Kaotik RC Osilatör Devresi.

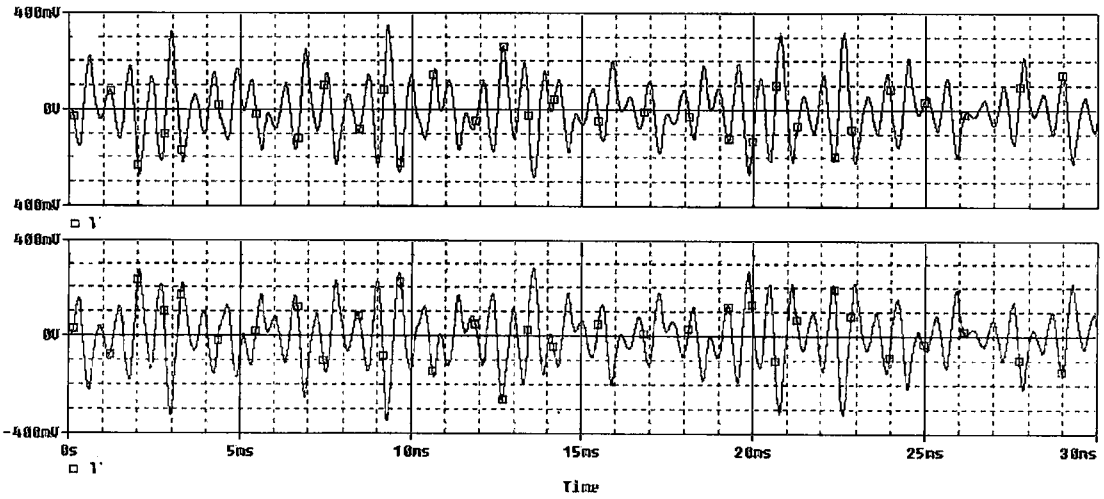


Şekil 3.26. Basit Kaotik RC Osilatör Devresinin (a) *F(v)* Doğrusal Olmayan Devre Bloğu, (b) Devrenin DC Karakteristiği.

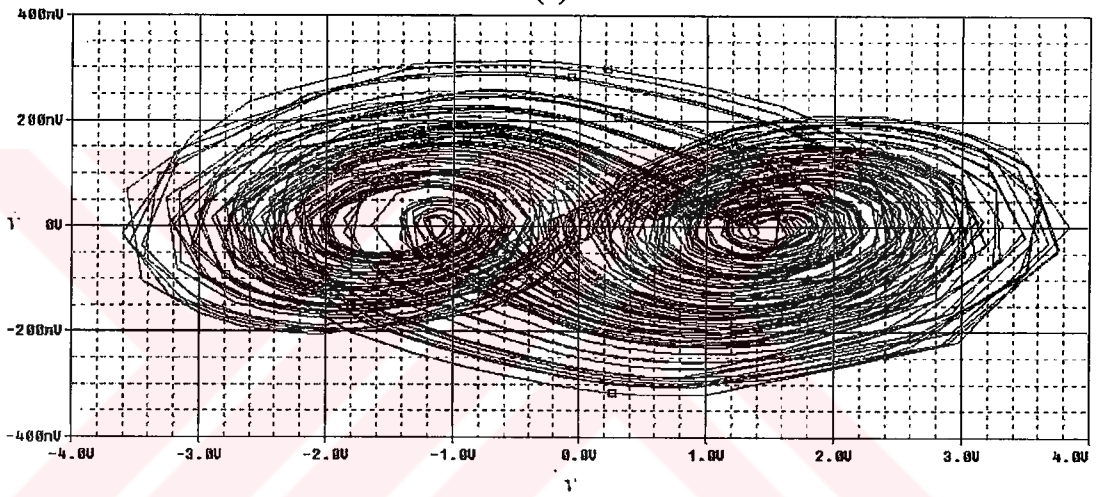


Şekil 3.27. Basit Kaotik RC Osilatörün Nümerik Çözümü.

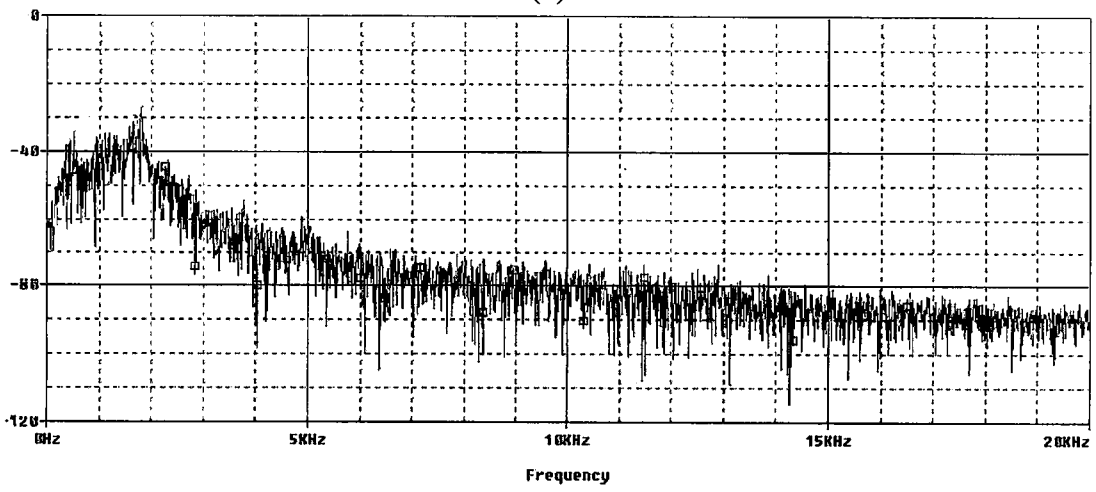
VOA-tabanlı RC devresinin çalışma frekansı, kapasitörlerin değerleri küçültülerek 1.8 kHz' den 40 kHz' e kadar değişmektedir. Devrenin orijinal kaotik dinamik davranışları, çalışma frekansı için 40 kHz' den büyük değerlerde kaybolmaktadır. Şekil 3.28' de bu devrenin benzetim sonuçları yer almaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.28. Basit Kaotik RC Osilatör Devresinin, (a) Kaotik $v(t)$, $\dot{v}(t)$ Devre Dinamikleri, (b) (v-$\dot{v}$) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, (c) $\dot{v}(t)$ Kaotik Frekans Spektrumu.

Tablo 3.1. Kaotik Osilatör Devrelerinin Birbirleri İle Karşılaştırılması.

Kaotik Osilatörler	Aktif Yapı Bloğu	Pasif Eleman Yapısı	Doğrusal Olmayan Eleman/Konfigürasyon Yapısı	Çalışma Frekansı
CFOA-tabanlı Chua diyodu kullanılarak gerçekleştirilen Chua osilatörü (Şekil 3.2)	Chua diyodu için 2 adet AD844 tipi CFOA	LC (LC kısmı için, 1 adet direnç, 1 adet indüktör, 2 adet kapasitör; Chua diyodu için, 4 adet direnç, toplam 8 eleman)	CFOA-tabanlı Chua Diyodu	Çalışma frekansı 3 kHz~827 kHz arasında değişmektedir.
Diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan Wien köprü osilatörü (Şekil 3.5)	1 AD844 tipi CFOA	LC (4 adet direnç, 1 adet indüktör 2 adet kapasitör, toplam 7 eleman)	Diyot-Indüktör konfigürasyonu, 1N914 tipi diyot	Çalışma frekansı yaklaşık 360 kHz civarındadır.
Kaotik Colpitts Osilatörü (Şekil 3.9)	1 adet 2N2222 tipi BJT	LC (2 adet direnç, 1 adet indüktör, 2 adet kapasitör, toplam 5 eleman)	2N2222 tipi BJT	Çalışma frekansı 42 kHz civarındadır.
FET kullanılarak gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörü (Şekil 3.12)	1 adet AD844 tipi CFOA	LC (3 adet direnç, 1 adet indüktör, 2 adet kapasitör, toplam 6 eleman)	FET-Kapasitör Konfigürasyonu, 2N4338 tipi JFET	Çalışma frekansı yaklaşık 2.3 MHz civarındadır.
4 boyutlu kaotik osilatör (Şekil 3.15)	1 adet AD712 tipi VOA	LC (4 adet direnç, 2 adet indüktör, 2 adet kapasitör, toplam 8 eleman)	1N4148 tipi diyot,	Çalışma frekansı 6.17 kHz~175 kHz arasında değişmektedir.
Wien köprü-tabanlı Chua devresi (Şekil 3.19)	Wien köprü devresi için 1 adet LF351 tipi VOA; Chua diyodu için 2 adet LF351 tipi VOA	RC (Wien köprü kısmı için, 4 adet direnç, 2 adet kapasitör ve Chua diyodu ve devrenin geri kalan kısmı için, 7 adet direnç, 1 adet kapasitör, toplam 14 eleman)	VOA-tabanlı Chua Diyodu	Çalışma frekansı yaklaşık 6.17 kHz civarındadır.
FET-C konfigürasyonu kullanılan CFOA-tabanlı Wien köprü osilatörü (Şekil 3.22)	1 adet AD844 tipi CFOA	RC (4 adet direnç, 3 adet kapasitör, toplam 7 eleman)	FET-Kapasitör Konfigürasyonu, 2N4338 tipi JFET	Çalışma frekansı yaklaşık 140 kHz civarındadır.
Basit kaotik RC osilatörü (Şekil 3.25)	Doğrusal olmayan devre bloğu için, 2 adet AD712 tipi VOA, devre için, 2 adet AD712 tipi VOA	RC (Doğrusal olmayan devre bloğu için, 4 adet direnç; devre için 3 adet direnç ve 3 adet kapasitör, toplam 10 eleman)	VOA-tabanlı doğrusal olmayan devre bloğu	Çalışma frekansı 1.18 kHz~40 kHz arasında değişmektedir.

BÖLÜM 4

KAOTİK OSİLATÖRLERİN YÜKSEK FREKANS UYARLAMALARI VE DENEYSEL OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

4.1. Giriş

Bu bölümde daha önceki bölümde nümerik çözümleri ve PSpice benzetimleri verilen kaotik osilatör yapılarının yüksek frekanslı çalışma moduna göre uyarlamaları ve uyarlanan bu yapıların yüksek frekans performansları laboratuar deneyleri ile incelenecektir. Ayrıca bölümün sonunda, incelenen osilatör devrelerinin çeşitli kriterlere göre yapılan mukayeseleri tablo halinde sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda yüksek frekans davranışlarının iyi olmasından dolayı aktif eleman olarak CFOA, CCII formatında kullanılan AD844 entegresi tercih edilmiştir. Deneysel çalışmalarda fiziksel büyüklük problemi, parazitik etkileri gibi olumsuzlukları gidermek amacıyla indüktör yerine aktif elemanlardan ve RC yapılardan oluşan indüktör simülatörleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, zaman domeninde ve frekans domeninde bilgisayar ara bağlaşımlı GOULD-DSO 400 dijital hafızalı osiloskop ve SPERRY-RF Field Analyzer 3200 spektrum analizör ile kaydedilmiştir.

4.2. Yüksek Frekanslı Çalışma Moduna Uyarlanan Kaotik Osilatörler

Bu bölümde, bir önceki bölümde verilen kaotik LC ve RC osilatörlerinden bazıları yüksek frekanslı çalışma moduna uyarlanmış olup, incelenen osilatör yapıları RC-tabanlı hale dönüştürülmüştür ve elde edilen yeni yapılar, kaotik RC-1, RC-2, RC-3, RC-4, RC-5 ve RC-6 osilatör devreleri olarak adlandırılmıştır. Takip eden bölümde bu yapılar incelenecektir.

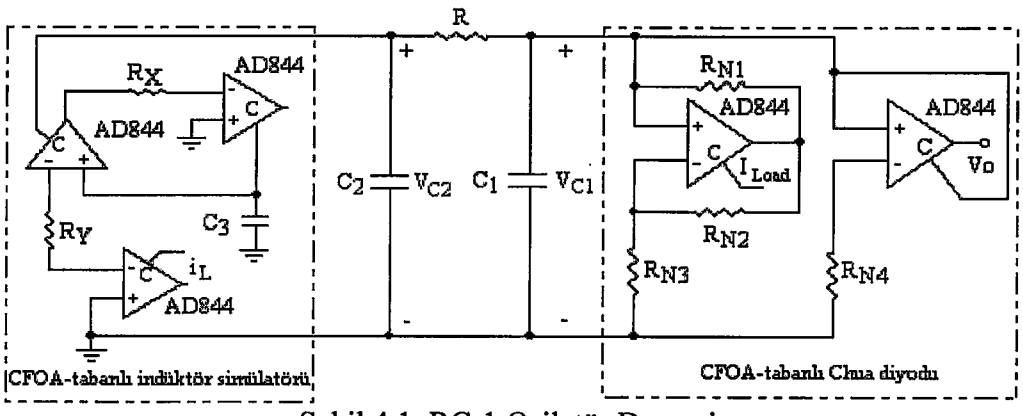
4.2.1. RC-1 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi

Şekil 4.1' de, RC-1 kaotik osilatör devresi gösterilmiştir. Bu devre, CFOA-tabanlı doğrusal olmayan direnç [11] ve CFOA-tabanlı indüktör simülatörü [13] ile gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan direnci gerçekleştirmek için ±9V ile kutuplanmış iki adet AD844 tipi CFOA ve dört adet direnç kullanılmış olup indüktör simülatörünü gerçekleştirmek için de ±9V ile kutuplanmış üç adet AD844 tipi CFOA, iki adet direnç ve bir adet kapasitör kullanılmıştır. İndüktör simülatörü yapısındaki eşdeğer indüktansı bulmak için Denklem (4.1) kullanılmıştır.

$$L_{eq}=R_X R_Y C_3 \tag{4.1}$$

Şekil 4.1' deki RC-1 osilatör devresinin deneysel çalışması yapılmıştır ve tüm yapılarda doğrusal olmayan direncin parametre değerleri aşağıdaki gibi sabit alınmıştır: $R_{N1}=R_{N2}=22$ kΩ, $R_{N3}=2$ kΩ pot. ve $R_{N4}=2.2$ kΩ [38]. Farklı frekans sahalarında özellikle de yüksek frekanslarda devrenin çalışmasını göstermek için devrenin geri kalan parametreleri üç grupta toplanmıştır.

Deneysel çalışmanın ilk parametre grubu, L=18 mH, C_1=10 nF, C_2=100 nF ve R=1.7 kΩ alınarak yapılmıştır. CFOA-tabanlı indüktör simülatörünün parametreleri, Denklem (4.1)' e göre L=18 mH' yi elde etmek için $R_X=R_Y$=1 kΩ, C_3=18 nF olarak belirlenmiştir. Devrenin frekans spektrumu, deneyde kullanılan spektrum analiz cihazının band genişliği 100 KHz-5 GHz aralığında olduğu için, kaotik frekans spektrumu kaydedilememiş olup devrenin PSpice programı ile benzetimi yapıldığında çalışma frekansının yaklaşık 3 kHz civarında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.1. RC-1 Osilatör Devresi.

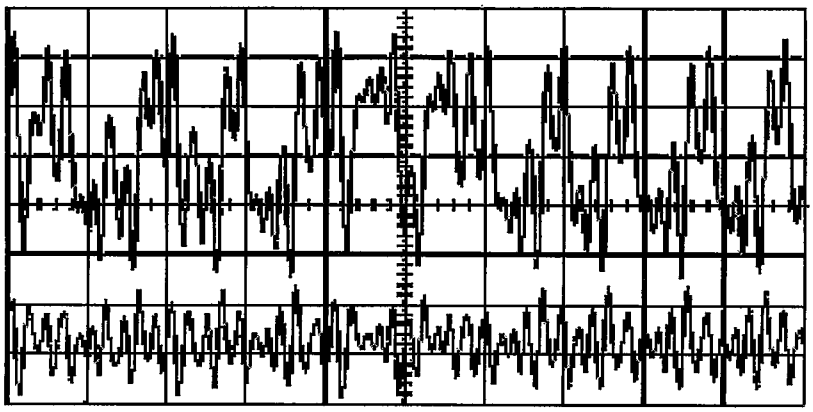
CFOA-tabanlı devrenin çalışma frekansını genişletmek ve yüksek frekanslarda çok iyi performans sergilediğini göstermek amacıyla indüktör simülatörünün ve kapasitörlerin değerlerinin küçültüldüğü ikinci ve üçüncü parametre grupları kullanılarak devre incelenmiştir. İkinci parametre grubunda indüktör simülatörünün ve kapasitörlerin değerlerinin 100 kat küçültülmesiyle Şekil 4.1' deki devre parametreleri C_1=100 pF, C_2=1nF, R=1.7 kΩ ve CFOA-tabanlı indüktör simülatörün parametreleri, Denklem (4.1)' e göre L=0.18 mH' yi elde etmek için R_X=R_Y=1 kΩ, C_3=0.18 nF olarak belirlenmiştir. Bu çalışma modu için çalışma frekans sahası genişlemiş ve kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 306 kHz civarında olduğu görülmüştür.

İndüktör simülatörünün ve kapasitörlerin değerlerinin 1000 kat küçültüldüğü üçüncü parametre grubunda Şekil 4.1' deki devre parametreleri C_1=100 pF, C_2=1 nF, R=1.7 kΩ olarak ve CFOA-tabanlı indüktör simülatörünün parametreleri, Denklem (4.1)' e göre L=0.018 mH' yi elde etmek için R_X=R_Y=1 kΩ, C_3=0.018 nF olarak belirlenmiştir. Diğer iki çalışmaya göre bu çok yüksek frekans sahasındaki çalışma için V_{C1}, V_{C2} devre dinamikleri, Şekil 4.2(a)' da, (V_{C2}-V_{C1}) düzlemindeki çift çeker yapısı ise Şekil 4.2(b)' de gösterilirken V_{C2}(t)' nin kaotik frekans spektrumu, Şekil 4.2(c)' de verilmektedir. Şekil 4.2(c)' de gösterildiği gibi çalışma frekans sahası, daha yüksek frekans sahası için genişlemiştir ve kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 1.35 MHz civarında olduğu tespit edilmiştir.

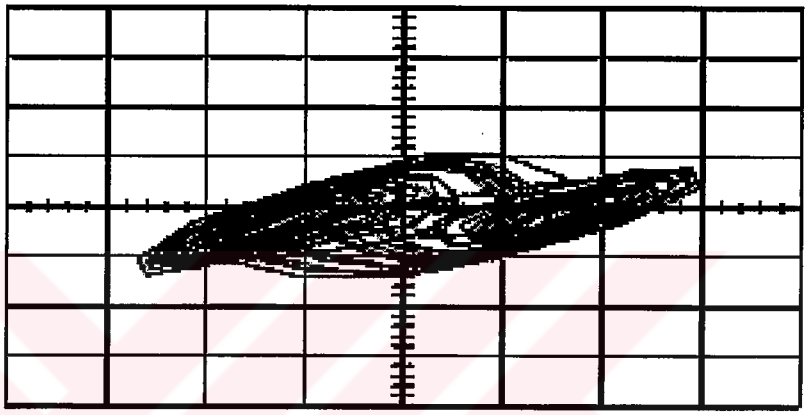
4.2.2. RC-2 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi

Şekil 4.3' de verilen RC-2 osilatörü, yüksek frekanslara cevap vermesi için devrede kullanılan Chua diyodu ve Wien köprü-tabanlı yapı AD844 tipi CFOA' lar ile gerçekleştirilmiştir. Chua diyodunu gerçekleştirmek için ±9V ile kutuplanmış iki adet AD844 tipi CFOA ve dört adet direnç kullanılmış olup Wien köprü-tabanlı yapıyı gerçekleştirmek için de ±9V ile kutuplanmış bir adet AD844 tipi CFOA, üç adet direnç ve bir adet kapasitör kullanılmıştır.

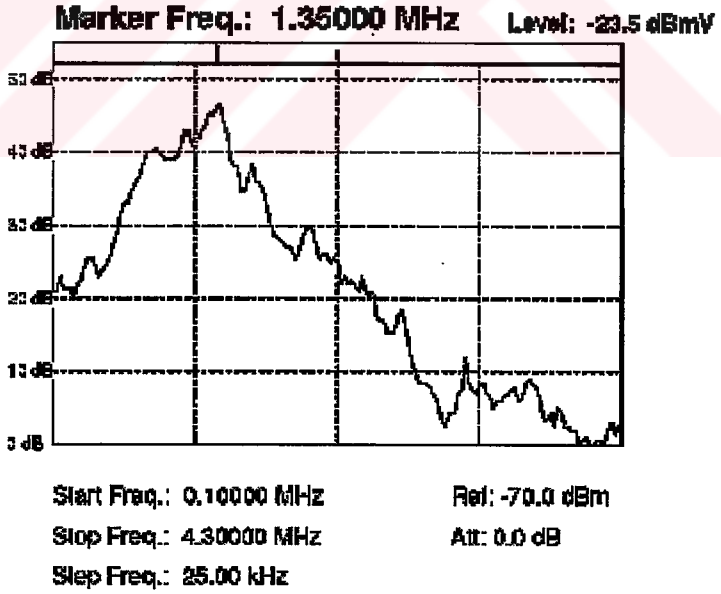
Tüm deneysel çalışmalarda doğrusal olmayan direncin parametre değerleri aşağıdaki gibi sabit alınmıştır: R_{N1}=R_{N2}=22 kΩ, R_{N3}=2 kΩ pot. ve R_{N4}=2.2 kΩ [12]. Farklı frekans sahalarında özellikle de yüksek frekanslarda devrenin çalışmasını göstermek



(a)

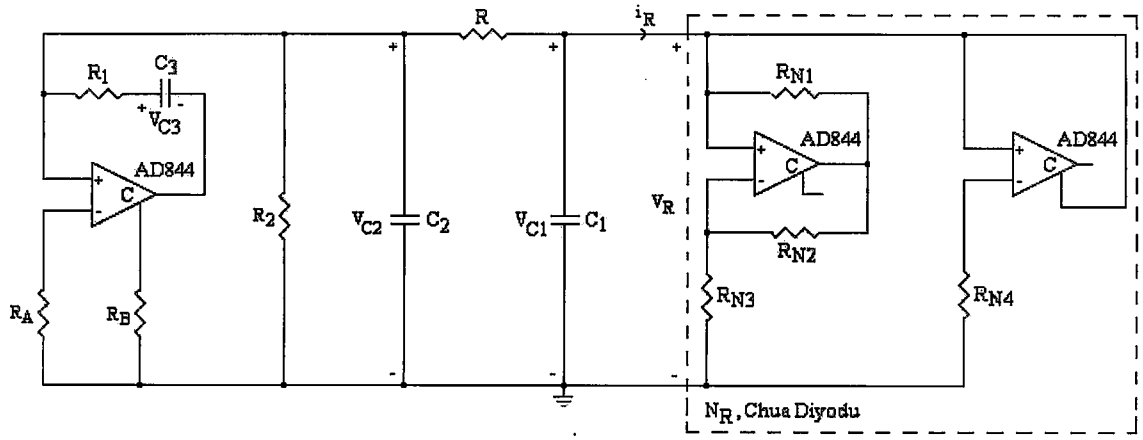


(b)



(c)

Şekil 4.2. RC-1 Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri: Üstteki İşaret V_{C1} (500 mV/div), Alttaki İşaret V_{C2} (500 mV/div), Time/div:5 μs/div, (b) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni:500 mV, Y-Ekseni:500 mV, (c) $V_{C2}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu.

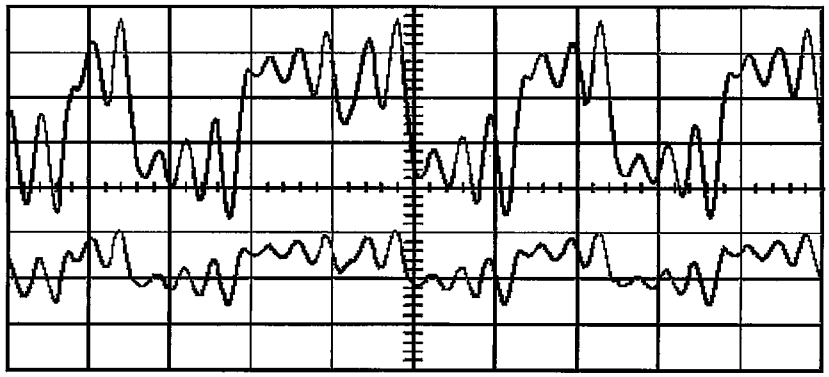


Şekil 4.3. RC-2 Osilatör Devresi.

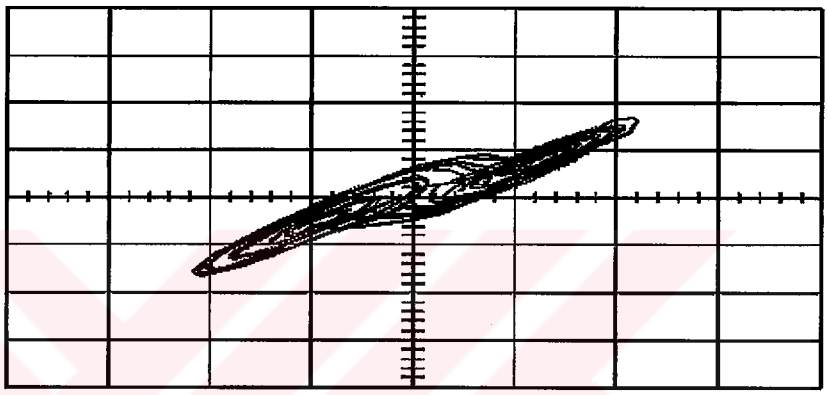
için devrenin geri kalan parametreleri üç grupta toplanmıştır. İlk parametre grubunda Şekil 4.3' deki devre için C_1=44 pF, C_2=C_3=4.4 nF, R_1=R_2=200 Ω, R_A=1 kΩ, R_B=5 kΩ pot ve R=2 kΩ pot. olarak belirlenmiştir. Devrenin spektrum analizör cihazı ile ölçülen frekansı, yaklaşık 187.5 kHz civarındadır.

İkinci ve üçüncü parametre gruplarında devrenin yüksek frekanslarda çok iyi performans sergilediğini göstermek ve çalışma frekans sahasını genişletmek amacıyla kapasitörlerin değerlerinin küçültülmüştür. İkinci parametre grubunda kapasitörlerin değerlerinin 2 kat küçültüldüğü Şekil 4.3' deki devre parametreleri C_1=22 pF, C_2=C_3=2.2 nF, R_1=R_2=200 Ω, R_A=1 kΩ, R_B=5 kΩ pot ve R=2 kΩ pot. olarak belirlenmiştir. Bu çalışma modu için kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 325 kHz civarında olduğu tespit edilmiştir.

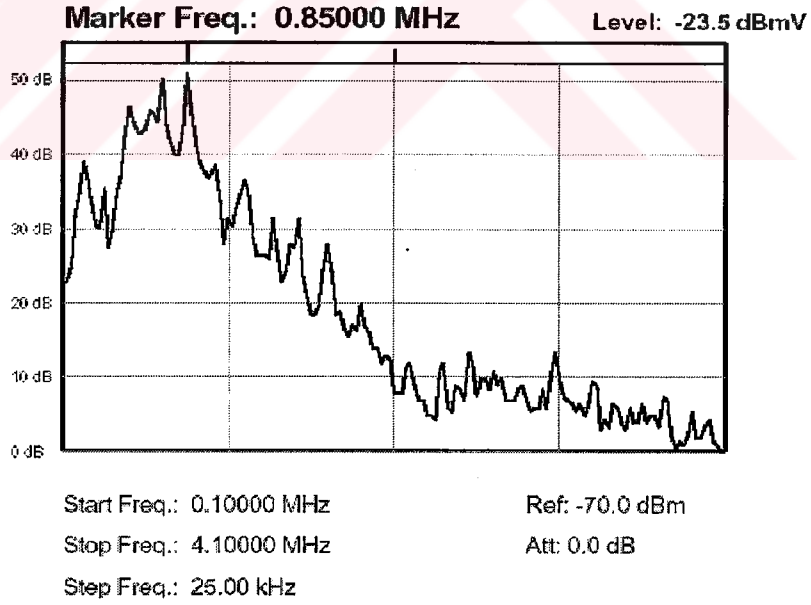
Kapasitörlerin değerlerinin 20 kat küçültüldüğü üçüncü parametre grubunda Şekil 4.3' deki devre parametreleri C_1=2.2 pF, C_2=C_3=220 pF, R_1=R_2=200Ω, R_A=1 kΩ, R_B=5 kΩ pot. ve R=2 kΩ pot. olarak belirlenmiştir. Bu çok yüksek frekans sahasındaki çalışma için V_{C1}, V_{C2} devre dinamikleri, Şekil 4.4(a)' da, (V_{C2}-V_{C1}) düzlemindeki çift çeker yapısı ise Şekil 4.8(b)' de ve V_{C2}(t)' nin kaotik frekans spektrumu, Şekil 4.8(c)' de verilmiştir. Şekil 4.8(c)' de gösterildiği gibi çalışma frekans sahası, yüksek frekans sahası için genişlemiştir ve kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 850 kHz civarında olduğu tespit edilmiştir.



(a)



(b)



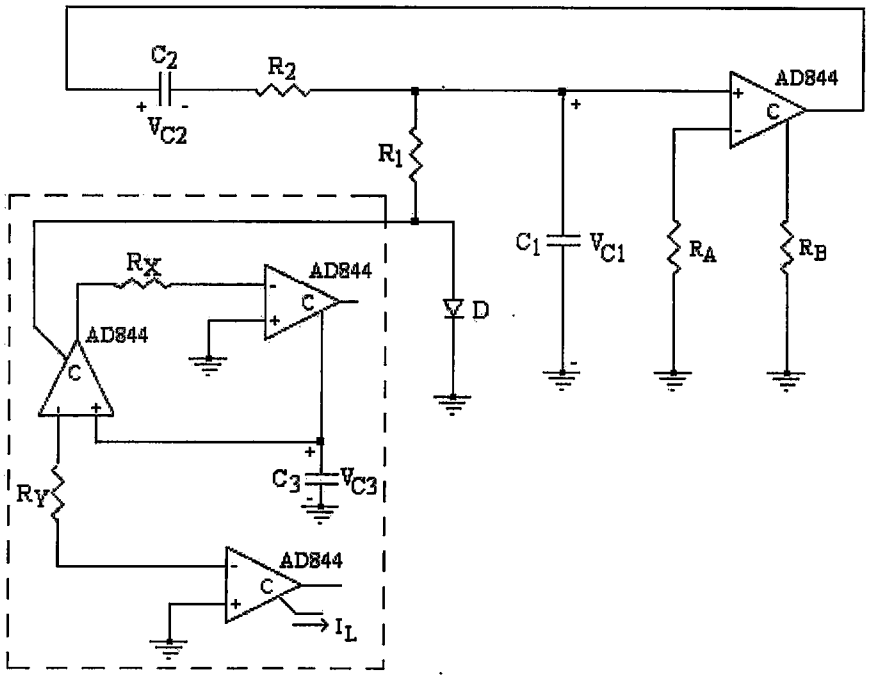
(c)

Şekil 4.4. RC-2 Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri: Üstteki İşaret V_{C1} (500 mV/div), Alttaki İşaret V_{C2} (1 V/div), Time/div:5 µs/div, (b) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni: 500 mV, Y-Ekseni: 500 mV, (c) $V_{C2}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu.

4.2.3. RC-3 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi

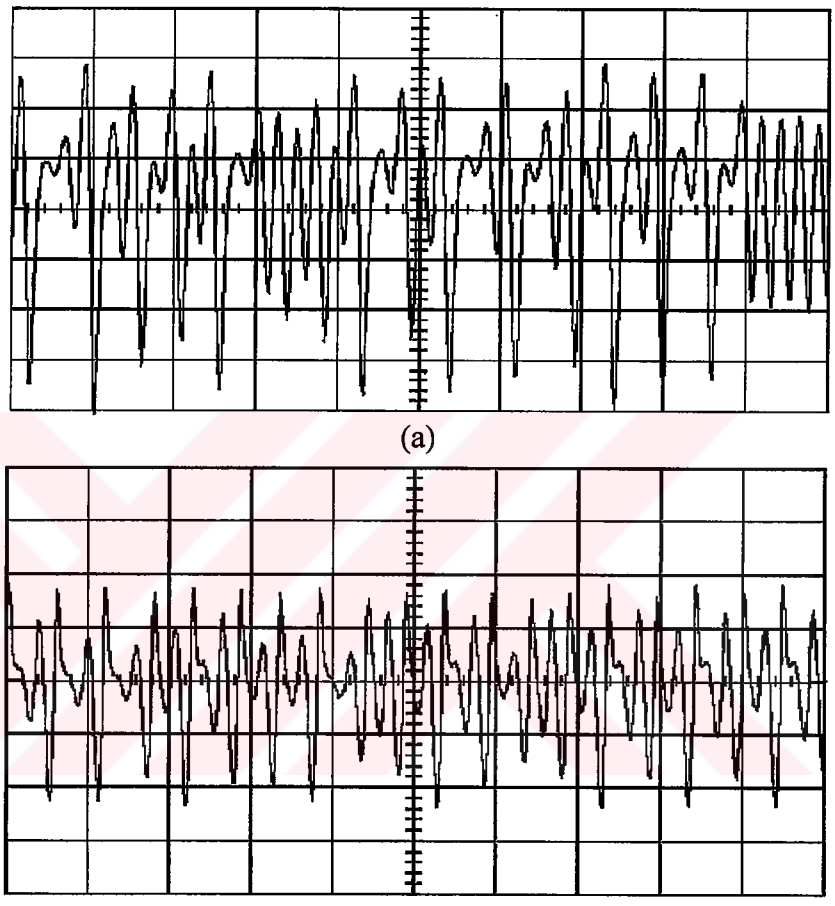
Kısım 3.2.3' de bahsedilen diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan devre, bir adet indüktör elemanı ve AD844 tipi CFOA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İndüktör elemanı deneysel çalışmada tercih edilmediği için bu bölümde, devrenin yüksek frekanstaki çalışmasını etkilemeksizin indüktörsüz gerçekleştirilen RC-3 kaotik osilatör devresi deneysel olarak incelenecektir. Bu amaçla devre, CFOA-tabanlı indüktör simülatörü ile gerçekleştirilmiştir [13]. Sunulan RC-3 osilatör devresi Şekil 4.5' de gösterilmiştir. İndüktör simülatörü yapısındaki eşdeğer indüktansı bulmak için Denklem (4.1) kullanılmıştır.

CFOA-tabanlı indüktör simülatörünün parametreleri, Denklem (4.1)' e göre L=18 mH' yi elde etmek için R_X=R_Y=1 kΩ, C_3=18 nF olarak belirlenmiştir. Devrenin diğer parametre değerleri aşağıdaki gibi sabit alınmıştır: C_1=C_2=330 pF, R_1=400 Ω, R_2=100 Ω, R_A=1 kΩ, R_B=5 kΩ pot. Devrede 1N4148 diyodu ve dört adet AD844 tipi CFOA kullanılmıştır. Deneysel çalışmada R_B pot. değerini değiştirerek farklı periyodik ve kaotik davranışlar gözlemlenmiştir. Periyot-1 ve periyot-2 sırasıyla R_B=2450 Ω ve R_B=2525 Ω değerlerinde gözlemlenirken kaotik davranışlar R_B=2600 Ω değerinde gözlemlenmiştir.

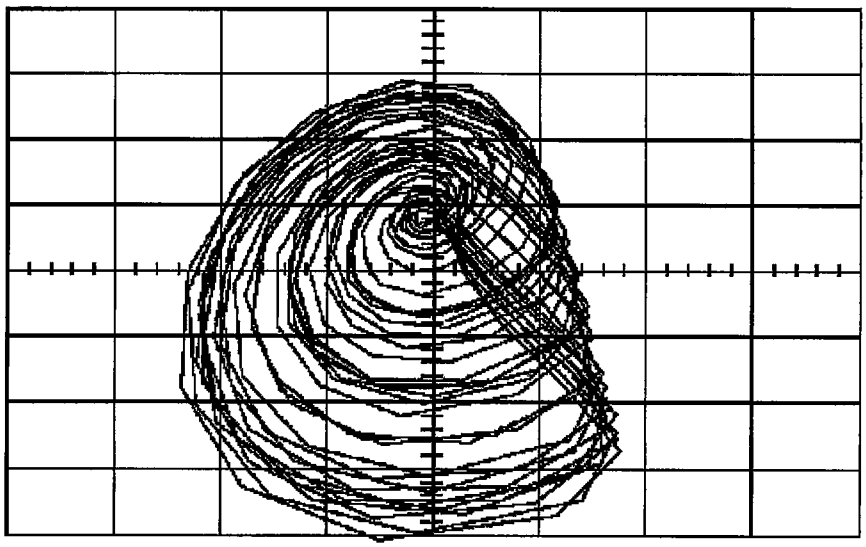


Şekil 4.5. RC-3 Osilatör Devresi.

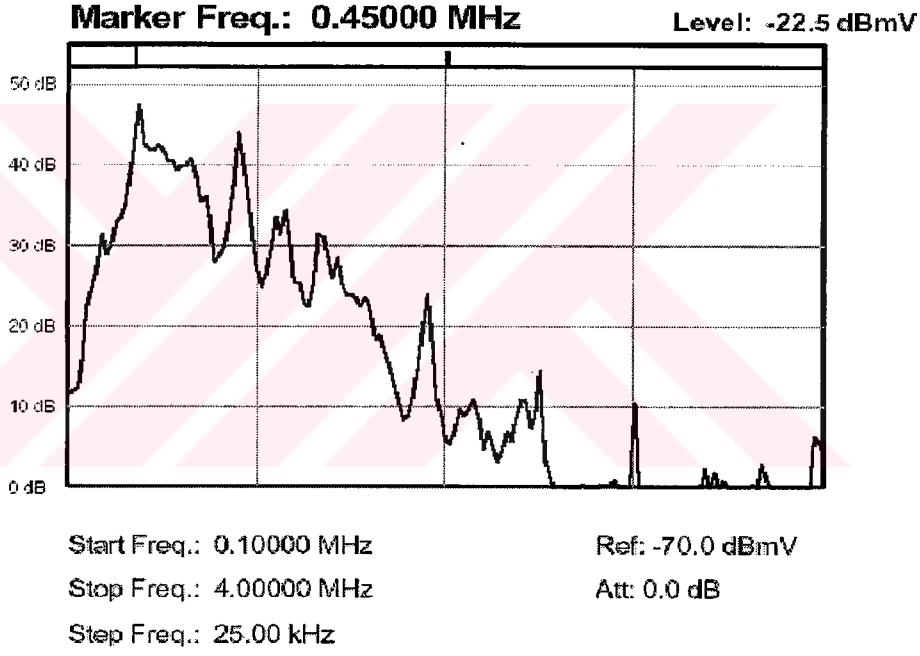
Devre dinamikleri, Şekil 4.6(a) ve (b)' de gösterilirken, (V_{C1}-I_L) düzlemindeki çeker yapısı Şekil 4.7(a)' da, $V_{C1}(t)$' nin kaotik frekans spektrumu ise Şekil 4.7(b)' de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 450 kHz civarında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. RC-3 Osilatör Devresinin Kaotik Devre Dinamikleri, (a) I_L (1 kΩ' luk Direnç İle) (50 mV/div), (b) V_{C1} (500 mV/div), Time/div: 10 μs/div.



(a)

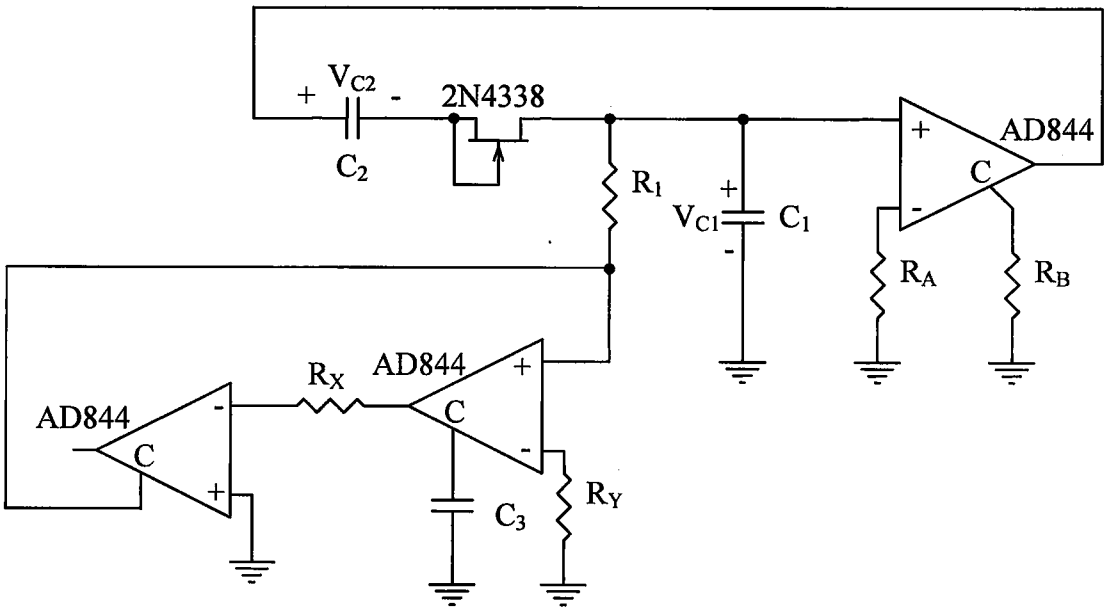


(b)

Şekil 4.7. RC-3 Osilatör Devresinin (a) (V_{C1}-I_L) Düzlemindeki Çeker Yapısı, X-Ekseni: 500 mV, Y-Ekseni: 50 mV, (b) $V_{C1}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu.

4.2.4. RC-4 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi

Kısım 3.2.5' deki FET kullanılan Colpitts Osilatör devresi, bir adet indüktör elemanı ve AD844 tipi CFOA elemanı ile gerçekleştirilmiştir. İndüktör elemanı bir önceki çalışmaya benzer olarak deneysel çalışmada tercih edilmediği için indüktörsüz gerçekleştirilen yüksek frekanslı Colpitts Osilatör devresinin benzetimi yapılarak



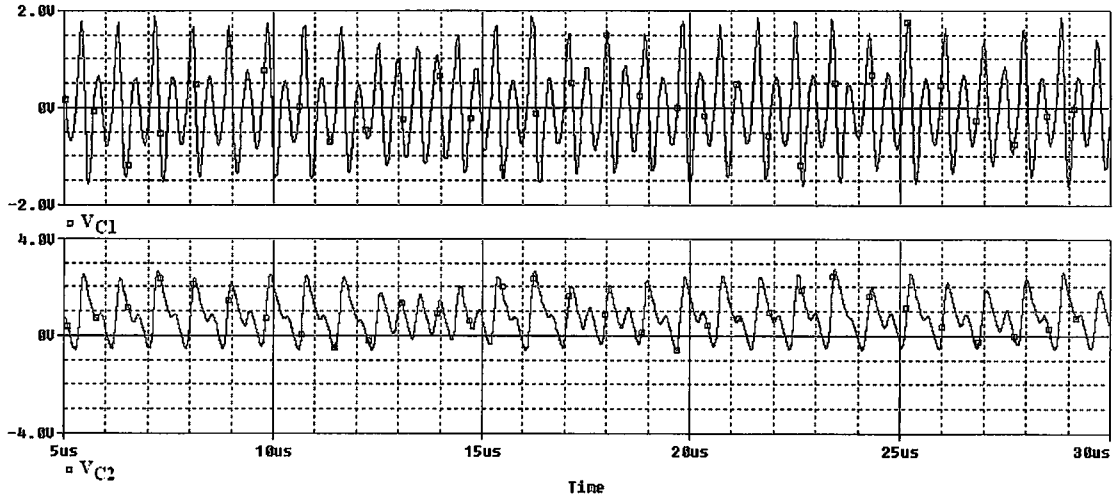
Şekil 4.8. RC-4 Osilatör Devresi.

incelenmiştir. Bu amaçla devre, CFOA-tabanlı indüktör simülatörü ile gerçekleştirilmiştir [38]. Sunulan RC-4 osilatör devresi Şekil 4.8' de gösterilmiştir. İndüktör simülatörü yapısındaki eşdeğer indüktansı bulmak için Denklem (4.1) kullanılmaktadır.

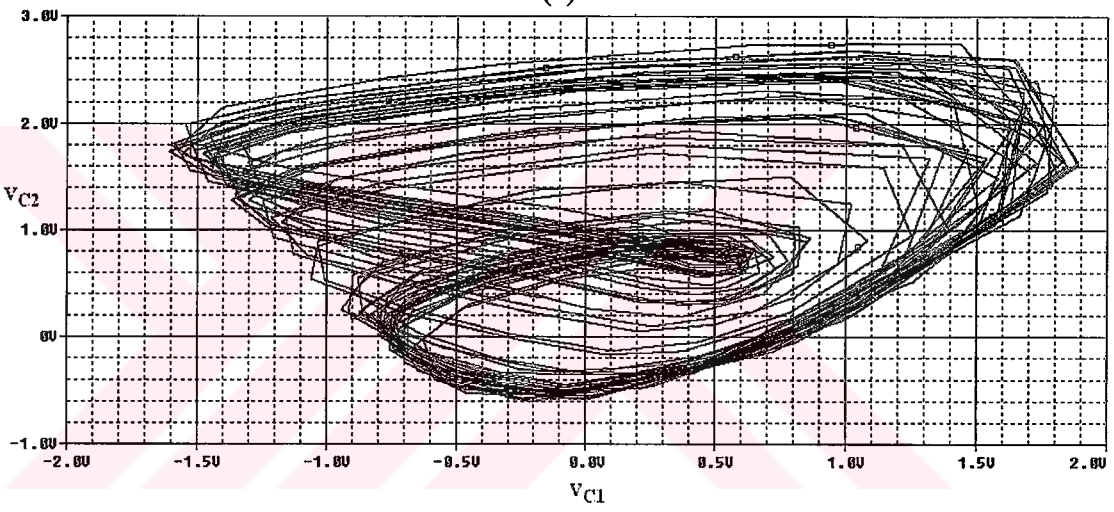
Şekil 4.8' deki devrede verilen 2N4338 tipi JFET' in temin edilememesinden dolayı devre, deneysel olarak gerçekleştirilememiş olup sadece PSpice benzetimi yapılmıştır.

CFOA tabanlı indüktör simülatörünün parametreleri, Denklem (4.1)' e göre L=50 μH' yi elde etmek için R_X=R_Y=1 kΩ, C_3=50 pF olarak belirlenmiştir. Devrenin diğer parametre değerleri aşağıdaki gibi sabit alınmıştır: C_1=C_2=50 pF, R_1=750 Ω, R_A=1 kΩ, R_B=2.85 kΩ. Devrede üç adet ±9V ile kutuplanan AD844 tipi CFOA ve R_N=750 Ω, V_p=-0.7 V parametrelerine sahip 2N4338 tipi JFET kullanılmıştır.

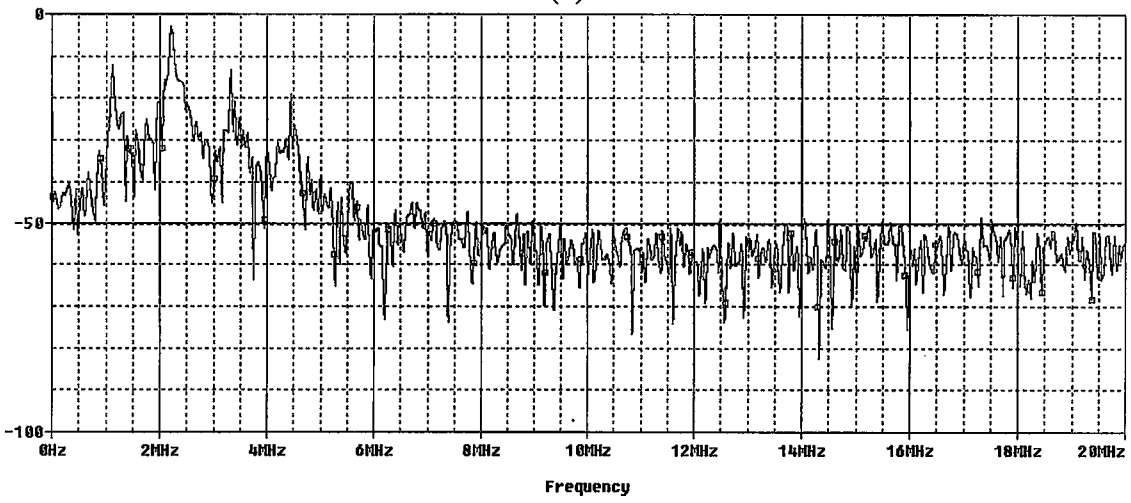
Bilgisayar benzetimlerinden elde edilen $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$ kaotik davranışlar ve (V_{C1}-V_{C2}) düzlemindeki kaotik çeker, sırasıyla Şekil 4.9(a) ve (b)' de, frekans spektrum ise Şekil 4.9(c)' de gösterilmiştir. Şekil 4.9(c)' de gösterilen kaotik spektrumun temel frekansı yaklaşık 2.2 MHz civarındadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.9. RC-4 Osilatör Devresinin, (a) $V_{C1}(t)$, $V_{C2}(t)$ Kaotik Devre Dinamikleri, (b) (V_{C1}-V_{C2}) Düzlemindeki Çeker Yapısı, (c) Kaotik Frekans Spektrumu.

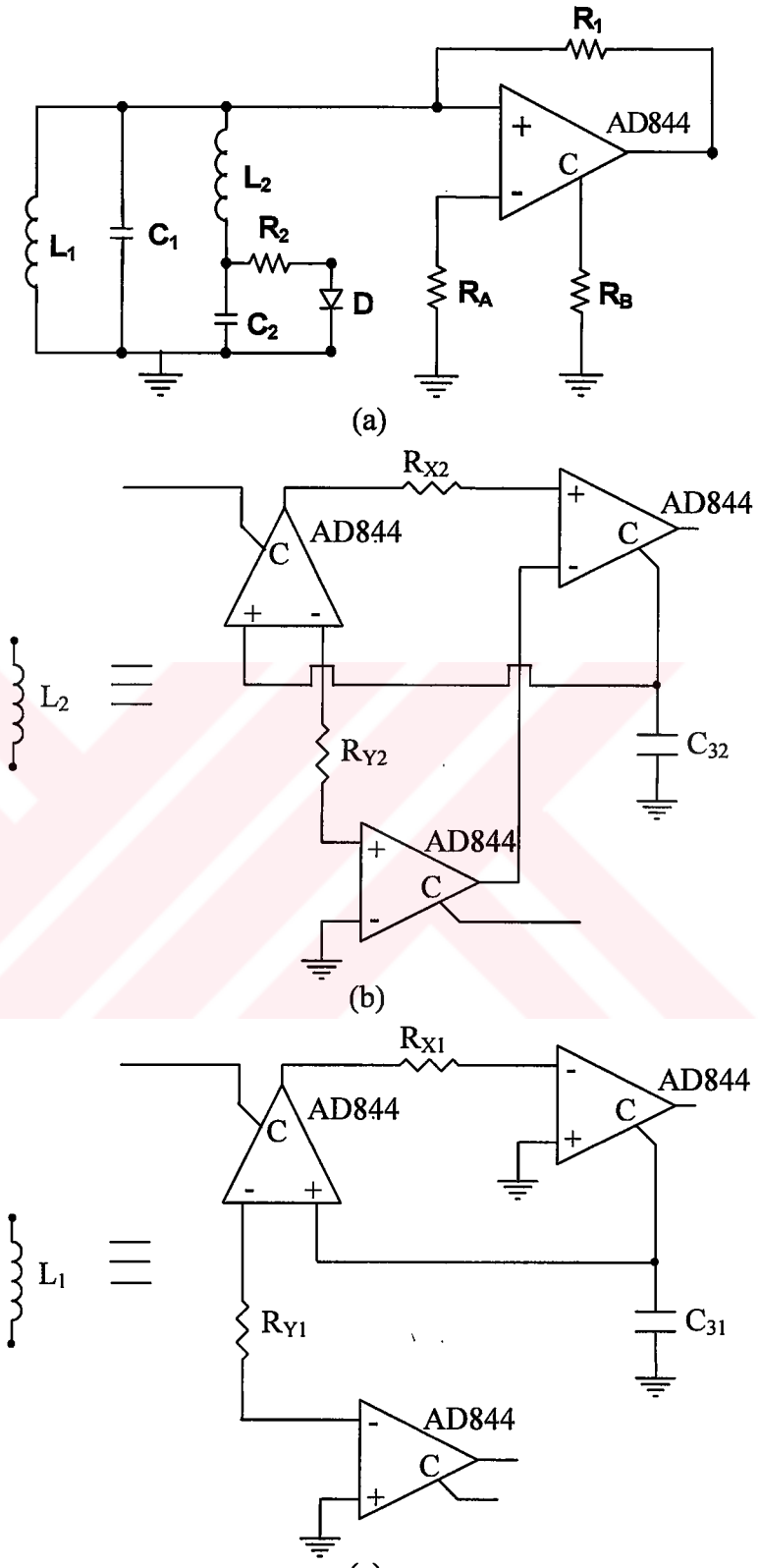
4.2.5. RC-5 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi

Kısım 3.2.6' daki 4 boyutlu osilatör devresi, iki adet indüktör elemanı ve VOA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. VOA' ların ideal olmamasından ve VOA ile gerçekleştirilen devre yapılarının çalışma frekanslarının sınırlı olmasından dolayı CFOA' lar kullanılmaktadır. Devrenin yüksek frekanslarda çalışabilmesi için VOA' dan CFOA' ya dönüşüm yapılmıştır. Bu dönüşüm işleminde devre elemanlarında ve elemanların parametre değerlerinde hiçbir değişiklik yapılmaksızın sadece VOA' daki geribesleme elemanı CFOA' nın kompanzasyon ucuna (compansate pin) yerleştirilmiştir. Ayrıca indüktör elemanı deneysel çalışmada kullanmaya uygun olmadığı için bu bölümde de devre, CFOA-tabanlı indüktör simülatörleri ile gerçekleştirilmiştir [13, 38]. Şekil 4.10' da RC-5 osilatör devresi gösterilmiştir. Bu devrede topraklı olarak kullanılan indüktör yerine [13]' de sunulan indüktans simülatörü kullanılmıştır. Değişken (floating) indüktörün yerine ise [38]' de sunulan indüktans simülatörü kullanılmıştır. Her iki indüktör simülatörü yapısındaki eşdeğer indüktansı bulmak için Denklem (4.1) kullanılmıştır.

Devre, farklı frekans sahaları için üç farklı parametre grubunda incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 4.10' daki devre parametreleri R_1=4 kΩ, R_2=70 Ω, R_A=1 kΩ, R_B=4 kΩ olarak sabit alınmıştır ve 1N4148 diyodu ile ±9 V ile kutuplanan AD844 tipi CFOA kullanılmıştır.

Birinci deneysel çalışmada Şekil 4.10' daki devrenin parametreleri C_1=30 nF, C_2=10 nF ve CFOA tabanlı indüktör simülatörlerinin parametreleri, Denklem (4.1)' e göre L_1=30 mH' yi elde etmek için R_{X1}=R_{Y1}=1 kΩ, C_{31}=30 nF ve L_2=10 mH' yi elde etmek için R_{X2}=R_{Y2}=1 kΩ, C_{32}=10 nF olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada spektrum analiz cihazının band genişliğinin sınırlı olmasından dolayı, ilk parametre grubu için devrenin kaotik spektrumu kaydedilememiştir. Devre, PSpice benzetimi yardımıyla incelendiğinde çalışma frekansının yaklaşık 4.57 kHz civarında olduğu görülmüştür.

İkinci deneysel çalışmada kapasitörlerin ve bobinlerin değerleri 200 kat küçültülerek Şekil 4.10' daki devrenin parametreleri C_1=0.15 nF, C_2=0.05 nF ve CFOA-tabanlı indüktör simülatörlerinin parametreleri, Denklem (4.1)' e göre L_1=0.15 mH' yi elde



Şekil 4.10. RC-5 Kaotik Osilatör Devresinin, (a) Devre Şeması, (b) Devredeki L_2' nin Yerine Kullanılan İndüktör Simülatörü, (c) Devredeki L_1' in Yerine Kullanılan İndüktör Simülatörü.

etmek için $R_{X1}=R_{Y1}=1$ kΩ, $C_{31}=0.15$ nF ve $L_2=0.05$ mH' yi elde etmek için $R_{X2}=R_{Y2}=1$ kΩ, $C_{32}=0.05$ nF olarak belirlenmiştir. Bu çalışma modunda kaotik spektrumun temel frekans bileşeni yaklaşık 1 MHz civarındadır.

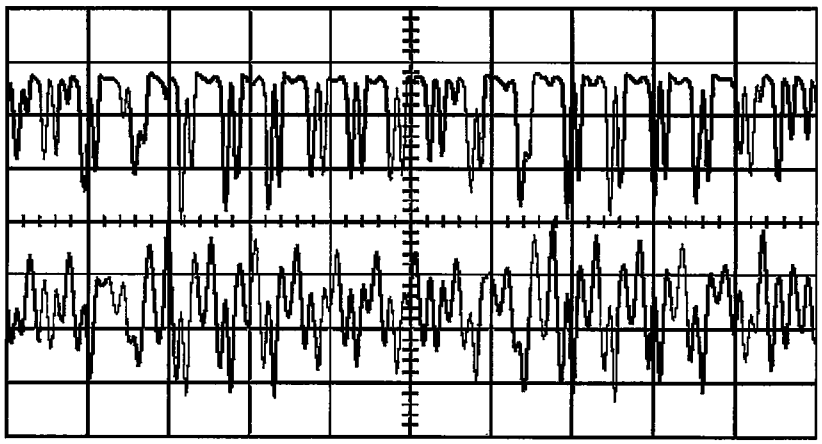
Son olarak yapılan üçüncü deneysel çalışmada kapasitörlerin ve indüktörlerin değerlerinin 300 kat küçültülmüş olup Şekil 4.10' daki devre parametreleri $C_1=0.1$ nF, $C_2=0.033$ nF ve CFOA tabanlı indüktör simülatörlerinin parametreleri, Denklem (4.1)' e göre $L_1=0.1$ mH' yi elde etmek için $R_{X1}=R_{Y1}=1$ kΩ, $C_{31}=0.1$ nF ve $L_2=0.033$ mH' yi elde etmek için $R_{X2}=R_{Y2}=1$ kΩ, $C_{32}=0.033$ nF olarak belirlenmiştir. Bu çalışma modu için kaotik davranışlar ve çeker yapıları sırasıyla Şekil 4.11(a) ve (b)' de gösterilirken, kaotik frekans spektrumu, Şekil 4.11(c)' de verilmektedir. Şekil 4.11(c)' de gösterildiği gibi çalışma frekans sahası genişlemiş ve kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 1.175 MHz civarında olduğu tespit edilmiştir.

4.2.6. RC-6 Kaotik Osilatörünün Gerçekleştirimi

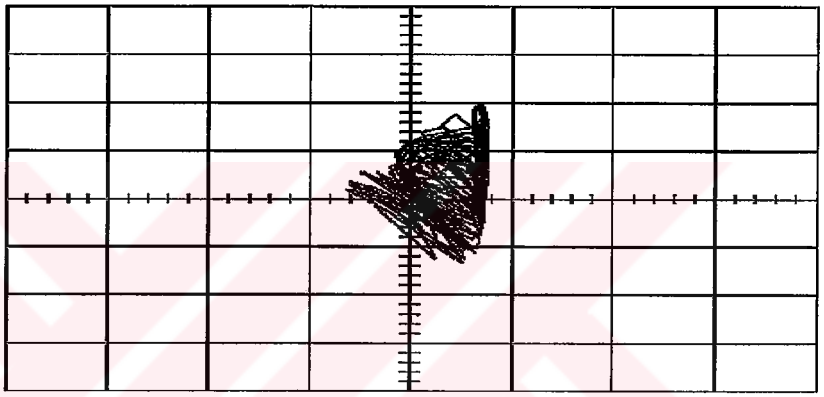
Kısım 3.3.3' de bahsedilen basit RC osilatör devresi, VOA' lar ile gerçekleştirilmiştir. VOA' ların sınırlı frekans cevapları yüzünden CFOA' lar tercih edilmektedir. Bu bölümde de devrenin yüksek frekanslarda çalışabilmesi için VOA' dan CFOA' ya dönüşüm yapılmıştır. Şekil 4.12' de görüldüğü gibi bu dönüşüm işleminde devre elemanlarında ve elemanların parametre değerlerinde hiçbir değişiklik yapılmaksızın sadece VOA' daki geribesleme elemanı CFOA' nın kompanzasyon ucuna bağlanmıştır.

Şekil 4.12(a)' daki RC-6 kaotik osilatör devresinin gerçekleştiriminde iki adet ±9 V ile kutuplanan AD844 tipi CFOA, üç adet kapasitör ve üç adet direnç kullanılırken Şekil 4.12(b)' deki doğrusal olmayan bloğun gerçekleştiriminde iki adet ±9 V ile kutuplanan AD844 tipi CFOA ve dört adet direnç kullanılmıştır [40].

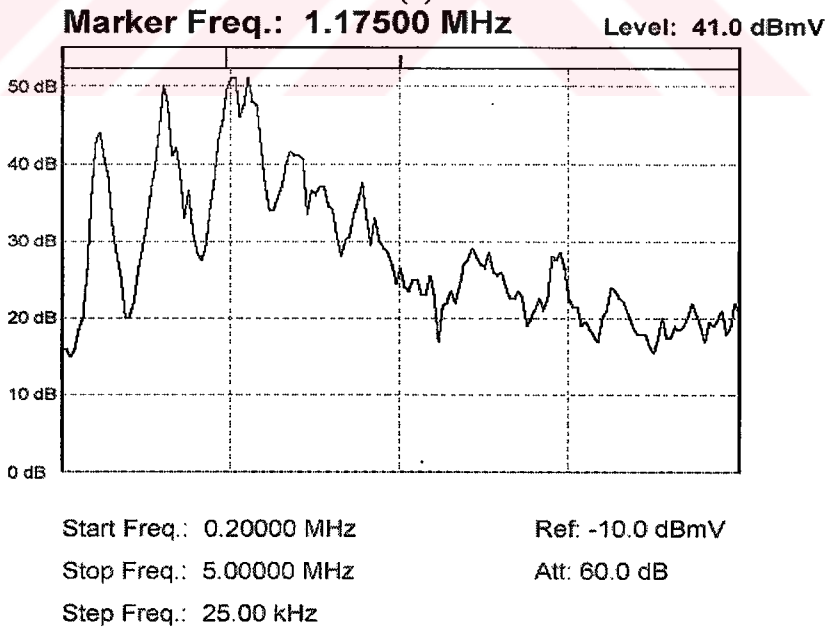
Deneysel çalışmalarda Şekil 4.12(a)' daki devrenin parametreleri $R_1=R_2=R_3=1$ kΩ ve Şekil 4.12(b)' de verilen doğrusal olmayan bloğun parametre değerleri $R_{N1}=10$ kΩ pot, $R_{N2}=R_{N3}=1$ kΩ, $R_{N4}=45$ kΩ olarak sabit alınmıştır. Devre parametrelerinin geri kalanı,



(a)

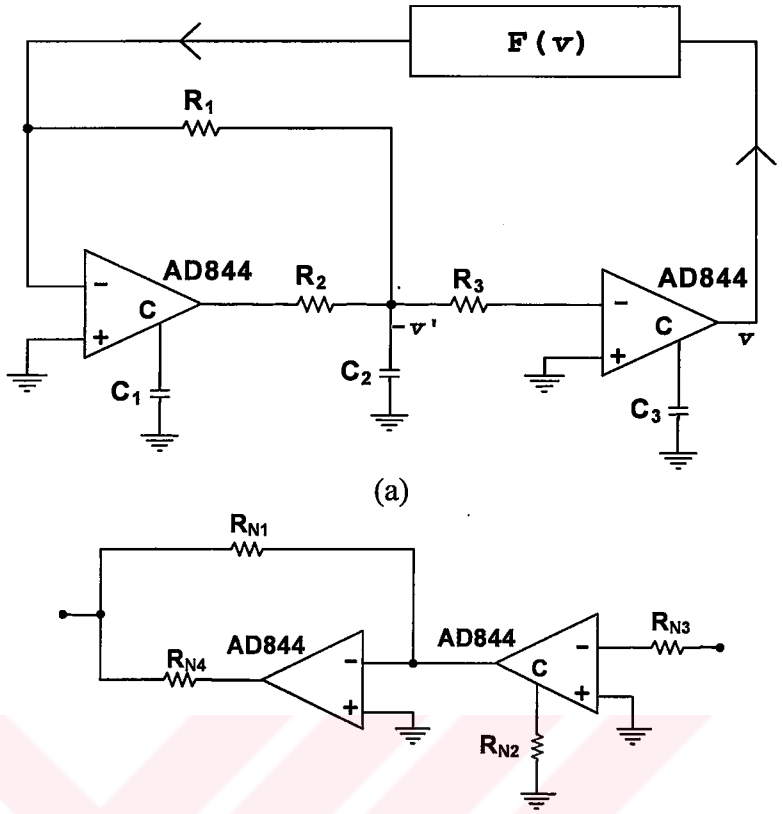


(b)



(c)

Şekil 4.11. RC-5 Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri: Üstteki İşaret V_{C2} (1 V/div), Alttaki İşaret V_{C1} (1 V/div), Time/div: 5 μs/div, (b) (V_{C2}-V_{C1}) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni: 2 V, Y-Ekseni: 1 V, (c) $V_{C2}(t)$' nin Kaotik Frekans Spektrumu.

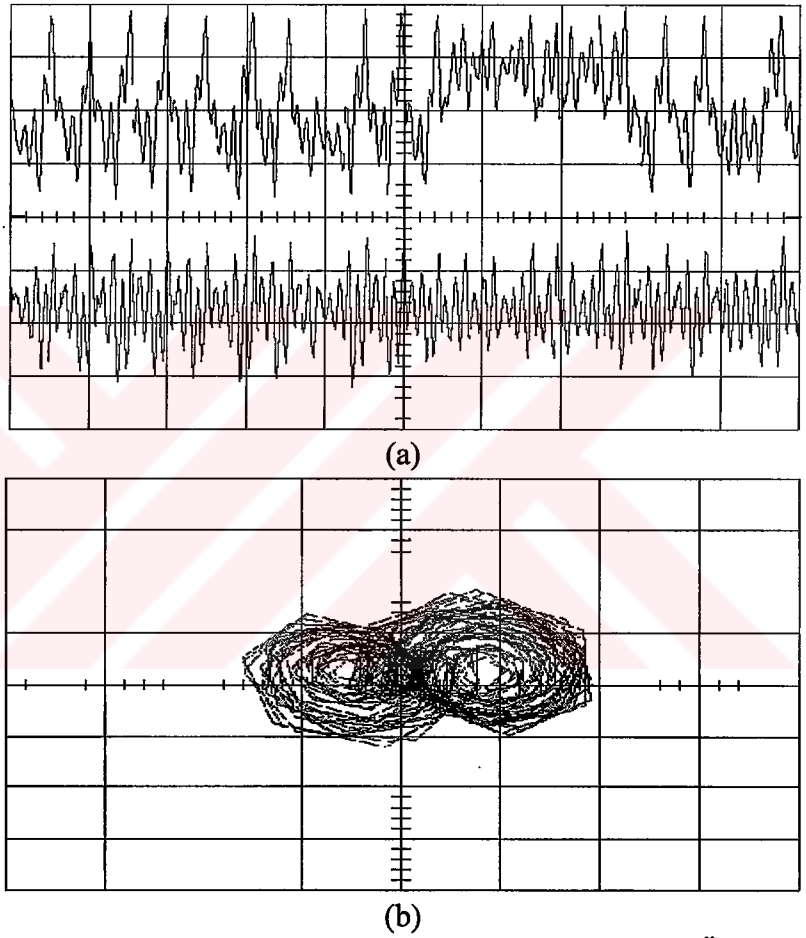


Şekil 4.12. RC-6 Kaotik Osilatör Devresinin (a) Devre Şeması, (b) *F(v)* Doğrusal Olmayan Devre Bloğu.

farklı frekans sahalarında devrenin davranışını göstermek için üç grupta toplanmıştır. Sunulan devrenin ilk parametre grubunda, Şekil 3.25' deki VOA-tabanlı kaotik RC osilatör devresinin orijinal kaotik davranışlar sergilediğini göstermek için devre parametreleri, C_1=0.02 μF, C_2=0.5 μF ve C_3=0.01 μF olarak belirlenmiştir. Bu çalışma modu için daha önce de karşılaşılan spektrum analiz cihazının band genişliğinin sınırlı olması probleminden dolayı, ilk parametre grubu için devrenin kaotik spektrumu kaydedilememiştir. Devrenin çalışma frekansının, PSpice benzetimi ile incelendiğinde yaklaşık 4.57 kHz civarında olduğu görülmüştür.

Devrenin yüksek frekanslardaki performansını göstermek ve çalışma frekansını genişletmek amacıyla kapasitörlerin değerlerinin küçültüldüğü ikinci ve üçüncü parametre grupları kullanılarak devre incelenmiştir. Kapasitörlerin değerlerinin 100 kat küçültüldüğü ikinci parametre grubunda Şekil 4.12' deki devre parametreleri C_1=0.2 nF, C_2=5 nF ve C_3=0.1 nF olarak belirlenmiştir. Bu parametre grubu için kaotik spektrumun temel frekans bileşeninin yaklaşık 200 kHz civarında olduğu tespit edilmiştir.

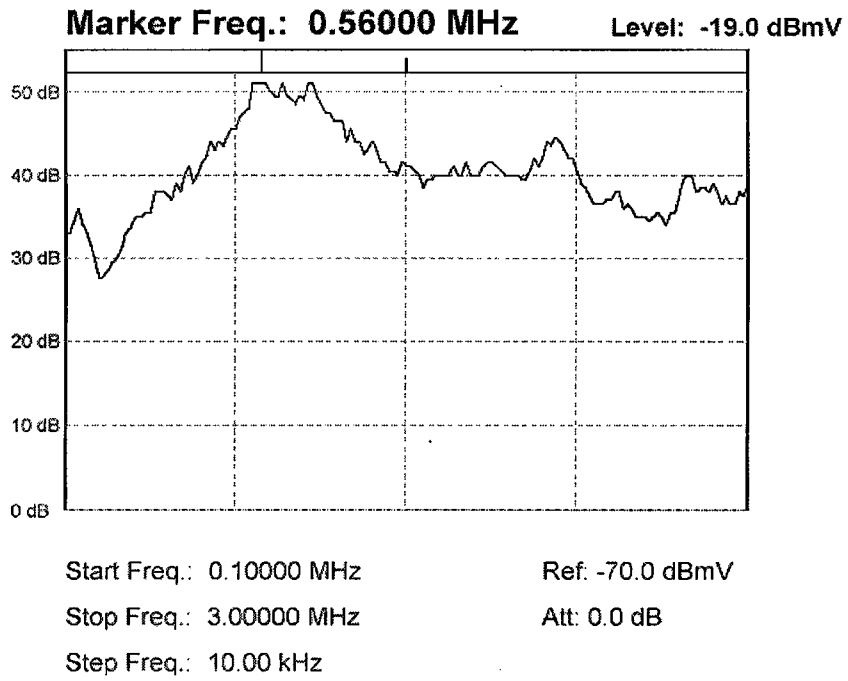
Son olarak üçüncü parametre gurubunda kapasitörlerin değerlerinin 250 kat küçültüldüğü Şekil 4.12' deki devre parametreleri C_1=80 pF, C_2=2 nF ve C_3=40 pF olarak belirlenmiştir. Bu çalışma modu için devre dinamikleri, Şekil 4.13(a)' da, çift çeker yapısı ise Şekil 4.13(b)' de gösterilirken kaotik frekans spektrumu, Şekil 4.14' de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kaotik spektrum birkaç MHz' e kadar uzanmaktadır ve temel frekans bileşeni yaklaşık 560 kHz civarındadır.



(a)

(b)

Şekil 4.13. RC-6 Kaotik Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin, (a) Kaotik Devre Dinamikleri: Üstteki İşaret v (2 V/div), Alttaki İşaret ($-\dot{v}$) (200 mV/div), Time/div: 20 µs/div, (b) v-($-\dot{v}$) Düzlemindeki Çift Çeker Yapısı, X-Ekseni: 2 V, Y-Ekseni: 200 mV.



Şekil 4.13. RC-6 Kaotik Osilatör Devresinin Üçüncü Parametre Grubu İçin Kaotik Frekans Spektrumu.

Tablo 4.1. İncelenen Kaotik Osilatörlerin Birbirleri İle Karşılaştırılması.

Kaotik Osilatörler	Aktif Yapı Bloğu	Pasif Eleman Yapısı	Doğrusal Olmayan Eleman/Konfigürasyon Yapısı	Çalışma Frekansı
RC-1 kaotik osilatör (Şekil 4.1)	Chua diyodu için 2 adet AD844 tipi CFOA ve indüktör simülatörü için 3 adet AD844 tipi CFOA	RC (İndüktör simülatörü için, 2 adet direnç, 1 adet kapasitör; Chua diyodu için, 4 adet rezistör ve devrenin geri kalan kısmı için, 1 adet direnç, 2 adet kapasitör, toplam 10 eleman)	CFOA-tabanlı Chua Diyodu	Çalışma frekansı 3 kHz~1.35 MHz arasında değişmektedir.
RC-2 kaotik osilatör (Şekil 4.3)	Wien köprü devresi için 1 adet AD844 tipi CFOA; Chua diyodu için 2 adet AD844 tipi CFOA	RC (Wien köprü kısmı için, 4 adet direnç, 2 adet kapasitör ve Chua diyodu ve devrenin geri kalan kısmı için, 5 adet direnç, 1 adet kapasitör, toplam 12 eleman)	CFOA-tabanlı Chua Diyodu	Çalışma frekansı 187.5 kHz~850 kHz civarındadır.
RC-3 kaotik osilatör (Şekil 4.5)	İndüktör simülatörü için 3 adet AD844 tipi CFOA ve devre için 1 AD844 tipi CFOA	RC (İndüktör simülatörü için, 2 adet direnç, 1 adet kapasitör ve devrenin geri kalan kısmı için 4 adet direnç, 2 adet kapasitör, toplam 9 eleman)	Diyot-İndüktör simülatörü konfigürasyonu, 1N4148 tipi diyot	Çalışma frekansı yaklaşık 450 kHz civarındadır.
RC-4 kaotik osilatör (Şekil 4.8)	İndüktör simülatörü için 2 adet AD844 tipi CFOA ve devre için 1 adet AD844 tipi CFOA	RC (İndüktör simülatörü için, 2 adet direnç, 1 adet kapasitör ve devrenin geri kalan kısmı için 3 adet direnç, 2 adet kapasitör, toplam 8 eleman)	FET-Kapasitör Konfigürasyonu, 2N4338 tipi JFET	Çalışma frekansı yaklaşık 2.2 MHz civarındadır.
RC-5 kaotik osilatör (Şekil 4.10)	İndüktör simülatörleri için 6 adet AD844 tipi CFOA ve devre için 1 adet AD844 tipi CFOA	RC (İndüktör simülatörleri için, 4 adet direnç, 2 adet kapasitör ve devrenin geri kalan kısmı için 4 adet direnç, 2 adet kapasitör, toplam 12 eleman)	1N4148 tipi diyot,	Çalışma frekansı 4.57 kHz~1.175 MHz arasında değişmektedir.
RC-6 kaotik osilatör (Şekil 4.12)	Doğrusal olmayan devre bloğu için, 2 adet AD844 tipi CFOA, devre için, 2 adet AD844 tipi CFOA	RC (Doğrusal olmayan devre bloğu için, 4 adet direnç; devre için 3 adet direnç ve 3 adet kapasitör, toplam 10 eleman)	CFOA-tabanlı doğrusal olmayan devre bloğu	Çalışma frekansı 4.57 kHz~560 kHz arasında değişmektedir.

BÖLÜM 5

SONUÇ

Bu tez çalışmasında, elektronik devrelerde kullanılan yüksek frekanslı kaotik osilatörlerin tasarımı ve gerçekleştirimi amaçlanmıştır. Bu amaçlara ulaşmak için teorik çalışmaları, bilgisayar benzetimlerini, nümerik çözümleri ve laboratuar deneylerini kapsayacak şekilde yapılan dört aşamalı bir çalışma süreci gerçekleştirilmiştir.

Literatürde yer alan LC ve RC tabanlı pek çok kaotik osilatör tipi Bölüm 3' de incelenmiştir. Bunlardan Kısım 3.2.1' de bahsedilen kaotik Chua osilatörü, üzerinde değişiklikler yapılan ve çok sayıda farklı gerçekleştirimi var olan bir osilatör tipi olup bu çalışmada, bahsedilen devrenin yüksek frekanslarda çalışabilmesi için iki farklı tip gerçekleştirimi incelenmiştir. Bunlardan ilki, Kısım 3.2.2' de bahsedilen Chua osilatörünün yapısında bulunan Chua diyodunun CFOA-tabanlı olarak gerçekleştirildiği LC osilatör tasarımıdır. Bu tasarımın yüksek frekanslarda tatmin edici bir performans sağlamasına karşın deneysel gerçekleştirim aşamasında, ihtiyaç duyulan indüktör değerlerinin temin edilmesi zorluğu, büyük hacimli ve yüksek frekanslara çıktıkça indüktörden kaynaklanan parazitik etkiler nedeniyle devrenin yüksek frekans performansı sınırlanmaktadır. Bu problemleri aşmak ve devrenin performansını iyileştirmek için Kısım 4.2.1' de bahsedilen CFOA-tabanlı indüktör simülatörü kullanılmış olup bu iyileştirme sayesinde devrenin çalışma frekansı ciddi bir şekilde yükselmiştir. Tablo 3.1 ve Tablo 4.1' de görüldüğü gibi devrenin çalışma frekansı 827 kHz' den 1.35 MHz' e çıkmıştır. Yapılan bu karşılaştırma neticesinde, CFOA-tabanlı tasarımın çok daha iyi sonuç verdiği ve bu tasarımda kullanılan eleman değerlerinin elde edilmesinin çok kolay olduğu belirtilmelidir.

İndüktörlerin yukarıda bahsedilen problemlerinden dolayı, Kısım 3.3.1' de Wien köprü-tabanlı Chua osilatörünün indüktörsüz olarak gerçekleştirilmiş olmasına rağmen VOA-tabanlı RC yapısı kullanıldığı için devre yüksek frekanslara çıkamamıştır. Kısım 4.2.2'

de, bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla Wien köprü-tabanlı osilatör devresindeki aktif eleman olarak kullanılan VOA' ların yerine CFOA' lar kullanılmıştır. Bu sayede, Tablo 3.1 ve Tablo 4.1' de görüldüğü gibi, devrenin çalışma frekansı çok fazla artarak 6 kHz' den 850 kHz' e kadar çıkmıştır.

Kısım 3.2.3' de diyot-indüktör konfigürasyonu kullanılan Wien köprü-tabanlı kaotik osilatör devresi incelenmiş ve Tablo 3.1' de görüldüğü gibi bu gerçekleştirimde devrenin çalışma frekansı 360 kHz civarında olup indüktör elemanından dolayı daha önceden de ifade edildiği gibi devrenin deneysel gerçekleştiriminde zorluklarla karşılaşılmıştır. Bu yüzden Kısım 4.2.3' de indüktör elemanı yerine CFOA-tabanlı indüktör simülatörü kullanılmış ve Tablo 4.1' de görüldüğü gibi devrenin frekansı 450 kHz' e kadar çıkmış olup indüktörlü yapıya göre devrenin performansı nispeten iyileştirilmiştir.

Kısım 3.2.5' de, aktif eleman olarak FET kullanılarak gerçekleştirilen Kaotik Colpitts Osilatörü incelenilmiş olup bu yapının çalışma frekansı 2.3 MHz' lere kadar çıkmıştır. Kısım 4.2.4' deki çalışmada önceki iyileştirmelere benzer olarak indüktör elemanı yerine indüktör simülatörü kullanılmış ve neticede Tablo 4.1' den de görüldüğü gibi çalışma frekansının önceki yapıya oranla değişmeyerek 2.2 MHz civarında olduğu tespit edilmiştir.

Kısım 3.2.6' daki 4 boyutlu kaotik osilatör devresi, VOA-tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. VOA' nın ideal olmaması ve kazanç-band genişliği çarpımının sınırlı olmasından dolayı bu yapının çalışma frekansının en fazla 175 kHz olduğu görülmüştür. Devrenin daha yüksek frekanslarda çalışabilmesi için Kısım 4.2.5' de verilen yapıda aktif eleman olarak CFOA seçilmiştir. Ayrıca devre yapısında bulunan iki adet indüktör yerine de CFOA-tabanlı indüktör simülatörleri kullanılmıştır. Bu değişiklikler yapıldığında devrenin çalışma frekansı, önceki frekans değerine göre çok büyük bir artış göstermiş olup Tablo 4.1' de görüldüğü gibi 1.175 Mhz' e kadar ulaşmıştır.

Kısım 3.3.3' de incelenen VOA-tabanlı kaotik RC osilatörünün Tablo 3.1' den de görüldüğü gibi çalışma frekansı en fazla 40 kHz civarındadır. VOA' ların çalışma frekanslarının düşük olmasından dolayı devrenin CFOA-tabanlı olarak gerçekleştirimi

yapılmış ve bu sayede devrenin çalışma frekans sahası genişleyerek Tablo 4.1' de verildiği gibi yaklaşık 560 kHz' e ulaşmıştır.

Bu tez çalışmasında, literatürde yer alan kaotik osilatör devrelerine alternatif olabilecek modeller ortaya konmuş ve bu modellerin kaotik davranışları ayrı ayrı yapılan teorik, benzetim ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Bu çalışmalar neticesinde literatürde yer alan kaotik osilatör devrelerinin performanslarında da iyileştirilmeler yapılmıştır. Yapılan bu iyileştirmeler, iki farklı yol izlenerek gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilkinde indüktör elemanı yerine indüktör simülatörü kullanılmış, ikincisinde ise literatürde voltaj modlu VOA-tabanlı olarak gerçekleştirilen devreler akım modlu CFOA-tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Son on yıl içerisinde üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan kaos ve kaotik sistemler konusunda, bundan sonra yapılacak çalışmaların daha da detaylandırılarak bilimsel ve endüstriyel amaçla kullanılacağı düşünülmektedir. Neticede bu çalışmada sunulan, performansları iyileştirilmiş kaotik osilatör devrelerinin, gerçekleştirilecek kaos kontrol sistemleriyle, kaotik şifreleme sistemleriyle, kaos tabanlı gürültü üreteçleriyle, kaotik haberleşme sistemleriyle ilgilenen araştırmacılara ışık tutacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Kennedy, M.P., Experimental Chaos from Autonomous Electronic Circuits, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Vol. 353, 13-32, 1995.
2. Kılıç, R., Karışık Modlu Yeni Bir Kaotik Devre Modeli Tasarımı ve Güvenilir Haberleşme Amaçlı Sistem Gerçekleştiriminde Kullanılması, Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2000.
3. Kennedy, M.P., Chua L.O., Van der Pol and Chaos, IEEE Trans. Circuits&Systems-I, Vol. 33, 974-980, 1986.
4. Chua, L.O., Wu, C.W., A Universal Circuit for Studying and Generating Chaos, IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundemental Theory and Applications, Vol. 40, 732-745, 1993.
5. Kılıç, R., Elektronik Devrelerdeki Kaos Olayının Bilgisayar Simülasyonları ile İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1996.
6. Cruz, J.M., Chua, L.O., A CMOS IC Nonlinear Resistor for Chua's Circuit, IEEE Trans. Circuits and Syst-I, Vol. 39, No. 12, 985-995, 1992.
7. Cruz, J.M., Chua, L.O., A CMOS IC Chip of Chua's Circuit, IEEE Trans. Circuits and Syst-I, Vol. 40, No. 10, 614-625, 1993.
8. Kennedy, M.P., Robust Op-Amp Realization of Chua's Circuit, Frequenz, Vol. 46, 66-80, 1992.
9. Zhong, G.O., Ayrom, F., Experimental Confirmation of Chaos from Chua's Circuit, Int.J. Circuit Theory and Appl., Vol. 13, No. 11, 93-98, 1985.
10. Elwakil, A.S., Kennedy, M.P., Chua's Circuit Decomposition: A Systematic Design Approach for Chaotic Oscillators, J. of the Franklin Institute, Vol. 337, 251-265, 2000.
11. Elwakil, A.S., Kennedy, M.P., Improved Implementation of Chua's Chaotic Oscillator Using Current Feedback Op-Amp, IEEE Trans. Circuits and Syst-I, Vol. 47, No. 1, 76-79, 2000.

12. Kılıç, R., On CFOA-Based Realizations of Chua's Circuit, Circuits, Systems and Signal Processing, 22, 475-491, 2003.

13. Senani, R., Gupta, S.S., Implementation of Chua's Chaotic Circuit Using Current Feedback Op-Amps, Electronic Lett., Vol. 34, No. 9, 829-830, 1998.

14. Kennedy, M.P., Chaos in the Colpitts Oscillator, IEEE Trans. Circuits Systems-I, Vol. 41, 771-774, 1994.

15. Kennedy, M.P., On the Relationship between the Chaotic Colpitts Oscillator and Chua' s Oscillator, IEEE Trans. Circuits and Systems-I, Vol. 42, No. 6, 376-379, 1995.

16. Elwakil, A.S., Kennedy, M.P., A Family of Colpitts-Like Chaotic Oscillators, Journal of The Franklin Institute, Vol. 336, 687-700, 1999.

17. Tamasevicius, A., Bumeliene, S., Mykolaitis, G., Evaluation of Bipolar Transistors for Application to RF Chaotic Colpitts Oscillator, The 42th International Scientific Conference, 2001.

18. Elwakil, A.S., Kennedy, M.P., High Frequency Wien Type Chaotic Oscillator, Electronics Letters, Vol. 34, 1161-1162, 1998.

19. Elwakil, A.S., Kennedy, M.P., A Semi-Systematic Procedure for Producing Chaos from Sinusoidal Oscillators Using Diode-Inductor and FET-Capacitor Composites, IEEE Trans. Circuits and Systems-I, Vol. 47, 582-590, 2000.

20. Elwakil, A.S., Soliman A.M., A Family of Wien Type Oscillators Modified for Chaos, Int. J. Circuit Theory Appl., Vol. 25, 561-579, 1997.

21. Elwakil, A.S., Soliman A.M., Current Mode Chaos Generator, Electronics Letters, Vol. 33, 1661-1662, 1997.

22. Morgül, Ö., Wien Bridge-Based RC Chaos Generator, Electronics Letters, Vol. 31, 2058-2059, 1995.

23. Morgül, Ö., An RC Realization of Chua's Circuit Family, IEEE Trans. Circuits and Syst-I., Vol. 47, No. 9, 1424-1430, 2000.

24. Namajunas, A., Tamasevicius, A., Modified Wien Bridge Oscillator for Chaos, Electronics Letters, Vol. 31, 335-336, 1995.

25. Namajunas, A., Tamasevicius, A., Simple RC Chaotic Oscillator, Electronics Letters, Vol. 32, 945-946, 1996.

26. Özoğuz, S., Şengör, N.S., CFOA-Based Wien Bridge Type RC Chaos Oscillator, Proc. of ELECO'99, Vol. Electronics, 81-85, 1-5 December, 1999.

27. Tamasevicius, A., Namajunas, A., Cenys, A., Simple 4D Chaotic Oscillator, Electronic Lett., Vol. 32, 957-958, 1996.

28. Sprott, J.C., A New Class of Chaotic Circuit, Physics Letters A, Vol. 266, 19-23, 2000.

29. Sprott, J.C., Simple Chaotic Systems and Circuits, Am. J. Phys, Vol. 68, No. 8, 758-763, 2000.

30. Guanrong Chen, Tetsushi Ueta, Chaos in Circuits and Systems, World Scientific, 2002.

31. Sedra, A.S., Smith, K.C., Microelectronic Circuits, Oxford University Press, 1998.

32. Pastacı, H., Elektronik Devreler, Yıldız Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 1991.

33. Soliman, A.M., Applications of the Current Feedback Operational Amplifiers, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 11, 265-302, 1996.

34. Alçı, M., Kılıç, R., Elektronik Devreler ve Uygulamaları-I, Erciyes Üniversitesi Yayınları, Kayseri, 1998.

35. Boylestad, R., Nashelsky, L., Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi, M.E.B, 1994.

36. Kılıç, R., Yıldırım, F., CFOA-Tabanlı Kaotik Chua Devresinin Tasarımı ve Yüksek Frekans Performansının Deneysel Olarak Doğrulanması, 11. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı-SIU 2003, 357-360 , 2003.

37. Kılıç, R., A Comparative Study on Realization of Chua' s Circuit: Hybrid Realizations of Chua' s Circuit Combining the Circuit Topologies Proposed for Chua's Diode and Inductor Elements, Int. Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 13, 6, 1475-1493, 2003.

38. Çam U., Inductorless Rrealization of Mixed-Mode Chaotic Circuit Using Current-Feedback Operational Amplifiers, The 10th Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems-NDES 2002, 69-72, 2002.

39. Kılıç, R., Çam, U., Alçı, M., Kuntman, H., Improved Realization of Mixed-Mode Chaotic Circuit, Int. Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 12, 1429-1435, 2002.

40. Uzunhisarcıklı, E., Yıldırım, F., Alçı, M., Experimental Verification of High Frequency Performance of CFOA-Based RC Chaotic Circuit, 2nd International Symposium on Electrical, Electronics and Computer Engineering-NEU-CEE 2004, 44-47, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma YILDIRIM 1979 yılında Karabük' te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Karabük' te tamamladı. 1996-1997 öğretim yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2001 yılında bu bölümden mezun olup 2002 yılında E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı yıl E.Ü. Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Elektrik-Elektronik Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı görevini sürdürmektedir.

Adres:
Erciyes Üniversitesi
Sivil Havacılık Yüksekokulu
Uçak Elektrik-Elektronik Bölümü
38039 Melikgazi / KAYSERİ
Tel: (352) 437 49 01 (İçhat:41 057)