

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

E SINIFI RF GÜÇ YÜKSELTEÇ TASARIMI
AKUSTO OPTİK Q-ANAHTAR SÜRÜCÜ
UYGULAMASI

Furkan Fatih KÖKER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

E SINIFI RF GÜÇ YÜKSELTEÇ TASARIMI
AKUSTO OPTİK Q-ANAHTAR SÜRÜCÜ
UYGULAMASI

Furkan Fatih KÖKER
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. A.Arif ERGİN

GEBZE

2013



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21.01.2013 tarih ve 2013/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 01.02.2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Furkan Fatih KÖKER'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. A. Arif ERGİN

ÜYE

: Doç. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE

: Prof. Dr. Necati ECEVİT

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : E SINIFI RF GÜÇ YÜKSELTEÇ TASARIMI

AKUSTO OPTİK Q-ANAHTAR SÜRÜCÜ UYGULAMASI

YAZAR ADI : Furkan Fatih KÖKER

Radyo frekansı teknolojisinin temel uygulamalarından biri olan Radyo Frekansı Güç Yükselteç'i (RF-GY) farklı uygulama alanlarında sistemlerin bir modülü olarak kullanılmaktadır. RF-GY'ler düşük güçteki sinyalleri kuvvetlendirmek için kullanılır. RF-GY'ler uygulama alanlarındaki farklı ihtiyaçları karşılamak için gürültü seviyesi, çalışma frekansı, çıkış gücü, verimliliği ve kazancı gibi parametreler göz önüne alınarak tasarlanır. Bu durum devre yapısında ve tasarım algoritmasında farklılığa yol açmaktadır. Devre yapısındaki farklılıklar çalışma prensibi bakımından A, B, AB ve C sınıfı RF-GY'ler gibi aktif çalışma ve D, E ve F sınıfı RF-GY'ler gibi anahtarlama çalışması olarak iki farklı prensipte toplanır.

Gün ışığı farklı frekanslardaki çok fazlı ışıklardan meydana gelmektedir. Lazer ise tek frekanslı ve tek fazlı yoğun bir ışık demetidir. Günümüzde kullanılan lazerler Sürekli Dalga Lazerleri (SDL) ve Darbe Lazerleri (DL) olarak iki farklı çalışma prensibinde sınıflandırılabilir. DL'lerde bir darbenin enerjisini sıkıştırarak tepe gücü seviyesini arttırmak için yüksek gerilim altında polarizasyonunu değiştiren Elektro Optik Q-Anahtarı kullanılır. SDL'lerde optik gücü darbeleri moda çevirmek için RF ile anahtarlanan Akusto Optik Q-Anahtarı (AO Q-A) kullanılır. Darbe modundaki sürekli dalga lazer uygulamalarında AO Q-A üzerindeki RF güç, sistemdeki sürekli dalga optik gücü ile aynı olmalıdır.

Bu tezin amacı, 1064 nm dalga boyunda 100 Watt çıkış gücüne sahip Darbe Modlu Sürekli Dalga Lazer Sistemindeki AO Q-A'yı sürmek için E sınıfı RF Güç Yükselteci tasarımıdır. Tez, teorik yaklaşımlar ve temel tasarım formülleri, lazer optiklerindeki AO Q-A'yı sürmek için yaygın olarak kullanılan E sınıfı RF güç yükselteçlerinin analizini kapsar. Tezin özgün yönü, tasarımdaki parametrelerin pratik bir uygulamadaki etkilerinin incelenmesi ve optimize edilmesidir.

Bu tez kapsamında FOKUS MÜHENDİSLİK Ltd. Şirketi'ne tescilli lazer sistemi için ürün olacak bir alt modülün tasarımı FOKUS Elektro Optik ve Radyo Frekansı Laboratuvarlarından yararlanılarak yapılmıştır.

SUMMARY

**TITLE : CLASS E RF POWER AMPLIFIER DESIGN
ACOUSTO OPTIC Q-SWITCH DRIVER APPLICATION**
AUTHOR : Furkan Fatih KÖKER

One of the basic applications of Radio Frequency technology is Radio Frequency Power Amplifier (RF-PA) which is used as a module of systems in different application areas. RF amplifiers are designed to meet the needs of different application fields taking into consideration parameters such as noise level, operating frequency, output power, efficiency, and gain. This situation leads to differences in circuit topology and the design algorithm. Differences in the topology of the circuit determine the operating principle as either active operating RF amplifiers such as A, B, AB, and C classes or switch mode operating RF amplifiers such as D, E, F classes.

Sunlight is composed of multi-phase lights at different frequencies. Laser is a bundle of dense light which is single frequency and single phase. Today, lasers can be classified with respect to two different working principles as continuous wave lasers (CWL) and Pulse Lasers (PL). Electro Optic Q-Switch which changes polarization under high voltage is used in PL to increase level of pulse peak power by compressing pulse energy. In CW laser, Acousto Optic Q-Switch (AO Q-S) is used to convert optic power to pulse mode average power by switching RF in CW lasers. In the pulse mode CW laser applications the RF power which is applied to AO Q-S has the same value with the CW optic output power of the systems.

The aim of this thesis is to design a class E RF Amplifier to drive the AO Q-S for a 1064 nm wavelength, 100 Watt optic output power CW pulsed laser system. In this thesis the theoretical approaches and basic design formulations are analyzed for the class E RF Amplifiers that are widely used for pulsing AO Q-S in laser optics. The novelty of the thesis is the study of the effects of the design parameters in a practical application and the optimization of these parameters.

This thesis is done in FOKUS Engineering Ltd. Electro-Optical and Radio Frequency Laboratories to generate a product as a sub module for FOKUS proprietary design laser system.

TEŞEKKÜR

Bana dünyanın en güzel hediyesini veren eşim Meltem ve kızım Eylül Ela'ya,

Hayatım boyunca karşılaştığım her koşulda yanımda olan ve desteklerini hiç eksik etmeyen annem ve babama,

Lisans ve yüksek lisanstaki tez danışmanım olan Prof. Dr. A. Arif ERGİN'e

FOKUS Mühendisliğin laboratuvar imkânlarının kullanılmasına izin veren ve tezin gelişim sürecinin her aşamada bilgi ve maddi desteğini esirgemedi paylaşan FOKUS Mühendislik Genel Müdürü Tunç NAHİ'ye,

Her türlü sorunda bilgilerini paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen Fokus Mühendislik çalışanı Birol KAYIKÇI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
SUMMARY	ii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
Sayfa	iv
KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. Giriş	1
1.1. Tez Konusu ve Gerekliliği	1
1.2. Uygulanan Yöntem	2
1.3. Tezin İçeriği	3
2. RF Güç Yükselteci	4
2.1. RF Güç Yükselteçleri ile ilgili temel kavramlar	4
2.2. RF Güç Yükselteçlerinin Sınıflandırılması	5
2.2.1. Frekansa Göre Sınıflandırma	5
2.2.2. Devre Yapısına Göre Sınıflandırma	5
3. E Sınıfı RF Güç Yükselteci	7
3.1. Devre Yapısı ve Özellikleri	8
3.2. E sınıfı RF-GY Devre Analizi	10
4. E SINIFI RF-GY Tasarımı	18
4.1. Tasarım Algoritması ile Teorik Devre Tasarımı	21
4.2. Aktif Elemanın Seçimi	24
4.3. Bilgisayarlı Devre Analizi	24
4.4. Pasif Malzemelerin Seçimi ve Özellikleri	28
4.5. Tasarım Ortamı ve Özellikleri	29
4.6. Prototip Tasarımı	30
4.6.1. C_p Kapasitörü Seçimi	33
4.6.2. L Çıkış Bobini Üretilmesi	33
4.6.3. C_i Seri Kapasitör İçin Ayarlı Kapasitör Seçimi	34
4.6.4. C_m Uyumlaştırma Kapasitörü İçin Ayarlı Kapasitör Seçimi	35
4.6.5. RFC Seçimi	35
4.6.6. Kapasitörlerin Ayarlanması	35
4.6.7. Maksimum Gücün Referans Alınması	38
4.6.8. Ayarlı Kapasitörlerin Değişimi	38

4.6.9. L Çıkış Bobini Hassas Ayarı	38
4.6.10. Nihai Prototip Tasarım ve Değerlendirme	38
4.7. Üretim Amaçlı Ön Tasarım	42
4.8. Ürün Tasarımı	48
4.8.1. Tasarımlar Arası Karşılaştırma ve Yorum	54
5. Lazerler	57
5.1. Lazerlerin Çalışma Prensibi	57
5.2. Lazer Işığının Özellikleri	59
5.3. Lazerlerin Sınıflandırması	59
5.3.1. Işık Üreten Ortama Göre Sınıflandırma	60
5.3.2. Çalışma Prensibine Göre Sınıflandırma	60
5.3.3. Güvenlik Seviyesine Göre Sınıflandırma	61
5.4. RF Tasarımın Kullanıldığı Lazerin Sınıfı	62
6. Tasarımın lazerle kullanımı	63
7. Sonuç ve değerlendirme	66
ÖZGEÇMİŞ	68

KISALTMALAR ve SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

RF	: Radyo Frekansı
RF-GY	: Radyo Frekansı Güç Yükselteci
SDL	: Sürekli Dalga Lazeri
DL	: Darbe Lazeri
AO Q-A	: Akusto Optic Q-Anahtarı
RF-PA	: Radio Frequency Power Amplifier
CWL	: Continuous Wave Laser
PL	: Pulse Laser
AO Q-S	: Acousto Optic Q-Switch
ISM	: Industrial Scientific Medical

Simgeler

Açıklama

R_{load}	: Yük Empedansı
V_{cc}	: DC Kaynak Voltajı
I_0	: DC Kaynak Akımı
$I_{r(wt)}$	: Yük Akımı
$I_{c(wt)}$	: Şönt Kapasitör Akımı
$I_{(wt)}$	: Anahtar Akımı
C_p	: Şönt Kapasitörü
C_l	: Seri Kapasitör
L	: Seri İndüktans
L_{res}	: Seri Rezonans İndüktansı
L_{ext}	: Seri Yükleme İndüktansı
L_0	: L Uyumlaştırma İndüktansı
C_m	: L Uyumlaştırma Kapasitörü
R_l	: Yük Direnci (Genellikle 50Ω)
R	: Yük Direnci (Uyumlaştırma devresinden öncesi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 – E sınıfı RF-GY devre yapısı.	18
3.2 – Anahtarlama durumlarında aktif eleman üzerindeki voltaj ve akım grafiği.	19
3.3 – Temel E sınıfı RF-GY devre şeması.	20
3.4 - E sınıfı RF-GY analiz ve tasarım devresi.	21
4.1 – E sınıfı RF-GY içeren 100 Watt RF sinyal jeneratörü blok diyagramı.	27
4.2 – 27.12 MHz sinyal jeneratörü.	28
4.3 – Ön yükselteç devresi.	29
4.4 – Teorik hesaplama sonucunda elde edilen E sınıfı RF-GY.	32
4.5 – E sınıfı RF-GY tasarım programı.	32
4.6 – İdeal anahtarlama elemanı ile simülasyon devresi.	34
4.7 – İdeal anahtar simülasyon sonucu (anahtarlama noktası).	34
4.8 – İdeal anahtar simülasyon sonucu (yük üzerindeki).	35
4.9 – Kullanılacak aktif eleman ile simülasyon devresi.	36
4.10 – Kullanılacak aktif eleman ile simülasyon sonucu (anahtarlama noktası).	36
4.11 – Kullanılacak aktif eleman ile simülasyon sonucu (yük üzerindeki).	37
4.12 – Test ortamı genel görünümü.	39
4.13 – RF test PCB’si ve modifikasyonu (sinyal jeneratörü – ön yükselteç).	40
4.14 – RF test PCB’si ve RF-GY geliştirmeye kartı.	40
4.15 – Prototip tasarımı sinyal üretici ve ön yükselteç görünümü.	41
4.16 – Ayarlı kapasitörler.	43
4.17 – RFC devresi.	44
4.18 – Cm kapasitörünün ayarlı olarak kullanılması.	45
4.19 – Yük üzerindeki 27,12 MHz sinüs sinyali.	46
4.20 – Prototip tasarımı devre şeması	48
4.21 – Prototip tasarımı E sınıfı RF-GY Görünümü.	48
4.22 – Prototip tasarımı E sınıfı güç yükselteçli RF jeneratör.	49
4.23 – Lazer sistemin bağlı durumdaki E sınıfı RF-GY’nin testi.	50
4.24 – Lazer sistemiyle kullanımı ve lazerin seramik üzerine delme işlemi.	50
4.25 - Ön tasarım PCB çizimi (Kırmızı Üst Katman).	52
4.26 – Üretim amaçlı ön tasarım sinyal üretici ve ön yükselteç görünümü.	53
4.27 – Ön tasarım devre şeması.	54
4.28 – Üretim amaçlı ön tasarım E sınıfı RF-GY görünümü.	55
4.29 – Üretim amaçlı ön tasarımın test sonuçları.	55
4.30 – Üretim amaçlı ön tasarımın lazer ünitesiyle kullanılması.	56
4.31 – Ürün tasarımı PCB çizimi (kırmızı üst katman – mavi alt katman).	57
4.32 – Üretilen kartın görünümü (sol taraf üst katman – sağ taraf alt katman).	58
4.33 – Üretim tasarımının toplanma aşamaları	59

4.34 – Ürün tasarımı hassas ayar sonrası bobinin değeri.	59
4.35 – Ürün tasarımı hassas ayar sonrası bobinin bulunduğu hattın toplam endüktans değeri.	60
4.36 – Ürün tasarımı RF çıktı görüntüleri.	60
4.37 – Ürün tasarımı 150 W RF çıkış gücü ve 53 V besleme akımı.	61
4.38 – Ürün tasarımı aktif eleman üzerine düşen gerilim (10x prob).	64
5.1 – Uyarılmış foton salınımı [9].	67
5.2 – Basit lazer operasyonu [10].	67
6.1 – Darbe modülasyonlu sürekli dalga lazer sistemi alt modül bileşenleri.	72
6.2 – RF sinyali ile SDL'nin ilişkisi.	73
7.1 – 27.12 MHz modülasyonlu RF jeneratör (Nihai Ürün).	75

TABLULAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 – Devre yapısına göre RF-GY’lerin özellikleri.	16
3.1 - Devre analizi sırasında kullanılan değişkenler ve açıklamaları.	22
4.1 – Tasarım parametreleri.	30
4.2 – Farklı besleme gerilimi ve RF çıkış gücüne bağlı tasarım tablosu.	32
4.3 – RF jeneratör veri tablosu.	63

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan sistemler farklı alanlardaki uygulamaların bir araya getirilmesinden dolayı karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu durum sistemlerin sundukları çözümlerin fonksiyonelliğini arttırırken tasarımlarını zorlaştırır. Tasarımdan kaynaklanan zorlukları azaltmak amacıyla karmaşık yapılara sahip bu sistemler her biri kendi işlevini yerine getiren alt bileşenlerle modellenir. Bu bileşenlerden biri ya da birkaçı sistemin temel işlevini yerine getiren ana modüllerdir. Diğer bileşenler ise ana modüllerin işlevini yerine getirirken kullandıkları yardımcı modüllerdir. RF teknolojisine ait uygulamalar günümüzde kullanılan birçok sistem içerisinde gerek ana modül gerekse yardımcı modül olarak karşımıza çıkar. Çok sayıda farklı uygulaması olan RF teknolojisinin temel uygulamalarından biri olan RF güç yükselteçleri (RF-GY'ler) düşük güçlerdeki sinyalleri kuvvetlendirmeyi sağlar.

1.1. Tez Konusu ve Gerekliliği

RF-GY'ler yaygın bir kullanım alanına sahip olmakla beraber kullanıldığı bir alan da lazer sistemlerdir. Sürekli Dalga Lazer (SDL) sistemlerinde lazeri darbe modülasyonlu çalıştırmak için kullanılan Akusto Optik Q-Anahtarı (AO Q-A; *Acousto Optic Q-Switch*) diye adlandırılan optik eleman üzerine RF enerji uygulandığında içerisinden lazer ışığının kavite doğrultusunda geçmesine izin vermezken uygulanmadığı zaman ışığın geçmesine izin vermektedir. Darbe modülasyonlu çalışan bir RF kaynakla sürülen AO Q-A SDL'lerin modülasyonlu olarak çalışmasını sağlar. Tez SDL'lerde kullanılmak üzere AO Q-A'yı sürecektir şekilde darbe modülasyonlu çalışabilen ürün düzeyinde bir RF-GY tasarımını ve prototip üretimini içeren bir AR-GE çalışmasıdır.

Tez kapsamında ürün düzeyinde tasarımı yapılacak olan RF-GY anahtarlama çalışması prensibine sahiptir ve E sınıfı olarak belirlenmiştir. Ayrıca RF-GY'nin tasarım parametreleri modül olarak kullanılacağı SDL sistemindeki AO Q-A'yı sürebilecek şekilde seçilmiştir. Bu doğrultuda tasarlanacak olan RF-GY'nin çalışma frekansı 27.12 MHz (ISM Bandı – Industrial Scientific Medical alanlarında kullanılan frekanslara ayrılmış özel bir radyo ışıınımı bandıdır) ve çıkış gücü 100 Watt olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu yapının lazer sisteminde kullanılması

için RF-GY'nin çıkışı modülasyon sinyal girişi ile kontrol edilmelidir. Modülasyon sinyali TTL formatında olup bir konumunda iken RF-GY'nin çıkışında RF sinyal mevcut; sıfır konumunda iken çıkışta sinyal olmayacak şekilde belirlenmiştir. Bununla birlikte RF-GY'nin kendisine ait çalışma frekansında bir sinyal kaynağı olması gerekmektedir. Böylece RF-GY hem kendisine ait bir sinyal kaynağı olan, hem de bu sinyali yükselterek 100 Watt RF güç üreten ve ürettiği RF sinyali modülasyon sinyal girişi ile kontrol edilebilen bir yapıda olacaktır. Bu doğrultuda RF-GY'nin dışarıdan verilen bir sinyali yükseltmek yerine bünyesine entegre bir sinyal kaynağından üretilen sinyali yükselttiği için bu yapıya RF jeneratör denir.

Günümüzde kullanılan AO Q-A'lı SDL'ler kesme, delme ve markalama gibi işlemlerde kullanılmaktadır [1]. Bu sistemlere ait lazerlerin hepsinin yurtdışı kaynaklı olduğu düşünüldüğünde yerli üretime geçilmesi noktasında sistemin ihtiyacı olan bir modülünün tasarımı, tasarımın uygulamaya aktarılması sırasında karşılaşılan problemlerin incelenmesi ve ürün düzeyinde bir AR-GE çalışması yapılırken kullanılan tasarım aşamalarının anlatılması bu tez kapsamında ele alınarak incelenecektir. Böylece ürün olarak yerli sanayiye katkısının olması sağlanacak ve tez içerisinde AR-GE faaliyetlerinin nasıl yürütüldüğünün bilgisi verilmiş olacaktır.

1.2. Uygulanan Yöntem

E sınıfı RF-GY tasarımını kapsayan tez çalışması dokuz aşamalı bir tasarım yöntemi içermektedir. İzlenen yöntemin içeriği şu şekildedir.

- Devrenin tasarım algoritması kullanılarak, teorik olarak devre elemanlarının değerlerinin bulunması.
- Devrede kullanılacak aktif elemanın seçilmesi.
- Devre analizinin SPICE programından yararlanarak bilgisayar üzerinde yapılması ve simülasyon sonuçlarının alınması.
- Devrede kullanılacak pasif malzemelerin seçilmesi.
- Tasarımın denenmesi için elverişli bir test ortamının kurulması.
- Devrenin gerçekleştirilebilirliğini test etmek için prototip tasarımının yapılması.

- Devrenin PCB tasarımının lazer sistem elektroniği içerisinde konulacağı alanın boyutlarına göre yenilenip üretim öncesi tasarımın yapılması.
- Tasarımın tamamlanarak üretimi yaptırılan PCB kartlar ile RF-GY'nin üretilmesi ve kutulanması.
- RF-GY'nin hedeflenen performansı gösterdiğine dair testlerin yapılması.

1.3. Tezin İçeriği

Tezin 1. Bölümü giriş niteliğindedir ve bu bölüm altında tezin konusu, amacı, uygulama yöntemi ve tezin içeriğinden söz edilmektedir.

2. Bölüm, tez konusu ile ilgili temel kavramları içerir. RF-GY'ler ve sınıflandırılması anlatılmaktadır.

3. Bölüm tezin temel konusu olan E sınıfı RF-GY'nin anlatıldığı bölümdür. Bu bölüm, E sınıfı RF-GY ile ilgili temel kavramları ve RF-GY'nin devre analizini içerir.

4. Bölüm E sınıfı RF-GY tasarımını içerir. Bu bölüm altında tasarımın teorik hesapları, simülasyonu, aşamalı olarak yapılan pratik tasarımı ve tüm bu tasarım aşamalarının karşılaştırılmalı yorumu mevcuttur.

5. Bölüm lazerlerle ilgili temel kavramları ve lazerlerin sınıflandırılmasını anlatmaktadır.

6. Bölüm tasarlanan RF-GY'nin lazer ile entegrasyonunu ve lazerle kullanıldığında sistem içerisindeki çalışma mantığını anlatmaktadır.

7. Bölüm tezin sonuçlarının ve değerlendirilmesinin yapıldığı bölümdür.

2. RF GÜÇ YÜKSELTECİ

Günümüzde birçok alanda kullanılan Radyo Frekansı (RF) teknolojisinin birbirinden farklı çok sayıda uygulaması vardır. Bu uygulamalar içerisinde RF-GY'ler önemli bir yere sahiptir. Direkt olarak bir sistem meydana getirmese de farklı sistemlerin içerisinde modül olarak kullanılan RF-GY'lerin görevi çalışma frekansında girişlerini uygulanan zayıf sinyalleri güçlendirmektir. RF-GY'ler cep telefonlarının içerisine sığabilecek kadar küçük boyutlardan çok yüksek güçlere ihtiyaç duyan büyük indüksiyon sistemlerinde kullanılmak üzere çok büyük boyutlara ulaşabilir. RF-GY'lerin boyutunu belirleyen dört temel unsur çıkış gücü, çalışma frekansı, kazanç ve verimliliğidir. RF-GY'lerin tasarımları bu temel unsurlar göz önüne alınarak yapılır¹[2][3].

Günümüzde kullanılan RF-GY'ler devre yapıları bakımından farklılık gösterir. Bu farklılıklardan dolayı devre analizi, formülleri ve bunlara bağlı olarak tasarım aşamaları ve algoritmaları değişir.

2.1. RF Güç Yükselteçleri ile ilgili temel kavramlar

Çalışma frekansı, çıkış gücü, kazanç ve verimlilik RF-GY'lerin temel kavramlarıdır. Bu kavramların açıklamaları şu şekildedir.

- Çalışma Frekansı: RF-GY'nin kuvvetlendirme işlemini yapabileceği frekanstır. Bu frekans devre yapısına göre tek bir değerde olabileceği gibi geniş bir spektrumda da olabilir.
- Çıkış Gücü: RF-GY'den elde edilebilen maksimum RF gücün miktarıdır. Uygulamasına göre mW'lardan MW'lara kadar değişebilir.
- Kazanç: RF-GY'nin çıkışından alınan gücün girişine uygulanan güce olan oranıdır.
- Verimlilik: RF-GY'nin çıkışından alınan gücün kaynağından çekilen güce olan oranıdır.

¹ Bu bölüm [2] ve [3] nolu referans kitaplarından derlenmiştir.

2.2. RF Güç Yükselteçlerinin Sınıflandırılması

Günümüzde çok sayıda uygulama alanı bulunan RF-GY'ler farklı özellikler gösterir ve bu özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Farklı şekilde sınıflandırılabilen RF-GY'ler için çalışma frekansına ve devre yapısına göre yapılan sınıflandırma bunlardan iki tanesidir.

- Çalışma Frekansına Göre Sınıflandırma
 - ❖ Tek Bantlı (Single Band) Yükselteçler
 - ❖ Dar Bantlı (Narrow Band) Yükselteçler
 - ❖ Geniş Bantlı (Broadband) Yükselteçler
- Devre Yapısına Göre Sınıflandırma
 - ❖ A Sınıfı RF Güç Yükselteçleri
 - ❖ B Sınıfı RF Güç Yükselteçleri
 - ❖ AB Sınıfı RF Güç Yükselteçleri
 - ❖ C Sınıfı RF Güç Yükselteçleri
 - ❖ D Sınıfı RF Güç Yükselteçleri
 - ❖ E sınıfı RF Güç Yükselteçleri
 - ❖ F Sınıfı RF Güç Yükselteçleri

2.2.1. Frekansa Göre Sınıflandırma

RF-GY'lerin temel parametrelerinden biri olan çalışma frekansının uygulama alanına göre belirli bir frekansta, dar bir frekans aralığında ya da geniş bir frekans aralığında olması istenir. Bu durum RF-GY'lerin tasarım mantığında ve devre yapısında değişikliğe yol açar. RF-GY'ler çalışma frekansı bakımından “Tek Bantlı”, “Dar Bantlı” ve “Geniş Bantlı” olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılır.

2.2.2. Devre Yapısına Göre Sınıflandırma

RF-GY'lerin devreleri çalışma mantığına göre temelde ikiye ayrılır. Bu durum yarı-iletken devre elemanın aktif veya anahtarlamalı olarak kullanılmasına dayanır. Her iki çalışma mantığı altında da farklı devre yapıları bulunmaktadır. Devre yapısına göre sınıflandırılan güç yükselteçlerinin çalışma prensipleri ve verimlilikleri Tablo 2.1’de gözükür.

Sınıfı	Çalışma Prensibi	Teorik Verimlilik	Pratik Verimlilik
A	Aktif	%50	%15 – %25
B	Aktif	%78.5	%40 – %65
AB	Aktif	%78.5	%40 – %65
C	Aktif	%85	%50 – %70
D	Anahtarlamalı	%100	%70 – %85
E	Anahtarlamalı	%100	%70 – %90
F	Anahtarlamalı	%100	%60 – %70

Tablo 2.1 – Devre yapısına göre RF-GY’lerin özellikleri.

3. E SINIFI RF GÜÇ YÜKSELTECİ

Yarı iletken devre elemanlarının gelişimiyle birlikte anahtarlama prensibi yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle anahtarlama prensibiyle çalışan güç kaynaklarındaki gelişimler bu mantığın farklı alanlardaki uygulamalarda kullanımını artırmıştır. Bunlardan birisi de 1972 yılında Nathan O. Sokal ve Alan D. Sokal tarafından geliştirilen E sınıfı RF-GY'dir [4]. Bu RF-GY'nin detayları 1975 yılında yayınlanmış ve 1976'da Nathan O. Sokal tarafından patenti alınmıştır.

Günümüzde E sınıfı RF-GY'ler yaygın olarak kullanılmaktadır ve yaygın olarak kullanılmasının temel nedenleri:

- Verimliliğinin yüksek olması ve buna bağlı olarak düşük güç tüketimleri,
- Yüksek verimlilikten dolayı aktif elemanın ısı üretiminin az olması ve buna bağlı olarak soğutucu ünitesinin küçük olması,
- Barındırdığı devre elemanlarının ısısal değişimlerinin devre karakteristiği üzerine etkisinin az olması,
- Yüksek güvenilirlikte bir yapısının olması,
- Küçük hacimde yapılabilir olması

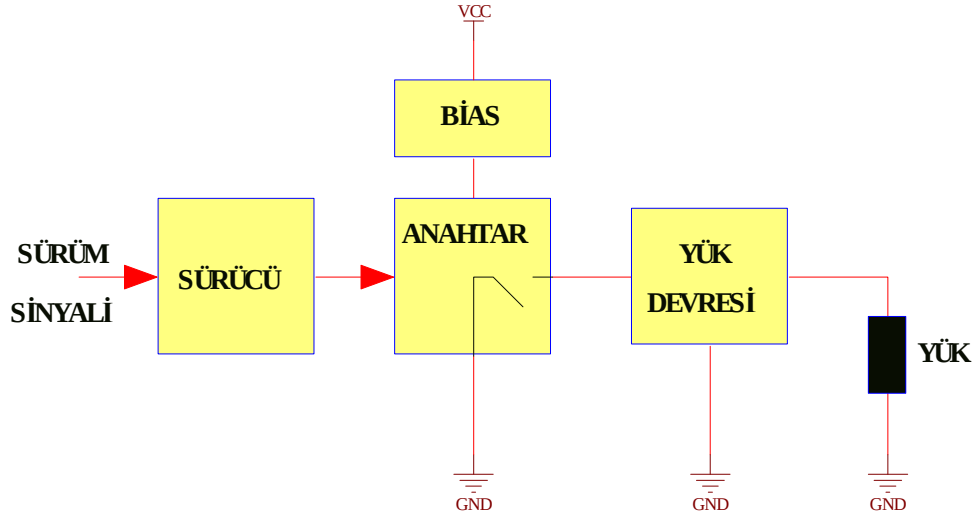
şeklinde sıralanabilir. Sık kullanılmasına sağlan bu avantajlarının yanı sıra dezavantajları

- Anahtarlama noktasında aktif elemanın üzerine düşen tepe gerilimin değeri besleme geriliminin 3,5 katı olması ve bu nedenle yüksek V_{DS} değerine sahip transistör gereksinimi,
- Besleme geriliminin düşük kullanılması ve bu nedenle yük direncinin küçük olmasından dolayı (50 Ω) empedans uyumlaştırma gereksinimi,
- Lineer olmaması

şeklinde sıralanabilir.

3.1. Devre Yapısı ve Özellikleri

E sınıfı RF-GY devre yapısı oldukça basittir. Şekil 3.1’de görülen blok diyagram tek sonlandırılmış anahtarlama modundaki E sınıfı RF-GY aittir. Temelde yük haricinde sürücü (Driver), anahtarlama (Switch), Bias (Biasing) ve yük devresi (Load Network) olmak üzere dört ana bloktan oluşur. Ayrıca tek sonlandırma yerine “Push Pull” bağlantı konfigürasyonu yapmakta mümkündür¹[2].

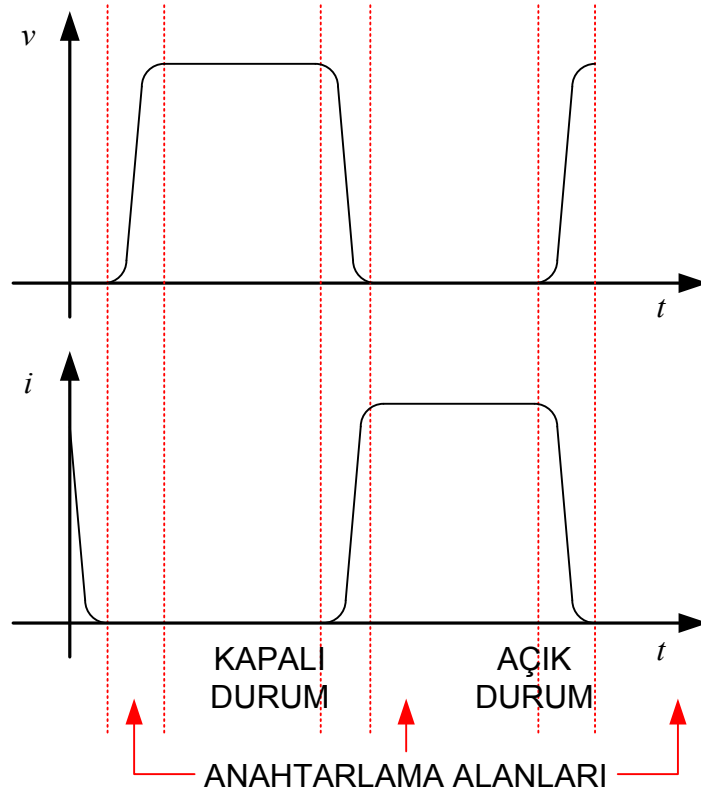


Şekil 3.1 – E sınıfı RF-GY devre yapısı.

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.’de gösterilen sürücü bloğu, E sınıfı RF-GY’nin çalışma frekansındaki sürüm sinyalini aktif elemanın giriş empedansına uyumlaştırarak taşınmasını sağlar. Bu sinyalin sürücü bloğu üstünden aktif elemanın girişine taşınmasıyla anahtarlama işlemi yapılır. Böylece aktif eleman, üzerinden akımı akıtan ve kesen bir anahtar şeklinde çalışır. Anahtarlama sırasında aktif eleman “KAPALI” (OFF STATE) durumda iken yüksek direnç göstermekte ve bu nedenle üzerine düşen gerilim maksimum seviyede üzerinden geçen akım ise minimum düzeydedir. Aktif eleman “AÇIK” (ON STATE) duruma geldiğinde ise çok düşük direnç göstermekte ve üzerine düşen gerilim minimum seviyede üzerinden geçen akım ise maksimum seviyededir. Bu durum Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Anahtar bloğu ile DC güç kaynağı arasındaki bias ünitesi devreye DC güç aktarmada ve anahtarlama sonucunda ortaya çıkan RF enerjisinin güç kaynağına geçmesini önlemek için kullanılmaktadır. Bu nedenle bias ünitesi, idealde DC direnci sıfır olan

¹ Bu bölüm [2] nolu kaynaktan derlenmiştir.

ve çalışma frekansında direnci sonsuz olan endüktif bir elemandır. Ayrıca bias ünitesi pratikte bir RF şok bobini (RFC – RF Choke) ile gerçekleştirilir. Aktif elemanla yük arasındaki yük devresi çalışma frekansında aktif elemanın çıkış empedansı ile yük empedansını uyumlaştırmak ve RF enerjisini yüke aktarmak için kullanılır.

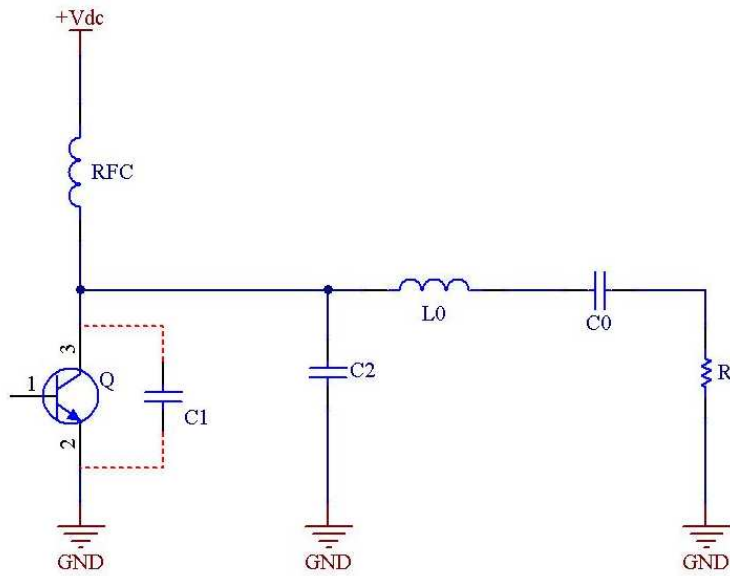


Şekil 3.2 – Anahtarlama durumlarında aktif eleman üzerindeki voltaj ve akım grafiği.

Devre elemanları oldukça basit olan bu yapı anahtarlama yapılan yarı iletken bir aktif eleman (BJT, HBT, JFET, MOSFET, MESFET olabilir), DC güç kaynağı ile aktif eleman arasındaki RF şok bobini ve yarı iletken ile yük arasındaki yük devresinden oluşmaktadır. Şekil 3.3’de E sınıfı RF-GY ait temel devre şeması görülmektedir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi yarı-iletken anahtarlama elemanı istenilen frekansta, tek kutuplu ve tek konumlu durumda çalışmaktadır. Yük devresi tarafında bulunan reaktif elemanlar ile yük, bu anahtarlama yapısıyla enerjilendirilir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere anahtarlama elemanı üzerindeki voltaj maksimuma gittiğinde üzerinden geçen akım değerinin ihmal edilebilir olması, anahtarlama elemanı üzerinden maksimum akım geçerken anahtarlama uçları arasındaki voltaj düşümünün minimum olması ve bu durumun tasarlanan sistemin çalışma frekansı

periyodu içerisinde süreklilik sağlaması nedenleriyle anahtarlama elemanı üzerindeki güç kaybı minimum düzeyde olur.

Şekil 3.3’de temel E sınıfı RF-GY devre şeması verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere devre anahtarlama işlemi yapan bir Q transistörü, bu transistöre bağlı paralel bir C_2 kapasitörü, transistör ile DC kaynak arasına bir RF şok bobini (RFC) ve transistörün çıkışına seri olarak uyumlaştırılmış L_0 C_0 elemanları ile yük direnci R görülmektedir. Şekilde görülen C_1 kapasitörü ise anahtarın açılıp kapatılması esnasında oluşan bozulmaların düzeltilmesinde kullanılan anahtarlama elemanına paralel bir parazitik kapasitansdır.



Şekil 3.3 – Temel E sınıfı RF-GY devre şeması.

3.2. E sınıfı RF-GY Devre Analizi

E sınıfı amplifikatör kavramsal formu Şekil 3.4’de görüldüğü üzere oldukça basittir. Aktif eleman tamamen kapalı veya tamamen açık olacak şekilde sürülür. Başka bir deyişle, anahtarlama voltajı ve anahtarlama akımı dalga formunda küçük bir örtüşme vardır. Anahtarlama voltajı ve akımının dalga formundaki örtüşme anahtar üzerinde güç kaybına yol açar. Tabii ki, endüktansların ve kapasitörlerin

Anahtar üzerindeki voltaj $V(\omega t)$ ve anahtar doğrultusundaki akım ise $I(\omega t)$ ile anlık olarak ωt zamanında ifade edilir. Analizle ilgili değişkenlerin tablosu ve açıklamaları anlaşılabilir olması için Tablo 3.1’de verilmiştir.

No	Değişken Açıklaması	Sembol	
1	DC Kaynak Voltajı	V_{cc}	
2	DC Kaynak Akımı	I_0	
3	Yük Akımı	$I_r(\omega t)$	Tek sinüs dalgası
4	Şönt Kapasitör Akımı	$I_c(\omega t)$	Sadece anahtar açıkken
5	Anahtar Akımı	$I(\omega t)$	Sadece anahtar kapalı olduğunda
6	Şönt Kapasitörü	C_p	
7	Seri Kapasitör	C_l	
8	Seri İndüktans	L	$L = L_{res} + L_{ext}$
9	Seri Rezonans Endüktansı	L_{res}	
10	Seri Yükleme Endüktansı	L_{ext}	E sınıfı için ekstra indüktans
11	L Uyumlaştırma Endüktansı	L_0	Yük empedansı dönüşümü
12	L Uyumlaştırma Kapasitörü	C_m	
13	Yük Direnci	R_l	Genellikle 50 Ω
14	Yük Direnci	R	L Uyumlaştırma öncesi düşük değerli yük direnci

Tablo 3.1 - Devre analizi sırasında kullanılan değişkenler ve açıklamaları.

Anahtar kapanır kapanmaz şönt kapasitör doğrultusundaki akım sıfır olmalıdır.

$$I_c(\alpha t) = \omega C_p \frac{d}{d(\alpha t)} V(\alpha t) = 0 \quad (3.3)$$

Bu durum anahtarın açık olduğu $2\pi n < \omega t < (2n+1)\pi$ zaman aralığındaki anahtar akımı için başlangıç koşulunu sağlar.

$$I = I_0 + I_r \quad (3.4)$$

Eğer $I_r(\omega t) = I_{r0} \sin(\omega t + \phi)$ ise $\omega t = 2\pi n$ olduğunda ϕ faz açısını belirler.

Böylece bu eşitlik (3.5)'deki gibi ifade edilir.

$$I_0 = -I_{r0} \sin \phi \quad (3.5)$$

Bu eşitlikten faydalanarak anahtarın açık olduğu periyot için $((2n+1)\pi < \omega t < (2n+2)\pi)$ anahtarlama akımı (3.6)'daki gibi ifade edilir.

$$I(\omega t) = I_0 + I_{r0} \sin(\omega t + \phi) \quad (3.6)$$

(3.5) ve (3.6) eşitlikleri kullanılarak $I(\omega t)$ (3.7)'deki gibi ifade edilir.

$$I(\omega t) = I_{r0} (\sin(\omega t + \phi) - \sin \phi) \quad (3.7)$$

Şönt kapasitörü üzerindeki voltaj (3.8)'deki gibi ifade edilir.

$$V(\omega t) = -\frac{1}{\omega C_p} \int_{\pi}^{\omega t} I(\omega t) d(\omega t) = -\frac{I_{r0}}{\omega C_p} (\cos(\omega t + \phi) + \cos \phi + (\omega t - \pi) \sin \phi) \quad (3.8)$$

E sınıfı RF-GY'nin $\omega t = 2\pi n$ ($\omega t = 0$) zamanlarındaki koşulunu $V(0) = 0$ koşulu kullanılarak (3.8)'e uygulandığında (3.9)'daki eşitlik elde edilir.

$$2 \cos \phi + \pi \sin \phi = 0 \quad (3.9)$$

(3.9)'daki eşitlik sadeleştirilerek (3.10)'daki gibi ifade edilir.

$$\tan \phi = -\frac{2}{\pi} \quad (3.10)$$

(3.10) eşitliği E sınıfı operasyonun yol açtığı temel faz kaymasıdır. Akım, voltaj dalga formundan $\phi = -32.48^\circ$ kadar gecikir.

$$\sin \phi = \frac{-2}{\sqrt{\pi^2 + 4}} \quad (3.11)$$

$$\cos \phi = \frac{\pi}{\sqrt{\pi^2 + 4}} \quad (3.12)$$

(3.11) ve (3.12)'deki trigonometrik eşitliklerden faydalanarak (3.8) tekrar yazılır ve (3.13) elde edilir.

$$V(\omega t) = -\frac{I_{r0}}{\omega C_p} (\pi \cos \omega t + 2 \sin \omega t + \pi - 2(\omega t - \pi)) \frac{1}{\sqrt{\pi^2 + 4}} \quad (3.13)$$

Eğer (3.11)'deki trigonometrik eşitlik (3.5)'da kullanılırsa (3.14) eşitliği elde edilir.

$$I_0 = \frac{2I_{r0}}{\sqrt{\pi^2 + 4}} \quad (3.14)$$

Anahtarın açık olduğu $\pi < \omega < 2\pi$ (numaralandırma değişken n silinerek) zamanlarda üzerine düşen gerilimin dalga formunu (3.14) eşitliği (3.13)'de kullanılarak (3.15)'deki gibi elde edilir.

$$V(\omega t) = -\frac{I_0}{\omega C_p} \left(\omega t - \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \sin \omega t \right) \quad (3.15)$$

Şok bobini ideal olarak kabul edilirse, biaslanmış DC kaynak voltajı V_{cc} tam bir açık-kapalı döngüsü boyunca anahtar üzerindeki ortalama voltaja eşittir. Bu durum ilk önemli tasarım ilişkisini sağlar ve (3.16)'daki gibidir.

$$\boxed{V_{cc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{2\pi} V(\omega t) d(\omega t) = \frac{I_0}{\pi \omega C_p}} \quad (3.16)$$

Kayıpsız olarak kabul edilen anahtar ve E sınıfı RF-GY'nin yapısından dolayı biaslanmış DC güç kaynağı ile sağlanan DC güç yük üzerinde tüketilen güce eşit olmalıdır. Burada ifade edilen R Şekil 3.4'de de görüldüğü üzere L uyumlaştırma devresinden öncesinden çıkışa kadar ölçülen toplam direnç değeridir. Güç eşitliği kullanılarak (3.17) eşitliği elde edilir.

$$\boxed{I_0 V_{cc} = \frac{1}{2\pi} I_{r0}^2 R} \quad (3.17)$$

(3.14) eşitliği (3.17)'de kullanılırsa (3.18) elde edilir.

$$\frac{2I_{r0}}{\sqrt{\pi^2 + 4}} V_{cc} = \frac{1}{2} I_{r0}^2 R \quad (3.18)$$

(3.18) düzenlenerek (3.19) elde edilir.

$$\frac{4V_{cc}}{\sqrt{\pi^2 + 4}} = I_{r0} R = V_{r0} \quad (3.19)$$

(3.19) ve (3.14) kullanılarak I_0 (3.20)'deki gibi elde edilir.

$$I_0 = \frac{V_{r0}}{R} \sin \phi = \frac{8V_{cc}}{(\pi^2 + 4)R} \quad (3.20)$$

(3.20) biaslanmış DC V_{cc} kaynağından çekilen akım değeri olduğundan dolayı kaynaktan çekilen güç (3.21)'deki gibi ifade edilir. Bu aynı zamanda yük üzerindeki güce eşittir.

$$P_{load} = \frac{8V_{cc}^2}{(\pi^2 + 4)R} \quad (3.21)$$

Şimdiye kadar yapılan hesaplamalardan amplifikatörün çıkış gücünün V_{cc} ve R 'ye bağlı olduğu görülür. Ayrıca V_{cc} 'nin I_0 ve C_p 'ye olan bağlantısı çıkış gücünün bu parametrelere de bağlı olduğunu gösterir. Şönt kapasitörü anahtarın “Drain-Source” (Kollektör-Emetör) parazitik kapasitörünü de içerir. Bu durum anahtar elemanının seçimini etkiler. Tasarım işlemi gerçekleştirilebilir RF-GY için V_{cc} , R ve C_p 'nin iyi bir kombinasyonunu bulmayı içerir. Genellikle R çok küçük olmaz fakat diğer yandan seri endüktans fiziksel olarak gerçekleştirilebilir küçüklükte olur.

Bu noktada, L_{ext} ekstra endüktansın değeri elde edilir. Yük doğrultusundaki akımın temel frekansa bağlı bir eşitliği olduğundan dolayı yük üzerindeki V_R ve ekstra endüktans üzerindeki $V_{L_{ext}}$ voltajı bulunabilir.

$$V_R = \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} V(\omega t) \sin(\omega t + \phi) d(\omega t) \quad (3.22)$$

$$V_{L_{ext}} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi}^{2\pi} V(\omega t) \cos(\omega t + \phi) d(\omega t) \quad (3.23)$$

Kirchhof Voltaj Kanunu ile (3.22) ve (3.23) kullanılarak (3.24)'deki eşitlik elde edilir.

$$\frac{V_{L_{ext}}}{V_R} = \frac{\omega L_{L_{ext}}}{R} = \frac{\pi + 2 \sin 2\phi - (\pi/2) \cos 2\phi}{(\pi/2) \sin 2\phi + 2 \cos 2\phi} \quad (3.24)$$

Faz $\phi = -32.48^\circ$ ise eşitliğin sadeleştirilmiş hali (3.25)'deki gibidir.

$$\boxed{\frac{\omega L_{L_{ext}}}{R} = 1.153} \quad (3.25)$$

Bir sonraki adım çıkış devresinin seri rezonans devresinin elemanları L_{res} ve C_l 'yi bulmaktır. Merkez frekansı ve yük rezistansı R tasarım sırasında belirlenir. Bu parametrelerle birlikte seri rezonans devresinin Q -Faktörünü belirlemek kalır. Q için yedinin üzerindeki bir değer yeterli olacaktır. Düşük Q değeri harmonik kaçağının etkili olmasından dolayı "EXCESS" endüktansında ve şönt kapasitöründe ince ayar gerektirir. Düşük Q bant genişliğinden daha fazlasına izin verir fakat harmonik miktarının artırır. Seri rezonans devresi LCR'nin analizi ile rezonans kapasitörünün ve endüktansının değeri (3.26) ve (3.27)'deki eşitliklerle bulunur.

$$\boxed{C_l = \frac{1}{\omega QR}} \quad (3.26)$$

$$\boxed{L_{res} = \frac{QR}{\omega}} \quad (3.27)$$

Temel tasarımın son parçası L uyumlaştırma devresidir. Genellikle E sınıfı RF-GY'lerin yük direnci düşüktür (birkaç Ω). Bu yüzden çıkışı standart yük direnci olan 50 Ω veya 75 Ω 'a uyumlaştırılır. L Uyumlaştırma devresi kullanışlı yollardan birisidir. Ayrıca iyi bir ekstra harmonik bastırma özelliği sağlar. Devrenin son çıkış yükü R_l Olarak tanımlanırsa uyumlaştırma devresinin elemanları C_m (3.28)'daki ve L_0 (3.29)'daki eşitliklerle hesaplanır.

$$\boxed{C_m = \frac{1}{\omega R_l} \sqrt{\frac{R_l}{R} - 1}} \quad (3.28)$$

$$\boxed{L_0 = C_m R R_l} \quad (3.29)$$

Bütün hesaplamalar sonucunda devrenin çıkışındaki seri endüktans bütün endüktansların toplamı ile elde edilir.

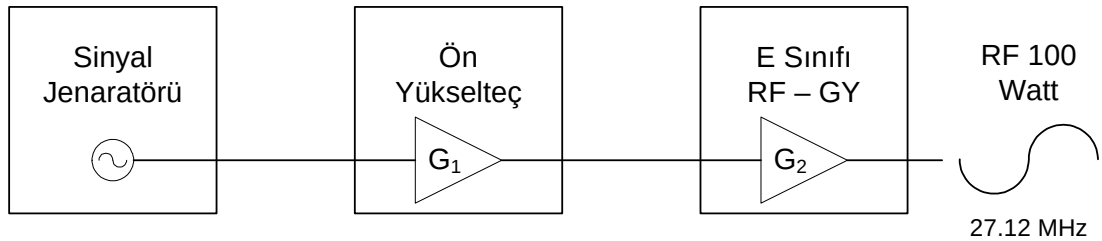
$$\boxed{L_{total} = L_{ext} + L_{res} + L_0} \quad (3.30)$$

4. E SINIFI RF-GY TASARIMI

E sınıfı RF-GY tasarımından önce geliştirilecek sistemin parametrelerinin, genel yapısının ve çalışma prensibinin belirlenmesi gerekir. Tasarımın yapılabilmesi için gereken parametreler şu şekilde sıralanabilir:

- Sistemin kendisine ait sinyal kaynağı olacak.
- 27.12 MHz’de RF sinyal üretecek.
- Minimum 100 Watt RF güç çıkışı olacak.
- Çıkıştaki RF sinyali darbe modülasyonlu olacak.

Kendisine ait bir sinyal kaynağı ile RF enerji üreten sistemlere RF jeneratör denir. Bu nedenle parametrelerden de anlaşılacağı üzere sistem E sınıfı RF-GY içeren bir RF jeneratördür. Bu doğrultuda tasarlanan sistem modüler parçalar ile Şekil 4.1’de gösterilir. Sistem şekilden de anlaşıldığı üzere sinyal jeneratörü, ön yükselteç ve E sınıfı RF-GY bloklarından meydana gelir. Sinyal jeneratöründe üretilen 27.12 MHz sinyal ile ön yükselteç çıkışında RF sinyal elde edilir ve bu sinyal E sınıfı RF-GY ile minimum 100 Watt RF güce yükseltilir.

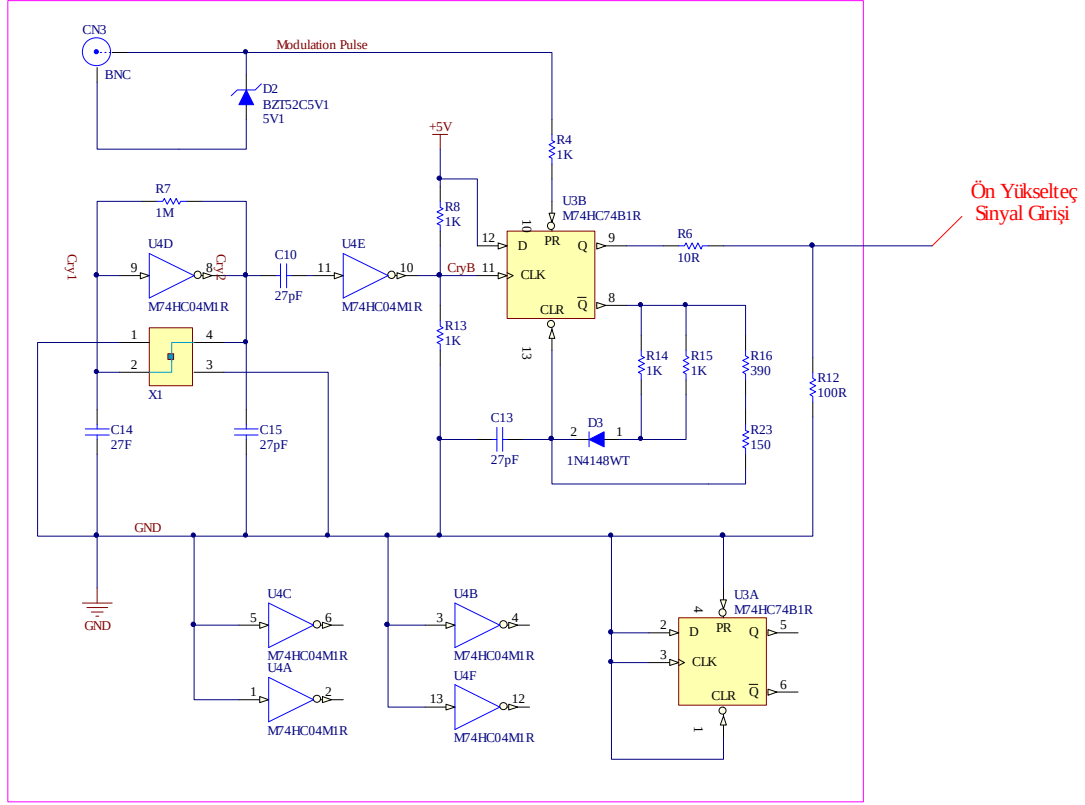


Şekil 4.1 – E sınıfı RF-GY içeren 100 Watt RF sinyal jeneratörü blok diyagramı.

Sistemin sinyal jeneratörü 27.12 MHz kristal ile lojik entegrelerden meydana gelir. Bu yapı Şekil 4.2’de gösterilir. Sistemin bu bölümünde kritik olan üç özellik şu şekildedir.

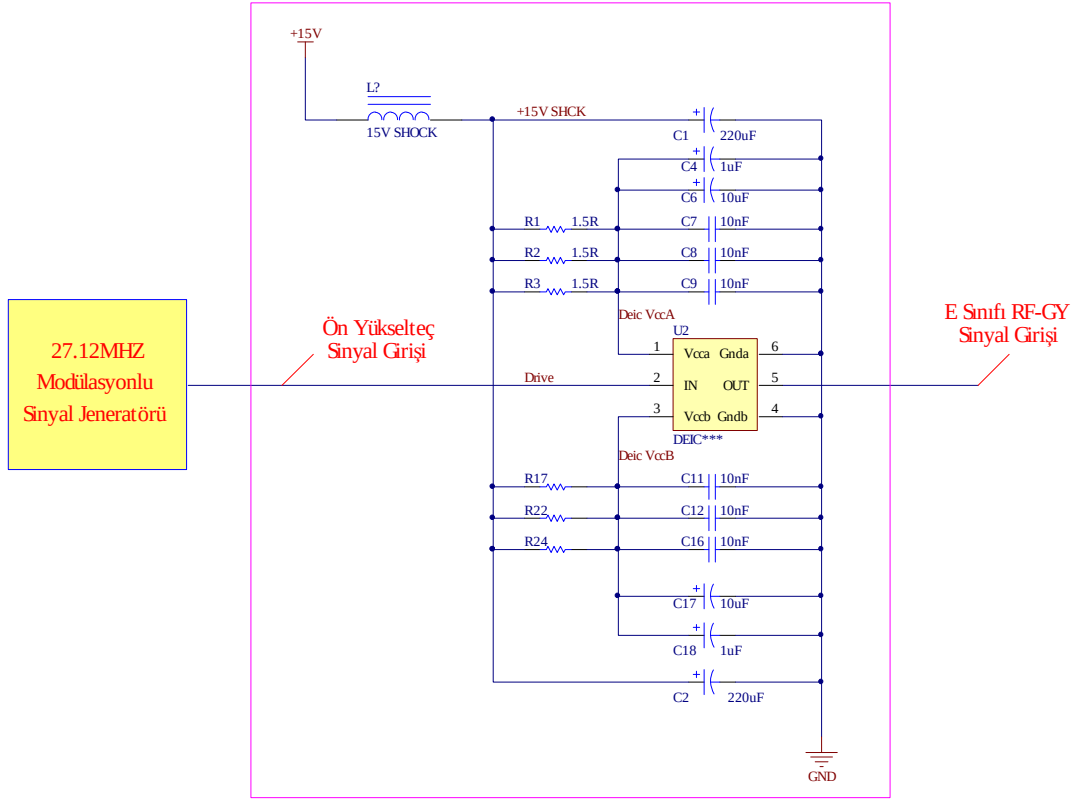
- Sistemde bulunan lojik entegrelerin kullanılmayan lojik bölümlerinin girişleri GND bağlanır. Bu durum lojiklerin etkilenecek rastgele davranmasını engeller.
- D Flip-Flop’un $\bar{Q}$ ile $\overline{CLR}$ girişi arasında bulunan diyot ve direnç devresi, sinyalin doluluk oranını düzelterek “Clock” frekansında %50 doluluk oranında salınımını sağlar.

- RF Modülasyon işlemi Ön Yükseltecin tetikleme sinyalini keserek yapılır. Bu nedenle sisteme BNC konektör üzerinden uygulanan 5 V TTL modülasyon sinyali D Flip-Flop'un "Asynchronous Set-Direct Input" girişine verilir.



Şekil 4.2 – 27.12 MHz sinyal jeneratörü.

Sinyal jeneratöründen elde edilen 27.12 MHz frekansında ve 5 V TTL seviyesindeki sürüm sinyal Şekil 4.3'deki ön yükselteç devresine uygulanır. Bu devre TTL sinyal ile sürülen özel amaçlı RF MOSFET sürücü entegresi ve entegrenin sürümünü sağlayan pasif elemanları içerir. Ön yükselteç bloğunda RF enerji üretildiğinden dolayı beslemesine şok bobini konulur. Böylece DC kaynağa ve aynı kaynaktan beslenen sinyal jeneratörü kısmına RF enerjinin kaçması engellenir.



Şekil 4.3 – Ön yükselteç devresi.

Sistemin sinyal jeneratörü ve ön yükselteç kısmına ait şematik tasarımları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de görülür. Sistemin bu bölümleri E sınıfı RF-GY için gerekli sürüm sinyalini üretilmesini sağladığı ve tasarımına bir etkisi olmadığı için tasarım aşamalarında aynı olarak kalır. Bu aşamadan sonra E sınıfı RF-GY tasarımına geçilir.

E sınıfı RF-GY tasarımı üretime geçecek seviyeye gelene kadar dokuz tasarım aşaması içerir. Bu aşamalar şu şekildedir;

- Devrenin tasarım algoritması kullanılarak, teorik olarak devre elemanlarının değerlerinin bulunması.
- Devrede kullanılacak aktif elemanın seçilmesi.
- Devre analizinin SPICE programından yararlanarak bilgisayar üzerinde yapılması ve simülasyon sonuçlarının alınması.
- Devrede kullanılacak pasif malzemelerin seçilmesi.
- Tasarımın için elverişli bir test ortamının kurulması.
- Devrenin gerçekleştirilebilirliğini test etmek için prototip tasarımının yapılması.

- Devrenin PCB tasarımı lazer sistem elektroniği içerisinde konulacağı alanın boyutlarına göre yenilenir ve üretim öncesi tasarımın yapılması.
- Tasarımın tamamlanarak üretimi yaptırılan PCB kartlar ile tasarımın toparlanması ve kutulanması.
- RF-GY'nin hedeflenen performansı gösterdiğine dair testlerin yapılması.

4.1. Tasarım Algoritması ile Teorik Devre Tasarımı

E sınıfı RF-GY tasarımına başlamak için gerekli olan parametrelerin listesi Tablo 4.1'de görülmektedir.

V_{cc}	f	P_{load}	R_{load}	Q
50 V	27.12 MHz	100 Watt	50 Ω	10

Tablo 4.1 – Tasarım parametreleri.

E sınıfı RF-GY devresinin analizi 3.2. başlığı altındadır. Bu başlık altında verilen analizden yararlanarak çıkartılan tasarım algoritması şu şekildedir.

- Hesaplamalar kayıpsız bir sistem için yapıldığından dolayı DC kaynak akımı I_0 , çekilen toplam gücün besleme gerilimine bölünmesiyle bulunur.

$$I_0 = \frac{P_{load}}{V_{cc}} = \frac{100}{50} = 2 \text{ A} \quad (4.1)$$

- Şönt kapasitörünün C_p 'nin değeri (3.16) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanır.

$$C_p = \frac{I_0}{\omega \pi V_{cc}} = \frac{2}{2\pi \times 27.12 \times 10^6 \times \pi \times 50} = 7,472 \times 10^{-11} = 74,72 \text{ pF} \quad (4.2)$$

- L Uyumlaştırma devresinden çıkışa karşı gözüken R direncinin değeri (3.21) eşitliğinden hesaplanır.

$$R = \frac{8V_{cc}^2}{(\pi^2 + 4)P_{load}} = \frac{8 \times 50^2}{(\pi^2 + 4) \times 50} = 14,42 \Omega \quad (4.3)$$

- Ekstra endüktansın L_{ext} 'in değeri (3.25) eşitliğinden hesaplanır.

$$L_{ext} = \frac{1,153R}{\omega} = \frac{1,153 \times 14,42}{2 \times \pi \times 27.12 \times 10^6} = 9,757 \times 10^{-8} = 97,57 \text{ nH} \quad (4.4)$$

- Seri kapasitör C_l 'nin değeri (3.26) eşitliğinden hesaplanır.

$$C_l = \frac{1}{\omega QR} = \frac{1}{2\pi \times 27.12 \times 10^6 \times 10 \times 14,42} = 4,069 \times 10^{-11} = 40,69 \text{ pF} \quad (4.5)$$

- Seri endüktans L_{res} 'in değeri (3.27) eşitliğinden hesaplanır.

$$L_{res} = \frac{QR}{\omega} = \frac{10 \times 14,42}{2 \times \pi \times 27.12 \times 10^6} = 8,462 \times 10^{-7} = 846,2 \text{ nH} \quad (4.6)$$

- L uyumlaştırma devresinin kapasitörü C_m 'nin değeri (3.28)'dan hesaplanır.

$$C_m = \frac{1}{\omega R_l} \sqrt{\frac{R_l}{R} - 1} = \frac{\sqrt{\frac{50}{14,42} - 1}}{2\pi \times 27.12 \times 10^6 \times 50} = 1,843 \times 10^{-10} = 183,4 \text{ pF} \quad (4.7)$$

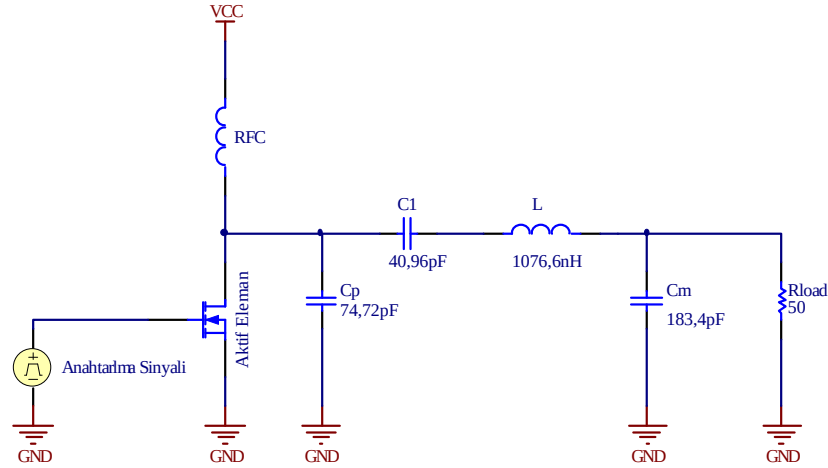
- L uyumlaştırma devresinin endüktansı L_0 'in değeri (3.29)'dan hesaplanır.

$$L_0 = RR_l C_m = 50 \times 14,42 \times 1,843 \times 10^{-10} = 1,329 \times 10^{-7} = 132,9 \text{ nH} \quad (4.8)$$

- L değerleri toplanarak toplam endüktans L_{tot} bulunur.

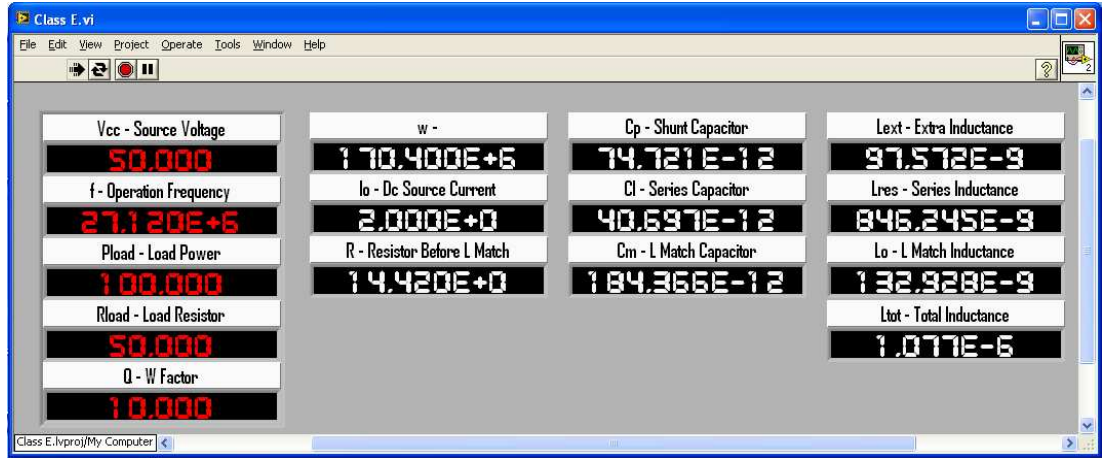
$$L = L_{ext} + L_{res} + L_0 = 97,5 \text{ nH} + 846,2 \text{ nH} + 132,9 \text{ nH} = 1076,6 \text{ nH} \quad (4.9)$$

Hesaplanan değerler sonucunda ortaya çıkan devre Şekil 4.4'de gösterilir.



Şekil 4.4 – Teorik hesaplama sonucunda elde edilen E sınıfı RF-GY.

E sınıfı RF-GY tasarım algoritması kullanılarak “Labview” üzerinde tasarım parametrelerinin girilmesiyle devre elemanlarının değerlerini hesaplayan yazılımın görüntüsü Şekil 4.5’de mevcuttur. Bu yazılım kullanılarak 50 V ve 53 V besleme gerilimleriyle 100 W ve 150 W RF güç çıkışları için hesaplanan devre elemanlarının değerleri Tablo 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.5 – E sınıfı RF-GY tasarım programı.

Farklı Besleme Gerilimi ve Çıkış Gücüne Bağlı Tasarım Tablosu				
Devre Elemanı	50 V		53 V	
	100 W	150 W	100 W	150 W
C_p	74.72 pF	112.08 pF	66.50 pF	99.75 pF
C_1	40.69 pF	61.04 pF	36.22 pF	54.33 pF
C_m	184.12 pF	240.57 pF	169.51 pF	223.59 pF
L	1077 nH	744.84 nH	1198 nH	827.73 nH

Tablo 4.2 – Farklı besleme gerilimi ve RF çıkış gücüne bağlı tasarım tablosu.

4.2. Aktif Elemanın Seçimi

E sınıfı RF-GY tasarımında kullanılacak olan aktif eleman sistemin tüm gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilmelidir. Bu seçim sırasında dikkat edilecek hususlar şu şekildedir.

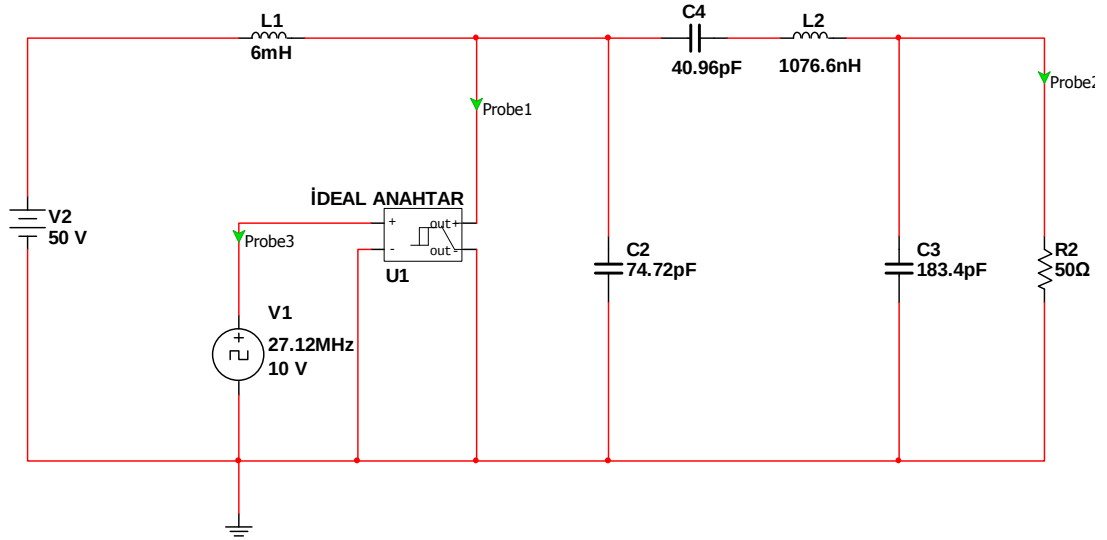
- Aktif eleman anahtarlama işlemine uygun olmalı.
- Aktif eleman 27.12 MHz frekansında çalışabilmeli.
- Aktif elemanın çıkış gücü en az 100 Watt olmalı.
- Aktif elemanın 50 V gerilimi anahtarlayabilmeli ve bu nedenle V_{DS} geriliminin en az 150 V olmalı.

Dikkat edilmesi gereken bu hususlar doğrultusunda kullanılacak olan aktif eleman ARF448 olarak seçilmiştir [6].

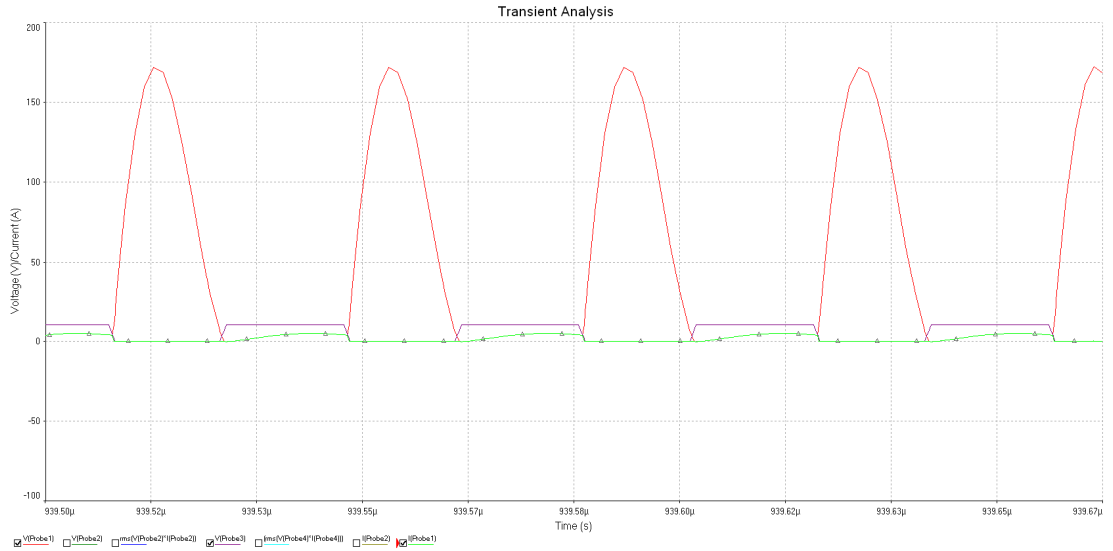
4.3. Bilgisayarlı Devre Analizi

Teorik hesaplamalarda aktif eleman da dâhil olmak üzere tüm devre elemanları ideal olarak kabul görür. Bu nedenle bilgisayar simülasyonu ideal anahtarlama elemanı ve seçilen MOSFET ile olmak üzere iki farklı şekilde yapılması gerekir. Simülasyonda kullanılacak olan devre elemanlarının değerleri Tablo 4.2’de bulunan 50 V, 100 W başlığı altındadır.

Şekil 4.6’daki ideal anahtarlama ile yapılan simülasyon sonucunda elde edilen veriler grafiksel olarak Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gözükmektedir. Şekil 4.7 27.12 MHz anahtarlama sinyali (Probe3) ile anahtarlama noktasındaki (Probe1) gerilim ve akım grafikleridir. Şekilde tetikleme sinyali mor, anahtarlama noktasındaki gerilim kırmızı ve anahtar üzerinden geçen akım açık yeşil renkle gözükmektedir. Grafikte mor renkli tetikleme sinyali sıfır konumunda iken anahtar kapalı ve bir konumunda iken anahtar açıktır. Grafik incelendiğinde anahtarın kapalı olduğu konumda anahtar üzerindeki gerilimin 175 V değerine kadar yani besleme geriliminin üç buçuk katı kadar bir değere yükseldiği görülmektedir. Grafikteki diğer bir ayrıntı ise anahtar açıldığı anda gerilim sıfır değerine düşerken anahtar üzerinden geçen akım maksimum geçecek akıma kadar artış gösterir ve anahtar kapanana kadar o değerde kalır. Grafiklerin teorideki grafikler ile benzer olmasının sebebi simülasyonda kullanılan elemanların ideal olmasından kaynaklanır.



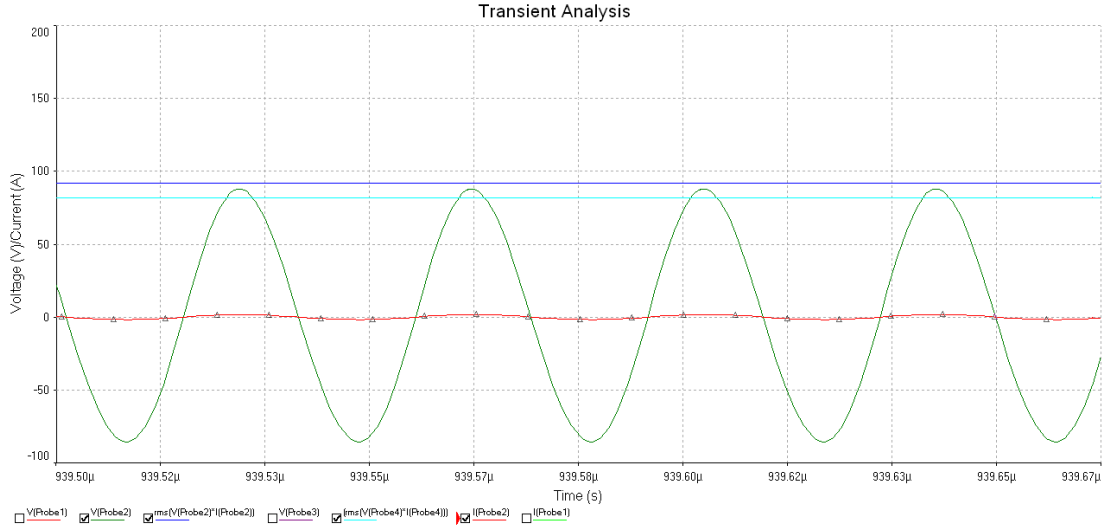
Şekil 4.6 – İdeal anahtarlama elemanı ile simülasyon devresi.



Şekil 4.7 – İdeal anahtar simülasyon sonucu (anahtarlama noktası).

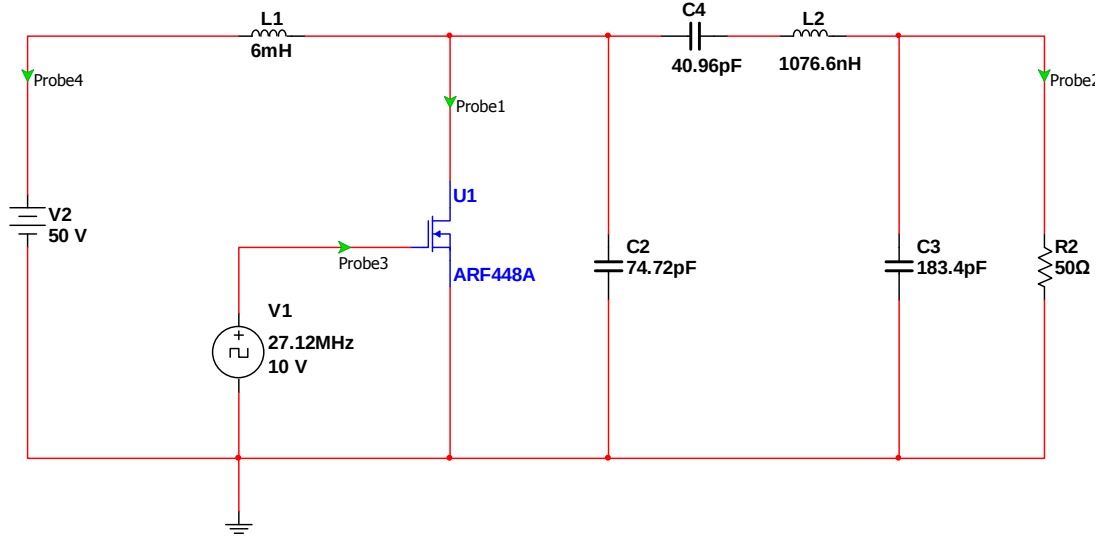
Şekil 4.8’de kaynaktan çekilen güç (koyu mavi), devrenin çıkış gücü (açık mavi), yük üzerinde düşen gerilim (koyu yeşil) ve yük üzerindeki akımın (kırmızı) görülmektedir. Grafik incelendiğinde kaynaktan çekilen gücün 92 W ve devreden alınan çıkış gücünün 82 W olduğu görülür. İdealde 50 V kaynakları 100 W için hesaplanan devre elemanlarıyla simülasyonda 82 W çıkış gücüne karşılık gelir. Bu durum ideal olarak kullanılan anahtarın simülasyon modelinden kaynaklanır. Simülasyon için kullanılan programda ideal olarak kullanılan anahtarın açma kapama işlemini yumuşatarak yapmasının sonucudur. Bu durum Şekil 4.7’deki akım sinyalinin ait grafiğin açma kapama anlarında meydana gelmesi gereken tepe seviyesine bir anda gelmemesinden anlaşılır. Simülasyondan elde edilen 82 W’lık

çıkış gücü Şekil 4.8'deki yeşil renkle gözükten yük üzerindeki 180 V'luk sinüs sinyalinde elde edilir.



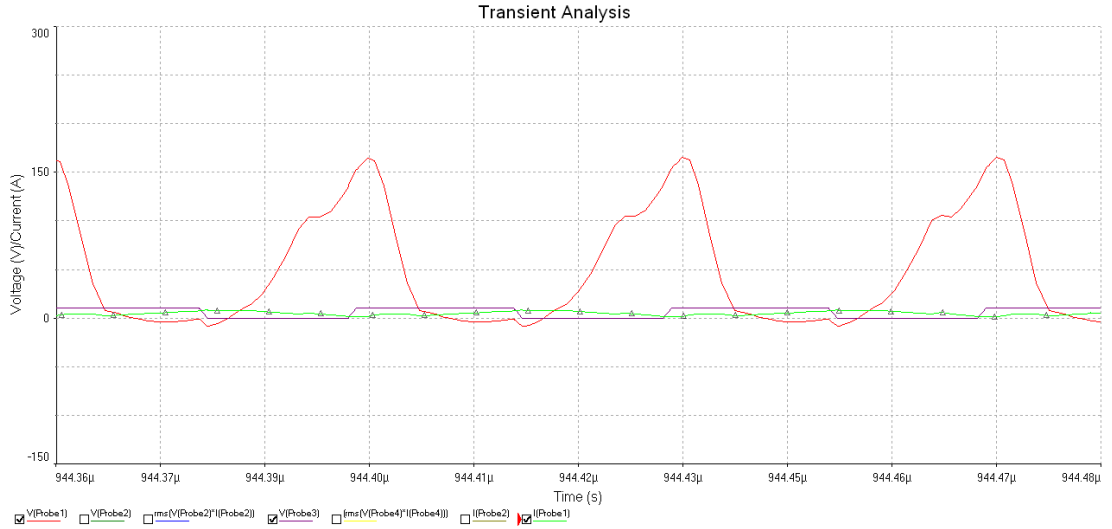
Şekil 4.8 – İdeal anahtar simülasyon sonucu (yük üzerindeki).

Şekil 4.9'da kullanılacak olan Aktif Eleman (ARF448A) ile yapılan simülasyona ait devre şeması gözükmemektedir. Devrede ARF448A haricindeki tüm elemanlar idealdir. Şekil 4.10'da anahtarlama sinyali (mor) ile birlikte aktif elemanın üzerine düşen gerilim (kırmızı) ve aktif eleman üzerinden geçen akımın (yeşil) grafikleri gözükmemektedir. Kullanılan MOSFET ile ideal bir anahtarlama yapılamadığı için tetikleme sinyali ile MOSFET üzerinde düşen gerilim ve içerisinde geçen akım sinyalleri Şekil 4.7'deki gibi ideal olmaz. Bu durum Şekil 4.10'da tetikleme sinyaline karşı MOSFET üzerine düşen gerilimin ve üzerinden geçen akımın zamanda kayma yapmasından anlaşılır. Bu durum aktif elemanın anahtarlama işlemi yapması için tetikleme sinyalini algılayıp cevap verme süresinden kaynaklanır. Bu süre sabit olduğundan dolayı da tetikleme sinyaline karşı MOSFET üzerine düşen gerilim ve üzerinden geçen akım sinyali zamanda kayma yaparak senkron gözükür.



Şekil 4.9 – Kullanılacak aktif eleman ile simülasyon devresi.

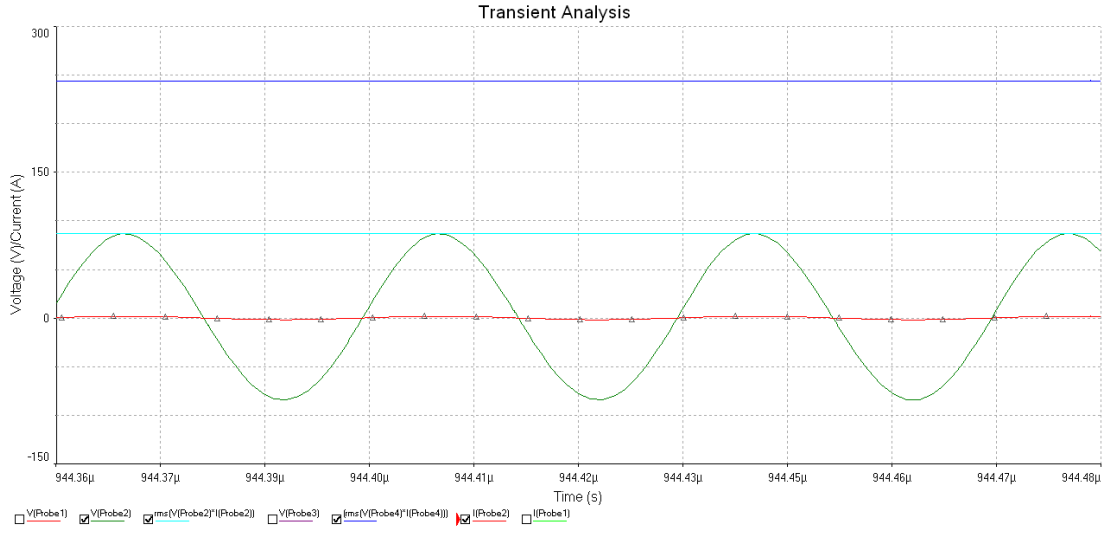
Aktif elemanın içyapısındaki endüktif, kapasitif ve resistif etkiler anahtarlama işlemini ideal olarak yapmasını engeller. Bu etkilere bağlı olarak aktif elemanların veri sayfalarında (Datasheet) açılma zaman gecikmesi (turn-on delay time), yükselme zamanı (rise time), kapanma zaman gecikmesi (turn-off delay time) ve düşme zamanı (fall time) gibi terimler mevcuttur. ARF448A'nın veri sayfası incelendiğinde bu terimlerin Şekil 4.10'daki grafiklerin gecikme zamanlarıyla örtüştüğü görülür.



Şekil 4.10 - Kullanılacak aktif eleman ile simülasyon sonucu (anahtarlama noktası).

Şekil 4.11'de kaynaktan çekilen güç (koyu mavi), devrenin çıkış gücü (açık mavi), yük üzerinde düşen gerilim (koyu yeşil) ve yük üzerindeki akımın (kırmızı) gözükmektedir. Grafik incelendiğinde kaynaktan çekilen gücün 243 W ve devreden

alınan çıkış gücünün 88 W olduğu görülür. Devreden alınan çıkış teorik hesaplama ve ideal anahtarlama elemanı ile yapılan simülasyon sonuçlarına çok yakındır. Fakat devreden çekilen güç 100 W civarı olması gerekirken 243 W'dır. Bu durum Şekil 4.10'dan anlaşılacağı üzere simülasyonda aktif elemanın kapalı olduğu konumda üzerinden geçen akım değerinin sıfır olmamasından ve ideal olarak hesaplanan değerlerin ideal olmayan aktif elemanla birlikte kullanılmasından dolayı meydana gelen uyumsuzluklardan kaynaklanır.



Şekil 4.11 – Kullanılacak aktif eleman ile simülasyon sonucu (yük üzerindeki).

4.4. Pasif Malzemelerin Seçimi ve Özellikleri

E sınıfı RF-GY tasarımının en önemli aşamalarından birisi tasarımda kullanılacak olan pasif malzemelerin seçimidir. E sınıfı RF-GY'de bulunan pasif malzemeleri 3 grupta toplayarak seçimlerinde dikkat edilecek hususlar şu şekilde sıralanır.

- E sınıfı RF-GY'nin en önemli dezavantajlarından biri anahtarlama sırasında aktif eleman üzerine besleme voltajının üç buçuk katı kadar gerilim düşer. Bu durum aktif elemanın seçimini etkilediği gibi özellikle şönt kapasitörü olmak üzere kapasitörlerin seçimini de etkiler. Kapasitörler seramik RF kapasitörü olmakla birlikte maksimum çalışma voltajları besleme voltajının en az beş katı olmasında yarar vardır.

- E sınıfı RF-GY'nin devre analizinde RF şok bobini ideal kabul edilerek iç direnci yok sayılır. Bu nedenle RF şok bobini devrenin ihtiyacını karşılayacak akımı geçirebilen ve iç direnci minimum olacak şekilde seçilmelidir.
- E sınıfı RF-GY'nin devre analizinde tank devresindeki elemanlar ideal kabul edilerek parazitik dirençleri yok sayılır. Bu durum özellikle tank devresindeki bobin üzerinde etkilidir. Bu nedenle bobin seçilirken iç direncinin minimum olmasına dikkat edilmelidir. İç direnci yükseldikçe bobin üzerine düşen gerilim yükselecek ve bobin üzerinde tüketilen güç artacaktır. Yüksek frekansta akım ağırlıklı olarak telin yüzeyinden geçtiğinden dolayı bobin olarak kullanılacak telin içinin boş olması bobinin direnci azaltacak bir yöntemdir. Ayrıca bobin olarak kullanılacak telin malzemesi de önemlidir. Kullanılacak materyalin iletkenliği ne kadar yüksek olursa gösterdiği direnç o kadar az olur. Bu nedenle bakır bir tel kullanmaktansa gümüş kaplı bir tel kullanmak daha iyidir.

4.5. Tasarım Ortamı ve Özellikleri

E sınıfı RF-GY tasarımı sırasında işlemlerin kolaylıkla yapılabilmesi açısından Şekil 4.12'deki gibi iyi bir deney ortamının olması gerekir. Bu nedenle tasarımın sırasında kullanılacak olan ortamın özellikleri şunlardır.

- Tasarım sırasında uzun süreli çalışma yapabilmek ve ısınmadan dolayı aktif elemanın bozulmasını engellemek amacıyla iyi bir soğutucu ünitenin olmalıdır.
- Tasarım sırasında 50 Ω yük bulunması gerekir ve bu yükün uzun süreli çalışma ortamı sağlaması için KW'lık olması gerekir.
- Tasarım sırasında kullanılacak olan besleme kaynaklarının hızlı ve kolay bir şekilde açılıp kapanmasını sağlayacak anahtarlar olmalıdır.
- Tasarımda işlemini hızlandırmak ve kolaylaştırmak amacıyla belli değerlerde ayarlı kapasitör elemanlarının bulunmalıdır.
- Tasarım sırasında ölçüm alabilmek için devrenin çıkışıyla yük arasında girebilen bir RF güç ölçer gereklidir. Ayrıca devreden

üzerinden RF yayılımının varlığını görebilmek amacıyla floresan lamba kullanılır.

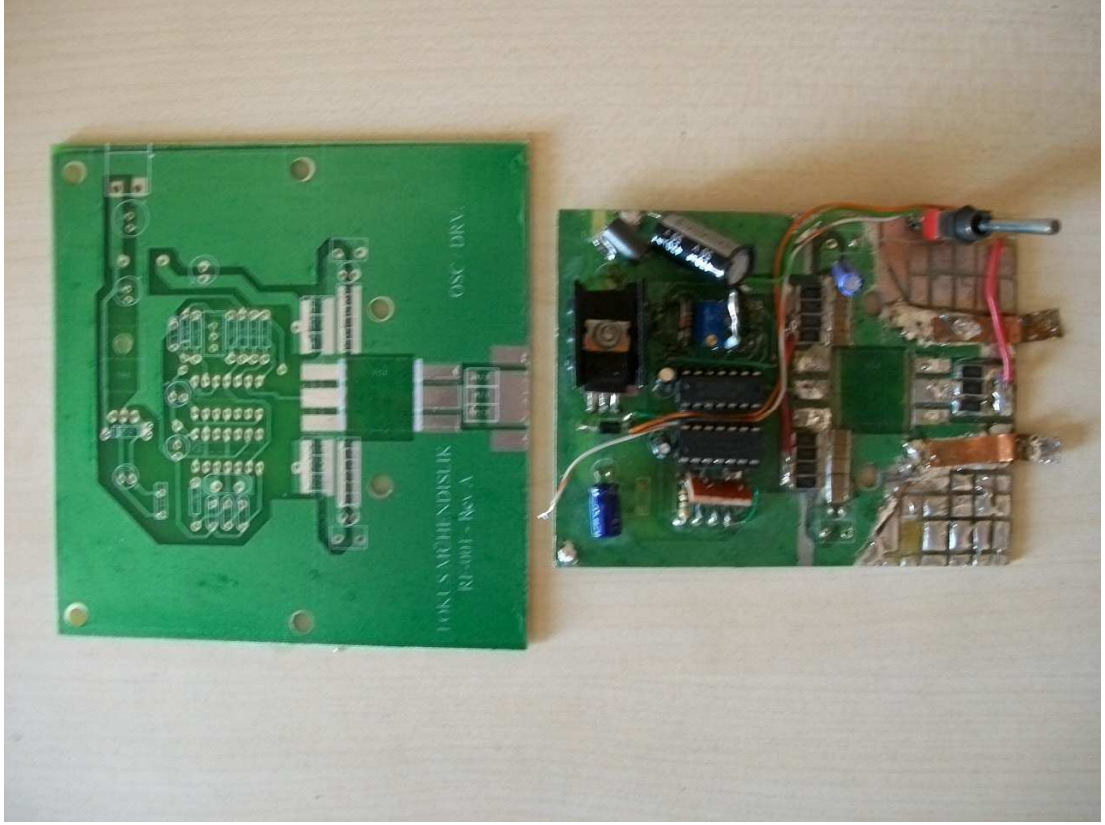
- Tasarım sırasında sistemin modülasyon girişi sürekli aktif ve modülasyon sinyali şeklinde iki farklı konumda çalıştırabilecek bir anahtar olmalıdır.
- Tasarım sırasında ölçüm amacıyla kullanılmak üzere osiloskop ve multimetre gereklidir.



Şekil 4.12 – Test ortamı genel görünümü.

4.6. Prototip Tasarımı

Prototip tasarımı devrenin istenilen fonksiyonlarda ve parametrelerde gerçekleştirilebilirliğini kanıtlamak amacıyla yapılan deneysel (breadboard çalışması) bir çalışmadır. Bu çalışma deneysel olacağından dolayı farklı amaçlar için kullanılan kartların modifikasyonu ile tasarım modüller olarak çalıştırılabiliyorsa yeni bir PCB tasarımı yapmaya gerek yoktur. Bu nedenle E sınıfı RF-GY'nin prototip tasarımına ait sinyal jeneratörü ve ön yükselteç kısmı Şekil 4.13'de sol tarafta bulunan kartın modifikasyonu ile elde edilir. E sınıfı RF-GY kısmının ait tasarımın geliştirilmesi için Şekil 4.14'deki deney (RF breadboard) kartı kullanılır.



Şekil 4.13 – RF test PCB’si ve modifikasyonu (sinyal jeneratörü – ön yükselteç).

E sınıfı RF-GY’nin çıkış devresinin tasarımından önce aktif elemanın anahtarlamasını sağlayacak tetikleme sinyalinin ayarlanması gerekir. Aktif elemanın giriş kısmında uyumlaştırma işleminin zorluğunu hafifletmek için RF MOSFET Sürüm entegresi kullanmakta yarar vardır. Bu sürüm entegresi ile elde edilen RF sinyalin uygun değerdeki bir kapasitör ile DC bloklama işlemi yapıldıktan sonra aktif elemana uygun değerdeki bir trafo ile taşınması yeterlidir.



Şekil 4.14 – RF test PCB’si ve RF-GY geliştirme kartı.

Şekil 4.14’de gözüken RF geliştirme kartı üzerine iki adet aktif eleman montajı yapılabilmekte ve aktif elemandan çıkışa kadar uzanan alan içerisinde GND

bölgesi haricinde bulunan bağımsız yedi alan üzerinde pasif malzemelerin montajına olanak sağlar. Bu nedenle farklı sınıflardaki ve farklı yapılardaki RF-GY'lerin tasarımlarına olanak sağlayan esnek bir RF geliştirme kartıdır.



Şekil 4.15 – Prototip tasarımı sinyal üretici ve ön yükselteç görünümü.

E sınıfı RF-GY'nin tasarımına teorik formüllerin çıkartılması sırasında tüm malzemelerin ideal kabul edilmesinden dolayı bu değerler birebir olarak yerlerine konduklarında çalışmazlar. Ayrıca bu değerleri bire bir olarak da yerlerine koymak mümkün değildir. Bu nedenle teorik çalışmadan pratik uygulamaya geçerken izlenecek bir yöneteme ihtiyaç vardır. İzlenmesi gereken yöntem şu şekildedir (pasif elemanların tanımları Şekil 4.4'deki teorik çizim üzerinde görülür).

- Teorik olarak hesaplanan C_p şönt kapasitörü için sabit bir değer seçilir.
- Hesaplanan L çıkış bobini değerine yakın bir bobin üretilir.
- C_l seri kapasitör için uygun aralıkta ayarlı bir kapasitör seçilir.
- C_m uyumlaştırma kapasitörü için uygun aralıkta ayarlı bir kapasitör seçilir.
- RFC için çıkış bobinin en az beş katı büyüklükte olacak bir bobin seçilir.
- C_l seri kapasitör ve C_m uyumlaştırma kapasitörü ayarlanarak ve çıkış gücü maksimize edilir.
- Maksimize edilen çıkış gücü okunur.
- C_l seri kapasitör ve C_m uyumlaştırma kapasitörünün değerleri okunur ve yerlerine sabit değerli kapasitörler konur.
- Maksimize edilen çıkış gücü referans alınarak L çıkış bobinin hassas ayarı yapılarak nihai devre elde edilir.

4.6.1. C_p Kapasitörü Seçimi

Çıkış devresinde aktif elemana paralel olduğu için anahtarlama yapılan noktanın GND'a karşı olan empedansına direk olarak etki eder. Bu nedenle C_p şönt kapasitörünün seçimi önemlidir. C_p şönt kapasitörünün seçimi sırasında aktif elemanla birlikte anahtarlama bölgesindeki ortak empedans değerinin çıkış devresinde kullanılan diğer elemanlarla birlikte 50Ω 'a eşitlenemeyecek bir değere gelmemesine dikkat edilerek yapılması gerekir.

Tablo 4.2'de farklı besleme gerilimi ve farklı çıkış gücü için hesaplanan C_p şönt kapasitörü değerinin en büyüğü olan değerlerinin en yükseği 112,08 pF değerine yakın olarak seçmekte fayda vardır. Bu nedenle 120 pF olarak seçilen C_p şönt kapasitörünün değerindeki olası bir fazlalık ya da azlık uyumlaştırma sırasında kullanılan ayarlı kapasitörler ile üstesinden gelinir.

4.6.2. L Çıkış Bobini Üretilmesi

L çıkış bobinin için kullanılacak tel gümüş kaplıdır. İletkenliğinin yüksek olmasından dolayı seçilen gümüş kaplı telin çapı 2 mm'dir.

Tablo 4.2'de farklı besleme gerilimi ve farklı çıkış gücü için hesaplanan L değerlerinin en yükseği (1198 nH) ile en düşüğünün (744.84 nH) ortasında olacak şekilde belirlenir ve bu değerde üretilir. Üretilmesi için belirlenen L çıkış bobinin değeri 975 nH'dir.

Bobinin değerini teorik olarak hesaplamadan önce bobinin sarılacağı çap belirlenmesi gerekir. Bu nedenle 17 mm çapında düzgün bir silindir üzerine 2 mm çapında tel ile sarılmasına karar verilen bobinin telin merkezinden merkezine olan çap uzunluğu 18 mm'dir. Bu aşamadan sonra çapı ve değeri belirlenen bobini gerçeklemek için sarım sayısına bağlı olarak bobinin uzunluğunu (4.10)'daki nüvesiz bobinin teorik hesabından yapılır.

$$L = \frac{d^2 \times N^2}{0,4572 \times d + 1.016 \times l} \quad (4.10)$$

d : Bobinin Çapı (mm cinsinden)

l : Bobinin Uzunluğu (mm cinsinden)

N : Sarım Sayısı

$$L = \frac{18^2 \times 10^2}{0,4572 \times 18 + 1,016 \times 25} = 963,437 nH \quad (4.11)$$

Bu formül ile hazırlanan EXCEL hesaplama tablosu üzerinden sarım sayısını ve tel çapına bağlı olarak tahmini bobin uzunluğu ile istenilen bobin değeri için sarım sayısı bulunur. On tur olarak sarılmasına karar verilen bobinin üretilmesinden sonra ölçülen değeri 1020 nH'dir. Bu değer farklılığının temel nedeni bobin uzunluğundaki ufak değişimlerdir. Bu değişim kullanılarak tasarım sırasında RF-GY'nin hassas ayarı yapılır.

4.6.3. C₁ Seri Kapasitör İçin Ayarlı Kapasitör Seçimi

C₁ kapasitörü anahtarlama noktasından yük üzerinde gidecek olan DC gerilimi engeller. Ayrıca bu kapasitörün değerinin olması gerekenden yüksek olması DC gerilimi engellemesinin yanında AC sinyali de bastırır. Bu nedenle çıkış gücünü birebir etkileyen elemanlardan birisidir.

Tablo 4.2'de farklı besleme gerilimi ve farklı çıkış gücü için hesaplanan C₁ seri kapasitörünün değerleri göz önüne alınarak ayarlı kapasitörün değer aralığı belirlenir. Bu nedenle kapasitörün alt sınırının 36,22 pF'dan düşük üst sınırı ise 54,33 pF'dan yüksek olması gerekir. Bu değerler göz önüne alınarak mevcut ayarlı kapasitörler arasından seçilen kapasitörün değer aralığı 30 pF ile 300 pF arasındadır. Kapasitörün üst sınırının hesaplanan değer üç-dört katı kadar büyük olmasında yarar vardır. Tasarım sırasında kullanılan ayarlı kapasitörler Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 – Ayarlı kapasitörler.

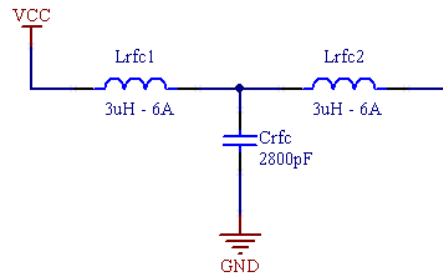
4.6.4. C_m Uyumlaştırma Kapasitörü İçin Ayarlı Kapasitör Seçimi

C_m uyumlaştırma kapasitörü yüke paralel olduğundan dolayı bulunduğu noktadan öncesi ile yükün empedansını eşitleyerek yüke maksimum güç aktarılmasını sağlar.

Tablo 4.2’de farklı besleme gerilimi ve farklı çıkış gücü için hesaplanan C_m uyumlaştırma kapasitörünün değerleri göz önüne alınarak ayarlı kapasitörün değer aralığı belirlenir. Tabloda hesaplanan değerlerin en düşüğü 169,51 pF en yükseği ise 240,57 pF’dir. Seçilecek olan kapasitörün alt sınırının en düşük olan değer yarısı üst sınırın ise en yüksek olan değer iki katı olmasında yarar vardır. Bu nedenle C_m uyumlaştırma kapasitörü için mevcut ayarlı kapasitörler arasından kullanılacak olan kapasitörün değer aralığı 100 pF ile 500 pF arasındadır.

4.6.5. RFC Seçimi

RFC besleme kaynağına RF sinyalinin gitmesini engeller ve böylece besleme kaynağını olası bir zarardan korur. RFC seçiminde iki önemli nokta vardır. Birincisi seçilecek olan bobinin teorikte hesaplanan kaynak akımı değerinin en az iki katını üzerinden geçirebilmelidir. Dikkat edilmesi gereken diğer husus ise bobinin değerinin çıkış bobini değerinin en az beş katı olmasıdır. RFC için kullanılacak bobin parçalı olarak kullanılıyorsa kullanılan bobinlerin arasına GND’a karşı kapasitör koymak yararlıdır. Bu doğrultuda devre için kullanılan olan RFC yapısı Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

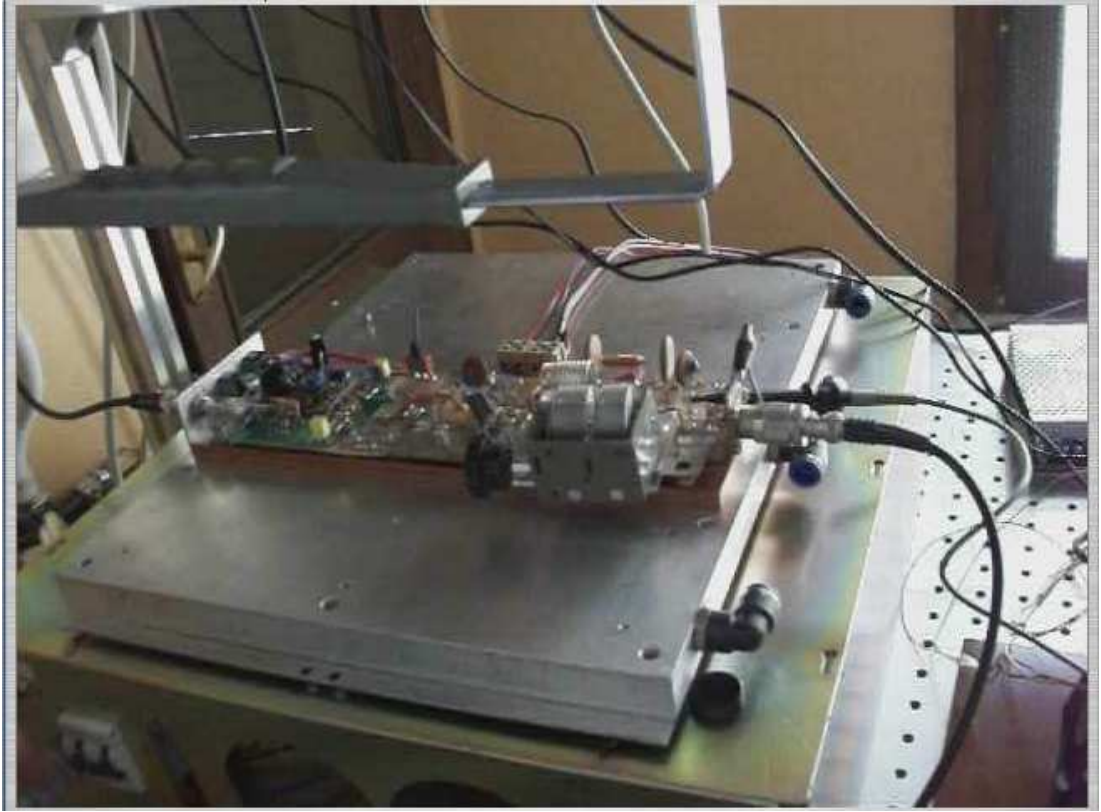


Şekil 4.17 – RFC devresi.

4.6.6. Kapasitörlerin Ayarlanması

E sınıfı RF-GY’nin çıkış devresinde kapasitörlerin ikisi de çıkıştaki sinüs sinyalinin genliğini etkilerken yaptıkları etkiler farklıdır. C_l seri kapasitörü

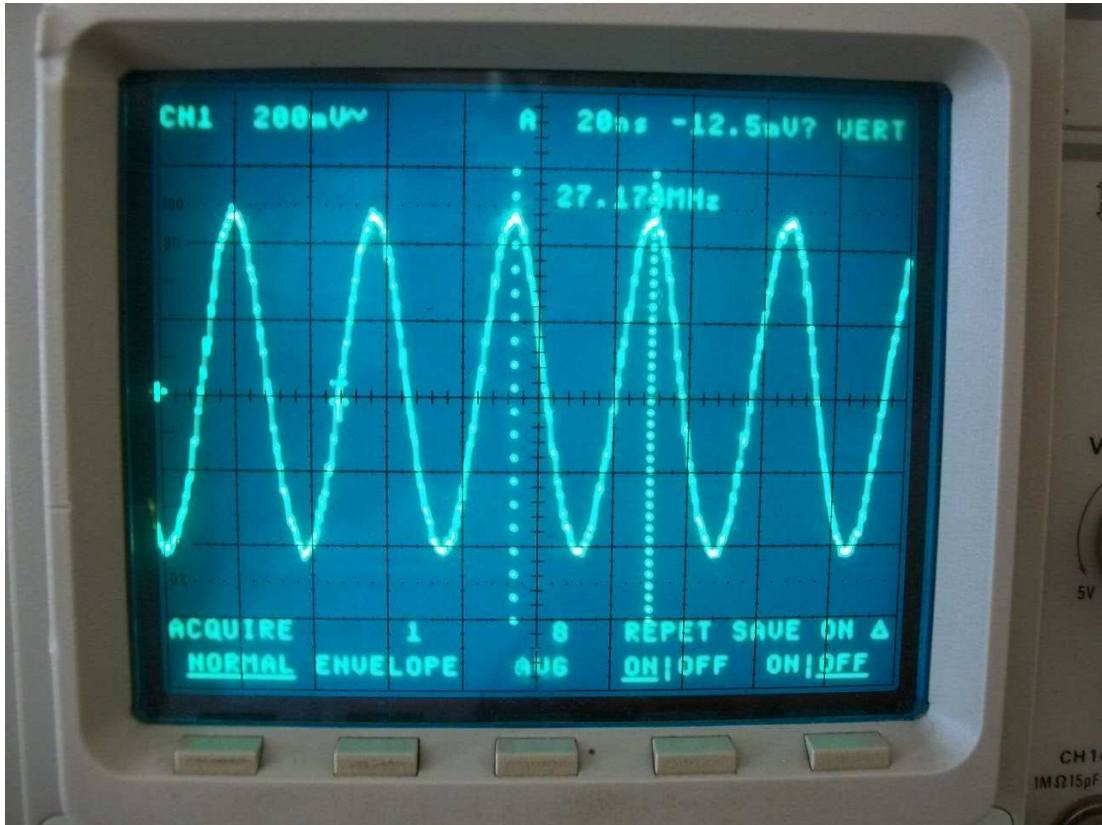
anahtarlama noktasındaki DC sinyali bloklarken AC sinyalin geçmesini sağlar. Bu kapasitörün değeri çok yüksek olduğu takdirde DC sinyali bloklamanın yanında AC sinyali de bastıracağından dolayı ayarlı kapasitör en düşük seviyesinden başlanarak ayarlanır. C_m uyumlaştırma kapasitörü ise devrenin çıkış empedansını yüke uyumlu hale getirmek için kullanılır. C_m kapasitörü ayarlanırken osiloskop ekranındaki sinüs sinyalinin genliğini etkilemesinin yanında formunu da düzelttiği görülür. C_m kapasitörü enerjinin yüke aktarılmasını bire bir etkilediği için ayarlı kapasitörün orta seviyesinden başlayarak ayarlanması doğru kapasitör değerinin bulunduğu alanın kestirilmesini hızlandırır ve fazla enerjinin daha kısa süreli olarak bobin ve aktif elemanın üzerinde kalması sağlanır. Bu durum ayrıca aktif elemanın, tasarım sırasında bozulmasını önlemek için bir koruma yöntemidir.



Şekil 4.18 – C_m kapasitörünün ayarlı olarak kullanılması.

Devre seçilen ve hazırlanan tüm elemanlarıyla kurulur, ayarlı kapasitörler başlangıç konumlarına getirilir ve yük üzerindeki sinyali görmek için osiloskop çıkışa bağlanır. Devreye elektrik verildiğinde yapılacak olan ilk işlem C_l ayarlı kapasitörü ile RF güç ölçme aleti üzerinden maksimum güç alınacak seviyeye getirilmesidir. Çıkış gücünün maksimum seviyeye getirilmesi osiloskop üzerindeki sinüs sinyalinin genliğiyle de takip edilebilir. C_l seri kapasitörün değeri

değiştirilirken çıkıştaki sinüs sinyal bozulabilir. Çıkış maksimum konuma geldiği anda C_m uyumlaştırma kapasitörünün ayarlanmasına başlanır. Yapılacak olan ilk işlem orta noktada bulunan ayarlı kapasitör orta noktanın üzerine ve altına hareket ettirilerek hangi yöne doğru çıkış sinyalinin düzelerek maksimize olduğu bulunur. Çıkış sinyalinin hangi yöne maksimize olduğu bulunduğundan sonra kapasitör hızlı bir şekilde gücün maksimum olduğu noktaya getirilir ve devrenin beslemeleri kapatılır. Aktif elemana zarar gelmemesi için üzerindeki ısının kontrolü yapılır. Devrenin çıkış empedansının ayarlandığı bu işlemler sırasında uyumsuzluktan dolayı aktif eleman üzerinde tüketilen güç ısıya dönüşür. Bu nedenle tüm bu işlem sırasında aktif elemanın üzerindeki ısının kontrol edilmesi gerekir. Her iki kapasitörün ilk ayarları ile maksimize edilen güç referans olarak alınır ve kapasitörlerin hassas ayarlarına başlanır. Sistem çalıştırılır ve önce C_l ayarlanmak üzere küçük değer değişikliklerle iki kapasitörün değerleri referans alınan güçten daha yükseğe çıkılacak şekilde ayarlanır. Bu ayarlama sonucunda maksimize edilen güç ile ayarlı kapasitörlerin nihai değerleri bulunur.



Şekil 4.19 – Yük üzerindeki 27,12 MHz sinüs sinyali.

4.6.7. Maksimum Gücün Referans Alınması

Ayarlı kapasitörler ile maksimum güç elde edilir ve ölçülen güç kapasitör değişiminden sonra olası güç düşümüne karşı yapılacak olan bobinin ayarı için referans oluşturur.

4.6.8. Ayarlı Kapasitörlerin Değişimi

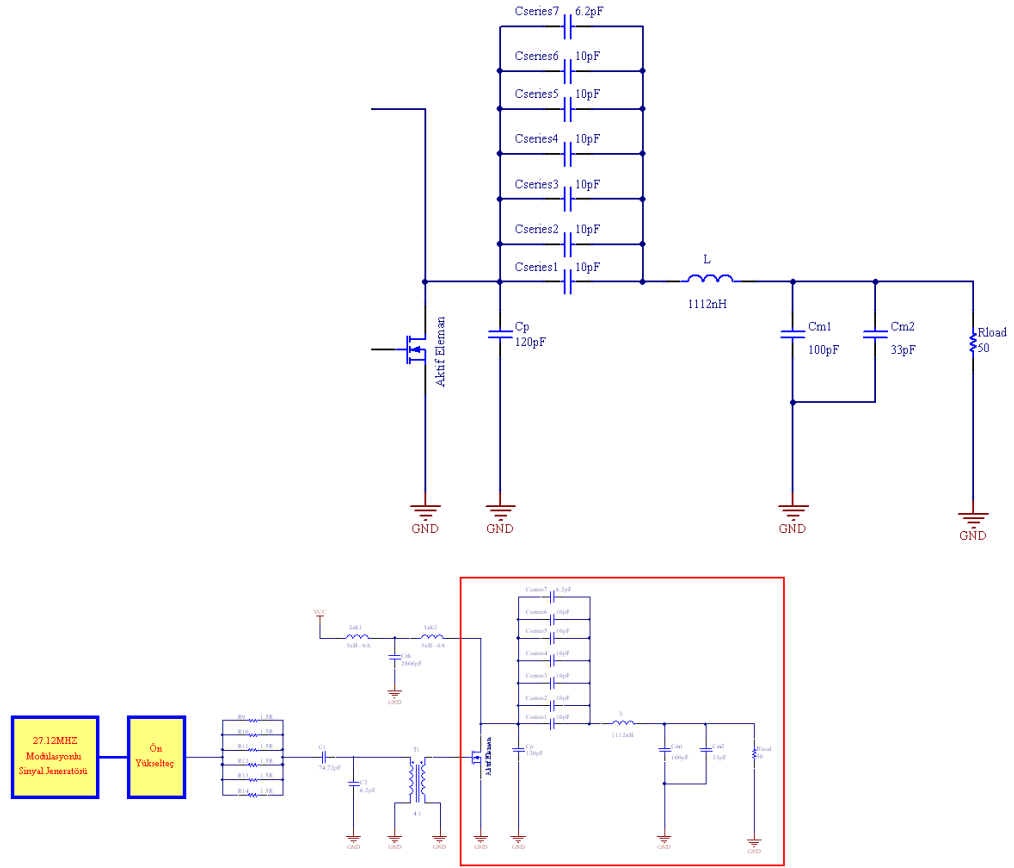
Ayarlı kapasitörler ile maksimum güç elde edilen değerlerin ölçülerek yerlerine denk gelecek şekilde en yakın kapasitör ya da kapasitör grubu konur.

4.6.9. L Çıkış Bobini Hassas Ayarı

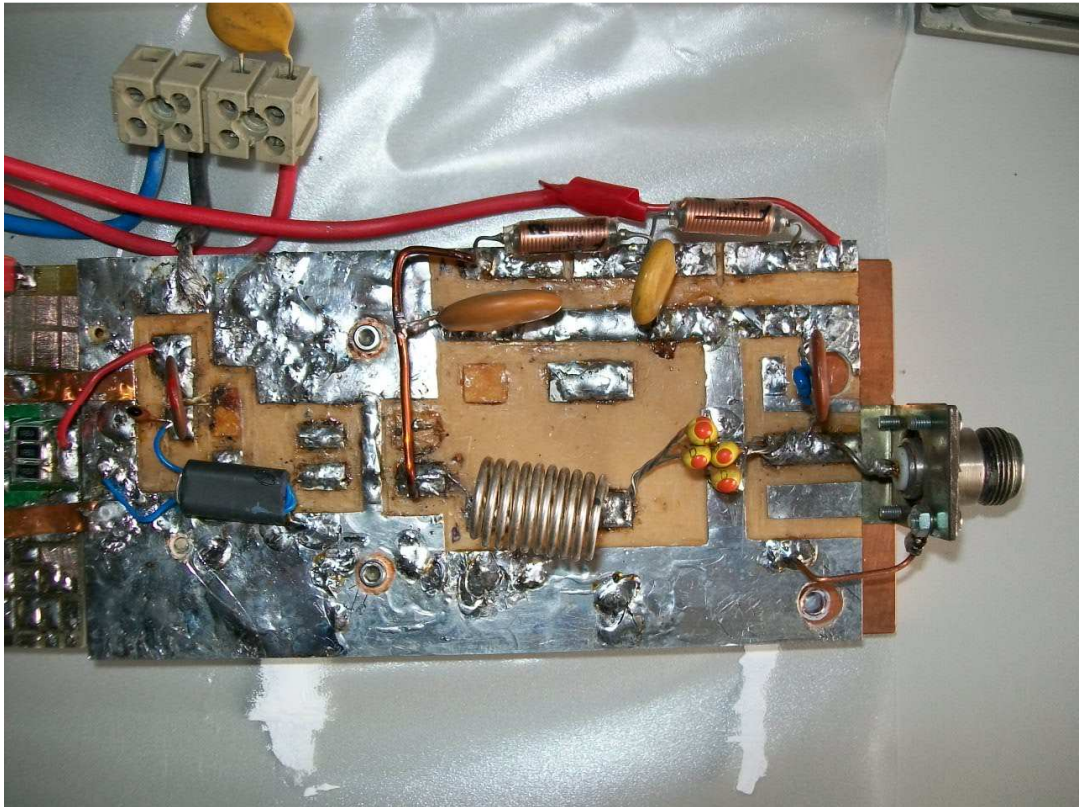
Ayarlı kapasitörlerin yerlerine konan sabit kapasitörlerin değerlerinin aynı olmaması ve ayarlı kapasitör ile sabit kapasitörlerin iç dirençlerinin farklı olmasından dolayı meydana gelecek güç düşümünü gidermek için L bobinin hassas ayarının yapılması gerekir. Kapasitörler değiştirildikten sonra çalıştırılan E sınıfı RF-GY'nin çıkış gücü ölçülerek referans alınan maksimum çıkış gücü ile karşılaştırılır. Ölçülen çıkış gücü referans alınan çıkış gücünden düşük çıkıyorsa bobinin telleri sıkıştırılarak ya da esnetilerek uzunluğu değiştirilir ve değeri değişen bobin ile tekrardan maksimum çıkış yakalanmaya çalışılır. Maksimum çıkış yakalandığı noktada bobin sabitlenir.

4.6.10. Nihai Prototip Tasarım ve Değerlendirme

E sınıfı RF-GY pratik tasarım algoritması doğrultusunda geliştirilen Prototip Tasarımına ait nihai devre şeması Şekil 4.20'de görülmektedir. Tasarım algoritmasında ayarlı kapasitörler ile elde edilen nihai devre için ölçülen C_l seri kapasitörü (Bu aşamadan sonra $C_{seriesx}$ ile ifade edilecek) 64 pF ve C_m uyumlaştırma kapasitörü 135 pF değerlerindedirler. Ölçülen bu değerleri yerine Şekil 4.20'de de görüldüğü gibi C_l seri kapasitörü yedi kapasitörün paralel kullanılmasıyla 66.2 pF ve C_m uyumlaştırma kapasitörü iki adet kapasitörün paralel kullanılmasıyla 133 pF olarak elde edilir. Kapasitörlerin değerlerindeki bu farklılıklar doğrultusunda çıkış gücünde meydana gelen 10 W civarındaki güç kaybı L çıkış bobinin hassas ayarı ile düzeltilerek Şekil 4.20'deki nihai devre elde edilir. Hassas ayar sonucunda sabitlenen L bobinin değeri 1112 nH olarak ölçülür.



Şekil 4.20 – Prototip tasarımı devre şeması



Şekil 4.21 – Prototip tasarımı E sınıfı RF-GY Görünümü.

Geliştirilen Prototip tasarım 50 V besleme ile 110 W çıkış gücüne sahiptir. Bu tasarım prototip amaçlı deneysel bir çalışma olduğu için amacı istenilen fonksiyonların ne kadarının yerine getirildiğini bulmaktır. Bu durum devreye ait verimlilik ve kazanç gibi parametrelerin bilinmesinden daha önemlidir.



Şekil 4.22 – Prototip tasarımı E sınıfı güç yükselteçli RF jeneratör.

Prototip tasarım Şekil 4.22'deki nihai duruma getirilmeden önce C_m uyumlaştırma kapasitörünün ayarlı olarak bırakıldığı durumda tasarımın lazer sistemi ile test edilmesi için hazırlanan test ortamı Şekil 4.23'de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi kullanılan floresan lamba ile devre üzerinden yayılan RF'in varlığı görülür. Aynı anda yük üzerindeki RF Sinyalin modülasyonlu görüntüsü osiloskop ekranındadır. Lazer sistemi çalıştırılmadan önce asıl yükü olan AO Q-A'ya bağlanan RF-GY'nin çıkış sinyali farklı modülasyon frekanslarında test edilmesi gerekir. Tamamlanan test işlemi sonucunda herhangi bir sorun ile karşılaşılmadığından dolayı test işleminin lazer ile kullanımı aşamasına geçilir. Tasarımın nihai bilgisini verecek olan bu test aşaması sonucunda sistem düzgün olarak çalışıyorsa lazer sistemi içerisinde E sınıfı RF-GY ayrılan alanın boyutlarına göre tasarlanacak olan yeni PCB ile üretim amaçlı ön tasarımın yapılması aşamasına geçilir. Tasarımın lazer ile yapılan testi sırasında seramik üzerinde delme işlemi için farklı frekanslarda modüle edilmiş lazer ışığı kullanılır. Bu test sırasındaki amaç malzeme üzerine yapılan işlemin testinden ziyade AO Q-A'nın lazer ışığının modülasyonu sırasında tamamen kapatabilmesinin sağlamaktır. Test sırasında çekilen video'dan alınan bir görüntü Şekil 4.24'de mevcuttur. Test işleminde bir sorunla karşılaşılmadığından dolayı üretim amaçlı ön tasarıma geçilir.



Şekil 4.23 – Lazer sistemin bağlı durumdaki E sınıfı RF-GY'nin testi.



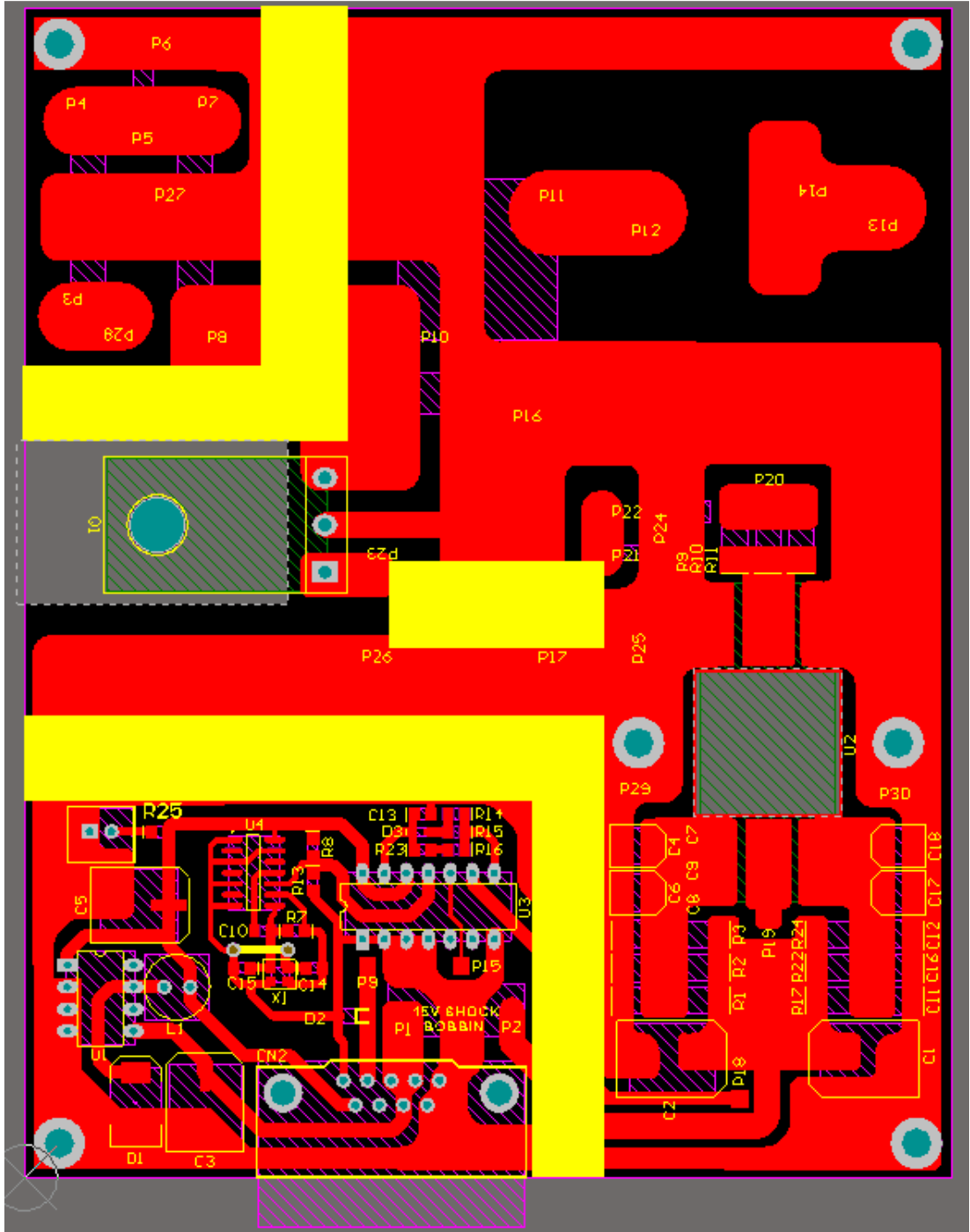
Şekil 4.24 – Lazer sistemiyle kullanımı ve lazerin seramik üzerine delme işlemi.

4.7. Üretim Amaçlı Ön Tasarım

Prototip tasarımında elde edilen sonuçlar tasarlanan devrenin fonksiyonel olarak ortaya konan şartları sağladığı görülür. Bu aşamadan itibaren devrenin kullanılacak sistem içerisinde kendisine ayrılan boyutlara göre yeniden yapılandırılmasına geçilir. E sınıfı RF-GY'den yayılan RF'in lazer sistemi içerisinde çalışan elektronikleri etkilenmesini engellemek için RF-GY kutulanır. Güç yükseltecinin konulacağı bu kutu içerisinde PCB için ayrılan alan 107mm x 135mm boyutlarındadır. Bu şartlar altında yeniden çizilen PCB'nin görünümü Şekil 4.25'de görülür.

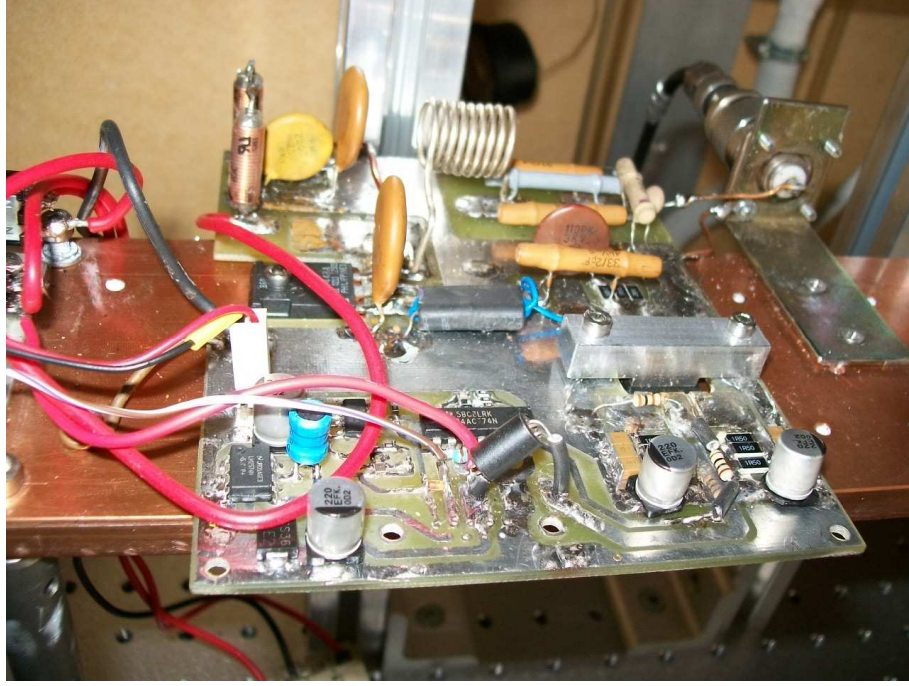
Prototip tasarımıyla üretim amaçlı ön tasarım arasında E sınıfı RF-GY haricinde üç temel değişiklik vardır. Bu değişikliklerden ilki Prototip Tasarımında düz bir doğrultuda kurulan devre kart boyutlarından dolayı bu aşamada sol alt köşede başlayan ve sağ üst köşede sona eren “S” şeklinde bir yol izler. İkinci değişiklik ise prototip tasarımı sırasında sinyal jeneratörü kısmına ait +5 V'luk besleme +15 V üzerinden LM7805 ile elde edilirken bu aşamada LM2574N-5.0 voltaj düşürücü regülatör ile sağlanır (Step Down Voltage Regulator). Devredeki son değişiklik ise “Ön Yükselteç” devresinin aktif elemanının sinyal girişi ile GND arasında olan paralel iki adet 100 Ω olan dirençlerden bir tanesi devreden çıkartılmasıdır. Bu durum Şekil 4.14 ile Şekil 4.26 kıyaslanarak görülebilir.

Devrenin PCB üzerinde izlediği doğrultunun “S” şeklinde olmasından dolayı E sınıfı RF-GY'nin çıkış devresindeki bobin sinyal jeneratörü ve şok bobinin olduğu kısma yaklaşır. Şekil 4.25'de görülen “L” şeklindeki sarı renkli alanlar bobin üzerinden yayılan RF'den olası bir etkilenmeyi kesmek amacıyla ayrılan kafesleme alanlarıdır.



Şekil 4.25 - Ön tasarım PCB çizimi (Kırmızı Üst Katman).

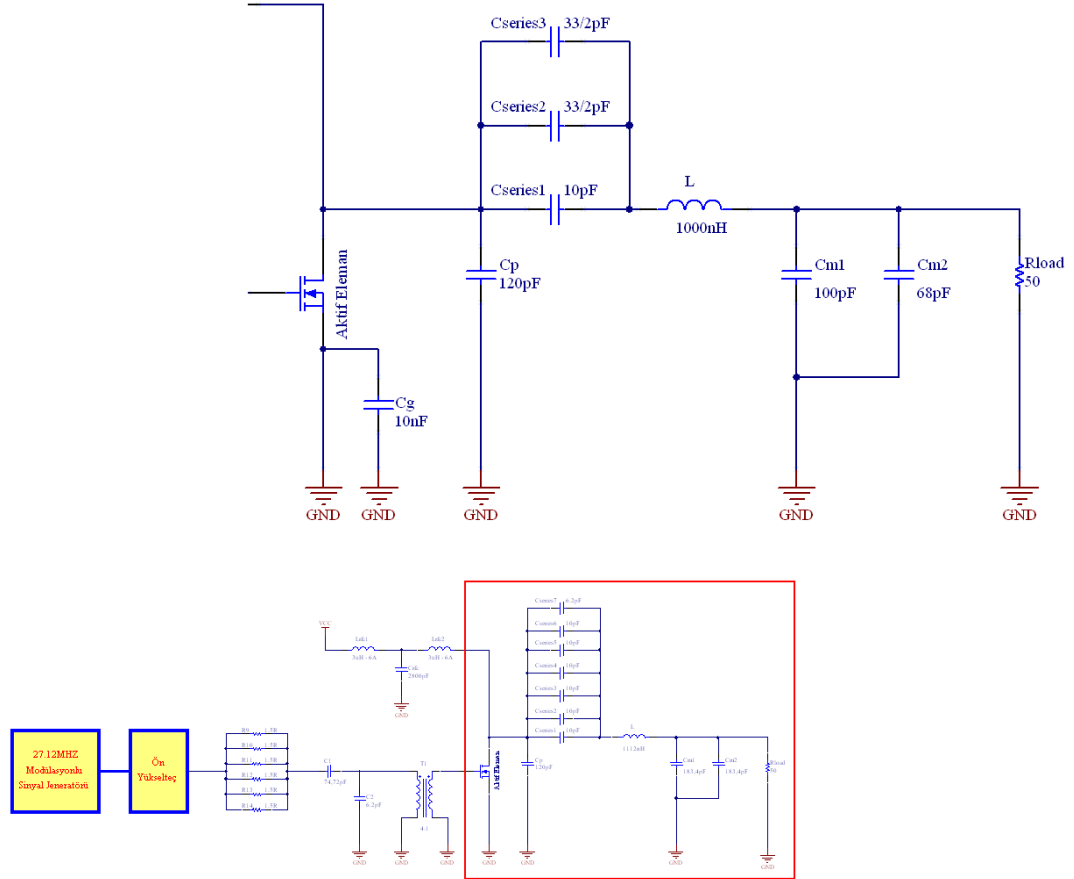
Bu aşmada PCB boyutlarında ve devrenin PCB üzerinde izlediği doğrultuda değişiklik olduğundan prototip tasarımın yapılması sırasında izlenen tüm aşamaların tekrardan yapılması gerekir.



Şekil 4.26 – Üretim amaçlı ön tasarımı sinyal üretici ve ön yükselteç görünümü.

Prototip tasarımında kullanılan L_{rfc1} - L_{rfc2} şok bobinlerinin, şok bobine ait C_{rfc} kapasitörünün, C_p şönt kapasitörünün ve çıkış devresi L bobinin değerleri değiştirilmeden kullanılır. Bu durumda L_{rfc1} ve L_{rfc2} 3 uH-6 A, C_{rfc} 2200 pF, C_p 120 pF ve L 1100 nH (prototip tasarımındaki bobinin yerinden sökülerek takılması sonucunda değerinde 12nH’lik bir değişim olmuştur) değerindedir. Bu aşamadan sonra prototip tasarımında olduğu gibi C_s seri kapasitör ve C_m uyumlaştırma kapasitörü yerine ayarlı kapasitörler konur. Prototip tasarımında da kullanılan ayarlı kapasitörlerden C_s için (30 pF - 300 pF) aynısı kullanılmış fakat C_m değer aralığı daha düşük değerde (60 pF - 400 pF) olan başka bir kapasitör seçilmiştir. Prototip tasarımında da olduğu gibi buradaki amaç C_s seri kapasitör ile AC sinyali bastırmadan DC geçişi engellemek ve C_m uyumlaştırma kapasitörü ile rezonans frekansında düzgün bir sinüs sinyali elde ederek RF’nin yüke maksimum iletimini sağlamaktır. Burada yapılması gereken işlem prototip tasarımı sırasında yapılan işlemle birebir aynıdır. Bu iki kapasitörün hassas ayarı yapıldıktan sonra değerleri ölçülür ve değerlerine en yakın kapasitör grubu yerlerine konur. Bu işlem sırasında kullanılan ayarlı kapasitörlerden ölçülen değerler C_{series} kapasitörü için 45 pF ve C_m kapasitörü için 170 pF’dır. Bu ayarlı kapasitörlerden C_{series} kapasitörü yerine en yakın değer $C_{series1}$ 33/2 pF, $C_{series2}$ 33/2 pF ve $C_{series3}$ 10 pF şeklinde konulmasıyla 43 pF olarak elde edilir. Diğer ayarlı kapasitör C_m yerine ise 100 pF C_{m1} ve 68 pF C_{m2} kapasitörleriyle 168 pF olarak en yakın değer elde edilir. Burada kapasitörlerin

tam değerleri yerine konulmamasından dolayı yapılması gereken son işlem L çıkış bobinin hassas ayarındır. Prototip tasarımında yapıldığı gibi devre çalıştırılarak çıkış gücü referans alınır. Bobinin değeri uzunluğu değiştirilerek oynanır. Bu değişim ile sistemin çıkışı maksimize edilir. Yapılan tüm bu işlemler sonucunda elde edilen devre şeması Şekil 4.27’de görülür.



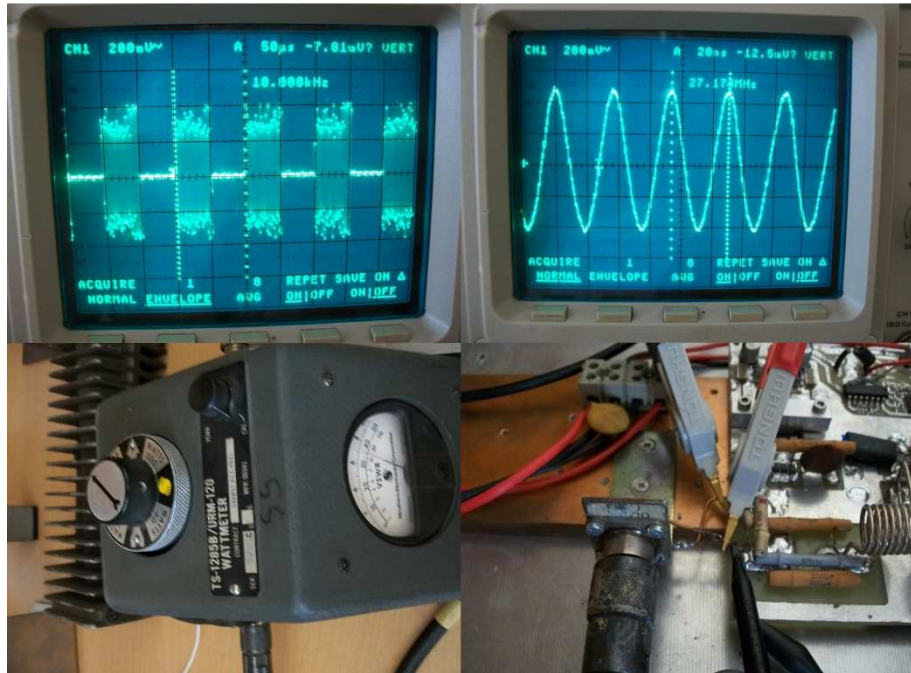
Şekil 4.27 – Ön tasarım devre şeması.

Şekil 4.27’de tasarlanan devrenin şematiği görülmektedir. Şematik incelendiğinden aktif elemanın “Source” noktası ile GND arasında bir C_g kapasitörü görülür. Teorik olarak iki ucu da GND’a bağlandığı için bu kapasitörün hiçbir etkisinin olmadığı düşünülür. Fakat Güç yükseltecinin PCB’si incelendiğinde ARF448’nin “Source” bacağına GND ile bağlantısı ince bir yoldan çift taraflı bir eğim ile olduğu görülür. Bu durumun yol açtığı bobinsel etkiyi dengelemek amacıyla o noktaya konulan kapasitör ile sistemin çıkış gücünde 20 W civarında bir artış sağlanır. Böylece sistemin verimliliği artırılırken aktif elemanın üzerinde tüketilen güç azaltılır. C_g Şekil 4.28’de MOSFET’in önündeki kapasitördür.



Şekil 4.28 – Üretim amaçlı ön tasarımı E sınıfı RF-GY görünümü.

Tasarım sonucunda E sınıfı RF-GY'nin 10 KHz'de %50 doluluk oranı ile modülasyonlu olarak çalıştırılırken elde edilen sonuçlar Şekil 4.29'da görülür. RF Güç Ölçüm cihazının kademesi 100 W'a iken ekrandaki ibre yetmiş beş değeri üzerindedir. Bu durum %50 Doluluk Oranıyla çıkış gücünün 75 W olduğunu gösterir.



Şekil 4.29 – Üretim amaçlı ön tasarımın test sonuçları.

Prototip tasarımında yapıldığı gibi devreyi besleyen kablolar sinyal jeneratörünün bulunduğu alan üstünde gezdirilerek diğer devrelerin yüksek frekansta modülasyon işlemi yapıldığı zaman kablolardan geçen akım tepelerinden etkilenip etkilenmediğine bakılır. Yapılan işlem sırasında diğer devrelerin etkilenmediği görülür. Böyle bir durumda diğer devreler etkilendiği takdirde besleme kablolarının blendajlı olarak kullanılması bu sorunun çözümünü sağlar.

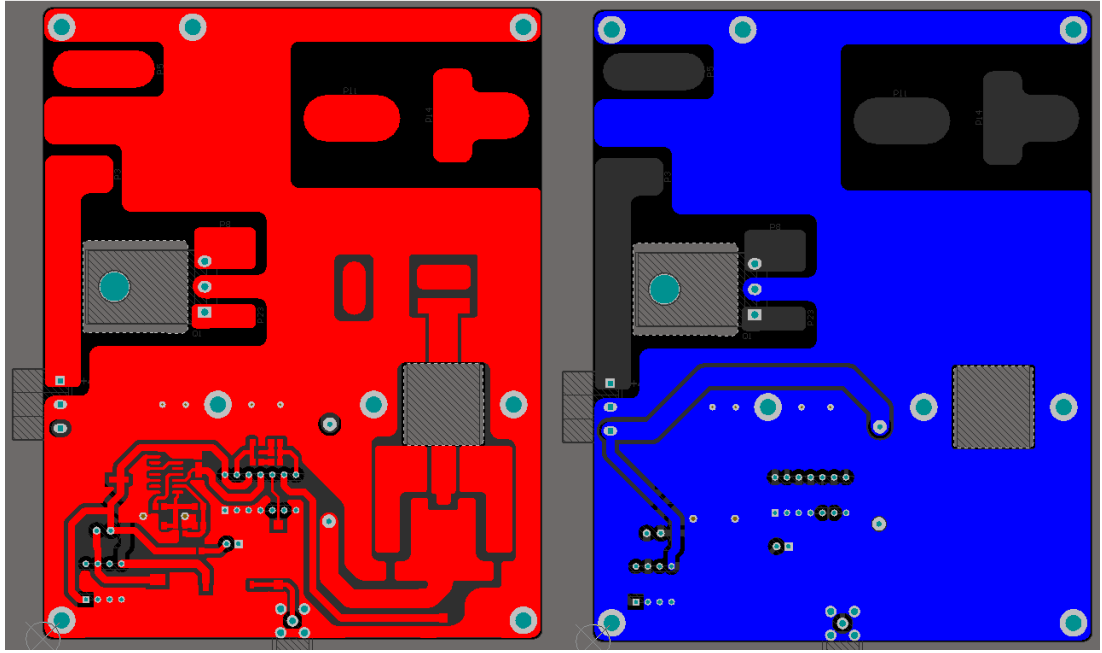
Tasarımı 50 Ω 'luk test yükü ile tamamlanan E sınıfı RF-GY asıl yükü olan AO Q-A ile test edilmesi amacıyla lazer sistemi içerisinde kullanılır. Şekil 4.30'da görülen lazer test ortamında lazer sistemi ışığın sürekli açık (RF yok), sürekli kapalı (RF var) ve farklı frekanslardaki modülasyonu ile test edilir. Beklenildiği gibi sistemden RF mevcutken hiçbir şekilde lazer ışığının çıkmadığı ve modülasyon işleminin lazer üzerindeki etkisinin olağan olduğu görülür. Testlerin beklenildiği gibi çıkması sonucunda tasarımın üretim aşamasına geçmesi ve nihai değişikliklerin yapılması için ürün tasarımına geçilir.



Şekil 4.30 – Üretim amaçlı ön tasarımın lazer ünitesiyle kullanılması.

4.8. Ürün Tasarımı

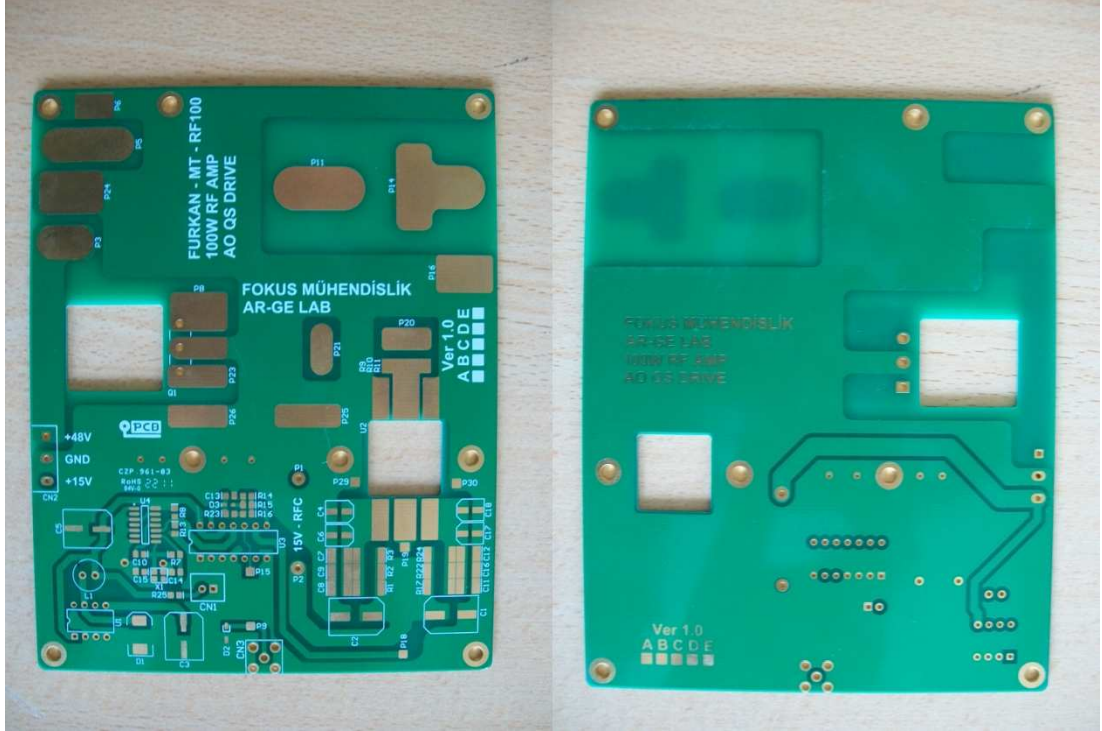
Üretim Amaçlı Ön Tasarım aşamasında elde edilen sonuçlar Lazer Sistemi içerisine kutularak eklenecek olan E sınıfı RF-GY'nin istenilen şekilde çalıştığı görülür. Bu aşamada E sınıfı RF-GY'nin sistemle entegrasyonunu sağlayan giriş ve çıkış bağlantılarında kullanılacak olan konektörler ve konektörlerin PCB üzerinde konulacağı alanlar belirlenir. Bu alanlar dikkate alınarak kartın nihai çizimi yapılır ve kartın konulacağı kutunun tasarımı sonuçlandırılır. Tüm bu işlemler sonucunda kart ve kutu üretime verilir. Çizilen nihai PCB'nin görüntüsü Şekil 4.31'de mevcuttur.



Şekil 4.31 – Ürün tasarımı PCB çizimi (kırmızı üst katman – mavi alt katman).

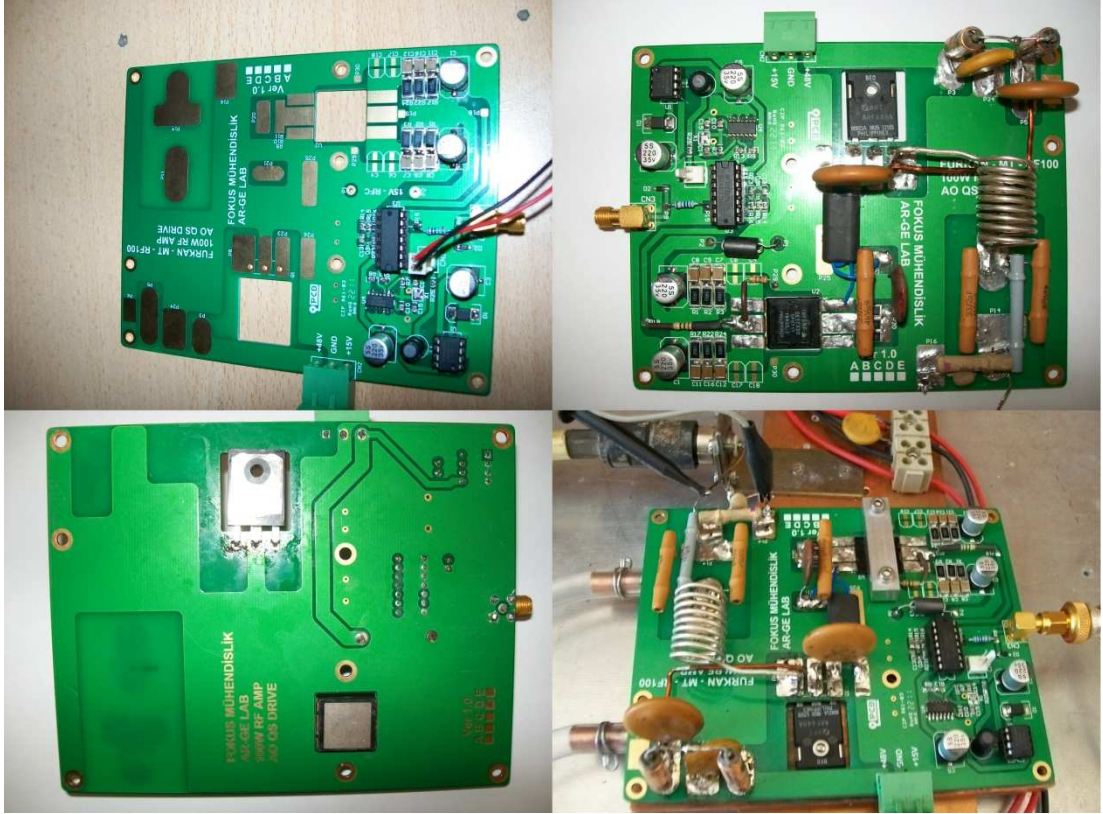
Bu aşamada kart üzerinde iki temel değişiklik mevcuttur. İlk değişiklik kart üzerindeki DSUB-9Pin konektör (Şekil 4.25'de kartın alt tarafında) yerine DC beslemelere ve modülasyon sinyaline ait iki farklı konektörün bulunmasıdır. Besleme konektörü PCB'nin sol tarafında GND ortak olacak şekilde üç bacaklı bulunur. Modülasyon konektörü ise modülasyon sinyalinin en kısa yoldan ilgili entegreye bağlanması için SMA konektör ile kartın alt tarafında ve tam orta hizada bulunur. Bu değişikliklerden dolayı +48 V ve +15 V beslemelerin bağlantıları PCB üzerinde üretim amaçlı ön tasarımdan farklı bir yol izler. Kart üzerindeki ikinci temel değişiklik ise PCB'ye alt katmanın eklenmesidir. Alt katman +15 V besleme sinyalinin taşınması haricinde tamamen GND ile kaplıdır. Bu işlem üst katmanda bulunan GND ile paralel olacak şekilde yapılır. Bu iki temel değişiklik haricinde

sinyal jeneratörü kısmına ait pasif malzemelerden bazılarının yerlerinde değişiklikler mevcuttur. Bu değişiklikler sonucunda elde edilen nihai çizimden ürettirilen kart Şekil 4.32’de görülür.



Şekil 4.32 – Ürettirilen kartın görünümü (sol taraf üst katman – sağ taraf alt katman).

Üretim amaçlı ön tasarım ile ürün tasarımına ait PCB’ler arasında devrenin izlediği doğrultu ve üst katmandaki RF üretilen kısımlara ait çizimlerin aynı olması nedeniyle E sınıfı RF-GY’nin devre elemanlarında farklılık olmaması gerekir. Bu nedenle prototip tasarım ve üretim amaçlı ön tasarımda izlenen tasarım aşamalarının adım adım yapılmasına gerek yoktur. Burada yapılması gereken işlem üretim amaçlı ön tasarım kartı üzerinde kullanılan RF malzemelerin birebir olarak üretim tasarımına aktarılmasıdır. Bu işlemin yapım aşamaları Şekil 4.33’de görülür. Birebir aktarma sonrasında devre çalıştırılarak karakteristiğine bakılır. Bu işlemde alınan sonuçların üretim öncesi ön tasarım sonuçlarına yakın olması beklenir. Eğer alınan sonuçlar yakın ve performansında bir miktar düşme varsa bu durum E sınıfı RF-GY’nin L çıkış bobinin hassas ayarının yapılmasıyla düzeltilir. Eğer alınan sonuçlar üretim öncesi ön tasarım sonuçlarından çok kötü durumdaysa öncelikle aktarma işleminde ya da PCB’nin çiziminde veya üretiminde hata yapıp yapılmadığı kontrol edilir. Hata yapıldıysa düzeltilir ve test tekrar edilir. Herhangi bir hata yoksa E sınıfı RF-GY’i tasarım adamlarının diğer aşamalarda olduğu gibi tekrarlanması gerekir.



Şekil 4.33 – Üretim tasarımının toplanma aşamaları

Üretim amaçlı ön tasarım kartı üzerindeki malzemelerin ürün tasarına aktarma işlemi tamamlandıktan sonra yapılan test işleminde beklendiği gibi sadece bobinin hassas ayarı ile devre 150 W'lık düzgün RF güç üretmiştir. Test işlemi sonucunda elde edilen devrenin şeması üretim amaçlı ön tasarım ile bire bir olarak aynıdır. Bu nedenle üretim amaçlı ön tasarım başlığı altında Şekil 4.27'deki devre şeması tasarımın son halidir.



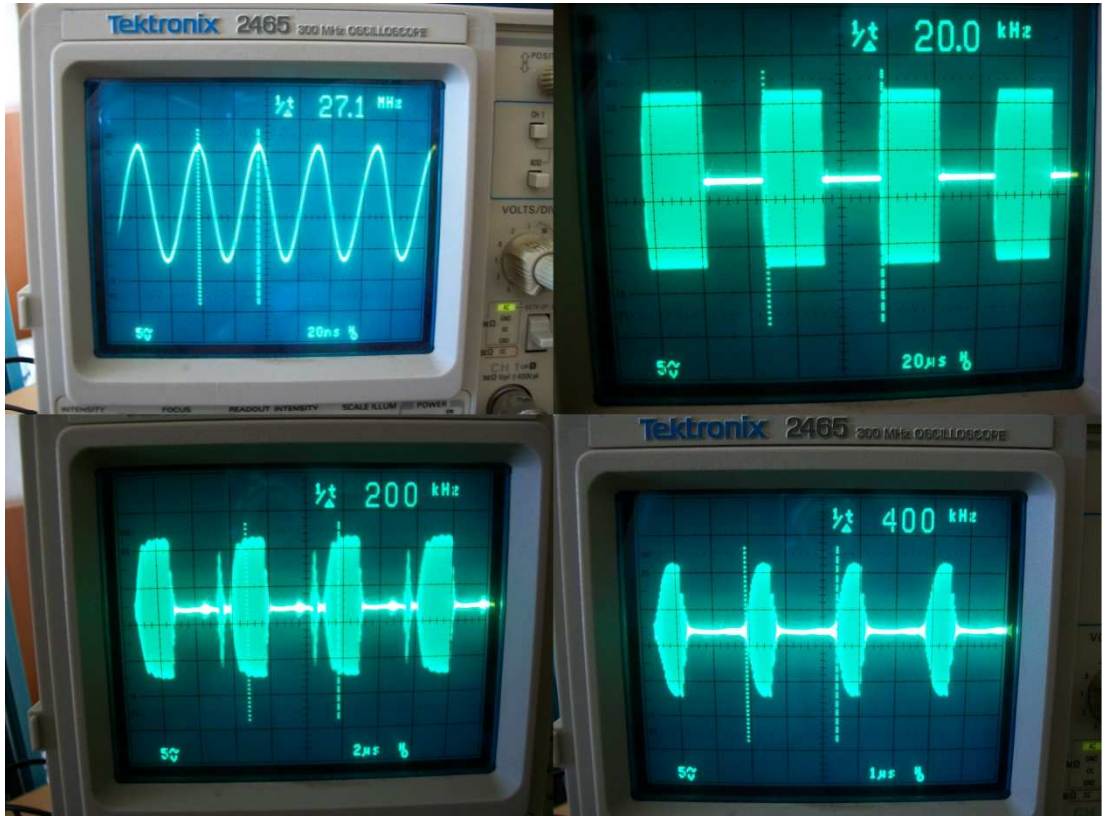
Şekil 4.34 – Ürün tasarımı hassas ayar sonrası bobinin değeri.

Nihai devre üzerinden bobinin ölçümü ve değerinin bulunma şekline dikkat edilmesi gerekir. Şekil 4.34'de bobinin iki bacağı arasından ölçüm alınmasıyla değeri

0,91 μH (910 nH) olarak bulunur. Bu devreden bağımsız olarak bobinin salt değeridir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken husus şok bobinin lehimlendiği yer ile çıkış bobinin lehimlendiği noktanın birleştirilmesi tel aracılığıyla yapıldığı için çıkış bobinin değeri hat üzerindeki toplam endüktif etkidir. Bu nedenle hat üzerinde ölçülen toplam bobin değeri Şekil 4.37’de 1,00 μH (1000 nH) olarak görülür. Bu durum bire bir aynı şekilde Üretim Amaçlı Ön Tasarımda da görülür. Ayrıca benzer bir taşıma şekli Prototip Tasarımında da olduğu için Şekil 4.20’deki devre şemasında görülen 1100 nH hat üzerindeki toplam değerdir.



Şekil 4.35 – Ürün tasarımı hassas ayar sonrası bobinin bulunduğu hattın toplam endüktans değeri.



Şekil 4.36 – Ürün tasarımı RF çıktı görüntüleri.

Tamamlanan tasarımın karakteristiğini çıkarmak için sistemin bant genişliğini, kazancını ve verimliliği gibi parametrelerin bulunması gerekir. Bu parametreler E sınıfı RF-GY içeren RF Jeneratörün veri sayfasının (Datasheet) hazırlanması için de gereklidir.

Tasarımın bant genişliğini bulmak için osiloskop ve modülasyon sinyalini üretecek bir sinyal kaynağına gerek vardır. Bant genişliğini bulma işlemi sinyal kaynağından üretilen modülasyon sinyalinin düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru taranmasıyla yapılır. Tarama sırasında osiloskop ile bakılan 150 W'lık darbeli RF çıkışın bozulduğu frekans değeri bulunur. Sinyalin bozulması uygulanan modülasyon sinyaline göre modülasyonlu RF çıkışın alınamadı değerdir. Bu şekilde yapılan analizin sonucunda tasarlanan RF Jeneratörün bant genişliği 400 KHz'dir. Analiz sırasında osiloskop ekranından alınan örnek görüntüler Şekil 4.36'da görülmektedir.



Şekil 4.37 – Ürün tasarımı 150 W RF çıkış gücü ve 53 V besleme akımı.

Tasarımın verimliliği kaynaktan çekilen güç ile çıkıştan alınan gücün bilinmesiyle hesaplanabilir. E sınıfı RF-GY'nin besleme gerilimi 53 V ve Şekil 4.37'de görüldüğü gibi kaynaktan çekilen akım 3,91 A'dir. Ayrıca aynı şekilde sistemden alınan RF çıkış gücünün 150 W olduğu görülür. Bu bilgiler ile sistemin verimliliği şu şekilde hesaplanır:

$$\delta = \frac{P_{RFout}}{P_{Source}} = \frac{P_{RFout}}{V_{Source} \times I_{Source}} = \frac{150}{53 \times 3,91} = \frac{150}{207,23} \approx 0,724 \quad (4.12)$$

Teorik verimliliği %100 olan E sınıfı RF-GY'nin pratikteki verimliliği %70 ile %85 arasındadır. Tasarlanan devrenin verimliliği %72,4 gibi alt sınıra yakın olmasının sebebi kullanılan aktif elemanın tam sınırında çalıştırılmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan tasarım ile 140 W çıkış gücüne sahip olan aktif elemandan 150 W RF üretmektedir.

Tasarımın diğer bir parametresi ise E sınıfı RF-GY'nin kazancıdır. Kazanç aktif elemanın çıkışından alınan gücün girişine uygulanan sinyalin gücüne olan oranıdır. Elde edilen çıkış gücü 150 W iken aktif elemanın girişine uygulanan güç 8 W'dır.

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{150}{8} = 18.75 \quad (4.13)$$

RF-GY'lerde kazanç genellikle dB cinsinden ifade edilir. Bu nedenle tasarımın kazancını dB cinsinden hesaplamak için güçleri dBm cinsine çevirmek gerekir.

$$P_{(dBm)} = 10 \times \log_{10}(1000 \times P_{(watt)}) = 10 \times \log_{10}(P_{(watt)}) + 30 \quad (4.14)$$

$$P_{out(dBm)} = 10 \times \log_{10}(150) + 30 \approx 51.76 \quad (4.15)$$

$$P_{in(dBm)} = 10 \times \log_{10}(8) + 30 \approx 39.03 \quad (4.16)$$

Güçleri dBm cinsinden değerleri kullanılarak kazancın hesaplanması şu şekildedir.

$$G(dB) = P_{out(dBm)} - P_{in(dBm)} = 51.76 - 39.03 = 12.73 \quad (4.17)$$

Tasarımın ölçülerek ve hesaplanarak elde edilen çeşitli parametreleri kullanılarak RF jeneratörün veri sayfası Tablo 4.3'deki gibi hazırlanabilir.

RF JENERATÖR VERİ TABLOSU				
Parametre	Min	Type	Max	Birim
Çalışma Frekansı		27.12		MHz
Çıkış Gücü	140	145	150	Watt
Bant Genişliği	DC		400	KHz
RF Besleme Voltajı	15	15.5	17	V
Sistem Besleme Voltajı	52.5	53	53.5	V
Verimlilik		72.4		%
Kazanç		12.73		dB
Çıkış Yüğü	49	50	51	Ω

Tablo 4.3 – RF jeneratör veri tablosu.

4.8.1. Tasarımlar Arası Karşılaştırma ve Yorum

Nihai ürün elde edilene kadar tasarım beş ana aşamadan geçer. Teorik çalışma tasarım formülleriyle pasif elemanların değerlerinin bulunmasını ve bu değerleri üzerinden bilgisayarda ideal anahtar ve kullanılacak olan MOSFET'in modeliyle yapılan simülasyonları içerir. Pratik çalışma ise E sınıfı RF-GY tasarım aşamalarıyla geliştirilen prototip tasarımı, üretim amaçlı ön tasarım ve ürün tasarımı aşamalarını içerir. Tüm bu çalışma sonucunda E sınıfı RF-GY içeren RF jeneratör 53 V besleme ile 150 W gücünde DC'den 400 kHz'e kadar modülasyonlu RF sinyal üretir.

Tasarım formülleri ile hesaplanan değerler ile yapılan simülasyonlarda E sınıfı RF-GY'nin çalıştığı görülür fakat güç olarak teorik hesaplamalardan farklılığı mevcuttur. Çıkış gücü 100 W olarak yapılan hesaplama ile elde edilen pasif malzemelerin değerleri üzerinden ideal anahtar ile yapılan simülasyonda çıkış gücü 82 W kullanılacak aktif elemanın modeliyle yapılan simülasyonda 88 W RF çıkış gücü elde edildiği görülür. Simülasyon programından kaynaklanan bu durum simülasyon sırasında kaynaktan çekilen güçlerin değerleri için de geçerlidir. Özellikle aktif elemanın modeli ile yapılan simülasyonda kaynak gücünün 243 W çıkması ile verimliliğin %36 civarına düşmesi ideal hesaplama ile kullanılan değerlerin değiştirilmeden kullanılmasından ve simülasyon modelinin gerçekte birebir aynı olmamasından kaynaklanır.

Teoride farklı besleme ve farklı çıkış gücü için hesaplanan pasif malzeme değerleri göz önüne alınarak izlenen pratik tasarım algoritması ile üç aşamalı yapılan çalışma sonucunda prototip tasarımda 50 V ile 110 W gücünde RF sinyal çıkışı, üretim amaçlı ön tasarım ve ürün tasarımı aşamalarında ise 53 V besleme ile 150 W gücünde RF sinyal çıkışı sağlandığı görülür. Bu gücün artışının temel nedeni besleme gerilimin yükseltilmesidir. Besleme gerilimin yükseltilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli husus E sınıfı RF-GY'nin en önemli dezavantajı olan aktif elemanın üzerine düşen gerilimin besleme gerilimin 3,5 katı olmasıdır. Teoride 3,5 kat olarak görülen bu durum gerçekte biraz daha fazla olabilir. Bu durum ideal anahtar ile yapılan simülasyonda 3,5 kat, aktif elemanın modeliyle yapılan simülasyonda ise 3,3 kat olarak görülür. Pratik tasarımın son aşamasındaki ürün tasarımında aktif elemanın üzerine düşen gerilim Şekil 4.38'de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere 10X kademeli Prob ile alınan osiloskop ekranında yaklaşık 235V gerilim aktif elemanın üzerine düşer. Bu gerilim ise beslemenin 4,43 katıdır. ARF448'in V_{DS} bozulma geriliminin 450V olduğu göz önünde alınırsa RF jeneratörün güvenilirliğini kuvvetlendiren bir etkidir.



Şekil 4.38 – Ürün tasarımı aktif eleman üzerine düşen gerilim (10x prob).

Tasarım aşamaları incelendiğinde teorik hesaplama ile elde edilen değerlerin uygulama aşamalarındaki devre elemanlarının değerlerinden farklı olduğu görülür. Ayrıca bu farklılık devreden alınan RF güçte ve besleme kaynağından çekilen güçte de görülür. Teoride %100 verimliliği olan devrenin ideal anahtarlama ile yapılan simülasyonda %89, aktif elemanın modeliyle yapılan simülasyonda %36 ve ürün tasarımı ise %72 verimliliğe sahiptir. Bu durum aktif elemanın modeli ile yapılan simülasyonun teoriye ve gerçekleştirilen devreye verimlilik açısından uzak olduğunu gösterir.

5. LAZERLER

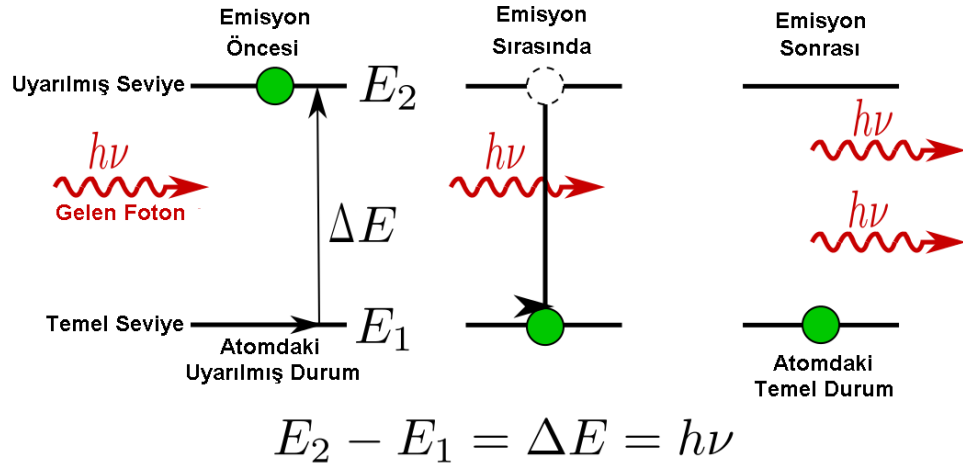
Türkçeye lazer şeklinde çevrilen “LASER” “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harflerinden meydana gelir ve anlamı uyarılmış radyasyon yayımı ile ışık yükseltilmesidir. Günümüzde çok sayıda uygulaması bulunan lazerlerin fonksiyonel olarak çalışan ilk örneği 1960 yılında ABD’nin California eyaletinde bulunan Hughes Araştırma Laboratuvarları’nda Theodore Maiman tarafından yapılmıştır. Bu lazer, flaş lambasıyla (Solid State Flash Lamp) pompalanan katı yapılı sentetik Ruby kristali sayesinde 694 nm’de kırmızı ışık üretmiştir ve yapısından dolayı sadece darbeleri (Pulse) olarak çalışmaktadır. Daha sonraki yıllarda lazer ışığının üretilmesinde farklı yöntemler ve bu yöntemlerde kullanılan farklı materyaller ile farklı dalga boylarında çalışan darbeleri ve sürekli dalga lazerleri geliştirilmiştir[7].

5.1. Lazerlerin Çalışma Prensibi

Lazer ışığının temeli atom veya moleküllerin yüksek enerji düzeylerinden düşük enerji düzeyine geçen elektronlardan yayılan fotonlara dayanır. Atom veya moleküller minimum enerjiye sahip (kararlı) olmak istediklerinden dolayı sahip oldukları elektronlar en düşük enerji düzeyinden en yüksek enerji düzeyine göre sıralanır. Kararlı durumda bulunan atoma dışarıdan bir enerji uygulanarak E_1 enerji seviyesindeki bir elektronu E_2 enerji seviyesine ($E_2 > E_1$) çıkarıldığında atom kararsız duruma geldiğinden dolayı tekrardan kararlı duruma gelmek için E_2 enerji seviyesindeki elektron kendiliğinden E_1 enerji seviyesine inecektir ve bu geçiş sırasında

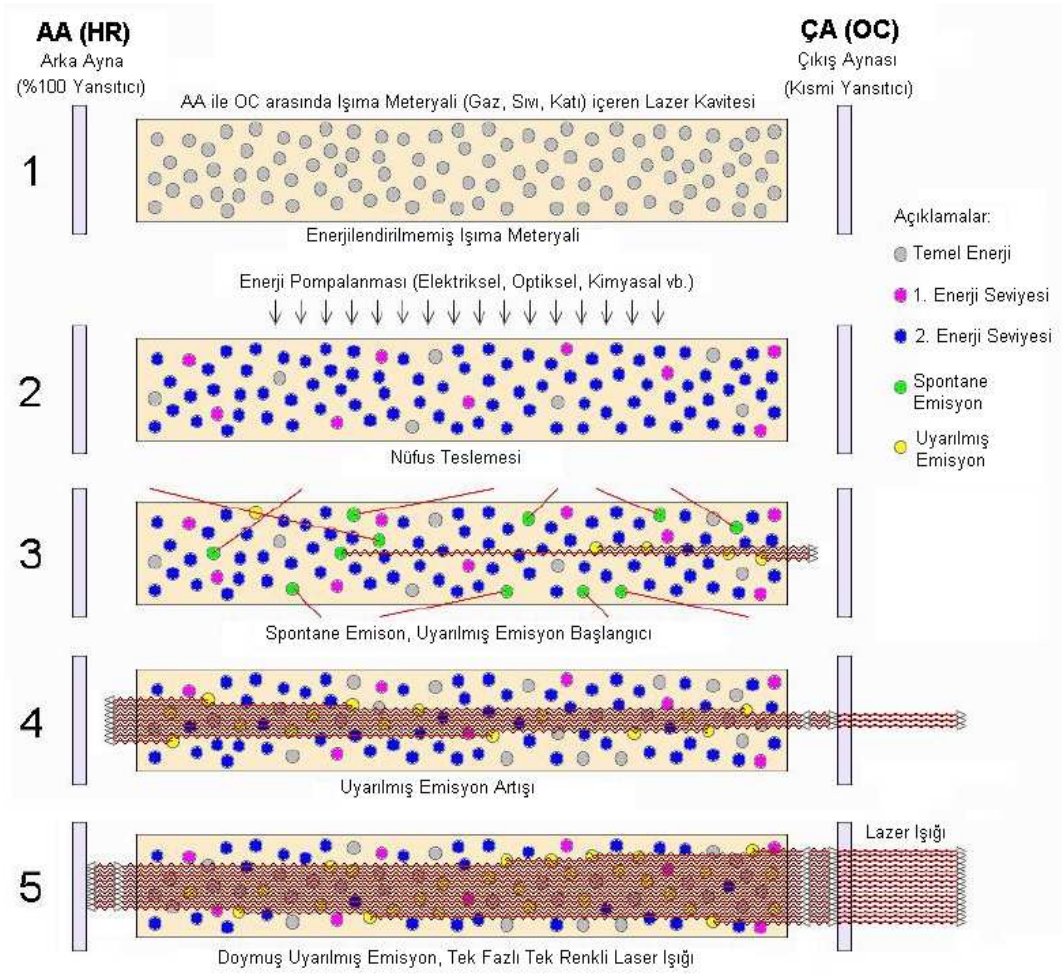
$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (5.1)$$

enerji seviyesine sahip foton yayar. Foton kendiliğinden salınmış bir elektrondan çıkarsa yönü tamamen rastgeledir. Ancak uyarılmış olan elektron bir fotonun etkisiyle inerse salınan yeni foton Şekil 5.1’deki gibi etki eden fotonla aynı yönde olacaktır ve bu geçiş biçimine uyarılmış emisyon (Stimulate Emmision) denir[8].



Şekil 5.1 – Uyarılmış foton salınımı [9].

Lazer ışığı elde edilebilmesi için Şekil 5.2’de görülen iki ayna (HR – OC) arasına ışık üreten ortam yerleştirilmelidir. Çıkış alınacak ayna (OC) az yansıtma özelliğine sahipken arka ayna tam yansıtma özelliğine sahip olmalıdır.



Şekil 5.2 – Basit lazer operasyonu [10].

Dışarıdan bir enerji uygulayarak ışık üretecek olan ortamdaki elektronlara enerji yüklemesi yapılır. Bu işleme pompalama (Population Inversion) ya da nüfus terslemesi denir.

Fazla enerji yüklenmiş olan elektronların atomları kararsız duruma gelir ve kendiliğinden veya bir fotonun etkisiyle üzerlerindeki enerjiyi atarken bir foton yayınlarlar.

Fotonların yayılımı farklı yönlerde olmasına rağmen bazı fotonlar aynalara dik olarak hareket ettiklerinden dolayı aynalara ulaşan fotonlar yansıyarak geri dönerler. Işık üreten ortamdaki uyarılmış olan elektronların kendiliğinden foton yayarak enerjilerini atması, iki ayna arasında hareket eden fotonların etkisiyle enerjilerini atmasına göre azalacaktır. Böylece fotonlar belli bir yoğunluğa kavuşana kadar iki ayna arasında uyarılmış salınım artacak ve aynalara dik hareket eden foton kaynaklı ışınım kuvvetlenecektir.

5.2. Lazer Işığının Özellikleri

Lazer ışığı normal ışığa göre farklı özellikler göstermektedir. Normal ışıkla lazer ışığının kıyaslaması şu şekilde yapılabilir [11].

- Normal ışık bünyesinde farklı dalga boylarını barındırırken lazer ışığı tek bir dalga boyundadır. Bu nedenle de tek renklidir (monokromatik).
- Normal ışık düzensiz bir şekilde yayılırken lazer ışığı düzenlidir.
- Normal ışık dağınık bir şekilde yayılırken lazer ışığının yayılma açısı çok küçük olduğundan sonra yayıldıkça çok küçük bir oranda büyüyen bir demet içerisinde hareket eder.

Bu özellikler göz önüne alındığında lazer ışığı normal ışığa göre yönlendirilebilen güçlü bir ışık kaynağıdır.

5.3. Lazerlerin Sınıflandırması

Günümüzde çok sayıda uygulaması olan lazerleri farklı şekillerde sınıflandırabiliriz fakat lazerleri sınıflandırmada yaygın olarak kullanılan ölçüt lazer

düzenğinde kullanılan ışık üreten ortamın türüdür. Buna göre lazerler gaz lazerleri, boya lazerleri ve katı-hal lazerleri olmak üzere üç ana grupta toparlanabilir. Bunun dışında lazerin sınıflandırılması çalışma prensibine göre darbeli ya da sürekli dalga lazerleri olarak iki grupta toparlanabilir. Ayrıca lazerler kullanımı tehlikeli aletler oldukları için güvenlik açısından verdikleri biyolojik zarara göre de dört ana güvenlik seviyesinde sınıflandırılırlar.

5.3.1. Işık Üreten Ortama Göre Sınıflandırma

Işık üreten ortamda kullanılan malzemeye göre yapılan sınıflandırmadır.

5.3.1.1. Gaz Lazerleri

En sık görülen örnekleri He-Ne (Helyum Neon) lazerleridir. Bunun CO₂ ve nitrojen lazeri gibi örnekleri de vardır. Özellikle CO₂ lazerleri kızılaltı ışık yayarlar ve sert malzemelerin kesilmesinde kullanılırlar. Ayrıca excimer lazerleri de gaz lazerlerindendir. Excimer lazeri Argon, Kripton ve Ksenon gibi asal gazlarla karıştırılmış klor ve flor gibi reaktif malzemeler kullanılarak yapılır. Özellikle tıp alanında geniş bir kullanıma sahiptir.

5.3.1.2. Boya Lazerleri

Işık üretici kaynağı olarak sıvı çözelti ya da sıvı içinde asılı Radomin 6G gibi karmaşık boyalar kullanılarak yapılırlar.

5.3.1.3. Katı-Hal Lazerleri

Işık üretecek materyalin katı bir kalıp olduğu lazerlerdir. Yakut, Nd-YAG gibi kristalleri pompalanması ile elde edilirler. Genelde diyot ile pompalandıkları içinde diyot lazerleri ya da diyot pompalı katı-hal lazerleri de denir.

5.3.2. Çalışma Prensibine Göre Sınıflandırma

Işık üreten ortamın uyarılma şekline göre yapılan sınıflandırmadır.

5.3.2.1. Darbe Lazerleri

Lazer kaynağından darbeli olarak kullanılmasıyla elde edilen lazerlerdir. Kaynağın aktif olduğu süreye bağlı olarak mSec veya uSec düzeyinde darbeli olarak lazer ışığı üretirler. Bu lazer darbelerinin süresi özel optik elemanlar ve düzenekler

kullanılarak nSec ve pSec seviyelerine indirilebilir. Bu şekilde kullanılan lazerler şöyledir.

- Q Anahtarlı Lazerler (Q-Switch Laser) nSec
- Mod Kilitlemeli Lazerler (Mode-Locking Laser) – pSec

5.3.2.2. Sürekli Dalga Lazerleri

Lazer kaynağından sürekli olarak lazer ışığının alındığı lazerlerdir. Darbeli lazerler enerji miktarlarıyla ifade edilirken sürekli dalga lazerleri güç miktarı ile ifade edilmektedir. Ayrıca bu lazerler AO Q-A kullanarak darbeli olarak çalıştırılabilirler.

5.3.3. Güvenlik Seviyesine Göre Sınıflandırma

Lazerlerin sahip oldukları güce ve güç yoğunluklarına göre yapılan sınıflandırmadır [13]. Her sınıfın kendisine ait uyarı işareti vardır ve bu işaretler üretilen tüm lazerlerin üzerinde bulunması gerekmektedir.

5.3.3.1. Sınıf I

Biyoloji olarak tehlike düzeyinde ışıınım yapmayan lazerlerdir. Günümüzde en sık kullanım şekli süpermarketlerdeki barkot okuyucularıdır.

5.3.3.2. Sınıf II

Çıkış güçleri 1mW'ı aşmayan bu lazerler görünür bölgede çalıştıklarından dolayı insanlar parlak ışığa karşı verdikleri korunma refleksi ile gözlerini bu lazerlerin zararlarından korurlar.

5.3.3.3. Sınıf III

Sınıf IIIa ve Sınıf IIIb olmak üzere iki ayrı sınıfı vardır. Sınıf IIIa'daki lazerlerin çıkış gücü 5 mW'ı ve güç yoğunluğu ise 2.5 mW/cm^2 'yi aşmaz. Sınıf IIIb'deki lazerlerin çıkış güçleri ise 5 mW ile 500 mW arasındadır. Bu sınıfın üst sınırındaki güç seviyesine sahip lazerlerin gözle 10mSn'den fazla teması gözde kalıcı hasarla yol açar. Günümüzdeki bazı çok lazer işaretleyiciler 300mW'lık yeşil ışığa sahip olmakla beraber bu kategori içerisindedir.

5.3.3.4. Sınıf IV

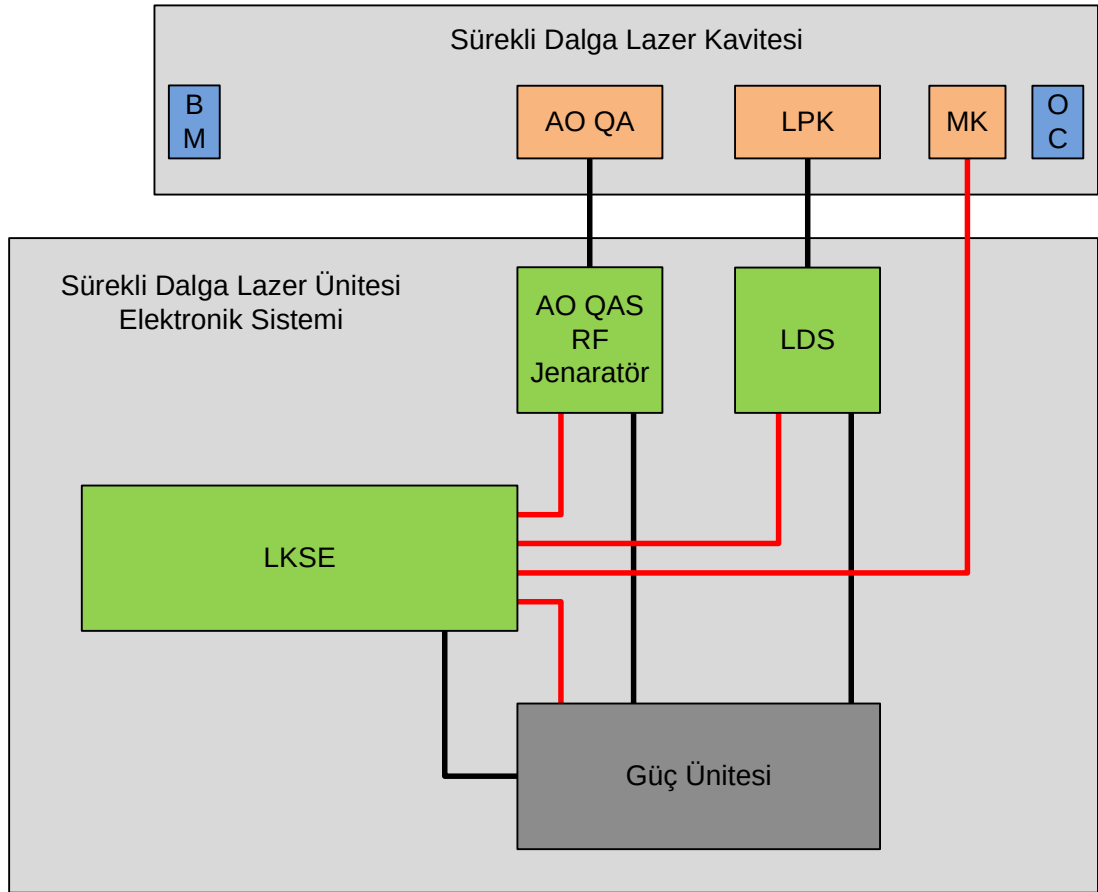
Çıkış gücü 500 mW'dan fazla olan lazerlerdir. Gözde ve deride kalıcı hasara yol açıklarından dolayı çok tehlikelidir. Günümüzdeki birçok endüstriyel, bilimsel, askeri ve medikal lazerler bu kategoridedir.

5.4. RF Tasarımın Kullanıldığı Lazerin Sınıfı

RF tasarımın kullanılacağı lazer çalışması bakımından AOptik Q-A içeren darbe modlu sürekli dalga lazeri, ışık üreten ortam bakımından diyot pompalı katı-hal Nd: YAG lazeri, gücü bakımından Sınıf IV lazeridir.

6. TASARIMIN LAZERLE KULLANIMI

AO Q-A'yı sürmek için tasarlanan darbe modülasyonlu 27.12 Mhz 150 Watt'lık RF jeneratör, tasarımı yapılan katı-hal diyot pompalı Nd: YAG lazer sistemi ile kullanılacaktır. Bu sisteme ait modüllerin blok diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir. Blok diyagramdan da anlaşılacağı üzere sistem lazer kavitesi ve elektronik sistem olmak üzere iki ana yapıdan oluşur. Lazer kavitesi içerisinde lazer pompa kafası (LPK), akusto optik q-anahtarı (AO QA), mekanik kesici (MK), arka ayna (BM) ve çıkış aynası (OC) bulunmaktadır. Elektronik kısım ise lazer diyot sürücüsü (LDS), tasarlanan RF jeneratör olan akusto optik q-anahtarını sürücüsü (AO QAS), lazer kontrol sistem elektroniği (LKSE) ve güç ünitesinden oluşmaktadır.



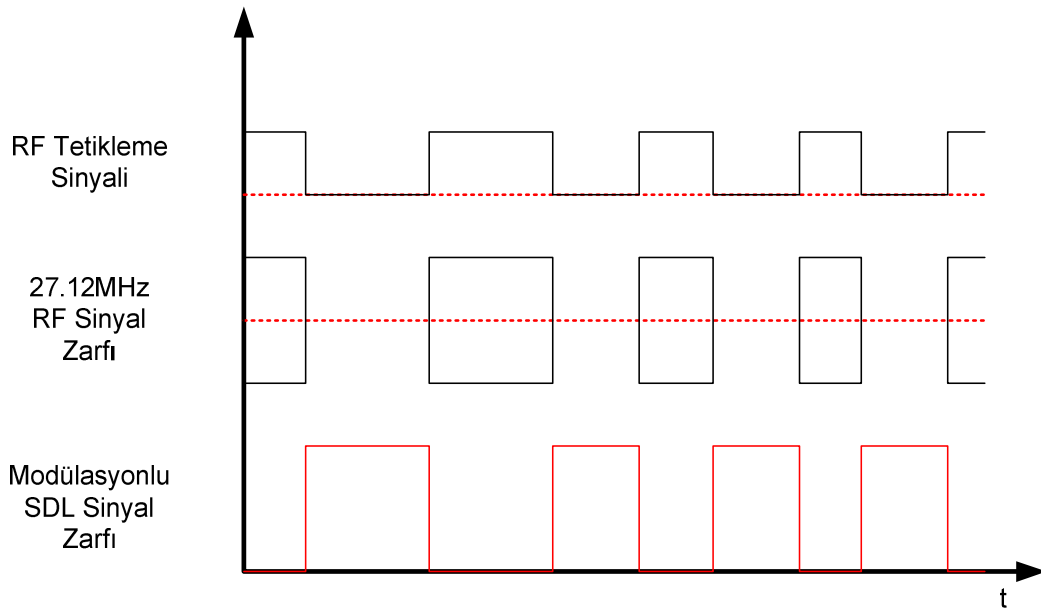
Şekil 6.1 – Darbe modülasyonlu sürekli dalga lazer sistemi alt modül bileşenleri.

Güç ünitesi sistemin gerekli olan tüm besleme kaynaklarını içeren bölümdür.

Lazer kontrol sistemi elektroniği lazer güvenlik ilkeleri göz önüne alınarak tasarlanmış ve sistem parametrelerinden ateşleme frekansının, doluluk oranının, lazer ışığının gücünün ayarlanabilir olması sağlayan bölümdür.

Lazer diyot sürücüsü lazer pompa kafasını kontrol sistemi üzerinden ayarlanan parametrelere bağlı olarak besleyen sürücü ünitesidir.

Akusto optik q-anahtar sürücüsü tez kapsamında tasarlanan 27.12 Mhz E sınıfı RF-GY içeren RF jeneratördür. Bu sistem darbe modülasyonlu çalıştığı için RF sinyali DC'den 400 KHz kadar istenilen frekansta istenilen doluluk oranıyla elde edilir.



Şekil 6.2 – RF sinyali ile SDL'nin ilişkisi.

Sistemde bulunan lazer pompa kafası yarı-iletken lazer diyotlarını içeren ışık kaynağıdır. Bu kaynak LDS üzerinden gerekli voltaj ve akım ihtiyacı karşılanacak şekilde beslendiğinde kavite içerisindeki ortama 1064 nm boyunda ışınım yapar.

AO Q-A kavite içerisindeki lazer ışığının modülasyonunu yapmayı sağlar. AO-QA üzerine RF uygulandığında ışığın kavite doğrultusunda geçmesini engeller. Böylece fotonlar lazer kavitesindeki iki ayna arasında osilasyona giremediğinden dolayı lazerin ışığının meydana gelmesini engeller. AO Q-A üzerine uygulanan RF kesildiğinde ise fotonlar kavite doğrultusunda salınım yapar ve LPK'dan çıkan ışık

kavite içerisindeki aynalar arasında osilasyona başlar ve kaviteden dışarı lazer ışığı çıkar. Böylece RF enerji kullanılarak lazer ışığının darbe modülasyonu yapılır.

Mekanik kesici lazer güvenlik kriterlerinden dolayı konulması gerekli olan bir elemandır. Mekanik olarak kavite içerisindeki ışık yolunu kestiğinden dolayı lazer ışığının oluşmasını engeller. Bu nedenle beklenmeyen durumlar için kullanılan fiziksel güvenlik elemanıdır.

Mekanik kesici açık ve AO Q-A ışığı geçireceği konumda bulunduğu takdirde lazer kavitesinden dışarıya 1064 nm boyunda lazer ışığı çıkar.

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

E sınıfı RF-GY tasarımını farklı aşamalarının anlatıldığı tez kapsamında 150 W gücünde RF üreten modülasyonlu bir RF jeneratör ürün olarak FOKUS firmasına kazandırılmıştır. Ürünün toplanarak kutulanmış son durumu Şekil 7.1’de gösterilmiştir. Bu ürün lazer sistemi ile birlikte kullanılarak toplamdaki katma değer artmasını da sağlar.



Şekil 7.1 – 27.12 MHz modülasyonlu RF jeneratör (Nihai Ürün).

Tasarımı gerçekleştirilen devre, tasarımına başlanmasından önce ortaya konan elektriksel ve fonksiyonel şartların hepsini fazlasıyla sağlar. Bu durum en basit olarak minimum 100 W çıkış gücü istenilen yapıdan 150 W güç elde edilmesinden anlaşılır.

Tez, içerisinde E sınıfı RF-GY tasarımındaki teorik hesaplamaları, simülasyonları ve pratik tasarımının nasıl yapılması gerektiğini bir algoritma çerçevesinde detaylı olarak işlenmesinden dolayı uygulama çalışmaları sırasında birinci derecede yardımcı olacak bir kaynak niteliğindedir.

KAYNAKLAR

- [1] Sintec Optronics Technology Pte. Ltd., “Acousto-Optical Q-Switch” Q-Switch models general datasheet, Ver1.4 2011.
- [2] Mihai Albulet, RF Power Amplifiers, Atlanta, GA: Noble Publishing Corporation, 2001, pp. 215-299.
- [3] Paolo Colantonio, Franco Giannini, and Ernesto Limiti, High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers, United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd, 2009, pp. 223-263.
- [4] Tao Wang, “Optimized Class-E RF Power Amplifier Design In Bulk CMOS,” M. S. thesis, The University Of Texas, Arlington, IL, 2007.
- [5] Bill Slade, “Notes on designing class-E RF power amplifiers,” May, 2010. [Online]. Available : <http://www.southernfriedsilicon.com/ClassE030909.pdf> [Accessed Jan. 01, 2013].
- [6] Advanced Power Technology, “RF Power MOSFETs N-Channel Enhancement Mode,” ARF448A – ARF448B datasheet, Rev C July 2003
- [7] Peter W. Milonni, and Joseph H. Eberly, LASER PHYSICS, Canada, John Wiley & Sons Inc., 2010, pp. 1-3.
- [8] Peter W. Milonni, and Joseph H. Eberly, LASER PHYSICS, Canada, John Wiley & Sons Inc., 2010, pp. 11-12.
- [9] “File:Stimulated Emission.svg,” May, 2008. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/File:Stimulated_Emission.svg [Accessed Jan. 01, 2013].
- [10] Samuel M. Goldwasser, “Sam's Laser FAQ - Basic Laser Operation,” 2009. [Online]. Available : <http://donklipstein.com/laserfil.htm> [Accessed Jan. 01, 2013].
- [11] Peter W. Milonni, and Joseph H. Eberly, LASER PHYSICS, Canada, John Wiley & Sons Inc., 2010, pp. 3-8.
- [12] Patrick Moroney, “Laser Safety Information,” 2013. [Online]. Available : http://www.lia.org/subscriptions/safety_bulletin/laser_safety_information [Accessed Jan. 01, 2013].

ÖZGEÇMİŞ

Furkan Fatih KÖKER, 1984 yılında İzmir’de doğdu. Öğretim hayatının ilk beş yılını Hamdullah Suphi Tanrıöver İlköğretim Okulu’nda tamamlandıktan sonra ortaokulu Çapa İlköğretim Okulu’nda okudu. Sınav sonucunda Çapa Anadolu Öğretmen Lisesi’nde okumaya hak kazanıp 2002 yılında mezun oldu. 2003 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği’nde okumaya hak kazandı. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nden mezun olduktan sonra aynı yıl enstitünün elektronik mühendisliği bölümünde açılan yüksek lisans öğretimine başladı. 2007 yılında stajyer olarak girdiği Fokus Mühendislik Müşavirlik LTD. ŞTİ firmasında 2008 yılından itibaren tasarım mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen çalışmaya devam etmektedir.