



**YÜRÜYEN DALGA TÜPLERİ İÇİN AYARLANABİLİR POZİTİF VE
NEGATİF GERİLİMLİ GENİŞ BANT IZGARA MODÜLATÖR TASARIMI**

Nesimi ŞAHİNDOKUYUCU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Nesimi ŞAHİNDOKUYUCU

21/12/2022

YÜRÜYEN DALGA TÜPLERİ İÇİN AYARLANABİLİR POZİTİF VE NEGATİF GERİLİMLİ GENİŞ BANT IZGARA MODÜLATÖR TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Nesimi ŞAHİNDOKUYUCU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Bir vakum tüpü olan Yürüyen Dalga Tüpleri (YDT) darbeli tip ve sürekli tip radarlarda RF güç yükselteci olarak kullanılmaktadır. YDT'lerin sağlayabileceği çıkış gücü, mevcut herhangi bir katı hal güç kuvvetlendiriciden çok daha fazladır. YDT'nin fiziksel yapısında elektron demetinin geçişini ve durdurulmasını kontrol eden ızgara birimleri bulunmaktadır. Izgara modülatörü, elektron demetinin geçişi için referansı katot gerilim olan pozitif görece yüksek gerilim ve elektron demetinin durdurulması için referansı katot gerilim olan negatif görece yüksek gerilim sağlayacaktır. YDT'inde ızgaranın ihtiyaç duyduğu bu pozitif ve negatif gerilim değerlerinin üretilmesi ve bu gerilimlerin, kullanılacak cihaz tipine göre değişen darbe sinyaline uygun anahtarlanması önem arz etmektedir. Radar gibi yüksek güç gerektiren sistemlerde, RF çıkış sinyalinin zamanlama kontrolü bu pozitif ve negatif gerilimin kontrolü ile ulaşılabilecektir. Bu çalışma içerisindeki Izgara anahtarlama modülatörünün tasarımıyla değişik tip ve güçlerdeki Yürüyen Dalga tüpleri için elektron geçişi ve güç kontrolü sağlanabilecektir. YDT çeşitlerine göre uygulanabilir olması için geniş görev çevrim aralığında ve geniş frekans aralığı için çalışabilmesi amaçlanmıştır. Pozitif ve negatif gerilimlerin 500V ile 100V arasında ayarlanabilmesi ile çoğu YDT'ine uygulanabilecektir. Vakum tüplerinin gerilim, akım ve ızgara giriş empedans karakteristikleri dikkate alınarak Izgara Anahtarlama Modülatörü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan ızgara modülatörün yüklü ve yüksüz anahtarlama testleri yapılmış ve yük değişimine karşı kararlı çalışmanın sürdürüldüğü sonuçları elde edilmiştir. Düşük frekans ve geniş görev çevrimi için bir YDT sürebilmeye uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 90517

Anahtar Kelimeler : Radar, Yürüyen Dalga tüpü, Izgara, Izgara Darbe, Vakum Tüp Kontrolü, Modülatör

Sayfa Adedi : 68

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KARAKAYA

DESIGN OF ADJUSTABLE POSITIVE AND NEGATIVE VOLTAGE WIDEBAND
GRID MODULATOR FOR TRAVELING WAVE TUBES

(M. Sc. Thesis)

Nesimi ŞAHİNDOKUYUCU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

Traveling Wave Tubes (TWT), a vacuum tube, are used as RF power amplifiers in pulsed and continuous type radars. The output power TWTs can provide is higher than any existing solid state amplifier. In the structure of the Traveling Wave tubes, there is a grid unit that controls the passing and stopping of the electron beam. The grid modulator provides a positive relatively high voltage with a reference to the cathode voltage to passing the electron beam, and a negative relatively high voltage with a reference to the cathode voltage to stopping the electron beam. It is important to produce these positive and negative voltage values required by the grid in Traveling Wave Tubes and to switch these voltages in accordance with the pulse signal that varies according to the device type to be used. In systems that require high power such as radar, timing control of the RF output signal can be achieved by controlling this positive and negative voltage. In this study, which includes the design of the grid switching modulator, electron transition and power control are provided for different types and power level of Traveling Wave tubes. In order to be applicable according to TWT types, it is intended to work in a wide duty cycle range and wide frequency range. It will be able to drive various types of Traveling Wave Tubes with the adjustability of positive and negative voltages between 500V and 100V. Grid Modulator design is aimed considering the voltage, current and grid input impedance characteristics of vacuum tubes. Loaded and unloaded switching of the designed grid modulator have been tested and the results have been obtained that stable operation is maintained against load change. It has been observed that it is suitable to drive a YDT for low frequency and wide duty cycle.

Science Code : 90517

Key Words : Radar, Travelling Wave Tube, Grid, Grid pulse, Vacuum Tubes Control, Modulator

Page Number : 68

Supervisor : Asist. Prof. Mehmet KARAKAYA

TEŞEKKÜR

Tüm ders dönemimde ve bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, iki yıl boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan, her zaman iletişim kurabildiğim, desteği ve becerilerini hiçbir zaman benden esirgemeyen kıymetli danışman hocam; Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KARAKAYA'ya, laboratuvar imkanları ve destekleri için EPROM Elektronik. A.Ş. ailesine teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmam boyunca tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KUVVETLENDİRİCİLER VE RADARLAR.....	3
2.1. Radar Çalışma Prensipleri ve Radar Sınıfları	3
2.2. Radar Türleri ve Radar Aygıtının Yapısı.....	8
2.3. Kuvvetlendiriciler	10
3. VAKUM TÜPLERİ VE YÜRÜYEN DALGA TÜPLERİ	13
3.1. Vakum tüpleri	13
3.2. Yürüyen Dalga Tüpleri	16
3.2.1. Elektron tabancası (EGUN).....	18
3.2.2. Izgara yapısı	20
3.3. Izgaranın Sürülmesi	23
4. DEVRE TASARIMI.....	25
4.1. Yöntem	25
4.2. Pozitif ve Negatif Gerilimin Elde Edilmesi.....	26
4.3. Darbe Sinyallerinin Elde Edilmesi	28
4.4. Anahtarlama Devresinin Tasarımı	30
5. İZOLASYON VE YÜKSEK GERİLİM	33
5.1. İzolasyon İçin Kullanılan Transformatörler.....	33
5.2. İzolasyon İçin Kullanılan Malzemeler	34

Sayfa

6. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	35
6.1. Osilatör Devresi Benzetim Çalışmaları	35
6.2. Osilatör Devresi Benzetim Çalışması Sonuçları.....	36
6.3. Darbe Osilatör Devresi Benzetim Çalışmaları.....	37
6.4. Darbe Osilatör Devresi Benzetim Çalışması Sonuçları	39
6.5. Anahtarlama Devresi Benzetim Çalışmaları.....	40
6.6. Anahtarlama Devresi Benzetim Çalışması Sonuçları	41
7. ÖLÇÜM SONUÇLARI	43
7.1. Pozitif Gerilim İçin Darbe Sinyali	43
7.2. Negatif Gerilim İçin Darbe Sinyali.....	44
7.3. Negatif Gerilim ve Pozitif Gerilim Osilasyon Sinyalleri.....	45
7.4. Anahtarlama.....	46
7.4.1. Düşük frekans ve düşük görev çevriminde anahtarlama	47
7.4.2. Düşük frekans ve yüksek görev çevriminde anahtarlama.....	48
7.4.3. Yüksek frekans ve düşük görev çevriminde anahtarlama.....	49
7.4.4. Yüksek frekans ve yüksek görev çevriminde anahtarlama.....	51
7.5. Anahtarlama Sırasındaki Aşma	52
7.6. Yüksüz Durumda Yükselme Zamanı.....	53
7.7. Yüksüz Durumda Düşme Zamanı.....	54
7.8. Kapasitif Yükler ile Yüklenme Durumu.....	56
7.9. Darbe Gecikme Süresi	58
7.10. Pozitif Gerilim Regülasyonu ve Ayarlanabilirliği	60
7.11. Negatif Gerilim Regülasyonu ve Ayarlanabilirliği.....	62
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Vakum tüpleri temel sınıflandırması	13
Çizelge 3.2. Tungsten filamentin sıcaklığına göre akım yoğunluğu	19
Çizelge 3.3. Kontrol elektrotlarının karakteristiği	20

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Radar çalışma prensibi	4
Şekil 2.2. Gönderilen darbe ve yansıyan sinyal ilişkisi	5
Şekil 2.3. Radar yapısı ve verici	9
Şekil 3.1. Bazı mikrodalga tüpleri, tepe ve sürekli gücü ile frekans karşılaştırılması	14
Şekil 3.2. Vakum tüplerinin ve Katı Hal kuvvetlendiricilerin uygulama aralıkları	15
Şekil 3.3. Yürüyen Dalga Tüpü yapısı.....	17
Şekil 3.4. Izgara ve katot mesafesinin hesaplanması için EGUN parametreleri	20
Şekil 3.5. Izgara ve katot geriliminin ızgara, katot ve anot pozisyonları ile ilişkisi	21
Şekil 3.6. Izgara transfer karakteristiği	22
Şekil 3.7. Izgaranın sürülmesi ve çalışma referansı	23
Şekil 4.1. Izgara modülatör devre tasarımı blok gösterimi.....	25
Şekil 4.2. Pozitif ve negatif gerilim için kullanılacak osilatör devresi temsili gösterimi	26
Şekil 4.3. Pozitif ve negatif gerilim doğrultma devresi blok gösterimi.....	28
Şekil 4.4. Darbe Osilatör devresi blok şema gösterimi	29
Şekil 4.5. Anahtarlama devresi tasarımı blok gösterimi-1	30
Şekil 4.6. Anahtarlama devresi tasarımı blok gösterimi-2	31
Şekil 5.1. Izgara modülatör izolasyon yapısı.....	33
Şekil 6.1. Osilatör devresi benzetim çalışması	35
Şekil 6.2. Osilatör devresi benzetim çalışmaları sonuçları (a) Osilatör devresi transformatör sekonderi sonuçları (b) Doğrultulan DC gerilim	36
Şekil 6.3. Darbe osilatör devresi benzetim çalışması	37
Şekil 6.4. Darbe osilatör devresi benzetim çalışması sonuçları.....	39
Şekil 6.5. Anahtarlama devresi benzetim çalışması	40
Şekil 6.6. Anahtarlama devresi benzetim çalışması sonuçları.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 7.1. Pozitif darbe sinyali deneysel sonuçları	43
Şekil 7.2. Negatif darbe sinyali deneysel sonuçları	44
Şekil 7.3. Pozitif ve negatif osilasyon sinyali deneysel sonuçları	45
Şekil 7.4. Izgara modülatör çıkışı anahtarlama deneysel sonuçları	46
Şekil 7.5. Düşük frekans ve düşük görev çevrimi için ızgara modülatör çıkışı deneysel sonuçları (1 kHz, %1)	47
Şekil 7.6. Düşük frekans ve yüksek görev çevrimi için ızgara modülatör çıkışı deneysel sonuçları (1 kHz, %99)	48
Şekil 7.7. Yüksek frekans ve düşük çevrimi için ızgara modülatör çıkışı deneysel sonuçları (100 kHz, %1)	49
Şekil 7.8. Yüksek frekans ve yüksek görev çevrimi için ızgara modülatör çıkışı deneysel sonuçları (100 kHz, %99)	51
Şekil 7.9. Anahtarlama sırasındaki aşma değeri deneysel sonuçları	52
Şekil 7.10. Yüksüz durumda anahtarlama yükselme zamanı deneysel sonuçları	53
Şekil 7.11. Yüksüz durumda anahtarlama sırasındaki düşme zamanı deneysel sonuçları	54
Şekil 7.12. Kapasitif yüklenme için anahtarlama sırasındaki yükselme zamanı deneysel sonuçları (10 pF)	56
Şekil 7.13. Kapasitif yüklenme için anahtarlama sırasındaki yükselme zamanı deneysel sonuçları (50 pF)	57
Şekil 7.14. Kontrol sinyali ve Izgara modülatör çıkışı arasındaki gecikme	58
Şekil 7.15. Pozitif gerilim regülasyonu ve ayarlanabilirliği için Izgara Modülatörü çıkışı deneysel sonuçları (+100 V, -500 V)	60
Şekil 7.16. Pozitif gerilim regülasyonu ve ayarlanabilirliği için Izgara Modülatörü çıkışı deneysel sonuçları (+200 V, -500 V)	61
Şekil 7.17. Negatif gerilim regülasyonu ve ayarlanabilirliği için ızgara modülatörü çıkışı deneysel sonuçları (+500 V, -100 V)	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
μs	Mikrosaniye
A	Amper
Ae	Anten etkin açıklığı
c	Işık hızı
C	Kondansator
cm	Santimetre
D	Diyot
dB	Desibel
dBm	Desibel miliwatt
dgc	Katot ızgara arası mesafe
f	Frekans
F	Farad
fd	Doppler frekansı
fo	Başlangıç frekansı
fy	Yansıyan işaretin frekansı
G	Kazanç
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
I	Akım
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
L	Bobin
m	Metre
mA	Miliamper
ms	Milisaniye
MW	Megawatt
nF	Nanofarad

Simgeler**Açıklamalar**

P	Güç
p	Piko
pF	Pikofarad
Pr	Ortalama güç
Pt	Tepe güç
Q	Transistör
R	Menzil
Ra	Anot yarı çapı
Rc	Katot yarıçapı
RDS	Drain-source direnci
Rmax	Maksimum menzil
Smin	Algılanan minimum güç
t	Zaman
T	Periyot
TTL	Transistor to transistor logic
V	Volt
Va	Anot gerilimi
Ve	Eşik gerilimi
Vg	Izgara gerilimi
Vh	Radyal hız
Vo	Çıkış gerilimi
Vr	Gözlem doğrultusundaki radyal hız
W	Watt
α	Langmuir ve blodgett'in boyut fonksiyonu
θ	teta,açı
μ	Gerilimler oranı
μc	Akımı sıfırlamak için gerekli gerilim oranı
π	Pi
σ	Radar kesit alanı
Ω	Ohm
τ	Darbe genişliği

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternating current
CW	Continous wave
dk	Dakika
DC	Direct current
EW	Electronic warfare
EM	Elektromanyetik
EMD	Elektromanyetik dalga
EGUN	Elektron gun
FEP	Fluorinated Ethylene Propylene
GPS	Global Positioning System
km	Kilometre
MW	Mikrowave
RCS	Radar cross section
RADAR	Radio Detection And Ranging
RF	Radyo frekans
SSA	Solid State Amplifier
YDT	Yürüyen dalga tüpü
YDTK	Yürüyen dalga tüpü kuvvetlendirici

1. GİRİŞ

Günümüzde bilgi edinme ve veri aktarımının önemi her geçen gün artmaktadır. Bilgi edinme ve veri aktarımı toplumsal yaşamda, ticari hayatta ve askeri alanda çok önemli bir yer tutmaktadır. Haberleşme teknolojilerinin gelişmesi ile bilgiye ulaşma ve bilgi aktarımı çok daha kolay bir hal almıştır.

Haberleşme teknolojileri ile çok uzak noktalar ile iletişim kurma ve bu uzak noktalar hakkında bilgi edinme becerileri gelişmiştir. Haberleşme sistemleri içerisinde kullanılan RF sistemler ile bunlar mümkün olmaktadır. RF sistemler ticari ve askeri sistemlerde haberleşmenin bir parçası olan radar sistemleri gibi sistemlerin çok önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu gibi sistemlerde RF sinyalleri radarın görevini yerine getirmesini sağlayan temel parçalar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Radarlar günlük hayatta kullanılan sistemlerde yer-yön belirleme ve hız belirleme konularında kullanılan cihazlardır. Radar sistemlerinin temel kullanım amacı nesneler hakkında çeşitli parametrelerde bilgi edinilmesidir. Hava, kara ve deniz ortamlarında Gözetim ve kontrol amacı ile kullanılmaktadır. Çeşitli ortam ve kullanım amaçlarına göre hava gözetim, atış kontrol, meteoroloji, yöngüdüm, alçak irtifa savunma, orta irtifa savunma, yüksek irtifa savunma, kara gözetleme ve silah tespit gibi çok çeşitli radar tipleri mevcuttur. Bu radarlar kullanıldığı yer için hayati önem taşıyan konum ve hız bilgilerinin edinilmesi için kullanılması zorunlu sistemlerdir. Örnek olarak, uçaklar için kendi bulunduğu konum ve yüksekliğin belirlenmesinde aynı zamanda kör uçuş olamaması için etrafında bulunan cisimleri belirlenmesi için radar sistemlerinin kullanılması gerekmektedir.

Radarlar kullanım alanları bakımından çok çeşitlilik göstermektedir. Buna rağmen yapı olarak incelendiğinde sürekli dalga radarları ve darbe radarları olarak iki çeşit radar mevcuttur. Darbe radarlarında gönderilen darbe üretilen sinyalin geri dönüş zamanı üzerinden işlem yapılmaktadır. Burada menzil ve konum bilgileri elde edilebilmektedir. Sürekli darbe radarında ise faz bilgileri incelenmektedir. Bu radar çeşidinde de hareketli cisimlerin takibi ve hız bilgilerine ulaşılabilir. Sürekli dalga radarı ya da darbe radarı radyo dalgalarını kullanmaktadır. Radyo dalgalarını ölçüm alınacak hedefe doğru yönlendirerek hedef hakkında bilgilere ulaşmak hedeflenmektedir. Hedefe gönderilecek radyo sinyallerinin ölçüm alınacak mesafeye göre yüksek güçlerde olması gerekmektedir.

Bu yüksek güçlere ulaşabilmek için kuvvetlendiriciler kullanılmaktadır. Katı hal güç kuvvetlendiriciler ve vakum tüplü kuvvetlendiriciler burada radar antenine aktarılacak sinyal için son kuvvetlendirici olarak tercih edilmektedir.

Güncel olarak radar sistemleri çoğunlukla, güç yükselteçleri için Klistron, Magnetron veya Yürüyen Dalga tüpü kuvvetlendirici (YDTK) gibi teknolojileri kullanır [1]. Özellikle yürüyen dalga tüpleri çeşitli savunma sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapı olarak YDTA birimleri bir Yürüyen dalga tüpü (YDT)'den ve bunu süren bir güç kaynağından oluşmaktadır. YDT içerisindeki birimler güç kaynağı ile beslenerek RF sinyalini kuvvetlendirmektedir. Güç kaynağı içerisinde katot, filament, ızgara ve kollektör gibi birimler bulunmaktadır.

Bu tez içeriğinde radarlarda sıklıkla kullanılan YDT'nin sürülmesi için kullanılacak elektronik devrenin bir parçası olan ızgara modülatör tasarımı yapılmıştır. Izgara modülatör yerli tasarımının gerçekleştirilmesi ile radarın çıkış gücü üzerindeki kontrol hassasiyeti artacaktır. Izgaranın kontrolü ile öncelikle YDT'nin çalışmasının kontrolü sonrasında YDTA biriminin çalışma kontrolü ve en son olarak da doğrudan radarın çalışmasının kontrolü sağlanacaktır.

YDT'ler radyo dalgalarını kuvvetlendirmek için kullanılır ve radar, elektronik harp, televizyon ve radyo yayıncılığı, internet, uzay, uçak ve gemi transponderleri, GPS, görüntüleme cihazları ve plasmanın karakterizasyonu gibi alanlarda kullanılmaktadır [2]. Radarlar ve elektronik harp alanında kullanılan YDT cihazlarının hedef hakkındaki tespiti için zamanlama büyük önem taşımaktadır ve ızgara birimi ile bu zamanlama kontrol edilebilmektedir. Bu tez içeriğinde radar ve elektronik harp alanındaki YDT türleri için ızgara modülatör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

YDT'lerin ızgara birimlerinin yerleşimi ve çalışacağı güçlere göre ihtiyaç duyacağı gerilim değerleri farklılık göstermektedir. Bu Izgara modülatör tasarımı YDT'lerin ızgaralı birimlerinin tümüne uygulanması mümkün değildir. Ancak YDT'lerin içerisindeki elektronları, pozitif gerilimde geçirip negatif gerilimde durduran türleri için ayarlanabilir yapısı ile kullanılabilir. Izgara modülatör tasarımında, gerilim genliklerinde üst sınır ve anahtarlama zamanlarında en yüksek ve en düşük değerleri gibi kısıtlarla gerçekleştirilmiştir.

2. KUVVETLENDİRİCİLER VE RADARLAR

2.1. Radar Çalışma Prensibi ve Radar Sınıfları

Radar, yansıyan nesnelerin tespiti ve konumu için elektromanyetik bir algılayıcıdır [3]. Bir radar, elektromanyetik enerji yayarak ve yansıyan nesnelerden (hedeflerden) dönen yankıyı algılayarak çalışır. Yankı sinyalinin doğası, hedef hakkında bilgi verir. Hedefe olan menzil veya mesafe, yayılan enerjinin hedefe gidip geri dönmesi için geçen zamandan bulunur. Hedefin açısal konumu, yankı sinyalinin varış açısını algılamak için yönlendirici bir anten (dar ışın genişliğine sahip olan) ile bulunur [4]. Özellikle ikinci Dünya Savaşı ile başlayan savunma ve silah sistemlerinin gelişmesi radar teknolojisinde de olağanüstü gelişmelere yol açtı ve buna bağlı olarak özellikle hava savunma sistemlerinde kullanılmaya başlandı. Kullanım yerlerine ve amaçlarına göre Kara, Deniz ve Hava radarları sınıflandırılan çeşitleri mevcuttur. Kullanım amaçları ve yerleri farklılık gösterse de çalışma prensibi olarak aynı temeller üzerine çalışmaktadırlar. Hedefin menzili, yatay açısı ve yüksekliği aşağıda belirtilen temel fizik kurallarına göre tayin edilebilmektedir.

- EM(Elektromanyetik) dalgaların yansıması

Bir kaynaktan üretilerek çıkan elektromanyetik dalgalar (EMD), elektriksel olarak iletken bir hedefle karşılaştıklarında yansır. Yansıyan işaret bir alıcı tarafından algılanarak hedefin tespiti gerçekleştirilebilmektedir.

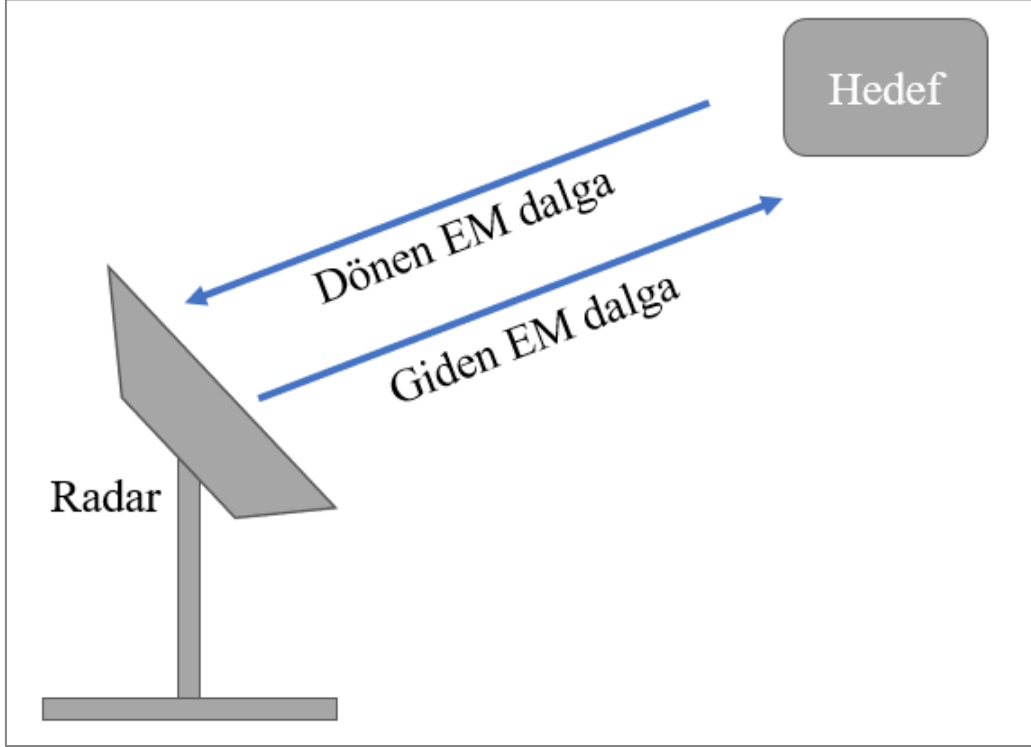
- EM dalgaların yayılma hızı

Elektromanyetik dalgaların yayılma hızı yaklaşık olarak ışık hızı (300 000 km/s) olarak kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalgaların bu sabit hızla yayılma özelliği sayesinde hedef için uzaklık süresi hesaplanabilmektedir. EM dalgaların kaynaktan darbe olarak çıkma ve algılanma süreleri ile hedef uzaklığı tespit edilebilmektedir.

- EM dalgaların doğrusal yayılımı

Radar kaynaklarından doğrusal olarak üretilen EM dalgalar çeşitli antenler kullanılarak belirli yönde yoğunlaştırılabilirler. Böylece hedefin konum ve açısal bilgileri elde edilebilir.

Radar ile bu üç temel fizik kuralını kullanarak hedef ile ilgili bilgilere ulaşılabilmektedir. Gönderilen elektromanyetik dalganın ilerleme şekli ve hız bilgisi hedef için tayinleri belirleyebilmektedir.

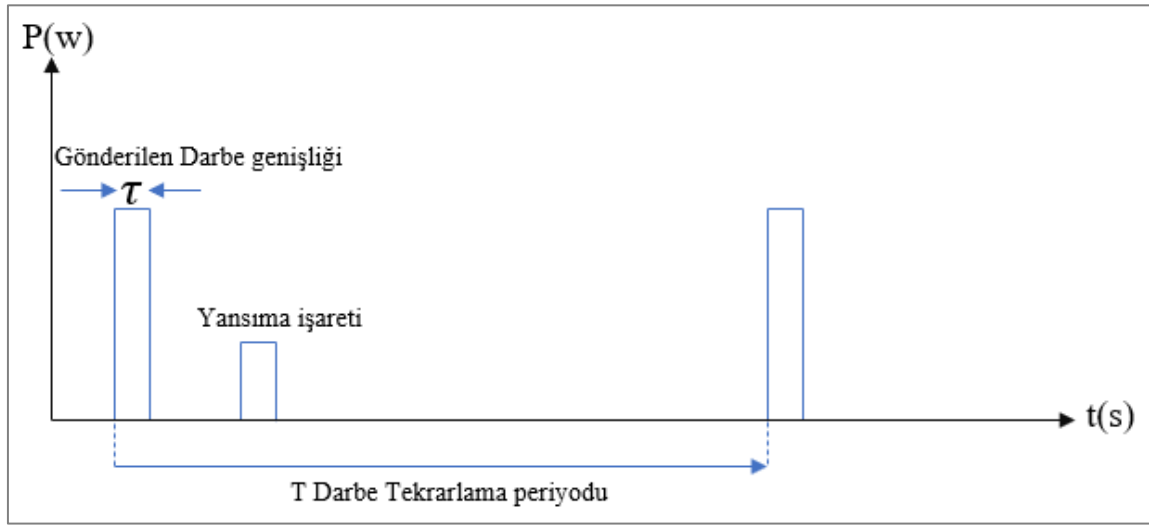


Şekil 2.1. Radar çalışma prensibi

Şekil 2.1’de radar cihazının, hedefi EM dalgaların iletimi ve yansıması ile tespit etmesi gösterilmiştir. Yürüyen dalga tüpü kuvvetlendiricisi gibi bir kuvvetlendirici ile elde edilmiş EM dalga radar anteni ile boş uzaya gönderilir. Gönderilen EM dalgalar doğrusal yönde kalan hedeflerden yansıyarak tekrar radar antenine dönmektedir. Gönderilen darbe radardan çıktığı süre ya da faz bilgisi tutularak yansıyan dalganın elde edildiği süre ve faz ile ışık hızı üzerinden işlem yapılarak hedefin bilgileri hesaplanmaktadır.

Radarlar çalışma prensibi ve hedefin tayini söz konusu olduğunda iki tür olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlar darbe radarı ve sürekli dalga radarıdır. Darbe radarları gönderilen sinyal ile dönüş olarak alınan yansıyan işaret arasındaki süreden konum belirleme için kullanılmaktadır. Sürekli dalga radarları ise gönderilen sinyal ile yansıyan sinyal arasındaki faz farkından hareketli cisimlerin hızını belirlemektedir. Sürekli dalga radarları aynı zamanda sinyal bozucu olarak gürültü oluşturmak için de kullanılmaktadır. Sürekli dalga radarının ve darbe radarının birlikte kullanıldığı sistemler de mevcuttur.

Darbe radarlarında, bir antenden çıkan yüksek güçlü EM dalga sinyali hedeften yansımalarının ardından tekrar aynı anten üzerinden algılanabilecek şekilde çalışmaktadır. Çalışma periyoduna göre nispeten daha kısa sürelerde bir darbe sinyali üretilerek antenden gönderilir. Yansıyan sinyal antenin güç üretmediği yani yeni darbe göndermediği ölü sürede algılanır. Sürelerin üst üste binmemesi ve bir karmaşıklığın oluşmaması için bu süreler çok önemli olmaktadır. Darbe radarlarının, darbe modülasyonlu ve darbe içi modülasyonlu olarak iki çeşit kullanımı mevcuttur.



Şekil 2.2. Gönderilen darbe ve yansıyan sinyal ilişkisi

Şekil 2.2’de bir darbe radarında üretilen çok yüksek darbe gücünün radardan çıkma süresi ve yansıyan işaretin algılanma süresi gösterilmiştir. Algılanan darbeler gönderilen darbelerin arasında algılanmaktadır. Aynı anten üzerinden gönderilip alındığı için kullanılan anten alıcı ve verici moduna uygun bir alt yapı ile birlikte kullanılması gerekmektedir.

$$R_{\max} = \frac{c \cdot (T - \tau)}{2} \quad (2.1)$$

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.2)$$

Bir darbe işaretinin genişliği ve darbe sıklığı ile ölçülebilecek maksimum menzil hesaplanabilmektedir (Eş. 2.1). Bu eşitlik radar için kullanılan en temel eşitliktir. Bu denklem içerisinde radardan çıkan güç, algılanabilecek en düşük güç seviyesi ve zayıflamaların etkisi bulunmamaktadır. Aynı zamanda radar aygıtından algılanan sinyale göre hedefin konumu belirlenebilmektedir (Eş. 2.2).

$R_{\max}$: Hatasız ölçülebilecek en büyük menzil(m)

R : Hesaplanan menzil (m)

c : Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/sn)

T : Darbe tekrarlama periyod(sn)

τ : Gönderim darbe genişliği(sn)

t : Ölçülen süre(sn)

Darbe radarları için ölçülebilecek en uzak menzil $R_{\max}$ radarın en önemli parametrelerindendir. Radarın Darbe Tekrarlama frekansı ve gönderim darbe genişliği parametreleri radar içerisinde vericiden elde edilen değerlerdir. Bu değerler radarın çalışma modu ve kullanım yerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Verici çıkışından antene gönderilen güç ve bu gücün darbe genişliği bu tezinde konusunu oluşturan kuvvetlendiricilerden kontrol edilmektedir.

Sürekli dalga radarları (Continuous Wave Radar) sürekli sabit güç seviyesinde belirli frekansta RF sinyali göndererek çalışmaktadır. Gönderdiği belirli frekansta sinyalin tekrar yansıması ile alıcıdan almaktadır. Alınan sinyal ile gönderilen sinyal arasındaki frekans değişim farkına bakılarak hedefin hız bilgisine ulaşılmaktadır. Gönderilen sinyal sürekli gönderildiği ve alınan sinyal sürekli algılandığı için bu tür radarlarda iki ayrı anten kullanılmaktadır. Sürekli dalga radarlarının kullanım şekillerine göre modülasyonlu ve modülasyonsuz olarak iki çeşidi bulunmaktadır.

Sürekli dalga radarlarında radar anteninden çıkan sinyal f_o ve yansıyan sinyalin frekansı f_y olarak gösterilmektedir. Bu iki frekans arasındaki fark, Eş. 2.5 ile gösterildiği gibi doppler frekansı f_d olarak karşımıza çıkmaktadır. Doppler frekansı ile hedefin hız bilgisine Eş. 2.3 ve Eş. 2.4 ile ulaşılabilir.

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (2.3)$$

$$V_r = V_h \cdot \cos \theta \quad (2.4)$$

$$f_d = f_y - f_o \quad (2.5)$$

f_y : Yansıyan işaretin frekansı (Hz)

f_o : Antenden çıkan, gönderilen işaretin frekansı (Hz)

f_d : doppler frekansı (Hz)

θ : Hedefin gözlem doğrultusu ile arasında kalan açı (derece)

V_r : Hedefin gözlem doğrultusundaki Radyal hızı (m/sn)

V_h : Radyal hız (m/sn)

Sürekli dalga radarları ile hedefin konum bilgisine ulaşamamaktadır. Kesintisiz, sürekli olarak antenden güç yayılması yüzünden bir zaman bilgisi oluşmamaktadır. Ancak bir süre ölçümü yapılması gerekirse gönderilen işaretin frekans ya da genlik modülasyonu yapılması ile gerçekleştirilebilir.

Sürekli dalga radarları aynı zamanda sinyal bozucu olarak da kullanılmaktadır. Sürekli olarak çalışmakla birlikte aynı zamanda belirli zamanlarda belirli süre radar susturulur. Bu süre kadar güç üretimi durdurulmaktadır. Başka sistemler ile senkron bir şekilde çalışması için bu zamanların uygun şekilde üretilmesi ve kuvvetlendiricinin kontrol edilmesi gerekmektedir.

Hem darbe radarı için hem de sürekli dalga radarın için temel olarak hedefin bilgilerine ulaşmak aynı işleminden oluşmaktadır. Radar aygıtında çok yüksek bir P darbe gücüne sahip τ süresi (sürekli dalga radarı için %100) kadar uzunlukta sinyaller ışık hızında(c) yayılır. Radar anteninden bu darbeler yalnızca bir belirli yönde yoğunlaştırılır. Dalgalar yayıldığı yönde bir engel ile karşılaşırsa belirli bir güçte radara doğru yansıma olarak geri döner. Radar anteni bu yansıyan gücü toplayarak işlemek üzere iletir.

$$P_r = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (2.6)$$

P_t : Antenden çıkan tepe güç(W)

P_r : Antenden algılanan ortalama güç(W)

G: Anten kazancı

A_e : anten etkin açıklığı(m^2)

R: Menzil(m)

σ : Radar kesit alanı(m^2)

Radarda hedef ile ilgili tayinler Eş. 2.6 ile elde edilmektedir. Bu eşitlik genel radar eşitliğidir ve hedefin menzilinın hesaplanmasını sağlamaktadır. Kuvvetlendiriciden çıkan P_t tepe gücünün anten açıklığı ve anten kazancı kuvvetlendirilmesi ile hedefin radar kesit alanı ile hedefin menzili tayin edilmektedir.

$$R_{maks} = \sqrt[4]{\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}}} \quad (2.7)$$

S_{min} : Radarda algınabilecek minimum güç (W)

R_{maks} : Radar maksimum menzili (m)

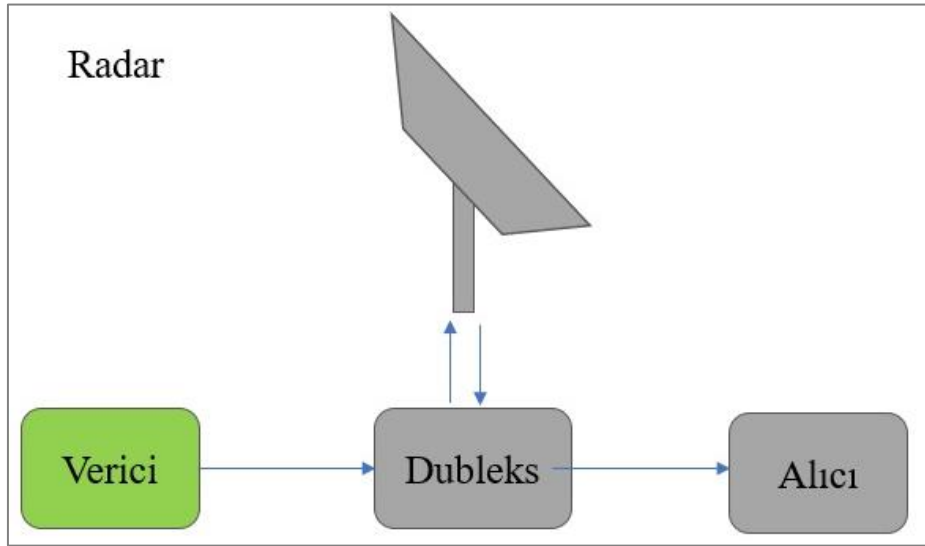
Radar denklemi üzerinden aynı zamanda radarın çalışabileceği maksimum menzil de hesaplanmaktadır. Eş. 2.6 üzerinde P_r algılanan gücün yerine radarda algılanabilecek minimum güç olan S_{min} Eş. 2.7 üzerindeki gibi yazılırsa radarın maksimum menzili R_{maks} hesaplanır. Yine P_t radardan çıkış tepe gücünün radarın etkin olarak çalışacağı menzil için çok önemli bir rolü vardır

2.2. Radar Türleri ve Radar Aygıtının Yapısı

Radardlar kullanım yerlerine göre temelde askeri uygulamalar ve sivil uygulamalar olarak iki türe ayrılmaktadır. Askeri uygulamalarda hava savunma radarları, savaş alanı radarları ve

hava trafik kontrol radarları olarak kullanılmaktadır. Sivil uygulamalarda ise hava trafik kontrol radarları ve muhtelif radarlar olarak kullanılmaktadır.

Radarlar aldıkları sinyallerin türüne göre birincil ve ikincil radarlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Birincil radarlar pasif sinyaller ile ikincil radarlar ise aktif sinyaller ile çalışmaktadır. Birincil radarlar gönderdikleri işaretin pasif yansımaları alıcılarında kullanırlar. İkincil radarlar ise hedeften algılanarak ve yeni üretilen sinyalleri kullanırlar. Burada iki radar türünün alıcı işlemlerinde ayrıldığı görülmektedir. Verici tarafında ise gönderilen güç ve aydınlatma için çalışma yöntemi olarak aynıdır.



Şekil 2.3. Radar yapısı ve verici

Şekil 2.3’de aynı antenden sinyalin alınıp verildiği bir radarın verici, alıcı, dubleks ve antenden oluşan basitleştirilmiş iç yapısı gösterilmektedir. Burada vericiden çıkan yüksek frekanslı ve kuvvetlendirilmiş sinyal, radar anteni ile hedefe doğru yönlendirilir ve tekrar antenden algılanarak alıcıya gönderilir. Şekil 2.3’de verilen basit yapı bir darbe radarı için uygundur. Sürekli dalga radarı için alıcı antenin gönderici antenden farklı olacaktır.

Verici içerisinde radarda kullanılacak yüksek frekanslı sinyal üretilerek kuvvetlendirilir ve antene gönderilir. Antene gönderilen sinyal radarın türüne göre sürekli ya da modülasyonlu olarak üretilmekte ve kuvvetlendirilmektedir. Yani vericinin temel görevi sinyali üretmek ve radarda kullanılacak son hale getirilerek uygun bir şekilde antene iletmektir.

Radar yapısına bakıldığında gönderilen gücün kontrolünün verici tarafından sağlandığı söylenebilmektedir. Verici çıkışından elde edilen çıkış gücü vericide şekillendiği hali ile antene gönderilmektedir. Verici içerisindeki çıkış gücünü kontrol edecek eleman kuvvetlendiricilerdir. Bu kuvvetlendiricilerin kontrolü radarın doğrudan kontrol edilmesini sağlayacaktır.

2.3. Kuvvetlendiriciler

Mikrodalga sistemlerde kullanılan RF sinyallerin seviyelerini arttırmak için kullanılan elektronik cihazlardır. Giriş olarak uygulanan sinyalin şeklini koruyarak genlik seviyesini arttırmaktadır. Çalışma şekli olarak tanımlanırsa kuvvetlendiriciler, DC giriş gücünü RF/Mikrodalga gücüne dönüştüren devrelerdir [5]. Kuvvetlendiriciler, özellikle kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılmaktadırlar ve burada yüksek güç ihtiyacı duyulmaktadır. Kablosuz iletişim sistemleri ses, video ve verileri yüksek veri hızıyla iletir [6]. Bu sebeple günümüzde veri transferi ve haberleşme için kuvvetlendiriciler çok önemlidir.

Girişine uygulanan sinyal ve çıkışından elde edilen kuvvetlendirilmiş sinyalin türüne göre kuvvetlendirici sınıfları mevcuttur. Giriş sinyali gerilim değerine göre çıkışında gerilim yükselten kuvvetlendiriciler, giriş sinyali akım değerine göre çıkışında akım yükselten kuvvetlendiriciler, çıkış akımına bağlı değişen giriş gerilimli kuvvetlendiriciler ve çıkış gerilimine bağlı değişen giriş akımlı kuvvetlendiriciler olmak üzere dört çeşit kuvvetlendirici çeşidi kullanılmaktadır. Radar sistemlerinde kullanılan kuvvetlendiriciler güç kuvvetlendiricilerdir. Bu tür kuvvetlendiricilerde girişine uygulanan gerilimin çıkışta gücünü yükselten kuvvetlendiricilerdir. Bu sınıflandırmalar kuvvetlendiricinin çalışma şekli ve tasarımı ile ilgilidir.

Vericiler içerisinde gücün ve modülasyonunu kontrolünü sağlayan en önemli birim kuvvetlendiricilerdir. Bu kuvvetlendiriciler vericinin kullanım amacına göre çeşitli türleri mevcuttur. Vericilerde yüksek frekanslı sinyallerin kuvvetlendirilmesi için katı hal kuvvetlendirici ya da vakum tüplü kuvvetlendiriciler kullanılmaktadır [7]. Katı hal kuvvetlendiriciler (SSA) transistör ve diyot gibi yapıları kullanan kuvvetlendirici türleridir. Çıkış güçleri bu kullanılan yapılara göre değişebilmektedir. Ancak birden fazla kuvvetlendirici birlikte kullanılarak çıkış güçleri çok daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir. Birden fazla düşük güçlü birim bir birleştirici ile bağlanarak çıkış olarak

bu birimlerin toplam gücü elde edilmektedir. Bu şekilde yüksek güçlere ulaşılabilse de birden fazla birimin senkron sürülmesi gerekmektedir. Katı hal yükselteçler ile senkron çalışarak ulaşılan güçler çok yüksek seviyelere çıkıldığında sistem içerisinde karmaşıklık ortaya çıkmaktadır. Karmaşıklık çok yüksek güç seviyeleri için tasarımı zorlaştırmaktadır. Yüksek atmosfer zayıflaması, katı hal kuvvetlendiricilerden (SSA) elde edilen düşük güç nedeniyle, belirli uzunluktaki kablosuz bağlantıların önündeki en büyük engeldir [8].

Vakum tüplü kuvvetlendiriciler, yüksek DC gerilimleri RF sinyallerine dönüştüren yapılardır. Vakum tüplü kuvvetlendiriciler ile katı hal yükselteçleri ile zor ulaşılan güç seviyelerine çok daha rahat bir şekilde tek birim ile çıkabilmektedir.

Radar ve uzay sistemleri de çok yüksek güç gerektiren sistemlerdir. Bu gibi yapılar için her alanda olduğu gibi katı hal yükselteçleri ve vakum tüplü yükselteçler kullanılmaktadır. Özellikle vakum tüplü kuvvetlendiriciler bu sistemlerde tercih edilmektedir. Darbe radarlarının ve sürekli dalga radarlarının çoğu, RF güç kuvvetlendirici için vakum tüplerini kullanmaktadır. Kontrollü olduğu için de YDT tipi vakum cihazları en çok tercih edilenlerdendir.

Yüksek güç ve frekans için, elektron tüpleri katı hal cihazlarından yalnızca daha küçük, daha hafif ve daha verimli olmakla kalmaz, aynı zamanda daha ucuz ve daha güvenilirdir [9].

3. VAKUM TÜPLERİ VE YÜRÜYEN DALGA TÜPLERİ

3.1. Vakum tüpleri

Mikrodalga vakum elektron cihazları veya mikrodalga “tüpler”, enerjiyi bir DC güç kaynağından bir RF sinyaline dönüştürmek için bir vakum içerisinde serbest elektronları kullanır. Triyotlar, lineer ışın cihazları, çapraz alan cihazları, periyodik ışın cihazları, gyro cihazları, ileri dalga cihazları ve geri dalga cihazlarının yanı sıra hızlı dalga ve yavaş dalga cihazları dahil olmak üzere çok çeşitli mikrodalga tüpleri bulunmaktadır [10].

Mikrodalga tüpleri, elektron demetlerinin ve elektromanyetik dalgaların kullanıldığı vakum cihazlarıdır. Tüpte elektron demeti, enerjinin bir kısmını elektromanyetik enerjiye verir ve böylece elektromanyetik dalganın oluşumu veya amplifikasyonu meydana gelir. Vakum tüp geometrisi ve elektron-elektromanyetik dalga etkileşim şekli mikrodalga tüplerinin türünü belirleyen faktörlerdir.

Kullanım alanlarına ve parametrelerine göre tasarlanmış birçok farklı tipte mikrodalga vakum tüpleri vardır. Ancak bu vakum tüplerinin çalışma prensibi temelde aynıdır. Bir elektron tabancası tarafından oluşturulan ve gönderilen elektron ışını, RF dalgası ile etkileşime girer ve tüp geometrisine göre amplifikasyon veya salınım oluşur.

Çizelge 3.1. Vakum tüpleri temel sınıflandırması [7]

Doğrusal demet tüpleri	Çapraz alan tüpleri	Hızlı dalga tüpleri
Klistronlar	magnetronlar	Gyro-monotronlar
Yürüyen dalga tüpleri	Çapraz alan kuvvetlendiriciler	Gyro kuvvetlendiriciler

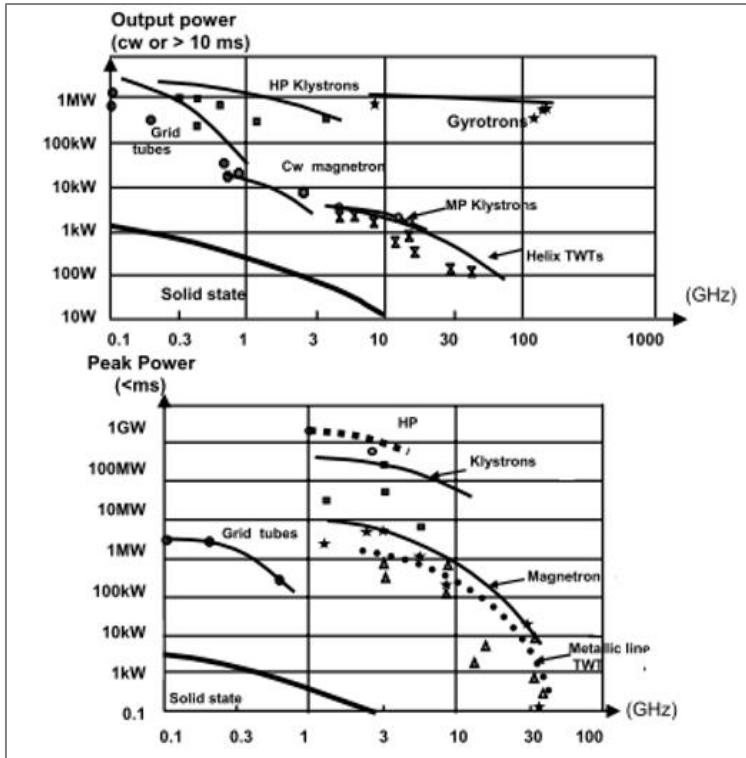
Vakum tüplerinin çalışması temeli, elektron geçiş kontrolü ile oluşturulan elektromanyetik alan sayesinde RF sinyaline enerji aktarımına dayanmaktadır. Elektronların oluşma şekli ve vakum cihazının geometrisine göre doğrusal demet tüpleri, çapraz alan tüpleri ve Hızlı dalga tüpleri olmak üzere üç sınıfa ayrıldığı Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Klistron ve yürüyen dalga için elektron tabancasında oluşturulan elektronlar RF devresinden geçerek kollektörlere doğru hareket eder. RF devresi klistronda rezonans boşluklarından ve Yürüyen dalga tüpünde sürekli helis hattından oluşur.

RF giriş sinyali oluşturduğu elektrik alan huzme içerisindeki elektronları hızlandırır ve yavaşlatır. Hızlı elektronlar ve yavaş elektronları şekillendirir ve bir demet oluşturur. Bu demetler yakınındaki RF devresinden geçerken RF akımı indükler ve RF akımı huzme içerisinde büyüyerek RF kuvvetlendirme gerçekleşmiş olur.

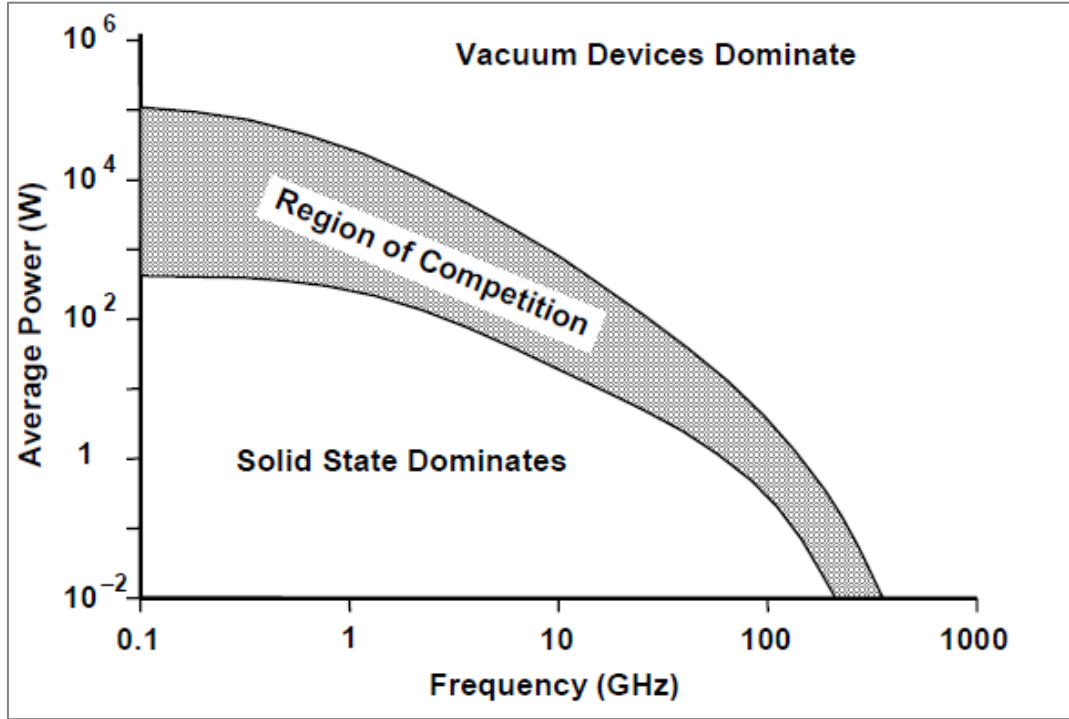
Magnetron tipi tüpte ise oluşturulan elektronlar magnetronun geometrik yapısı ile bir LC osilatör gibi davranarak osilasyona geçer ve RF sinyalini oluşturur. Bu tür vakum cihazında çalışılacak frekansı doğrudan cihazın fiziksel yapısı belirlemektedir. İç yapısında bulunan bakır plakaların L ve C değerleri frekansı belirlemektedir. Bu vakum cihazına uygulanan katot gerilimi ile cihazın çıkış gücü belirlenebilmektedir.

Vakum tüpleri tarihi çok eskilere dayansa da günümüzde halen kullanılmaktadır. Katı hal yükselteçlerinin sürekli çıkış gücü ve tepe çıkış güçlerinin yetersiz olması yüzünden vakum tüplerinin geliştirilmesi günümüzde devam etmektedir.



Şekil 3.1. Bazı mikrodalga tüpleri, tepe ve sürekli gücü ile frekans karşılaştırılması [11]

Vakum tüp cihazlarının frekans ve güçlerine göre çalışma aralık dağılımları yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Bkz. Şekil 3.1). Aynı zamanda vakum cihazları katı hal yükselteçleri ile de karşılaştırıldığında istenilen frekans ve güce göre vakum tüplerinin çok geniş bir yer kapladığı gözlemlenmektedir (Bkz. Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Vakum tüplerinin ve Katı Hal kuvvetlendiricilerin uygulama aralıkları [7]

- Genel olarak mikrodalga tüpleri, katı hal tüplerinden verimli cihazlardır. Uygun kollektör teknolojisinin kullanımı ile tüp verimlilikler %70'e yaklaşabilir veya bazı durumlarda aşabilir.
- Mikrodalga tüpler, katı hal kuvvetlendiricilerden çok daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir cihazlardır.
- Son derece yüksek güvenilirlikleri nedeniyle, yürüyen dalga tüpleri birçok uydu uygulaması için tercih edilen amplifikatörlerdir.
- Bant genişliği birçok uygulamada büyük önem taşıyan bir faktördür. Bu, bazı helis yürüyen dalga tüp türleri için 2 oktavın üzerinde olabilir.

3.2. Yürüyen Dalga Tüpleri

Yürüyen Dalga Tüpleri (YDT) kuvvetlendirici olarak kullanılan vakum tüpleridir [7]. Bir Yürüyen Dalga Tüpü geniş bantta 40 ila 70 dB i bulan bir kazanca sahiptir. Yürüyen Dalga Tüpleri 300 MHz ila 100 GHz arasındaki frekans bölgesinde çalışabilmektedir [7].

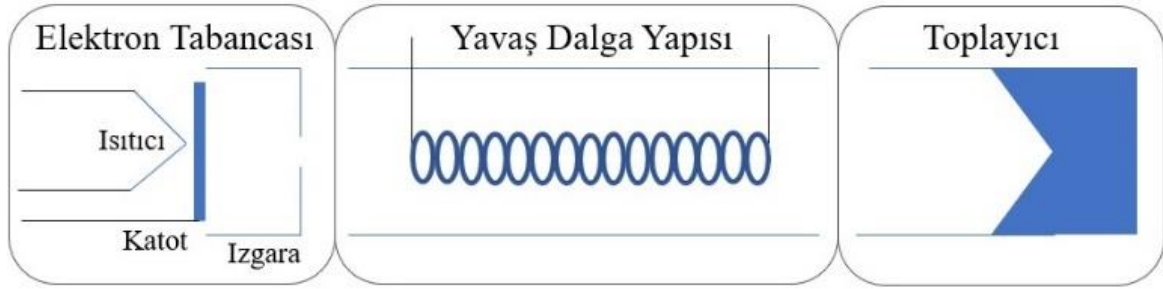
Yürüyen dalga tüpleri vakum tüpleri içerisinde en yüksek ticari satışı olan vakum tüpleridir. Mikrodalga vakumlu elektronik cihazlarının tüm satışlarının %50'sinden fazlasını temsil eder [7]. YDT, güç seviyesi birkaç watt ile onlarca MW arasında değişebilen ve frekansı 1 GHz ile 100 GHz arasında değişen lineer ışınli bir mikrodalga tüpüdür. Yakın zamana kadar hemen hemen tüm haberleşme uydularında, radar sistemlerinde ve elektronik karşı tedbir sistemlerinde yükseltici olarak kullanılmaktadırlar [7].

TWT 1942'de Kampfner tarafından icat edilmesine rağmen, bu cihaz uydu iletişim sistemlerinin, elektronik karşı önlemlerin ve radar sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olmaya devam ediyor [10].

YDT, hareket eden bir elektrik alanı ile yaklaşık aynı hızda hareket eden bir elektron ışını arasındaki etkileşim ilkesine dayanan bir tüptür [12].

Tüm Yürüyen Dalga Tüpleri bir elektron tabancası, bir yavaş dalga devresi ve bir toplayıcı bölümünden oluşur. Bir elektron tabancasından elektronların oluşumu, hızlanması, bir etkileşim bölümü ile RF dalgasına güç aktarımı ve enerjisi harcanmış elektronların toplayıcılarda toplanması RF kuvvetlendirmenin adımlarıdır [11]. Bu kuvvetlendirme işi yapılırken kullanılan diğer parçalar ise manyetik şekillendirme sistemi ve RF bağlantı noktalarıdır.

Yürüyen dalga tüpünün temel çalışma prensibi, yüksek hızlı bir elektron demetindeki kinetik enerjinin, sarmal bir "yavaş dalga" yapısı üzerinde taşınan radyo frekansı (RF) enerjisine dönüştürülmesidir. Mikrodalga (RF) sinyali, sarmal üzerindeki alanlar ile sarmal boyunca hızlandırılan yüksek gerilimli elektron ışınının alanları arasındaki karşılıklı etkileşim mekanizması aracılığıyla sarmal boyunca ilerlerken güç kazanır.



Şekil 3.3. Yürüyen Dalga Tüpü yapısı

Yürüyen Dalga Tüpleri Elektron geçişinin gerçekleştiği bölüm ve RF geçişinin sağlandığı bölüm olarak iki hat üzerine kurulmuştur. Şekil 3.3’de bir YDT’nin basitleştirilmiş temel yapısı gösterilmektedir. Yürüyen dalga tüpü iç yapısı olarak elektron tabancası (EGUN), yavaş dalga yapısı ve toplayıcı bölümleri olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Elektron tabancası RF işaretin etkileşime gireceği elektron demetinin uygun biçimde oluşturulmasını ve sisteme uygulanmasını sağlamaktadır [13].

YDT bölümlerinin görevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Elektron tabancası, elektron üretimi ve elektron ivmelendirme.
- Manyetik odaklama sistemi, manyetik alan oluşturmak ve YDT doğrusal eksenini boyunca akım demetini şekillendirmek.
- Geciktirme hattı (yavaş dalga yapısı), düşük empedans meydana getirmek ve RF hattına enerji aktarımı sağlamak.
- Toplayıcılar (kollektörler), elektronları saptırmak ve toplamak.

YDT içerisinde empedansın sabit olması yüksek gerilim ve yüksek akım yaratır. Bu da çıkış gücünün yüksek olmasını sağlar. Bir YDT için çıkış gücü temel parametredir ve katı hal kuvvetlendiricilere göre kullanılma sebebidir. Bu değer tüpün fiziksel yapısı ve yapım malzemeleri ile ilgilidir. Çıkış gücü aşağıdaki parametrelere göre belirlenmektedir.

- YDT yapısı (helis uzunluğu gibi)
- Helis gerilimi

- Giriş RF gücü
- Manyetik odaklama düzeni

Radar gibi yüksek güç ile çalışan sistemlerin içerisinde yer alan vericinin RF sinyalini bu yüksek seviyelere kuvvetlendirmesi gerekmektedir. Bu gibi yüksek frekans ve yüksek güçlere Yürüyen Dalga tüplü kuvvetlendiriciler ile çıkılabilmektedir. YDT'lerin sağlayabileceği çıkış gücü, mevcut herhangi bir katı hal güç kuvvetlendiriciden en az bir veya iki kat daha yüksektir [10]. Sağladıkları düşük gürültü ve yüksek kazanç ile yüksek güçlü sistemlerde sıklıkla tercih edilmektedir.

3.2.1. Elektron tabancası (EGUN)

Elektron tabancası (EGUN) bir elektron üretici (örneğin filament), katot ve kontrol elektrodundan (örneğin ızgara) oluşmaktadır. Elektron tabancası, elektron demeti üretir ve bu demeti doğrusal bir şekilde tüp boyunca ivmelendirir. Katot, yüzeyinden elektron yayan bir metaldir. Elektron üretiminin fiziksel olayları, Termiyonik emisyon, yüksek alan emisyonu ve foto emisyon olarak sınıflandırılabilir [14]. Termiyonik elektron tabancaları endüstriyel hızlandırıcılarda çoğunlukla kullanılır [15]. Termiyonik malzeme ısıtılması ile etrafına elektronları yayarak oluşturulur. Burada genellikle tungsten malzeme kullanılır. Burada ısıtıcı bobin elektron yoğunluğu oluşturmak için kullanılır ve 6 V ile 8 V aralığında gerilime ihtiyaç duymaktadır. Bir termiyonik malzeme ile elektron üretimi Eş. 3.1 ile gerçekleşmektedir.

$$J = AT^2 e^{(-W/(kT))} \quad (3.1)$$

Eş. 3.1'de yer alan J yayılan akım yoğunluğu, A Richardson sabiti (genellikle $3A.cm^{-2}.K^{-2}$), T (K) tungsten sıcaklığı, W iş fonksiyonu (eV) ve k boltzman sabitidir. Termiyonik malzemenin sıcaklığı arttıkça oluşturduğu akım yoğunluğu artacaktır. Çizelge 3.2'de filament sıcaklığına göre üretilen akım yoğunluğu verilmektedir. Buna göre filamentin oluşturacağı akım yoğunluğu, katot gerilimi ve ızgara pozitif gerilimlerinin belirli bir oranda olması gerekecektir.

Çizelge 3.2. Tungsten filamentin sıcaklığına göre akım yoğunluğu [16]

Filament Sıcaklığı (K)	Akım yoğunluğu (A/m ²)
1500	94,4
1600	384,1
1700	1335
1800	4065,8
1900	11077,8
2000	27448,3

Elektron tabancasının son elemanı kontrol plakalarıdır. Elektronların geçişini dolayısıyla huzme akımını kontrol edecek elemanlardır. Huzme akım kontrol teknikleri aşağıda verilmiştir.

- Katot gerilimi ile
- Anot gerilimi modülasyonu ile
- Kontrol odak elektrotları ile
- Izgara ile

Katot gerilimi yönteminde yüksek gerilimin anahtarlanması zorluğu bulunmaktadır. Aynı şekilde anot gerilimi modülasyonunda da anodun tüpten ayrılması gerekecektir. Burada kontrol odak elektrotları ve Izgara yöntemi birbirine yakın yöntemlerdir ve en çok kullanılan yöntemlerdir. Elektron geçişini, katoda olan uzaklıklarına göre uygulanan potansiyel seviyesine bağlı olarak kontrol etmektedir. Odak elektrot yöntemi, elektron tabancasında meydana gelen şiddetli odak bozulmasından dolayı akımın ara kontrolü için kullanışlı değildir [7].

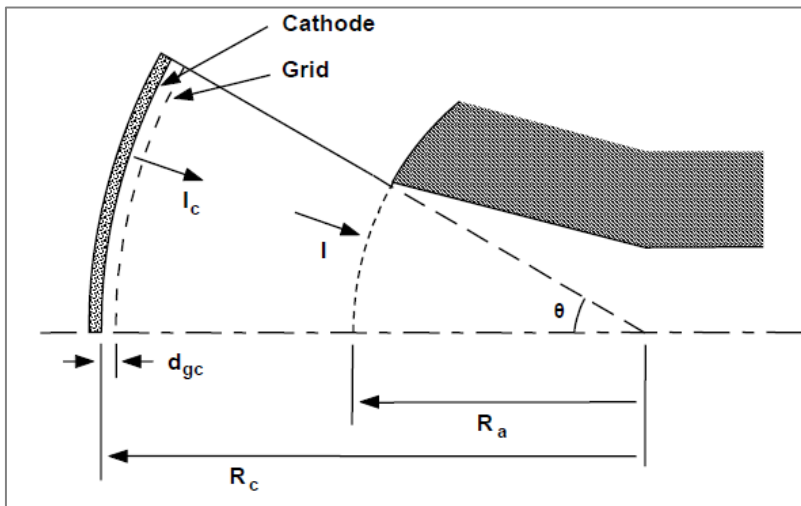
Elektronların kontrol yöntemleri karşılaştırılması Çizelge 3.3’de gösterilmektedir. Buradaki parametreler, toplam amplifikasyon faktörü, μ ışın kontrolü için gerekli gerilimin kontrol elektrot gerilimine oranıdır. Kesme amplifikasyon faktörü, μ_c huzme akımını sıfıra indirmek için kontrol elektrot gerilimi ile katot geriliminin oranıdır. Izgara yakalama, huzme akımının ızgaraya kaçan miktarıdır. Düşük gerilimde odaklama parametresinde bakıldığında en iyi sonucun, anot geriliminin modülasyonu ile elde edildiği görülmektedir.

Yakalayan ızgara katot akımının %15'i kadarını yakaladığı görülmektedir. Bu durumda kullanılacak modülatöründe daha güçlü olması gerekecektir. Gölge ızgaranın ise çok daha düşük akım yakaladığı görülmektedir. İkisi de elektronların odaklanması için makul seviyede iyi olduğu görülmektedir. Burada en önemli parametre kapasitans değerleridir. Yaklaşık olarak iki ızgara yönteminde de 50 pF olduğu görülmektedir. Bu değer modülatör için yük olacak değerdir. Kontrol odak elektrodunda ise bu değer 100 pF değerine çıkmaktadır. Iızgaralı yöntem ile odak elektrotlu yöntem arasındaki kapasitans farkından dolayı modülatörde farklılıklar olacaktır.

Çizelge 3.3. Kontrol elektrotlarının karakteristiği [17]

Tip	μ	μ_c	kapasitans	Grid yakalama	Düşük gerilimde odaklama
Anot modülasyonu	1 - 3		50 pF	0	iyi
Kontrol odak elektrot	2 - 10	2 - 10	100 pF	0	Zayıf
Yakalayan ızgara	50	100	50 pF	15%	Makul
Gölge ızgara	30	300	50 pF	0.1%	Makul

3.2.2. Iızgara yapısı



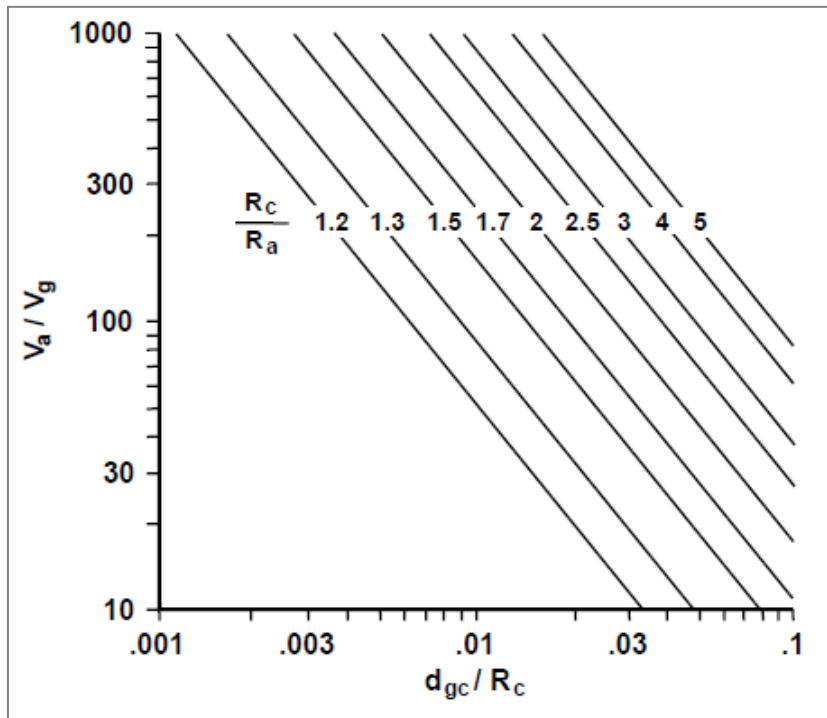
Şekil 3.4. Iızgara ve katot mesafesinin hesaplanması için EGUN parametreleri [7]

Bir ızgara ile katot arası mesafenin belirlenmesi için gerekli parametreler ve bunların bölümleri çok önemlidir ve geçecek akımın belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır (Bkz.

Şekil 3.4). Izgara ile katot arası mesafe katot eğim açısı ve belirli bazı uzunluklar ile bulunmaktadır. Bu uzunluklar katot gerilimi ile ızgara geriliminin oranını da belirleyen değerler olacaktır.

$$\frac{V_a}{V_g} = \left[\frac{\alpha_a}{d_{gc}/R_c} \right]^{\frac{4}{3}} \quad (3.2)$$

Bir ızgaralı YDT için katot-anot arası gerilim (V_a) ve ızgara gerilimi (V_g) elektron tabancasının yapısına bağlı olarak belirlendiği Eş. 3.2 ile verilmektedir. Buna göre YDT türüne göre ihtiyaç duyulacak ızgara gerilimi bu fonksiyona göre belirlenmektedir. Burada d_{gc} ve R_c elektron tabancasındaki fiziksel büyüklükler ve α Langmuir ve Blodgett'in boyut fonksiyonu ve $(-\alpha a)$ ise bunun anotta uygulanmasıdır.



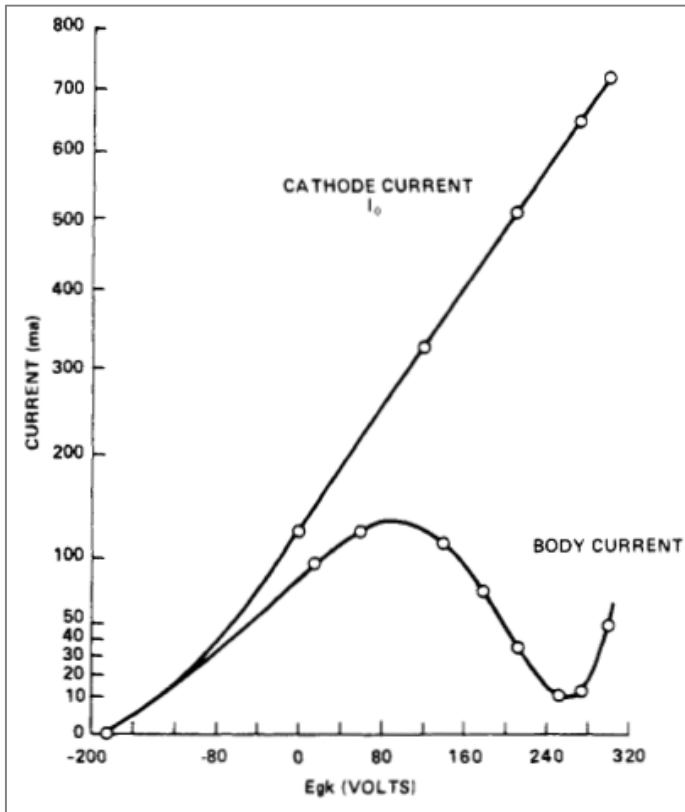
Şekil 3.5. Izgara ve katot geriliminin ızgara, katot ve anot pozisyonları ile ilişkisi [7]

Elektron tabancasının boyutlarının katot-anot gerilimi ve ızgara gerilimi ilişkisini üzerinden belirlenmektedir (Bkz. Şekil 3.5). Burada R_c ve R_a katot ve anot için yarıçaplardır. Elektron tabancası boyutlarına göre ideal ızgara gerilim oranı bu grafiğe göre seçilebilmektedir.

Katot ve ızgara gerilim oranı fiziksel yapısına göre elektronları odaklamak için seçilen değerlerdir. Buradan ızgaranın pozitif ve negatif gerilim değerlerine göre geçireceği huzme akımı belirlenmelidir. Bu değerler RF sinyalinin kuvvetlendirileceği miktarı da belirleyecektir.

Şekil 3.6'da bir YDT için ızgaranın pozitif ve negatif gerilimi için YDT doğrusal hattından geçirilen huzme akım miktarı gösterilmektedir. Izgara gerilimlerine göre belirli seviyenin altında (örneğin -200 V seviyesinde) geçirilen huzme akımının sıfıra indiği gözlemlenmektedir (Bkz. Şekil 3.6). Pozitif gerilim için ise doğrusal bir şekilde arttıkça huzme akımının da arttığı sonucu çıkmaktadır.

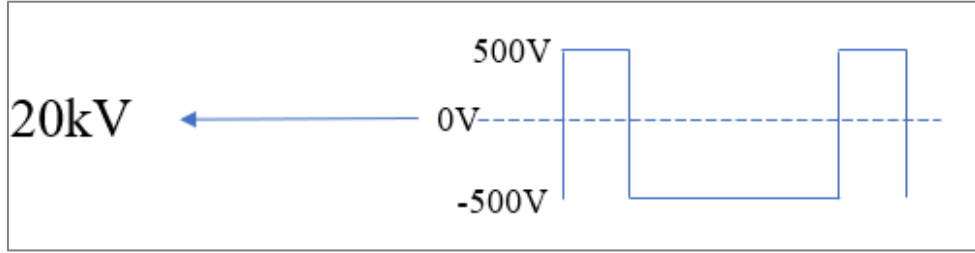
Gövde akımı da ızgara potansiyelinin değerine göre değişiklik göstermektedir (Bkz. Şekil 3.6). Izgara pozitif gerilimi arttıkça artan ancak sonrasında en düşük seviyesine kadar azalan bir grafik çizmektedir. Bu gövde akımı YDT huzme akımının toplayıcıları tarafından yakalanmayan akımlardır ve değerinin yüksek olması YDT sağlığı için zararlı olacaktır.



Şekil 3.6. Izgara transfer karakteristiği [18]

Eğer katot ızgara arası uzak olursa Huzme akımı mA başına yüksek ızgara gerilimi gerekecektir. Katot ızgara arası kısa olursa anoda kaçan akım miktarı fazla olacaktır. Bir çalışma için katot ızgara arası mesafe 1,30 cm yapılmıştır [19].

3.3. Izgaranın Sürülmesi



Şekil 3.7. Izgaranın sürülmesi ve çalışma referansı

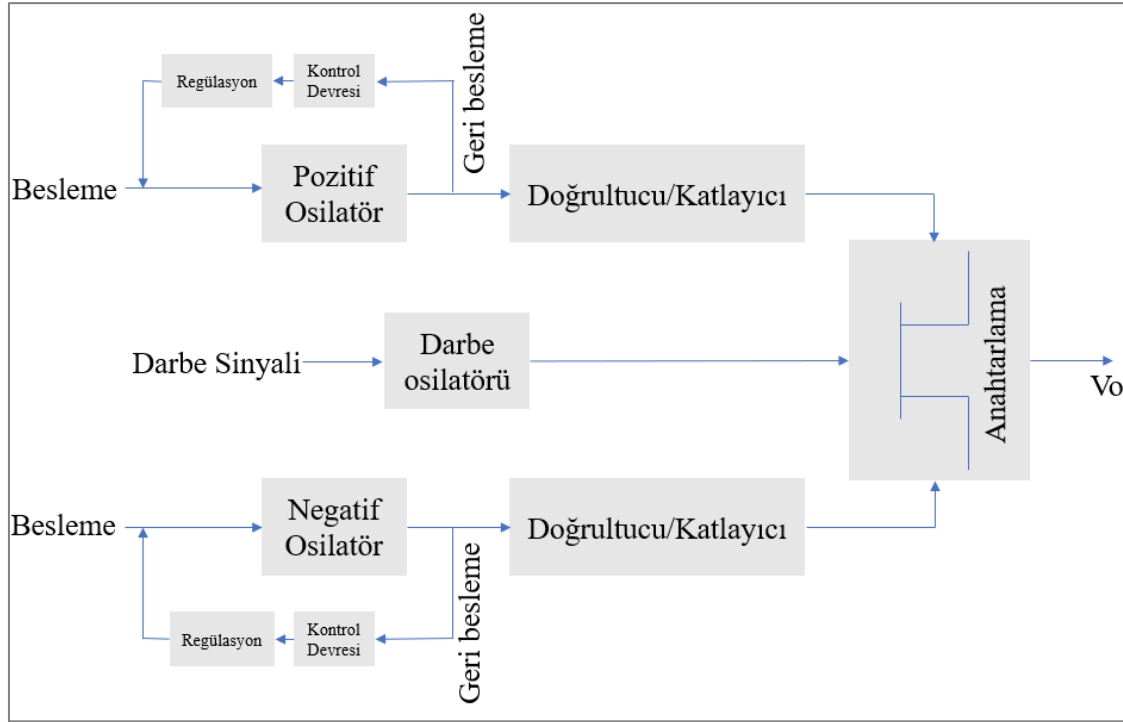
Izgara biriminin pozitif gerilime geçtiği her an YDT huzme akımını geçirdiği zamandır. Negatif gerilime geçtiği anda aynı şekilde elektronların geçişini durdurduğu ve huzme akımını sıfıra düşürdüğü zamandır.

Izgaraya uygulanan bu pozitif ve negatif gerilimlerin diğer bağlantı noktası ise elektron tabancasında yer alan katottur. Dolayısıyla katot gerilimi ızgara modülatör için referans değeri olacaktır. Şekil 3.7 ile verilen referans değeri yüksek gerilim olduğu belirtilmiştir. Burada elektron geçirme değeri pozitif gerilim elektron durdurma gerilimi ise negatif gerilimdir. Bu değerler YDT geometrik yapısına göre değiştiği önceki bölümlerde belirtilmektedir.

Elektron tabancasının geometrisine göre ızgara gerilimi belirlense de aynı YDT serisi için küçük farklılıklar olacaktır. Bu durum için kullanılacak modülatörün de bu değere uydurulması gerekmektedir. En verimli şekilde YDT kuvvetlendirme işini yapabilmesi için ızgaranın sürülmesi için gerilimlerin doğru uygulanması gerekmektedir.

4. DEVRE TASARIMI

4.1. Yöntem



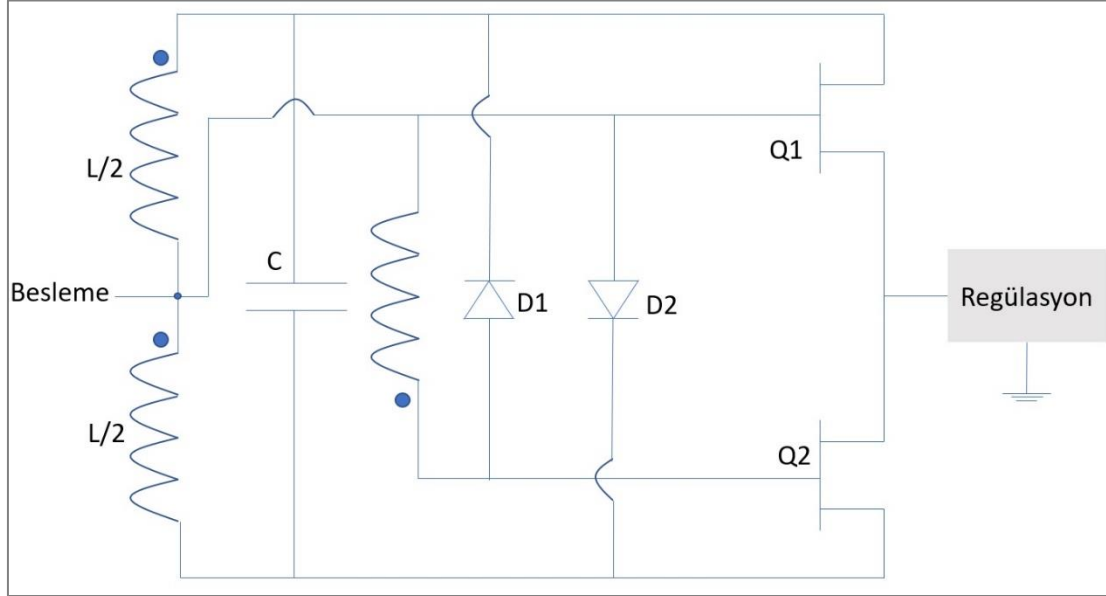
Şekil 4.1. Izgara modülatör devre tasarımı blok gösterimi

Izgara modülatör devre tasarımında, bir YDT için ideal sürülme şartları göz önünde bulundurularak hazırlanmış çeşitli bölümler yer almaktadır. Izgara modülatör devre yapısı olarak osilatör ve regülasyon, doğrultucu-anahtarlama ve darbe osilatörü bölümü olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Osilatör bölümünde yüksek gerilimlerin elde edileceği sinyal üretilir. Bu osilatörün besleme gerilimi seviyesi ayarlanarak oluşacak yüksek gerilimin genlik değeri kontrol edilir. Osilatör ile elde edilen gerilim doğrultularak DC olarak bekletilir. Anahtarlama bölümünün darbe sinyali ile kontrolü sayesinde ızgara modülatör çıkışında pozitif ya da negatif sinyal elde edilir. Çıkışa hangi gerilimin hangi sırayla verileceği dışardan düşük gerilim ile kontrol edilir. Şekil 4.1’de ızgara modülatörün temel yapısı blok gösterim olarak verilmiştir.

Tasarımın oluşmasında izolasyon, yükselme zamanı, gecikme süresi, gerilimlerin ayarlanabilirliği, yüklenme durumu ve RF performansına etkisi gibi kriterler ve kısıtlar yer almaktadır. Belirlenene osilatör devreleri ve kontrol yöntemleri anahtarlama sırasında dışarı aktarılabilecek gerilimlerin RF performansı etkilemesi sebebi ile seçilmiştir. Darbe osilatörü,

tüm anahtarlama devresinin izole bir şekilde sürülmesi için belirlenmiştir. Tüm bu tanımlar ve parametreler dikkate alınarak devre tasarımı hazırlanmıştır.

4.2. Pozitif ve Negatif Gerilimin Elde Edilmesi



Şekil 4.2. Pozitif ve negatif gerilim için kullanılacak osilatör devresi temsili gösterimi

YDT Izgara birimini sürececek olan +500 V seviyesine kadar ayarlanabilecek pozitif gerilim ve -500 V gerilim seviyesine kadar olabilecek negatif gerilim bir LC osilatör devresinden üretilen olacaktır. Bu LC osilatör devresinin temsili gösterimi Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Pozitif gerilim ve negatif gerilim için ayrı ayrı LC osilatörleri bulunacaktır. Besleme hatları doğrudan bu osilatörlere uygulanacağı için osilatörler sistem enerjilendirildiği anda osilasyona başlayacaktır. İki osilatörde birbirinden bağımsız bir şekilde osilasyona başlayacak ve osilasyon genlikleri ve frekansı birbirinden bağımsız olacaktır.

Izgara modülatör çıkış gerilimlerinin elektron demetine ve RF sinyaline etkisi doğrudan olacaktır. Bu gerilimler üzerindeki aşma, salınım gibi etkiler doğrudan YDT performansını etkileyecektir. RF sinyalinin gürültüsüz ve temiz çıkması için bu gerilimlerin olabildiğince temiz olmalıdır. Bu gerilimleri oluşturacak devre bir devre LC devresinden elde edileceği için sinüs osilasyonu sağlayacaktır. Sinüs osilasyonu oluşturulduğu için harmonikleri düşük olacaktır.

Temel olarak osilatör devresi birer adet L ve C elemanlarından oluşmaktadır. Osilatör devresinin ana parametresi olan frekans ve genlik seviyeleri bu ana elemanlar üzerinden belirlenmektedir. Burada L indüktans değeri iki parça bobinden oluşmaktadır. İki indüktörün toplam indüktans değerini gerçek indüktans değerini belirleyecektir. Osilasyonun frekansını belirleyecek diğer bileşen ise C olacaktır. Oluşacak sinyalin frekansı Eş. 4.1 ile belirlenmektedir. Buna göre pozitif ve negatif osilasyonların birbirinden etkilenmemesi için farklı frekanslar seçilebilmektedir.

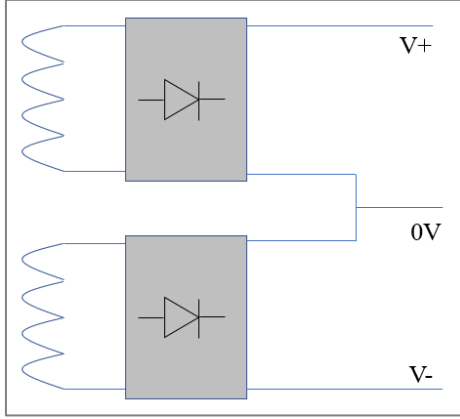
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Osilatör devresindeki diğer önemli elemanlarda anahtarlama elemanları olan transistörlerdir. Bu transistörler osilasyonun sağlanması için kapı gerilimlerini yine osilasyonun kendisinden alarak ters yönde tetiklemek için kullanılmaktadır. Transistörlerin kapılarına iletilen gerilimler osilasyon sinyalinin tersi olacak şekilde L bobini üzerinden ek bir sargıdan elde edilmektedir. Bu şekilde sistemin osilasyonu kesintisiz bir şekilde sürekli olarak devam edecektir.

Osilatör devresi çalışmaya başlarken öncelikle besleme gerilimi Q1 transistörünü aktifleştirir ve L bobininden pozitif yönde akım akmasını sağlar. L bobini üzerine sarılmış tetikleme sarımı ile Q2 transistörünü aktifleştirir. Burada L bobinin kutuplanması sırasında kondansatörün de aynı kutupta dolması sayesinde sinüs gerilimi elde edilir. D₁ ve D₂ diyotları ters transistörün aktifleşmesi ile diğer transistörün kapı gerilimlerini boşaltmak için kullanılır.

Gerilim değerinin ayarlanması için tüm osilatör devresini toprağa bağlayacak bağlantı noktasına bir değişken direnç oluşturacak eleman yerleştirilecektir. Bu direnç oluşturacak eleman bir MOSFET olarak seçilmiştir. Kapı gerilimi doğrusal olarak değiştirildiğine oluşacak R_{DS} direnci tüm sisteme bir gerilim bölücü olarak osilasyonun genliğini düşürecektir. Bu şekilde gerilim genliği istenildiği gibi ayarlanabilecektir.

L bobini aynı zamanda bir transformatör primer bölümü olacaktır. Bu şekilde elde edilen osilasyonun genliği istenildiği seviyeye kadar yükseltilebilecektir. Yükseltilecek gerilim diyot ve kondansatör bloğu ile doğrultularak anahtarlanmak üzere DC olarak bekletilecektir.

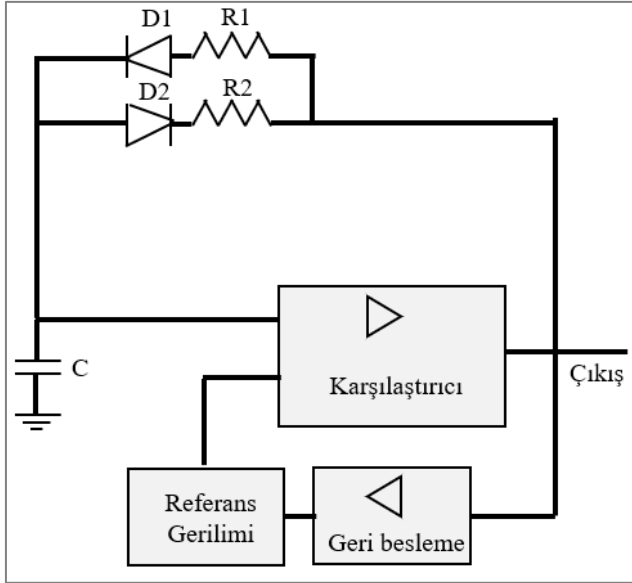


Şekil 4.3. Pozitif ve negatif gerilim doğrultma devresi blok gösterimi

Şekil 4.3’de gösterildiği gibi pozitif ve negatif gerilimler transformatör sekonder kısımlarından alınarak doğrultulduktan sonra DC gerilimleri elde edilecektir. DC gerilimler anahtarlanmak üzere anahtarlama devresine aktarılacaktır. Bu iki gerilimin referans noktaları birleştirilerek çıkış gerilimi için ortak uç olarak kullanılacaktır. Diğer uçlar anahtarlama devresi için anahtarlama elemanından darbe ile çıkışa aktarılacaktır.

4.3. Darbe Sinyallerinin Elde Edilmesi

Bir YDT için ızgara birimine pozitif gerilim uygulanarak elektron geçişinin zamanları önemlidir. Bu zamanlama YDT cihazının çalışacağı yere göre değişiklik göstermektedir. Izgara Modülatör bu darbeyi TTL (transistor to transistor logic) seviyesinde dışardan alarak bu zamana göre yüksek gerilimlerini anahtarlama suretiyle çalışacaktır. Bu zamanlar YDT kullanım türüne göre çok uzun zamanlar olacaktır. Özellikle negatif gerilim dışarıya aktarılacağı süre çoğu uygulamada daha uzun olacaktır. Bu sinyalin bir transformatörden aktarılması zorlaşacaktır. Bu uzun süreli darbenin yerine darbe içerisine de birden fazla darbe üreterek kullanılacak anahtarlama elemanının kapı kondansatörü istenilen seviyede istenilen süre kadar doldurulacaktır.



Şekil 4.4. Darbe Osilatör devresi blok şema gösterimi

Dışarıdan verilen ve YDT elektron geçirme ve durdurma süresini belirleyecek ana darbe sinyalinin açık (ON) süresi ve kapalı (OFF) süreleri için ayrı ayrı darbe osilatörleri kullanılacaktır. Şekil 4.4’de kullanılacak darbe osilatör yapısının blok şema gösterimi verilmiştir. Bu yapıda bir kondansatörün direnç üzerinden dolması ve bir direnç üzerinden boşalması ile bir sinyal elde edilmektedir. Kondansatör dolma boşalma eğrileri ile edilen üçgen sinyalin karşılaştırılması ile darbe sinyalleri üretilecektir. Ancak her darbe osilatör, kendi zaman aralığında çalışarak anahtarlama elemanını sürecektir.

Ana darbe sinyalinin açık süresi boyunca birinci darbe osilatörü, kapalı süresi boyunca da ikinci darbe osilatörü aktifleşecektir. Bu darbelerin frekans değeri kullanılacak anahtarlama elemanın yapısına göre belirlenebilecektir.

$$V_{e1} = V \cdot \left[1 - e^{\frac{-t_1}{R_1 C}} \right] \quad (4.2)$$

$$V_{e2} = V \cdot \left[e^{\frac{-t_2}{R_2 C}} \right] \quad (4.3)$$

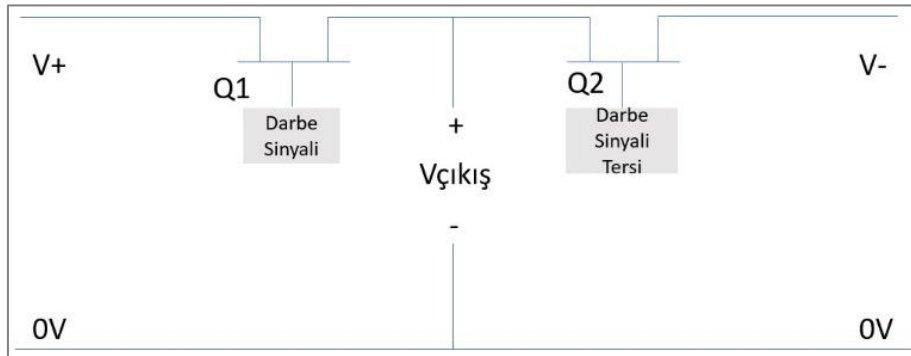
Osilatör devresinde, R ve C elemanlarının özelliklerinden faydalananarak osilasyon oluşturulmuştur. Kondansatörün dolma ve boşalma özelliği darbe osilatörün frekansını belirleyecektir. D₁ diyotu aktif iken R₁ direnci üzerinden C kondansatörü dolacaktır. D₂ diyotu aktif iken R₂ üzerinden C kondansatörü boşalacaktır. Kondansatör, karşılaştırıcı

çıkışından dolma ve boşalma işini yapacağı için kullanılacak karşılaştırmacı elemanın çıkış gerilimleri de önemli olacaktır. Karşılaştırmacı referans gerilimi de kendi çıkışına bağlanarak bir pozitif geri besleme yapılmış olacak ve bu şekilde karşılaştırmacı elemana referans olarak verilen gerilimin sürekli değişmesi sağlanacaktır.

Eş. 4.2 ve Eş. 4.3 kullanılarak elde edilecek sinyalin darbe süresi ve periyodu ayarlanabilecektir. Bu denklemlerde V_{e1} gerilimi kondansatörün dolacağı gerilim seviyesidir ve karşılaştırmacı çıkışından pozitif gerilim alınırken oluşacak V referans gerilim değeri kadar olacaktır. V_{e2} gerilimi ise kondansatörün boşalarak düşeceği gerilim seviyesidir. Bu gerilimin değeri de karşılaştırmacının çıkış gerilimine bağlı olarak değişecektir.

Darbe osilatör devresinde kondansatörün dolduğu süre boyunca karşılaştırmacı çıkışında darbe belirecektir. Kondansatörün boşaldığı süre boyunca da karşılaştırmacı çıkışında toprak gerilimi olan 0 V olacaktır. Darbe süresi, bu darbenin ızgara anahtarlama bölümüne aktarılması için önemli bir faktördür. Kullanılacak transformatör nüvesinin seçimi bu darbe süresine bağlı olarak seçilecektir. Bu şekilde darbe şekli itibari ile bir bozulma yaşamadan yüksek gerilim bloğuna aktarılabilir.

4.4. Anahtarlama Devresinin Tasarımı



Şekil 4.5. Anahtarlama devresi tasarımı blok gösterimi-1

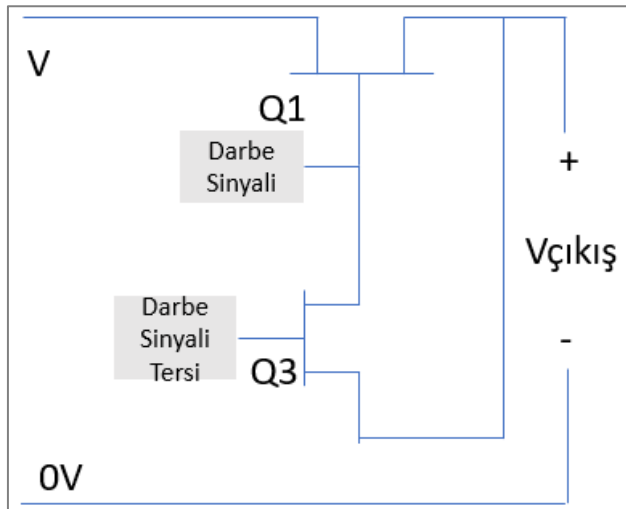
Anahtarlama devresi ızgara modülatörün çıkış bölümünü oluşturacak devresidir. Anahtarlama devresinin temel gösterimi Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Devrenin temel görevi çıkışına pozitif gerilim ya da negatif gerilimi aktarmaktır. Bu gerilimi aktarırken sistemin sağlığını etkileyecek bazı kriterler mevcuttur. Aynı anda iki anahtarın da açılmaması ve her an yalnızca birinin açık olması gerekmektedir. Aynı zamanda açık olması

istenilen anahtarın zamanlamasının doğru ayarlanması ve açık olması gerektiği sürece açık kalması gerekecektir.

Aynı anda iki anahtarın açılmaması için darbe osilatörden gelen sinyallerin birbirinin tersi şeklinde çalışacağı için iki anahtar aynı anda açılmayacaktır. Açık kalması gerektiği sürece istenilen anahtarlama elemanına tetik verileceği için bu zaman süresince açık kalacaktır.

Pozitif ve negatif gerilimin çıkışa aktarılacağı süreler uzun olacağı için darbe osilatör sinyallerinin uzunluğu çok uzun tutulamamaktadır. Bu durum anahtarlama elemanı için darbelerle birlikte dolu kalacak şekilde bir eleman seçmeye yönlendirmektedir. Burada anahtarlama elemanları MOSFET (metal oxide field effect transistor) olarak seçilmiştir. Bu transistörlerin kapı kondansatörleri mevcuttur ve darbelerle birlikte dolu kalacaktır. Ancak kondansatörlerin değeri çok yüksek olursa doldurma süresi ve MOSFET anahtarın açma süresi de uzun olacaktır. Bu değer sistemin çıkış anahtarlanmış geriliminde çok önemli yükselme zamanı ve darbe gecikme süresi gibi parametrelerin değerlerini belirleyecektir.

Hızlı bir şekilde anahtarlamanın sağlanması için Q1 ve Q2 anahtarlama elemanları SCT10N120 SiC (silikon karbür) MOSFET transistörü seçilmiştir. Bu transistör çeşidinin giriş kapı kondansatör değeri çok yüksek olmayan bir seviyede olduğu için seçilmiştir.

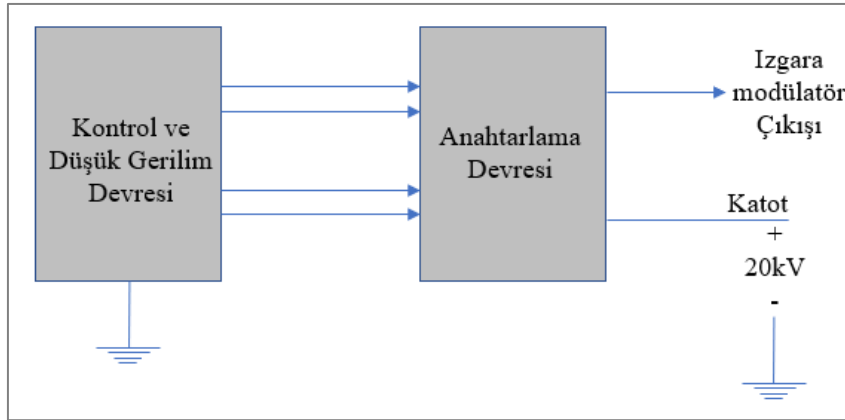


Şekil 4.6. Anahtarlama devresi tasarımı blok gösterimi-2

Dolu kalan kapı kondansatör değeri transistörlerin kapatma süresini uzatacaktır. Bunun için Şekil 4.6'da yer alan Q3 transistörü gibi boşaltma anahtarları kullanılmıştır. Boşaltma transistörleri tetikleme sinyalinin tersi ile sürüldüğü için negatif sinyalin çıkışa

aktarılaçağı zaman pozitif gerilimi bloklayan Q1 transistörünün kapı gerilimi bu Q3 boşaltma transistörü ile sıfır gerilime düşürülecektir. Aynı şekilde pozitif gerilim çıkışa aktarılaçağı zaman da negatif gerilim süren transistörün kapı gerilimi sıfıra düşürülecektir. Bu şekilde çıkışa gerilimleri aktaracak anahtarlama elemanları aynı anda çıkışa ilgili gerilimi göndermemiş olacaktır. Senkron bir şekilde çalışarak iki anahtarlama elemanında zaman ekseninde çakışma olamadan sürülmesi sağlanmış olacak. Olası bir pozitif gerilim ile negatif gerilim arasındaki kısa devre durumu engellenmiş ve istenilen ideal anahtarlama düzeni kurulmuş olacaktır.

5. İZOLASYON VE YÜKSEK GERİLİM



Şekil 5.1. İzgara modülatör izolasyon yapısı

Izgara modülatör tasarımı gerilim seviyesi farkı olarak iki bölümden oluşmaktadır. Bu iki bölüm, sistem toprağına bağlı bölüm ve yüksek gerilim referanslı bölüm olarak ayrılmaktadır. Şekil 5.1’de ızgara modülatörün toprağı ve kontrol devresine göre izole olduğu izolasyon yapısı gösterilmektedir.

5.1. İzolasyon İçin Kullanılan Transformatörler

YDT katot gerilimi sistemin toprak bağlantısına yani helisine göre yüksek gerilim olacağı Şekil 5.1’de gösterilmektedir. İzgara modülatör çıkış ve anahtarlama bloğu da tümüyle bu katot gerilimi üzerinde olacaktır. İzgara modülatör katot gerilimi üzerinde bulunan devre bölümü ve düşük gerilim-kontrol bölümleri birbirinden tamamen izole olması gerekmektedir.

Izgara modülatörün bu iki bölümü birbirinden izole etmek için kullanılacak optokuplör ve transformatör gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. İzolasyon seviyeleri itibarı ile 20 kV seviyelerine çıksa da gerilim yükseltme özelliğı olmadığı için optokuplörler gibi izolasyon yöntemleri bu tasarım için tercih edilmemiştir. Bunun yerine yüksek gerilimlere çıkma ve elektriksel olarak yalıtkan olan transformatörlü yöntem tercih edilmiştir. Yüksek gerilim bölümü ile kontrol bölümünün tümü transformatör ile bağlanmıştır.

Pozitif gerilim ve negatif gerilim için sekonder sarımları sayısı fazla olacak şekilde transformatör kullanılmıştır. Aynı şekilde bu transformatörlerin anahtarlama için

kullanılacak transistörlerin darbeli bir şekilde sürülmesi için de transformatör kullanılmıştır. Transformatörlerin primer ve sekonder kısımları yüksek gerilim kablolar kullanılarak hazırlanmıştır. Transformatör sarımları Fluorinated Ethylene Propylene (FEP) malzemesinden yapılan ve yaklaşık 20 kV gerilim seviyesinde izolasyon sağlayan iletkenler ile sarılmıştır. Primer ve sekonder sarımları aynı tür malzemeden sarıldığı için iki iletken arasındaki toplam izolasyon 40 kV olacaktır.

5.2. İzolasyon İçin Kullanılan Malzemeler

Izgara modülatör yüksek gerilim bloğu da toprağa ve sistemin şasesine göre ark atlama tehlikesi oluşacaktır. Izgara modülatörün çıkışları tasarım adımı belirlendiği gibi yüksek gerilim referanslı çalışacaktır. Izgara modülatör üzerinden toprağa ve sistemin şasesine göre ark atlama tehlikesi oluşacaktır. Izgara modülatöre ve sistemin geri kalanına zararın engellenmesi için izolasyon ihtiyacı olacaktır. YDT katot gerilimi üzerinde anahtarlama yapılacağı için İzolasyon miktarı kullanılacak YDT türüne göre değişecektir.

Izgara modülatörün yüksek gerilim kısmında bulunan baskı devre kartı, iletken yollar, bağlantı noktaları ve kullanılan kablo gibi iletkenler toprağa göre izolasyon miktarını yüksek olması gerekecektir. Katot gerilimi bu iletkenler üzerinden toprağa kısa devre olması durumunda 20 kV gerilim ızgara modülatör üzerinden kısa devre olacaktır. Bu kısa devre olma durumu ark şeklinde gerçekleşecektir.

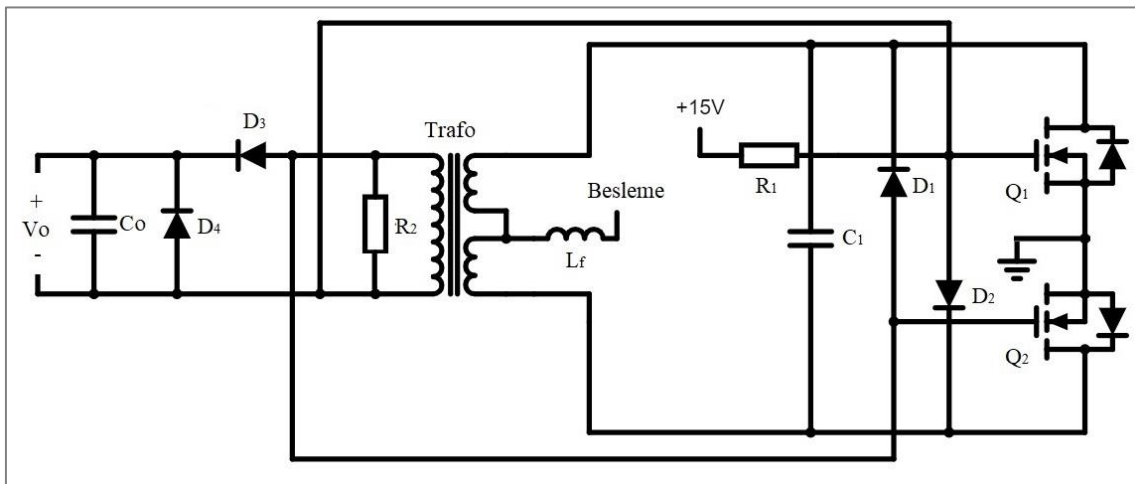
Sistem içerisinde şaseye olan hava aralıklarının tamamının başka bir malzeme ile değiştirilmiştir. Bu malzemenin dielektrik değerinin milimetredeki izolasyon değeri 20 kV üzerinde olması gerekecektir. Bu dielektrik değerine göre kullanılacak malzemeler silikon bazlı malzemeler, yağ ve gaz türü malzemeler olacaktır. Yağ ve gaz malzemeleri sistem için sızdırmazlık sorunu da doğuracağı için bu malzemeler tercih edilmemiştir. Silikon bazlı malzemelerin de izolasyonun yüksek olmasının yanı sıra termal iletkenliğinin de yüksek olması ihtiyacı vardır. Bu parametrelere Beep 6108 kodlu silikon alaşımlı potalama malzemesi seçilmiştir.

Izgara modülatör yüksek gerilim kısımları ile helis arasına seçilen izolasyon malzemesi ile sıvı bir şekilde doldurulmuştur. Sıvı hali vakum altında havası alınmak suretiyle izolasyon seviyesi artırılarak kullanılmıştır.

6. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Tasarım adımımda belirlenen bloklara göre sistemin işleyişi ve işlevsel kabiliyetlerinin değerlendirilebilmesi için benzetim çalışmaları yürütülmüştür. Izgara modülatörü oluşturacak alt birimlerin birbirinden bağımsız olarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları sırasında kullanılan birimlerin ve elemanların nasıl seçildiği değerlendirilmiştir. Benzetim çalışmaları sonuçları grafik ve parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir.

6.1. Osilatör Devresi Benzetim Çalışmaları



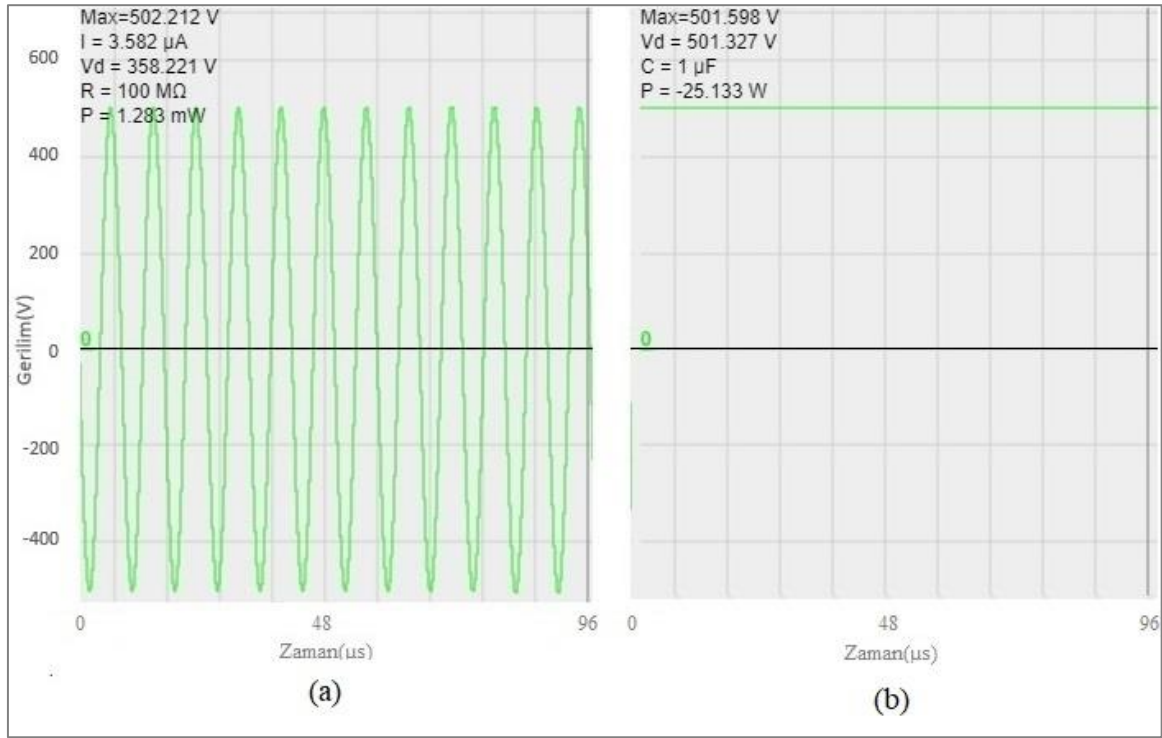
Şekil 6.1. Osilatör devresi benzetim çalışması

Pozitif ve negatif gerilimlerin üretilmesinde kullanılmak üzere tasarım adımı belirlenen osilatör devresi Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Benzetim çalışmasında transformatör olarak gösterilen birimin primeri L endüktansı ile C_1 elemanları osilasyonu oluşturacak elemanlar olarak belirlendi. Q_1 ve Q_2 transistörlerinin kapı gerilimleri için üçüncü bir sargı gerekirken benzetim çalışması üzerinde okuma kolaylığı için transformatörün sekonder gerilimi, kapı gerilimleri olarak verilmiştir. Izgara modülatörün gerçekleşmesi sırasında kullanılmayacak olsa da benzetim çalışmasında ölçüm alabilmek için R_2 direnci eklenmiştir. Transformatör çıkışındaki alternatif akım sinyali bu direnç üzerinden gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmasında yer alan Q_1 , Q_2 , D_1 , D_2 , D_3 , D_4 yarı iletken malzemeleri ideal malzemeler olarak seçilmiştir.

Benzetim çalışmasında sistemin giriş ve çıkışlarına göre elde edilen değerler ve manipüle edilecek parametreler belirlenmiştir. Sistem parametrelerine göre değişen frekans ve gerilim genlik değerleri gözlemlenmiştir. Osilatör bobini aynı zamanda transformatör primeri olacağı için buradaki tur ve endüktans değişimi transformatör sekonder gerilimini ve oluşacak frekansı nasıl etkilediği belirlendi.

Osilatör devresinin değerleri, ızgara modülatörün çalışacağı frekans aralıklarına bağlı olarak belirlenmiştir. Osilatör devresinin benzetim çalışmasında yer alan, yarı iletkenler ve pasif elemanların değerleri, devrenin gerçekleşmesi sırasında başlangıç değerleri seçildi. Transformator, bobin ve kondansatör için seçilecek malzemeler benzetim çalışması üzerinden ideal değerler olarak belirlendi.

6.2. Osilatör Devresi Benzetim Çalışması Sonuçları



Şekil 6.2. Osilatör devresi benzetim çalışmaları sonuçları (a) Osilatör devresi transformatör sekonderi sonuçları (b) Doğrultulan DC gerilim

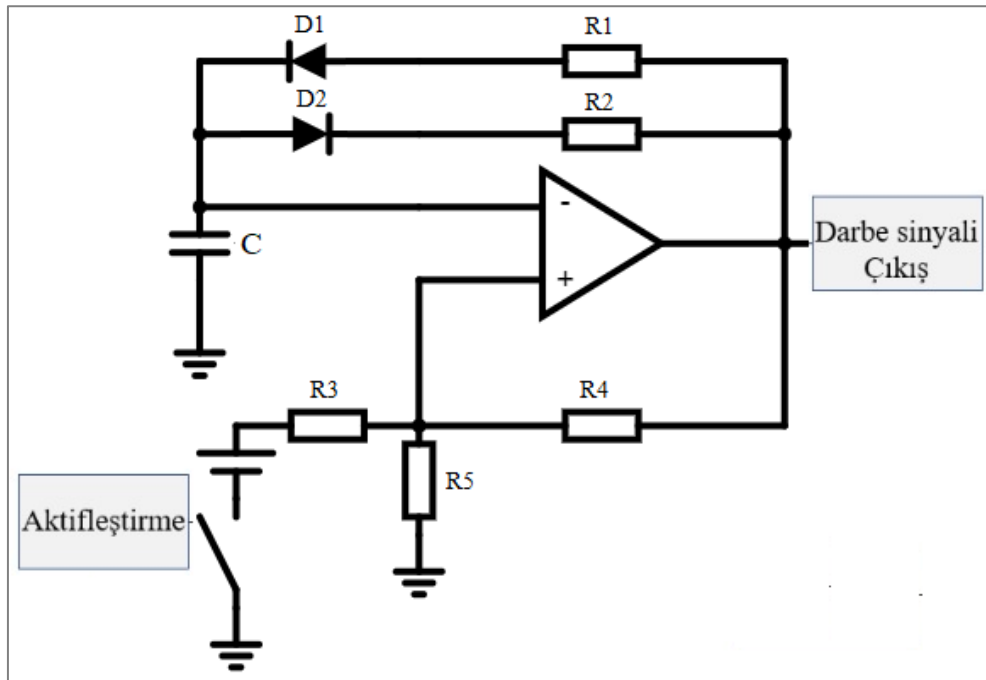
Pozitif gerilim ve negatif gerilimler 500 V seviyesinde yüksek değerde gerilimlerdir. Bu yüksek gerilim seviyesine çıkılabilmek için transformator kullanılmıştır. Bu sinyalin transformator aktarılabilmesi için AC olarak üretilmesi gerekmektedir.

Benzetim çalışmalarında osilatör devresi kurularak AC sinyal üretilmiştir. AC sinyal transformatörden aktarılarak 500 V seviyesine yükseltilmiştir. Yükseltileen gerilim DC sinyale çevrilerek ızgara modülatör çıkışına aktarılmak üzere hazır bekletilmektedir. Transformatör sekonderinden elde edilen ve doğrultulan sinyallerin benzetim sonuçları Şekil 6.2’de gösterilmektedir. Tepe değeri 500 V olan AC gerilim ve doğrultulan DC gerilim görülmektedir.

Benzetim çalışması içerisinde LC osilatör devresi beslemesi 15 V olarak verildiğinde 500 V elde edilmektedir. Giriş besleme geriliminin genlik seviyesi kontrol edilerek transformatör primerinde oluşacak AC sinyalin genliği ve dolayısı ile sekonderinden elde edilen AC sinyalin de gerilimi kontrol edilmiştir. Bu besleme gerilimin kontrolü ile 100 VDC ve 500 VDC arasında gerilimi ayarlandığı çalışmada gözlemlenmiştir.

Pozitif gerilim ve negatif gerilimlerin ikisi için de kullanılacak osilatör devresinde L ve C elemanları değiştirilerek frekans değişimi gözlemlenmiştir. Şekil 6.2’de gösterilen AC sinyalin frekansı yaklaşık 100 kHz seviyesindedir. Tasarım adımımda seçilen L ve C değerleri ile yaklaşık beklenen sonuçlar elde edilmiştir.

6.3. Darbe Osilatör Devresi Benzetim Çalışmaları



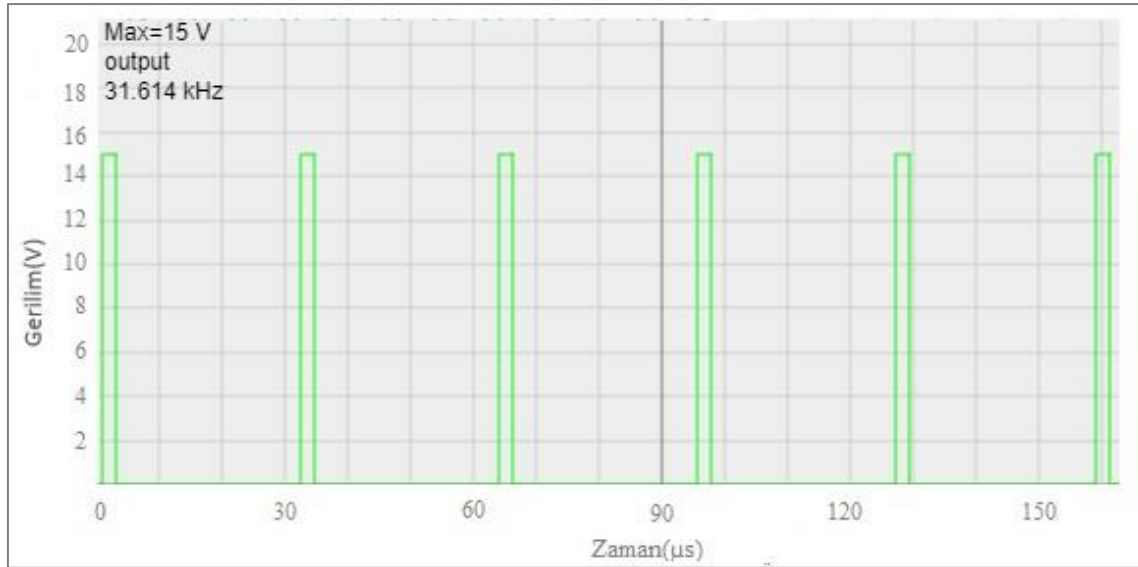
Şekil 6.3. Darbe osilatör devresi benzetim çalışması

Tasarım adımı belirlenen darbe osilatör devresinin benzetim çalışması Şekil 6.3’de gösterilmektedir. Darbe osilatör devresinin aktifleştirme ve çıkış sinyallerinin birlikte gözlemlenebilmesi için birlikte monitörlenmiştir. Benzetim çalışması içerisinde aktifleştirme sinyali bir anahtar olarak belirlenmiştir. Aktifleştirme sinyali darbe osilatörü aktif hale getirmek için kullanılmak üzere manuel olarak yer almaktadır. Pozitif gerilimin anahtarlanması ve negatif gerilimin anahtarlanması için ayrı ayrı kullanılacak darbe osilatörlerin kontrolü benzetim bu şekilde bulunmaktadır. Kullanılacak karşılaştırma elemanının referans geriliminin açılıp kapanması ile kontrol sağlanmıştır. Karşılaştırmacı Op-amp olarak ideal bir eleman kullanılmıştır.

Op-amp elemanının beslemesi ve bu elemanın pozitif bacağına gelecek referans gerilimi darbe osilatörün çıkışında frekans ve darbelerin uzunluğunu nasıl değiştirdiği gözlemlendi. Referans gerilimi 15 V ve op-amp beslemesi de aynı şekilde 15 V olarak benzetim gerçekleştirildi. Tasarımda belirtilen referans değişikliği de bu şekilde gözlemlendi. Op-amp ideal olarak seçildiği için op-amp çıkışında besleme gerilimi eksiksiz olarak çıkmaktadır. Bu durum oluşacak değerlerden uzak sonuçlar elde edilmeye sebep olacaktır.

R_1 , R_2 ve R_3 , R_4 , R_5 ve C elemanları üzerindeki değişiklikler benzetim çalışması sonuçlarında etkisi gözlemlendi. Op-amp çıkışının durumuna göre R_3 , R_4 , ve R_5 elemanlarının birbirlerine göre durumlarının değişimi sonuçlar üzerinde incelendi.

6.4. Darbe Osilatör Devresi Benzetim Çalışması Sonuçları



Şekil 6.4. Darbe osilatör devresi benzetim çalışması sonuçları

Şekil 6.3’de darbe osilatör devresinin çıkışlarından elde edilen, ızgara modülatör çıkışlarını süren transistörlerin kapılarına uygulanacak darbe sinyali Şekil 6.4’de gösterilmektedir. Darbe süreleri ve darbenin periyodu için kurulan devreye uygun şekilde sonuçlar elde edilmiştir. Benzetim çalışması sonuçlarına göre 33 μs periyodunda (30 kHz) darbe sinyali çıkış alınmaktadır. Bu sonuç negatif gerilim anahtarlanması için kullanılacak darbe frekansıdır. Aynı şekilde pozitif gerilimin anahtarlanması için de benzetimi gerçekleştirilmiştir.

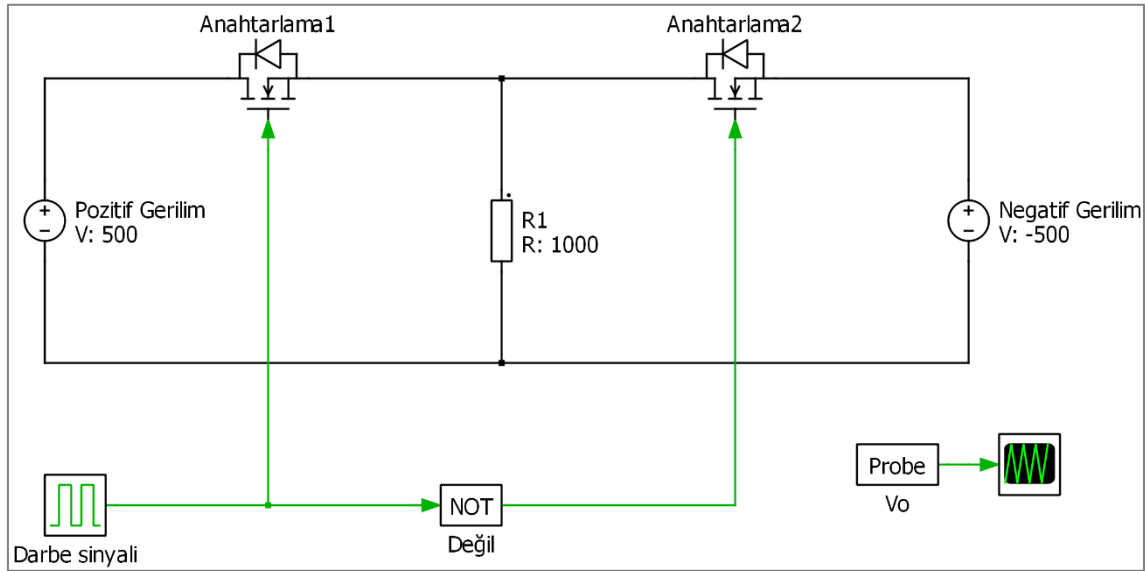
Benzetim çalışması ortamında kullanılan op-amp’ın besleme gerilimleri gerçekte olacağı gibi 0 V ve 15 V olarak uygulanmıştır. Bu seviyeler ızgara modülatör anahtarlama devresinde kullanılacak transistörün giriş kondansatörünü dolu tutabilmek için seçilen seviyelerdir.

Pozitif ve negatif çıkış gerilimlerinin anahtarlanması için birbirinden farklı frekanslarda osilatör devreleri kullanılmıştır. Pozitif çıkış gerilimin anahtarlanması için 70 kHz ve negatif çıkış gerilimin anahtarlanması için 30 kHz değerleri hedeflenmiştir. Pozitif gerilim için hedeflenen frekans ve darbe sürelerine $R_1=40\ \Omega$, $R_2=1,8\ k\Omega$ ve $C=1\ nF$ değerleri ile ulaşılabilmektedir. Negatif gerilim için hedeflenen frekans ve darbe sürelerine $R_1=220\ k\Omega$, $R_2=3\ k\Omega$ ve $C=1\ nF$ değerleri ile ulaşılabilmektedir.

Devre üzerinde frekansa ve periyoda doğrudan etki eden diğer direnç elemanları da çalışma üzerinde sabit tutulmuştur. Kondansatörün dolma ve boşalma zamanlarına etki etmese de referans gerilimini oluşturacak bu elemanlar enerji tüketiminin az olması için $R_3=1\text{ k}\Omega$, $R_4=10\text{ k}\Omega$ ve $R_5=1\text{ k}\Omega$ olarak seçilmiştir.

Benzetim çalışması kapsamında kurulan devre üzerinde belirtilen bu elektronik elemanlar devre gerçekleştirirken ilk değerler olarak başlamak için seçilmiştir. Devre gerçekleştirirken bu elektronik elemanların değerleri değiştirilerek yaklaşık frekans değerinin istenilen değer yaklaştırılması sağlanmıştır.

6.5. Anahtarlama Devresi Benzetim Çalışmaları



Şekil 6.5. Anahtarlama devresi benzetim çalışması

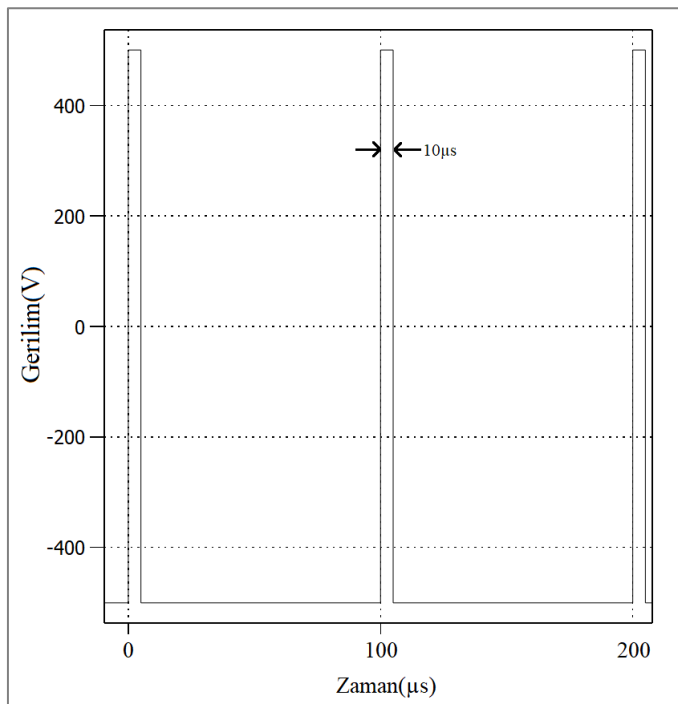
Izgara modülatör devresinin çıkış katında bulunacak pozitif ve negatif gerilimin çıkışa aktarılmasını ve anahtarlama devresini sağlayacak devrenin benzetim çalışması Şekil 6.5’de gösterilmektedir. Burada benzetim çalışmasında kullanılan anahtarlama elemanı parametreleri doğrudan kullanılmıştır. Anahtarlama elemanının giriş kapasitans değeri ve iç direnci gibi performansı etkileyecek değerler, tasarım adımıyla seçilen anahtarlama elemanının değerlerine göre bu çalışmada kullanıldı. Anahtarlama devresine giriş olarak verilecek DC gerilimler, çalışmanın sadeleşmesi için AC gerilimden elde edilmek yerine doğrudan DC gerilim kaynakları kullanılarak üretilmiştir.

Anahtarlama devresinde kullanılan transistörlerin kapı uçlarına darbe osilatör devresinin çıkışlarının benzetimi olarak bir darbe sinyali verilmiştir. Pozitif gerilim darbesinin geldiğinde negatif gerilim ile çakışmaması ve susması için darbe sinyalinin tersi diğer anahtarlama transistörünün kapısına uygulanmıştır. Bu çalışma ile ideal bir anahtarlama devresi oluşturulmuştur.

Benzetim çalışması içerisinde DC gerilim kaynaklarının referans noktaları birleştirilmiştir. Diğer uçlarına anahtarlama elemanları bağlanmıştır. Anahtarlama elemanlarının, anahtarlayacakları gerilimin pozitif ya da negatif olmasına göre bağlantıları kurulmuştur. Bu şekilde ızgara modülatör çıkışında pozitif ya da negatif gerilimler anahtarlama elemanlarının kontrolü ile belirecektir. Anahtarlama elemanlarının kontrolü, darbe sinyalini temsilen darbe sinyal üretici ve bu sinyalin tersi ile sağlanmıştır.

Anahtarlama devresinin ortasında yer alan R_1 aynı zamanda Izgara modülatörün çıkışı olarak alınmıştır. Çıkış sinyali bu direnç üzerinden gözlemlenmiştir. Çıkış gerilimlerinin darbe sinyaline uygun anahtarlanması ve çıkış pozitif-negatif gerilimlerin kararlı ve sıralı bir şekilde elde edildiğinin gözlemlenmesi için darbe ve çıkış gerilimleri izlenmiştir.

6.6. Anahtarlama Devresi Benzetim Çalışması Sonuçları



Şekil 6.6. Anahtarlama devresi benzetim çalışması sonuçları

Anahtarlama devresi çalışmasından elde edilen sonuçlar Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Bu sinyal aynı zamanda ızgara modülatörün de çıkış sinyalidir. Periyodu 100 μ s ve görev çevrimi %10 olacak şekilde darbe kontrol sinyali uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Değişik frekans ve görev çevrimleri için çıkış sinyalinde pozitif ve negatif gerilimlerin süreleri uygun şekilde ayarlandığı gözlemlenmiştir.

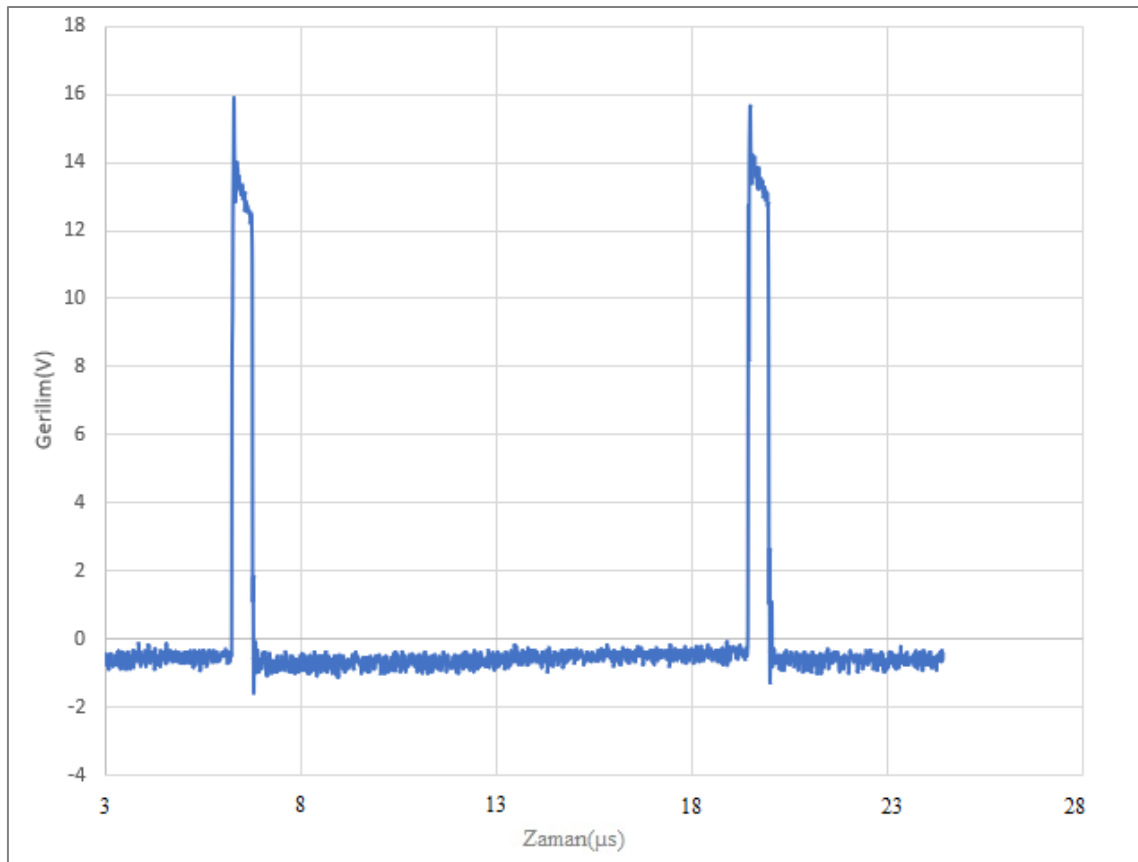
Benzetim çalışması üzerinde parametreler değiştirilerek tasarımda karşılaşılabilecek durumlar takip edilmiştir. Çıkış sinyalinde kapasitif etkiler göz önünde bulundurularak kondansatör eklenmiş ve sinyallerde bir bozulma gözlemlenmemiştir. Aynı şekilde anahtarlama elemanlarının iç dirençleri gibi parametrelerinin değişimi ile çıkışta bir bozulma olmadığı gözlemlenmiştir. Benzetim çalışması üzerinde değiştirilen bu gibi parametreler, kullanılacak elektronik elemanların seçimi ve kullanılması konusunda bilgi vermektedir.

Benzetim çalışmaları sonuçlarına göre anahtarlama yapısının tasarıma uygun bir şekilde istenilen frekansta ve görev çevriminde çalışacağı sonucuna ulaşılmaktadır.

7. ÖLÇÜM SONUÇLARI

Izgara modülatör, tasarıma uygun bir şekilde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Üç adet baskı devre kartı ile gerçekleştirilmiştir. Yürüyen dalga tüpleri kullanılabilirliği için yüksek gerilimlerin anahtarlanması, pozitif gerilim ayarlanması, negatif gerilimin ayarlanması ve görev çevriminin ayarlanabilmesi gibi çeşitli ölçümler alınmıştır.

7.1. Pozitif Gerilim İçin Darbe Sinyali



Şekil 7.1. Pozitif darbe sinyali deneysel sonuçları

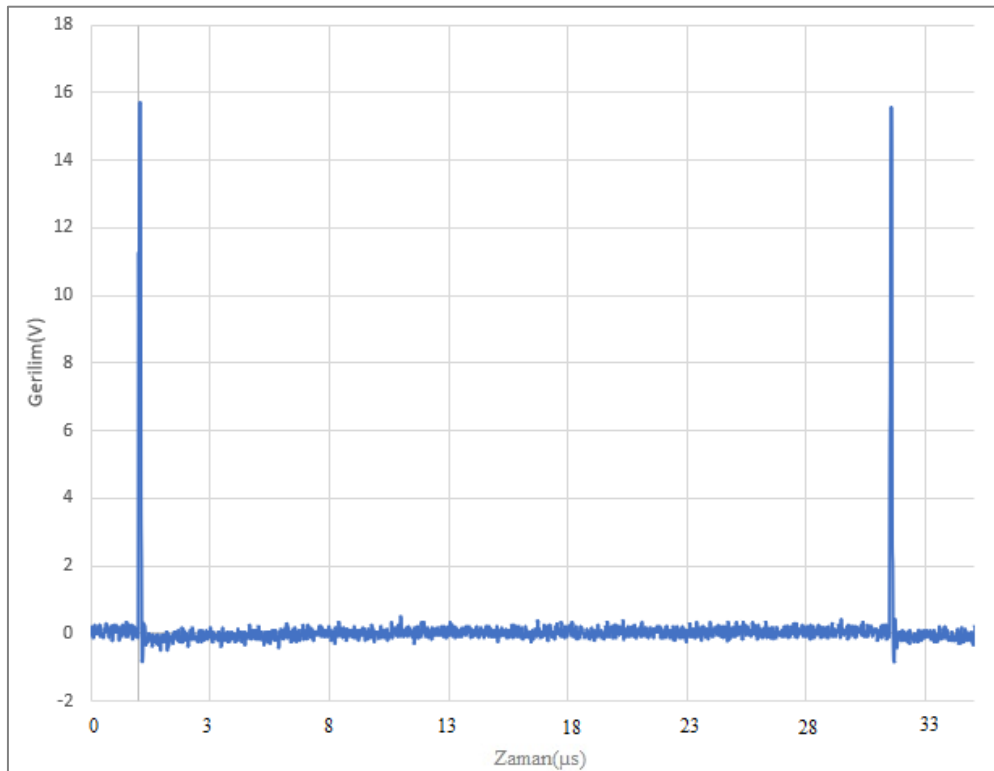
Pozitif darbe sinyali, pozitif geriliminin ızgara modülatör çıkışına aktarılması için kullanılacak sinyaldir. Şekil 7.1’de darbe osilatör devresinin çıkışından alınan darbe sinyali gösterilmektedir. Bu sinyal Izgara modülatör çıkışında pozitif gerilimi anahtarlayacak anahtarlama elemanını sürecektir. Osiloskop ile osilatör devresinin çıkışından 75 kHz olarak ölçülmüştür.

Izgara modülatörün kullanılacağı yere göre pozitif darbe sinyalinin frekansı değiştirilebilir. Izgara modülatör çıkışında pozitif gerilimin süresine göre bu frekans istenildiği gibi

ayarlanabilecektir. Pozitif gerilimin sürekliliğinin sağlanabilmesi için pozitif gerilim süresince birkaç kez anahtarlama elemanının tetiklenmesi gerekmektedir. Bir radar için pozitif gerilim süresi negatif gerilime göre çok daha kısa olacağı için 75 kHz seviyesi yeterli olacaktır. Pozitif gerilim süresinin çok daha kısa süreceği uygulamalar için bu frekans değeri yükseltilerek pozitif gerilimin sürekliliği sağlanacaktır.

Darbelerin genlik seviyesi kullanılan entegre devrelere uygun olarak 15 V seviyesindedir. Benzetim çalışmasında daha net bir şekilde 15 V olarak gözükse de burada kullanılan entegre devre ve çevre etkileri ile genlik seviyesinde 16 V seviyesine bir tepe yaptığı görülmektedir. Anahtarlama elemanlarının tam açılma gerilimi 5 V olduğu için bu tepe seviyesinin değişmesinin bir olumsuz etkisi olmamıştır. Bu seviye çıkışta kullanılan anahtarlama elemanlarına göre ayarlanmıştır. Darbe osilatör devresinden 15 V olarak elde edilen bu darbeler bir transformatörden aktarılmış ve genlik seviyesi korunmuştur. Pozitif ve negatif darbe sinyallerinin ikisi de aynı şekilde kullanılarak anahtarlama elemanlarına aynı seviyede gerilimler ile sürülmüştür.

7.2. Negatif Gerilim İçin Darbe Sinyali



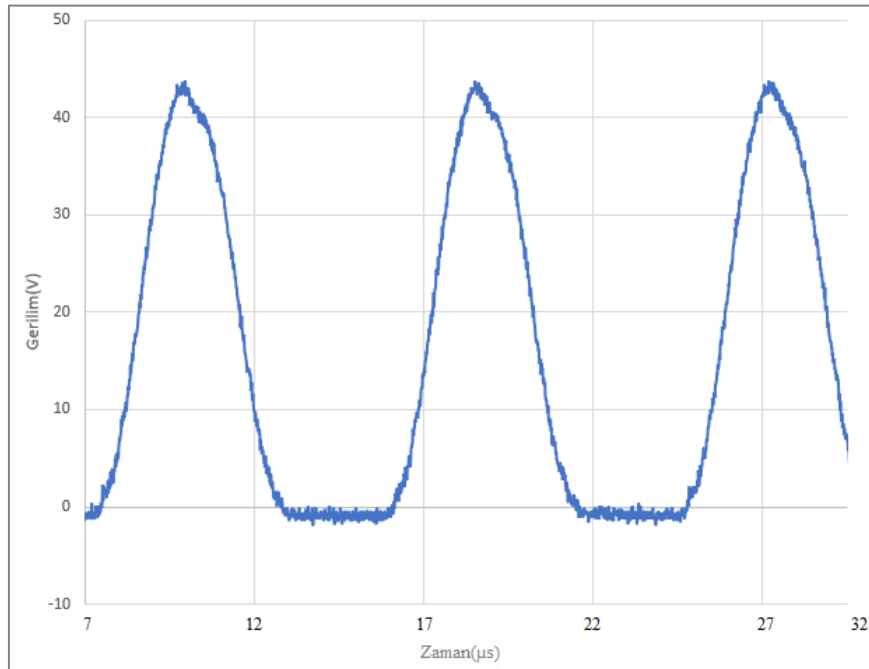
Şekil 7.2. Negatif darbe sinyali deneysel sonuçları

Negatif gerilimin çıkışa aktarılması için kullanılacak anahtarlama elemanını sürececek olan darbe sinyali Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Darbe osilatör devresinin çıkışından osiloskop ile ölçüm alınmıştır. Negatif darbe frekansı Şekil 7.2’de gösterildiği üzere 31 kHz olarak ölçülmüştür. Kullanılan entegre devrelerin eşik değeri ile birlikte hesaplanan değere yakın bir değer ölçülmüştür.

Izgara modülatörün negatif darbe frekansı kullanılacağı yere göre değiştirilebilir. Izgara modülatör çıkışında negatif sinyalin uzunluğuna göre bu değer ile çıkışın sürekliliği sağlanabilecektir. Negatif gerilim süresinin uzun olması durumunda çok daha düşük frekanslar yeterli olacak iken kısaldıkça frekansı yükseltmek daha yararlı olacaktır.

Bir darbe radarı için negatif gerilimin süresi çok daha uzun süreceği için negatif gerilim boyunca birkaç darbe gelmesi gerekecektir. Negatif gerilimin çıkışa kararlı bir şekilde iletilmesi için 30 kHz değeri yeterli olacaktır.

7.3. Negatif Gerilim ve Pozitif Gerilim Osilasyon Sinyalleri



Şekil 7.3. Pozitif ve negatif osilasyon sinyali deneysel sonuçları

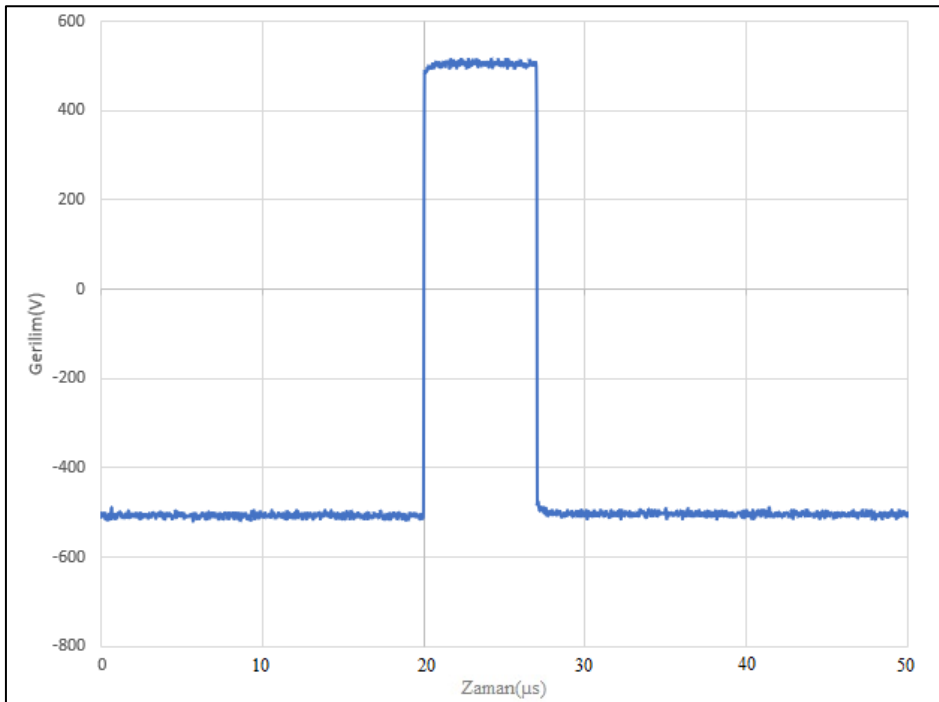
Pozitif gerilimi ve negatif gerilimi oluşturan osilatör devresinden elde edilen osilasyon sinyali Şekil 7.3’de gösterilmektedir. Osilatör devresi üzerine takılacak ölçü aletinin kondansatör etkisi yüzünden ölçüm değerlerinin doğruluğu azalacaktır. Osilatör devresi, LC

osilatör olduğu için ölçüm aletlerinin etkisini azaltmak adına yarım dalga üzerinden ölçüm alınmıştır. Ölçüm düşük seviyelerden alınması için osilasyonu oluşturan devrenin çıkışı yani transformatör primerinden alınmıştır. Şekil 7.3’de görüleceği gibi osilasyon frekans değeri 115 kHz olarak ölçülmüştür:

Osilatör devresinden iki adet kullanılarak pozitif ve negatif gerilimlerin genlik değeri birbirinden bağımsız olarak ayarlanmıştır. Osilatörden elde edilen gerilimler bir transformatör ile ızgara modülatör genlik seviyelerine yükseltilmiştir. Transformatör sekonderinde oluşan gerilim doğrultulduktan sonra çıkışa aktararak çıkış gerilimlerini oluşturmuştur.

Birbinin benzeri iki adet osilatör devresi için frekanslar birbirine yakın tutulmuştur. Osilatör devrelerinde kullanılan bobinler kaçak akılar üzerinden birbirlerini etkilediği gözlemlenmiştir. Osilasyonların genliği diğer osilatör devresinin bobininden etkilenerek değişmiştir. Bu genlik değişimi ile ızgara modülatör çıkış gerilimleri ayarlanan değerden uzaklaştırmıştır. Bu sebep ile osilatör devreleri frekansları değiştirilmiş ve bobinleri birbirinden uzaklaştırılmıştır.

7.4. Anahtarlama

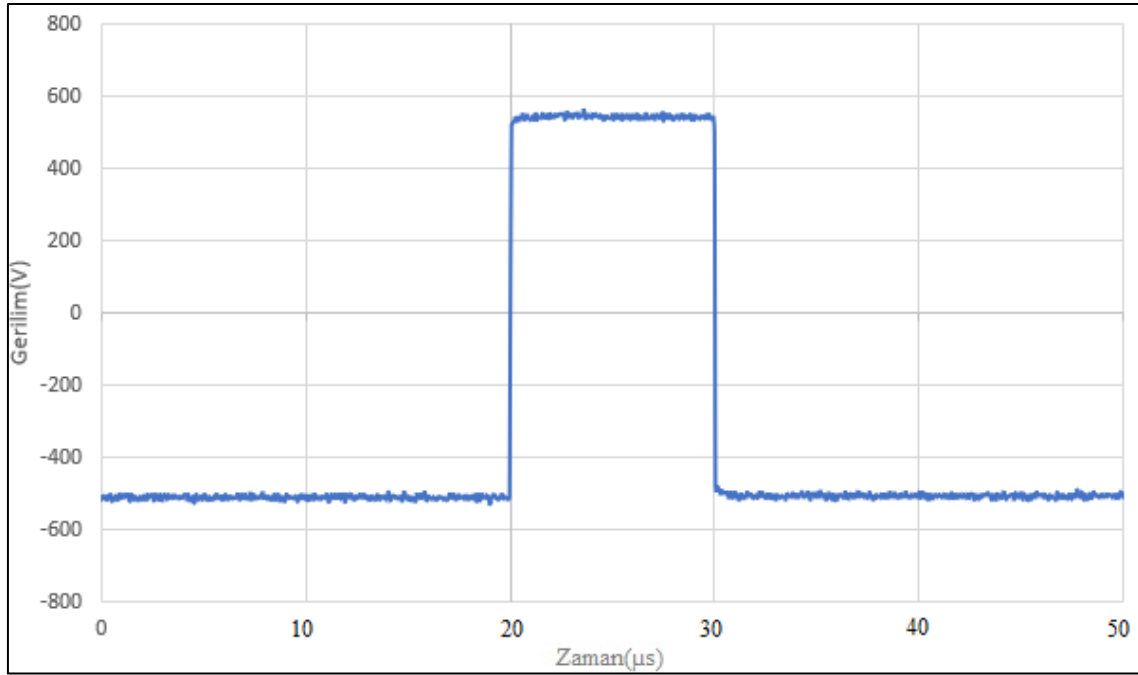


Şekil 7.4. ızgara modülatör çıkışı anahtarlama deneysel sonuçları

Izgara modölatörün temel görevi olan yüksek gerilimlerin anahtarlanması için elde edilen sonuçlar Şekil 7.4’de gösterilmektedir. Izgara modölatör girişinden TTL seviyesinde sinyal uygulanmıştır. Izgara modölatör çıkışından elde edilen anahtarlanmış yüksek gerilim de aynı sürede olduğu gözlemlenmiştir. Çıkış gerilimi kontrol sinyalinin değişimini takip edecek şekilde değişmiş ve anahtarlanmıştır.

Osilatör devresinden elde edilen sinüs sinyalinin doğrultularak oluşturan DC gerilim seviyeleri ölçülmüştür. Pozitif ve negatif gerilimler anahtarlama ile DC seviyelerini koruyarak çıkışa aktarılmıştır. YDT’nin elektron kontrolünü sağlayacak şekilde pozitif gerilimin ve negatif gerilimlerin sırayla çıkışa aktarıldığı Şekil 7.4’de görölmektedir.

7.4.1. Düşük frekans ve düşük görev çevriminde anahtarlama



Şekil 7.5. Düşük frekans ve düşük görev çevrimi için ızgara modölatör çıkışı deneysel sonuçları (1 kHz, %1)

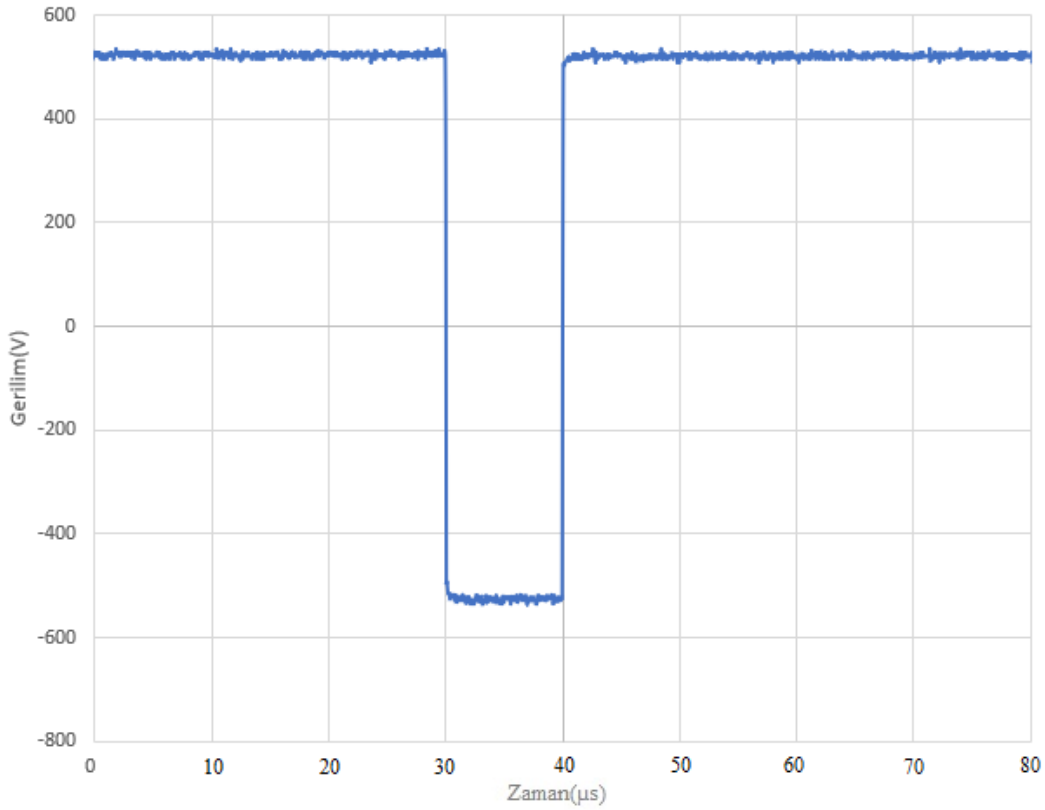
Izgara modölatör girişine TTL kontrol girişi olarak 1 kHz ve %1 görev çevrimi uygulanmıştır. Buna göre Şekil 7.5’de ızgara modölatörün düşük frekans ve düşük görev çevrimi için elde edilen çıkış gerilimi deneysel sonuçları görölmektedir. Pozitif ve negatif gerilim için en yüksek değerlerde anahtarlama yapılmıştır. Pozitif gerilim süresi 10 μs ve negatif gerilim süresi 990 μs olarak ölçülmüştür. Uygulanan kontrol sinyaline uygun

sürelerde anahtarlama gerçekleşmiştir. Pozitif ve negatif gerilim regülasyonları için kararlılığın devamlı olduğu gözlemlenmiştir.

Izgara modülatör düşük frekans ve düşük görev çevrimi için çok daha düşük frekans ve daha düşük görev çevrimlerinde de kararlı çalıştığı gözlemlenmiştir. YDT'ler için düşünüldüğünde açık kalma süresinin kısıtlı olması için ızgara modülatör sınırı 1 kHz ve %1 olarak belirlenmiştir.

Izgara modülatörün düşük frekans ve düşük görev çevrimi modu bir darbe radarı için sıklıkla kullanılabilecek parametreler olduğu için bu değerlerde kararlı çalışması çok önem arz etmektedir. Bu değerlerde ızgara modülatörün gerilim kararlılıklarının yanı sıra yükselme zamanı ve anahtarlama süresindeki değişim gibi diğer önemli parametrelerde de kararlılığını sürdürdüğü gözlemlenmiştir.

7.4.2. Düşük frekans ve yüksek görev çevriminde anahtarlama

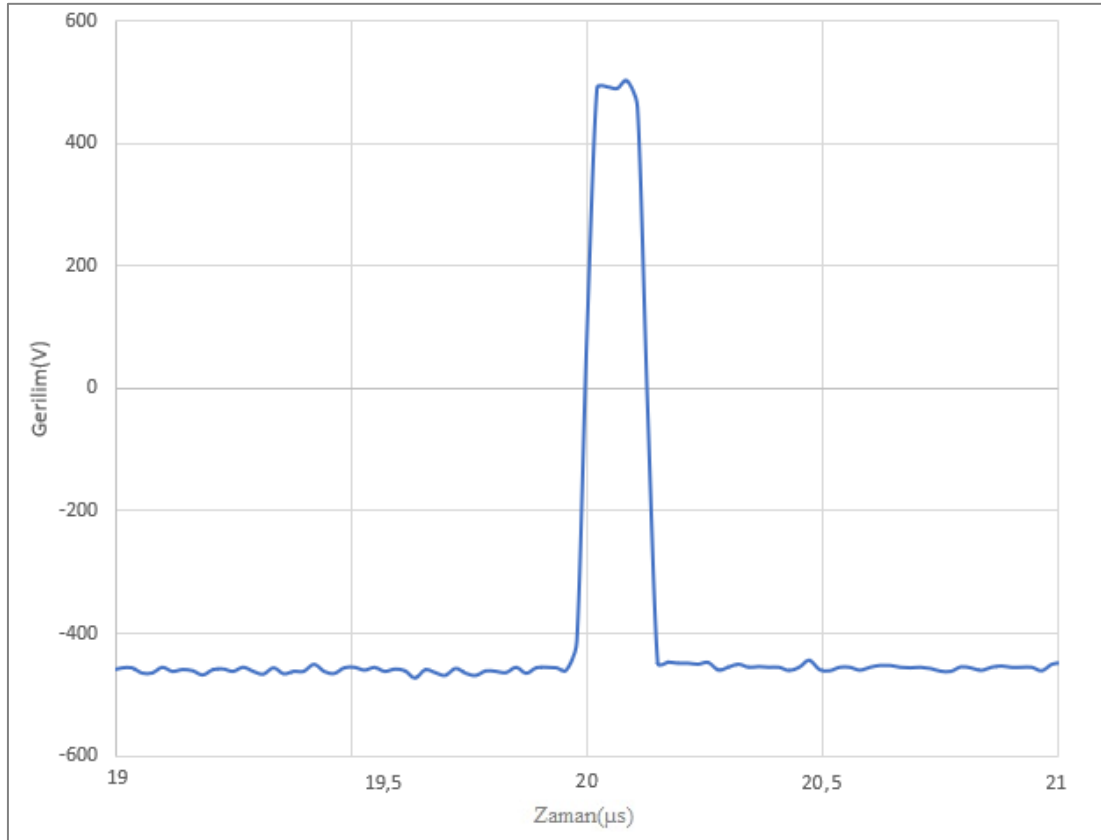


Şekil 7.6. Düşük frekans ve yüksek görev çevrimi için ızgara modülatör çıkışı deneysel sonuçları (1 kHz, %99)

Izgara modölatör çıkışından düşük frekans ve yüksek görev çevrimi için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 7.6’da gösterilmektedir. Izgara modölatör kontrol sinyal girişinden TTL olarak 1 kHz frekansı için %99 görev çevriminde sinyal uygulanmıştır. Izgara modölatör çıkışından pozitif gerilim ve negatif gerilim için 500 V olan en yüksek değerlerde çıkış elde edilmiştir. Negatif gerilimin çıkışa uygulandığı süre 10 μ s ve pozitif gerilimin çıkışa uygulandığı süre 990 μ s olduğu Şekil 7.6’ da görölmektedir. Pozitif gerilim, çıkışa aktarıldığı bu uzun süre boyunca regölasyonda kararlılığını sürdürmüştür. Pozitif ve negatif gerilim genlik seviyelerinde bir değişme olmadan anahtarlama gerçekleşmiştir.

Izgara modölatör çıkışından düşük frekans ve yüksek görev çevrimi için bir YDT sürebilmek için sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir. Çok daha düşük frekanslar ve yüksek görev çevriminde de aynı performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. 1 kHz ve %99 seviyesi bir YDT için uygulanabilecek değerler olduğu için bu değerler Izgara modölatör için sınır değerler olarak seçilmiştir.

7.4.3. Yüksek frekans ve düşük görev çevriminde anahtarlama



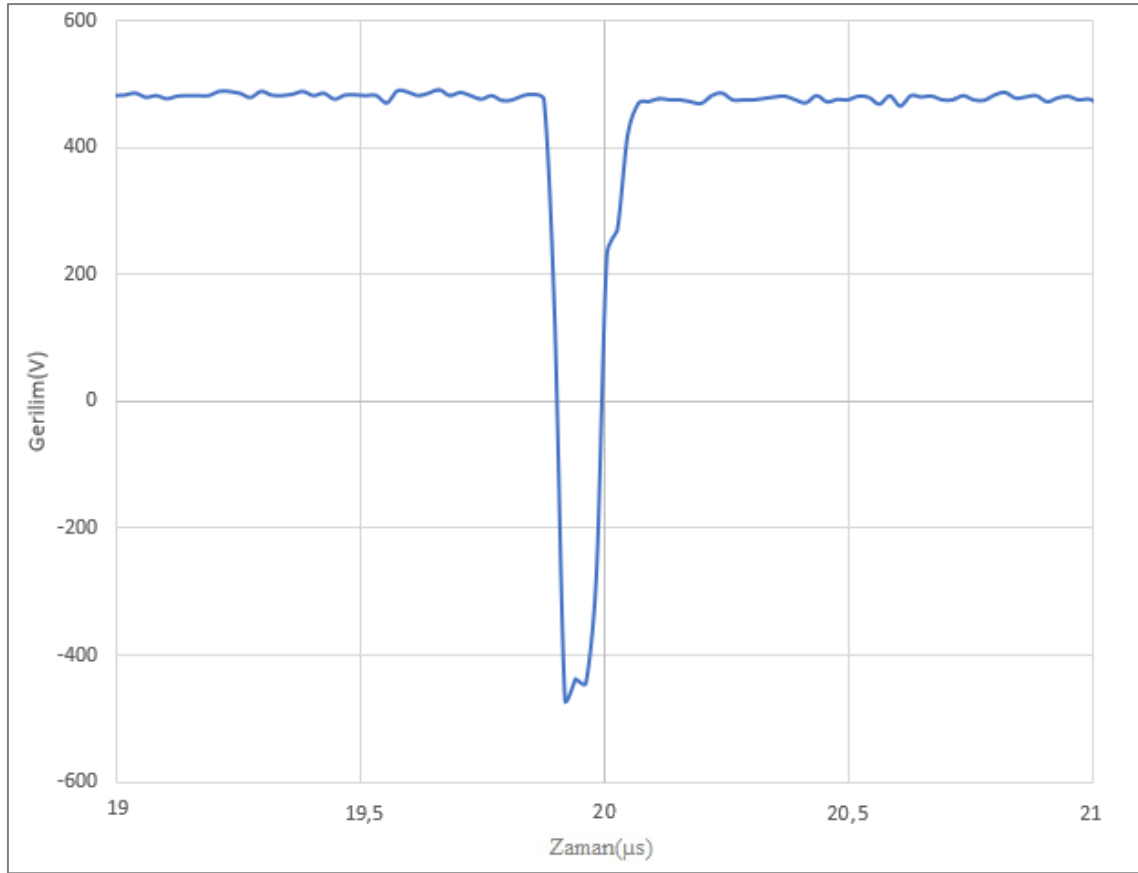
Şekil 7.7. Yüksek frekans ve düşük çevrimi için ızgara modölatör çıkışı deneysel sonuçları (100 kHz,%1)

Şekil 7.7’de ızgara modülatörün yüksek frekans için düşük görev çevrimindeki deneysel sonuçları gösterilmektedir. Pozitif ve negatif gerilimler bu ölçüm için en yüksek değerde tutulmuştur. Düşük görev çevriminde negatif gerilimde, yükselme zamanında ve düşme zamanında bozulma gözlemlenmemiştir. Pozitif gerilimde anahtarlama kaynağı gerilim değerinin sabit kalmadığı gözlemlenmektedir. Burada görev çevrimi kademeli bir şekilde arttırıldığında %2 değerinde gerilimin kararlı yapıda olduğu gözlemlenmiştir. 100 kHz frekansında görev çevrimi için %2 değerinin altında kararlılık bozulmaktadır.

Şekil 7.7’de yer alan pozitif gerilim sonuçları bir YDT için elektron geçişi sırasında düzensizlik oluşturacaktır. Bu yüzden bu ızgara modülatör için 100 kHz %2 sınır değeri olarak belirlenmiştir. Bu değere kadar olan YDT’leri sürebilecektir.

Düşük frekansın aksine yüksek frekansta anahtarlama süresi ve yükselme zamanı çok daha önemli olmaktadır. Bu değerlerin etkisi ile 100 kHz frekansında görev çevrimi daha yüksekte çalıştırılmalıdır. Yüksek tepe gücü olan bu radarlarda düşük görev çevriminin sağlanmaması durumunda hem menzil değişecektir hem de ortalama güç değeri artacaktır.

7.4.4. Yüksek frekans ve yüksek görev çevriminde anahtarlama



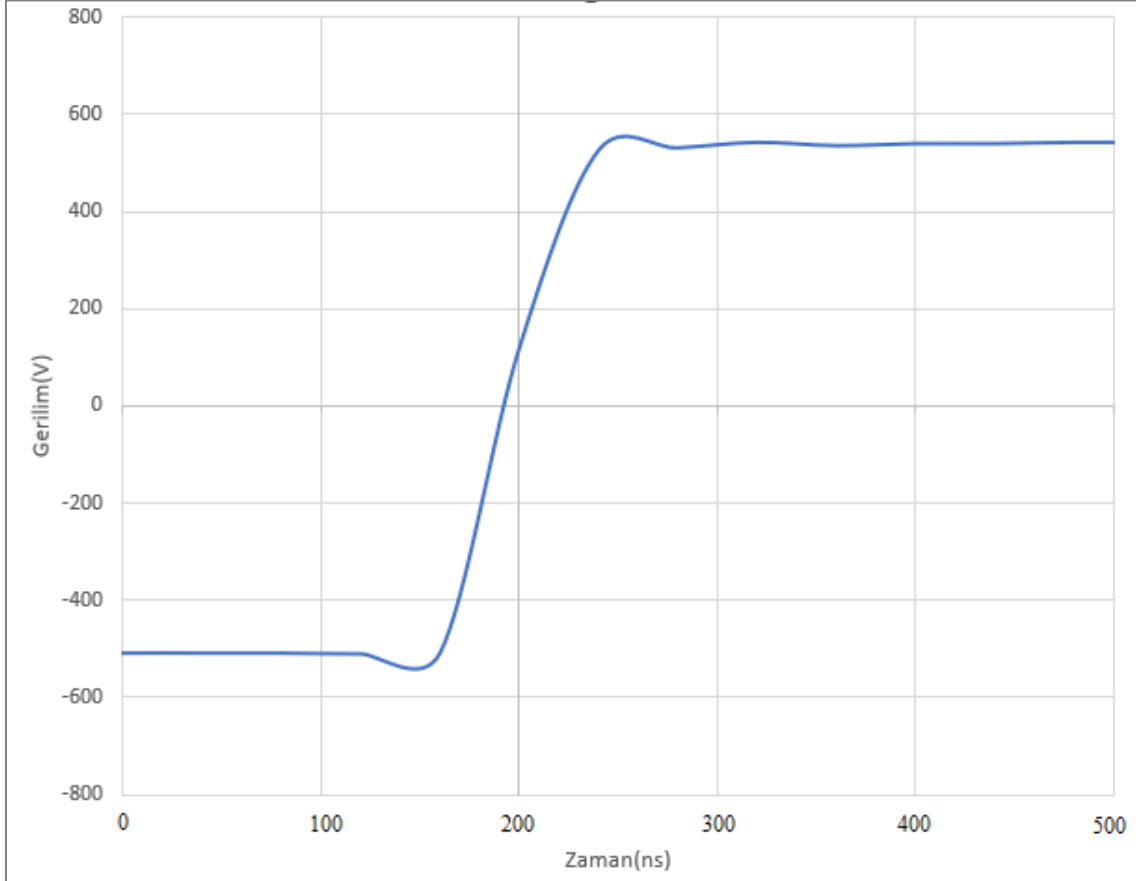
Şekil 7.8. Yüksek frekans ve yüksek görev çevrimi için ızgara modülatör çıkışı deneysel sonuçları (100 kHz, %99)

Izgara modülatör çıkışından yüksek frekans ve yüksek görev çevrimi için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Ölçümler pozitif ve negatif gerilimin en yüksek değerlerinde osiloskop ile alınmıştır. Pozitif gerilim süresince sinyalde bozulma olmazken negatif gerilimde ve düşme sinyalinde anahtarlama kaynaklı bozulmalar gözlemlendi. 100 kHz sinyal için görev çevrimi %95 değerinden sonra negatif gerilim çıkışında kararlılık bozulmaktadır. Kademeli bir şekilde görev çevrimi azaltıldığında %95 değerinde sinyalin kararlılığın sağlandığı gözlemlenmiştir.

Çıkıştan elde edilen bu sinyale göre bir YDT için elektron durdurma konusunda negatif gerilim yetersiz kalacaktır. Buna göre bir YDT için ızgara modülatörün kullanım aralığı yüksek frekans yüksek görev çevrimi için 100 kHz, %95 olarak belirlenmiştir. Bu aralıkta çalışabilecek radarlar elektronik harp için sürekli dalga radarları ve sinyal bozucular

olacaktır. Darbe radarları için %95 değeri çok yüksek bir değer olacaktır. Bu aralıkta ortalama güç yüksek çıkacağı için darbe radarları için uygun olmayacaktır.

7.5. Anahtarlama Sırasındaki Aşma



Şekil 7.9. Anahtarlama sırasındaki aşma değeri deneysel sonuçları

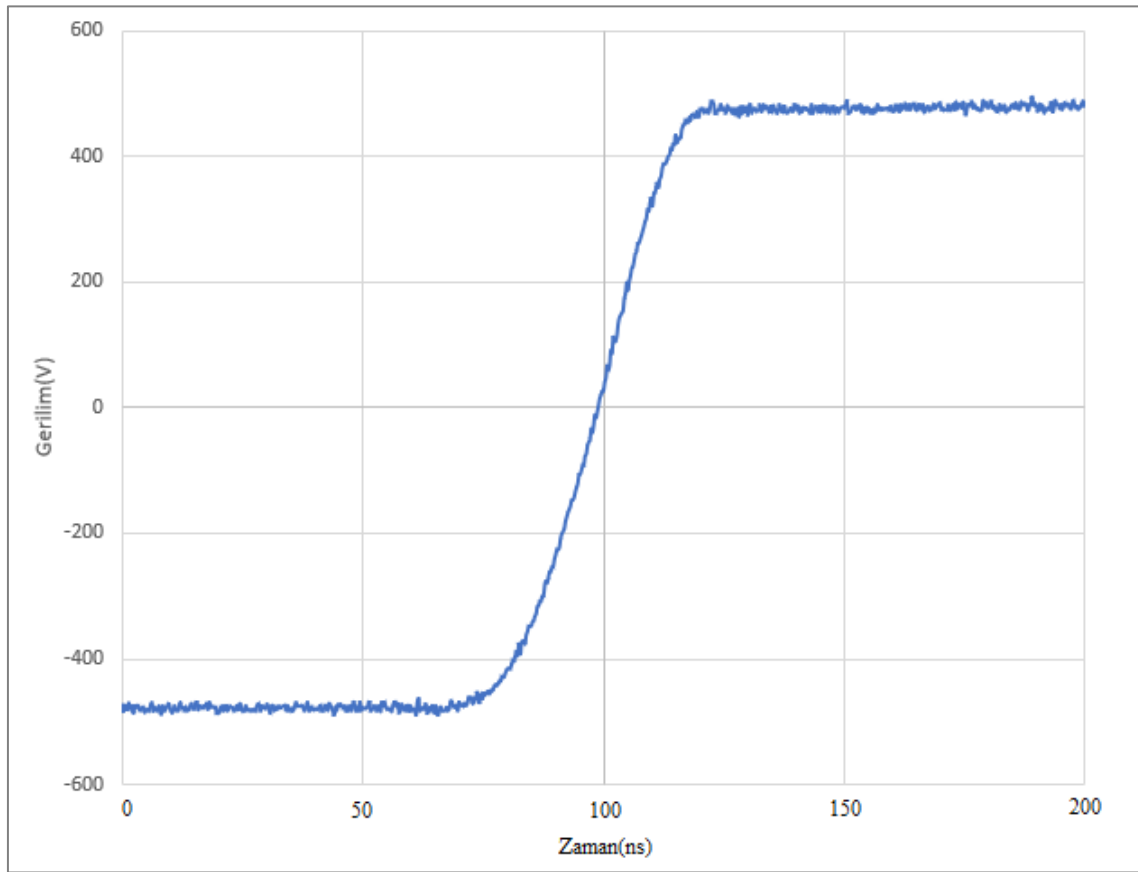
Izgara modülatör çıkışlarında tasarımdan kaynaklı anahtarlama sırasında gerilim seviyelerinde aşma meydana gelmektedir. Izgara modülatör çıkışı için kullanılan anahtarlama elemanlarının sürülmesine bağlı olarak çıkışa aktarılan anahtarlanmış gerilim seviyelerinde değişimler oluşmuştur.

Izgara modülatörün çıkışında anahtarlama ile oluşan aşma miktarı %2,23 olarak ölçülmüştür. Şekil 7.9’da Izgara modülatör çıkışından osiloskop ile elde edilen aşma sonuçları yer almaktadır. Izgara modülatörün en yüksek seviyeleri olan +500 V ve -500 V için ölçüm alınmıştır. Aşma değerinin bilinmesi YDT verimini ve ömrünü etkileyecektir. Aşma değeri negatif gerilim için elektron durdurma seviyesinin daha da altında olacağı için %2,23 aşma miktarının önemi olmayacaktır. Ancak pozitif gerilime anahtarlanırken oluşan

aşma miktarı geçecek elektron miktarını etkileyeceği için YDT türüne göre %2,23 aşma miktarı dikkate alınmalıdır.

YDT türlerine göre Izgara modülatörün aşma miktarının fazla olacağı durumlarda aşma miktarının süresi de önemli olacaktır. Aşma süresi gerilimlerin ayarlanan değere oturma süresi olarak belirlenmiştir. Pozitif ve negatif gerilimlere oturma süreleri eşittir ve 25 ns olarak ölçülmüştür.

7.6. Yüksüz Durumda Yükselme Zamanı



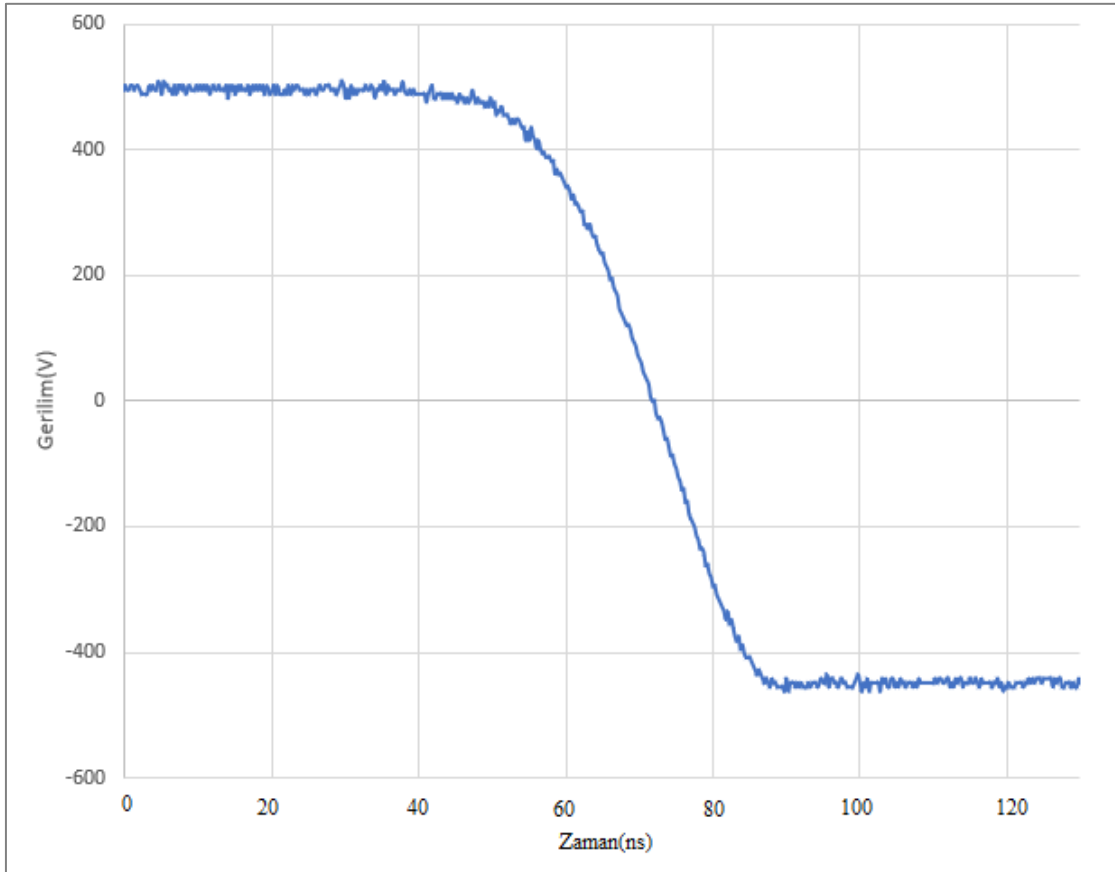
Şekil 7.10. Yüksüz durumda anahtarlama yükselme zamanı deneysel sonuçları

Izgara modülatörün çıkış geriliminin negatif gerilimden pozitif gerilime geçme süresi olan yükselme zamanı Şekil 7.10'da gösterilmektedir. Hiçbir yük bağlanmadan, doğrudan ızgara modülatör çıkışlarından osiloskop ile ölçüm alınmıştır. Yükselme zamanı 28,85 ns olarak ölçülmüştür. Yüksüz olması yüzünden sadece ızgara modülatör anahtarlama tasarımının etkisi ile oluşacak en düşük yükselme süresi bu süredir. YDT ızgara biriminden, değeri çok düşük te olsa bir akım çekileceği için ölçülen bu değer ideal durumdur.

Izgara modölatör çıkış gerilimlerindeki yükselme zamanı, YDT'nin elektron geçirmeye başladığı zamandır. Aynı zamanda helis yapısından aktarılan enerji de bu süre ile başlayacaktır. Bu zamanın uzun olması elektronların lineer bir şekilde uzun süre çekilmesine sebep olacaktır. RF hattındaki kuvvetlendirme de doğrusal olarak gerçekleşecektir. Bu süreyi kısa tutarak elektronları doyuma geçirmek mümkün olacaktır. YDT türüne göre bu sürenin bilinmesi çok önemli olacaktır. Elektronun geçirilmesi ve RF sinyalin aktifleştirilmesi arasındaki senkronizasyon sağlanabilecektir. RF sinyalinin aktifleştirilme süresi de ızgara modölatörün pozitif gerilime geçişinin tam olarak gerçekleştiği zaman olmalıdır. Bu şekilde YDTK çıkışından darbe sinyaline daha yakın sonuç elde edilecektir.

Bir radar için yükselme zamanının bilinmesi ile radar çıkışından elde edilen sinyalin sabit güçte olması sağlanacaktır. Bu şekilde daha temiz bir radar sinyali elde edilir. Çıkan radar darbe sinyalin zaman aralığının bilinmesi algılanan sinyalin de gürültü seviyesinden ayrılmasını kolaylaştıracaktır.

7.7. Yüksüz Durumda Düşme Zamanı



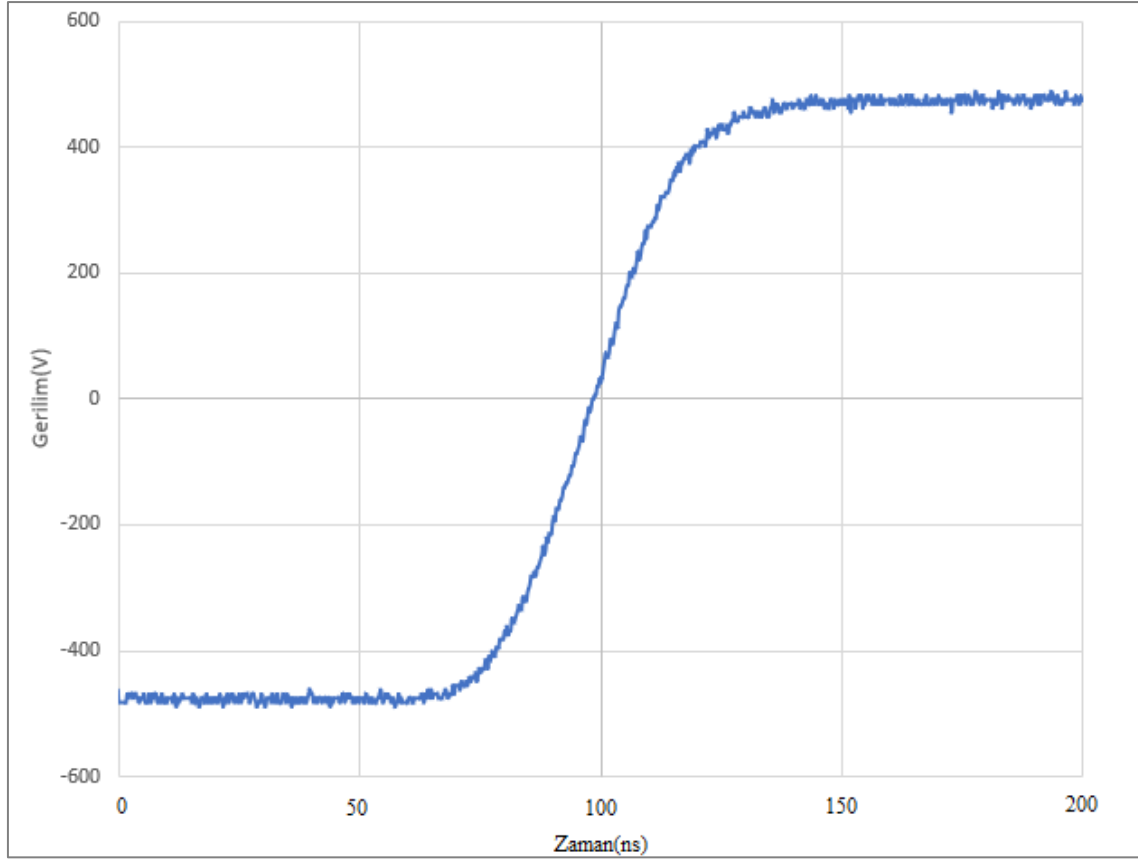
Şekil 7.11. Yüksüz durumda anahtarlama sırasındaki düşme zamanı deneysel sonuçları

Izgara modölatörün çıkış geriliminin pozitif gerilimden negatif gerilime geçme süresi olan düşme zamanı Şekil 7.11’de gösterilmektedir. Izgara modölatör çıkış uçlarına yük bağlanmadan ölçüm alınmıştır. Düşme zamanı osiloskop üzerinden 24,55 ns olarak ölçölmüştür. Yüksüz olarak ölçüm alındığı için sadece anahtarlama için kullanılan tasarımın etkisi ile oluşacak en düşük düşme süresi bu süredir.

Anahtarlama sırasındaki düşme süresi YDT içerisindeki elektron geçişinin durdurulacağı zaman olacağı için bu süre ile RF sinyalinin senkron çalışması gerekecektir. Elektron geçişinin durmaya başladığı zamandan önce RF sinyalinin de kapatılması gerekecektir. YDT RF çıkışı bu sürede elde edilecektir. Aynı zamanda RF sinyalinin uygulanmadığı zamanda elektronların tamamı YDT toplayıcılarına ulaşacaktır. RF hattına enerjisi aktarılmadan toplayıcılara çarpan elektronlar YDT için ısınmaya sebep olacaktır. Soğutma ve verimin önemli olduğu sistemlerde bu durum çok önem arz edecektir.

Bir radar sisteminde ızgara modölatörün düşme süresi, radar anteninin ışıma süresinin biteceğı zaman anlamına gelecektir. Yükselme zamanı ve düşme zamanlarının bilinmesi ile darbe radarında kullanılan darbelerin süresi de daha verimli kullanılacaktır. Giden sinyal ile gelen sinyalin karşılaştırılması, hedefin konumu, hedefin hızı gibi bilgilerde bu sürelerin hesaplanması kolaylaştıracak ve doğruluğunu arttıracaktır.

7.8. Kapasitif Yükler ile Yüklenme Durumu



Şekil 7.12. Kapasitif yüklenme için anahtarlama sırasındaki yükselme zamanı deneysel sonuçları (10 pF)

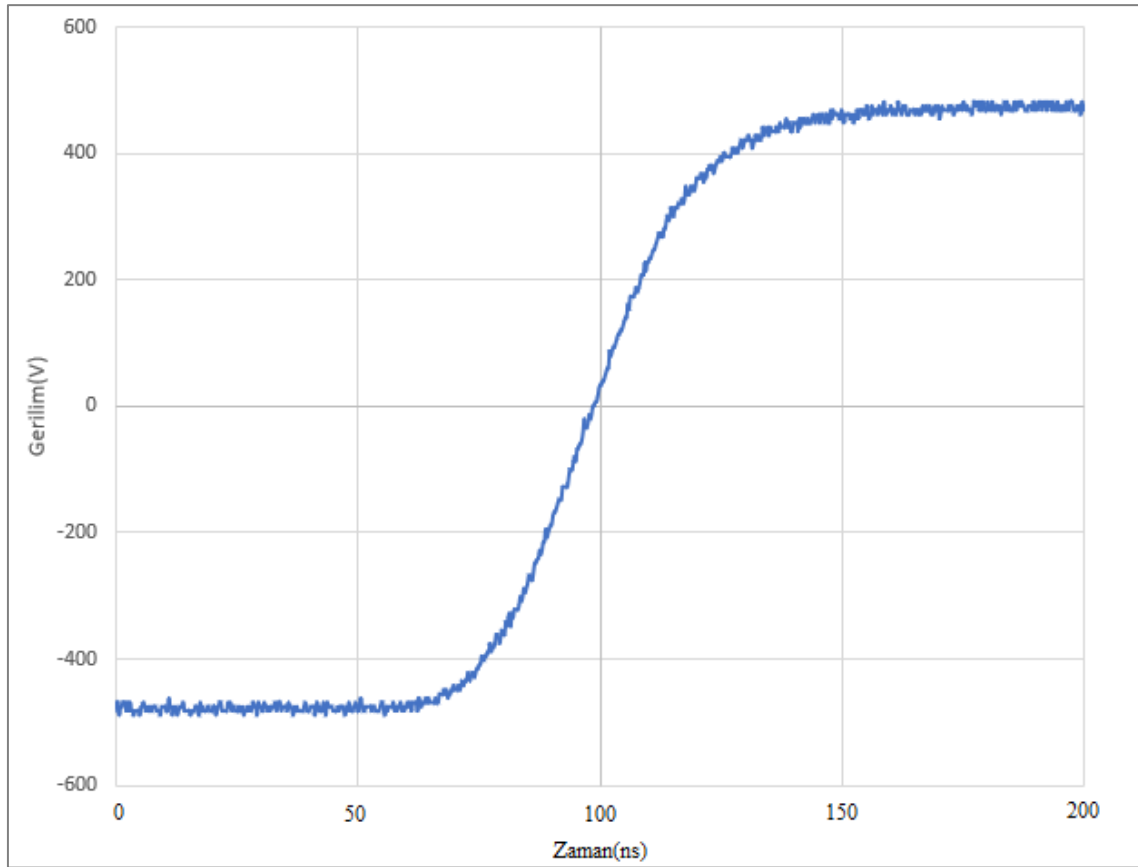
YDT ızgara biriminden çekilecek akımlar yalnızca rezistif yükler olmadığı için ızgara modlatr çıkışı kapasitif yükler ile sonlandırılmıştır. Bu kondansatörler üzerinden ızgara modlatr üzerinden çıkış sinyali ölçümleri alınmıştır.

Şekil 7.12’de ızgara modlatr çıkışı 10 pF kondansatör ile sonlandırıldığında elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Bu kapasitif yük etkisi ile ızgara modlatr çıkışındaki yükselme zamanı değişme gözlemlenmiştir. Yükselme zamanı osiloskop üzerinden 36 ns olarak ölçülmüştür.

Şekil 7.13’de ızgara modlatr çıkışına takılan kapasitans değeri 50 pF ile değiştirildiğinde elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Yükselme zamanındaki sürenin 43 ns seviyesine arttığı osiloskop üzerinden ölçülmüştür.

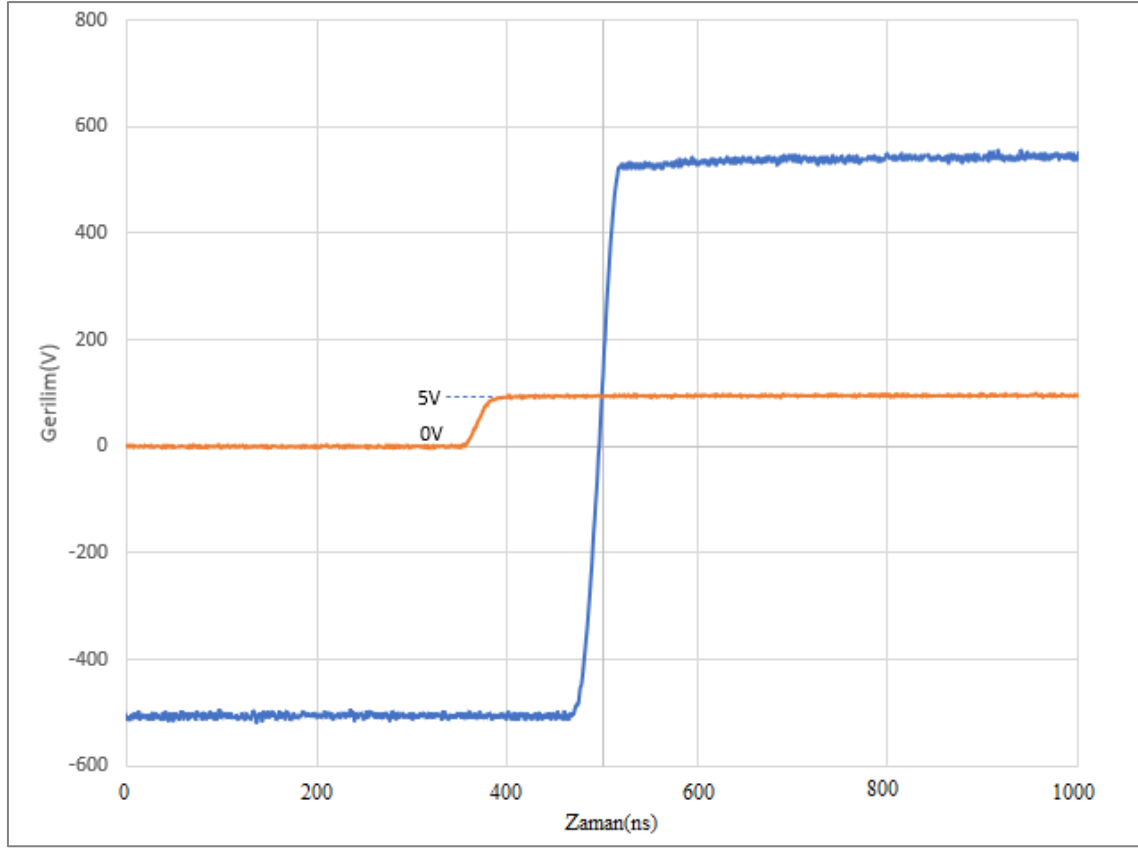
Kondansatörler ile yüklenme durumunda ızgara modülatörün akım gereklerini yerine getirebilme kabiliyeti test edilmiştir. Izgara modülatör çıkışına seri oluşan dirençler ile bu yükselme zamanı daha da artmıştır. Yükselme zamanı bir YDT'ye göre kullanılan seri dirençler ile ayarlanabilmektedir. YDT'ye göre özelleştirilen ızgara modülatörün yükselme zamanının bilinmesi ile YDT'ye uygulanacak RF süresi de rahatlıkla seçilebilir.

Bu kapasitif yükler ızgara modülatör çıkışında pozitif ve negatif gerilimlerin genlik seviyeleri gibi diğer parametrelerde bir değişime sebep olmamıştır.



Şekil 7.13. Kapasitif yüklenme için anahtarlama sırasındaki yükselme zamanı deneysel sonuçları (50 pF)

7.9. Darbe Gecikme Süresi



Şekil 7.14. Kontrol sinyali ve Izgara modülatör çıkışı arasındaki gecikme

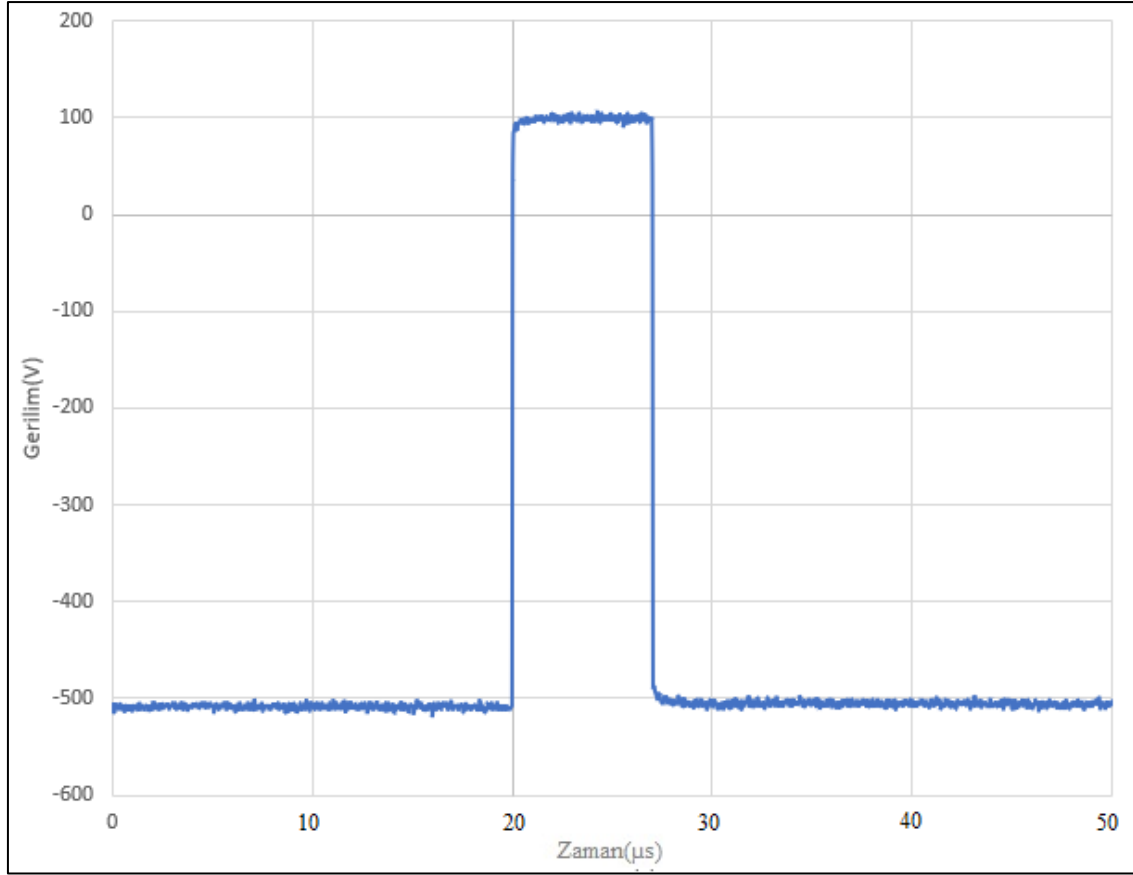
Şekil 7.14’de ızgara kontrol sinyali ve ızgara modülatör çıkışı arasındaki toplam gecikme gösterilmiştir. Kontrol sinyali modülatörün TTL (transistor to transistor logic) giriş ucundan, çıkış sinyali de YDT’nin ızgara ucuna bağlanacak nokta olan ızgara modülatör çıkış noktalarından ölçülmüştür. Bu süre osiloskop üzerinden 128 ns olarak ölçülmüştür.

Izgara modülatörün pozitif geriliminin çıkış sinyal zamanı RF sinyali için de kuvvetlendirilmiş sinyalin çıkış zamanı olabilmektedir. Izgara modülatörün pozitif gerilimin uygulandığı süre içerisinde RF sinyal de YDT RF giriş ucundan uygulanırsa RF çıkışından kuvvetlendirilmiş sinyal elde edilir. RF sinyali ızgara modülatörün pozitif olma süresinden daha sonra verilmesi gerekir. Bu sayede ızgara modülatörün yükselme zamanındaki geçen eksik elektronlar ile kuvvetlendirme yapılmamış olur. Izgara modülatöre uygulanan ızgara kontrol sinyali ile ızgara modülatörün çıkışı arasındaki gecikme bilinerek RF sinyalinin ne zaman uygulanacağı seçilebilecektir.

RF sinyali uygulanmadan ızgara modölatör girişinden kontrol sinyali lojik 1 olarak uygulandığında YDT içerisinde tüm akım toplayıcı plakalarına çarpacaktır. Toplayıcı plakalarına çarpan bu fazla akım miktarı YDT gövdesinde aşırı ısınmalara sebep olacaktır. RF sinyalinin geciktirildiği süre çok uzun tutulursa bu sürede YDT için ortalama sıcaklık da arttırılmış olacaktır. Izgara modölatör girişine uygulanan kontrol sinyali ile çıkışından elde edilen pozitif gerilim arasındaki gecikme sistem ısınması ve YDT ömrü için belirleyici en önemli parametre olacaktır. Izgara kontrol ve RF sinyali arasındaki fark bu süre ile belirlenecektir. Pozitif gerilimin salınım etkileri de göz önünde bulundurularak 128ns değerinden biraz daha fazla bir süre seçilmesi gerekmektedir. Bu ızgara modölatör tasarımı için ızgara kontrol sinyali ile RF sinyali arasında 150 ns fark ile YDT kontrol edilebilir. 150 ns fark ile YDT'nin sıcaklığı çok daha aşağı çekilmiş olacaktır.

Radar sisteminde, RF sinyalinin YDT'den çıktığı zaman bilinerek giden EM dalga ile dönen EM dalga arasındaki hesaplamaların doğruluğu artacaktır. YDT çıkışından RF örneklemeler ile giden dalga zamanı ölçülebilmektedir. Aynı zamanda ızgara modölatöre uygulanan kontrol sinyali ile bu süre doğrulanabilecektir. Bu ızgara modölatör için 150ns seçilmesi durumunda radarın giden EM dalga güç çıkışı da 150 ns sonrası olarak hesaplanabilir. Hedefin menzili hesaplanırken bu süreler de menzilin doğruluğunu arttıracaktır. YDT içerisinde faz gecikmesi de bilinmesi ile tam olarak radar giden dalga süresi bilinir ve hedef konumu tam olarak belirlenir.

7.10. Pozitif Gerilim Regülasyonu ve Ayarlanabilirliği



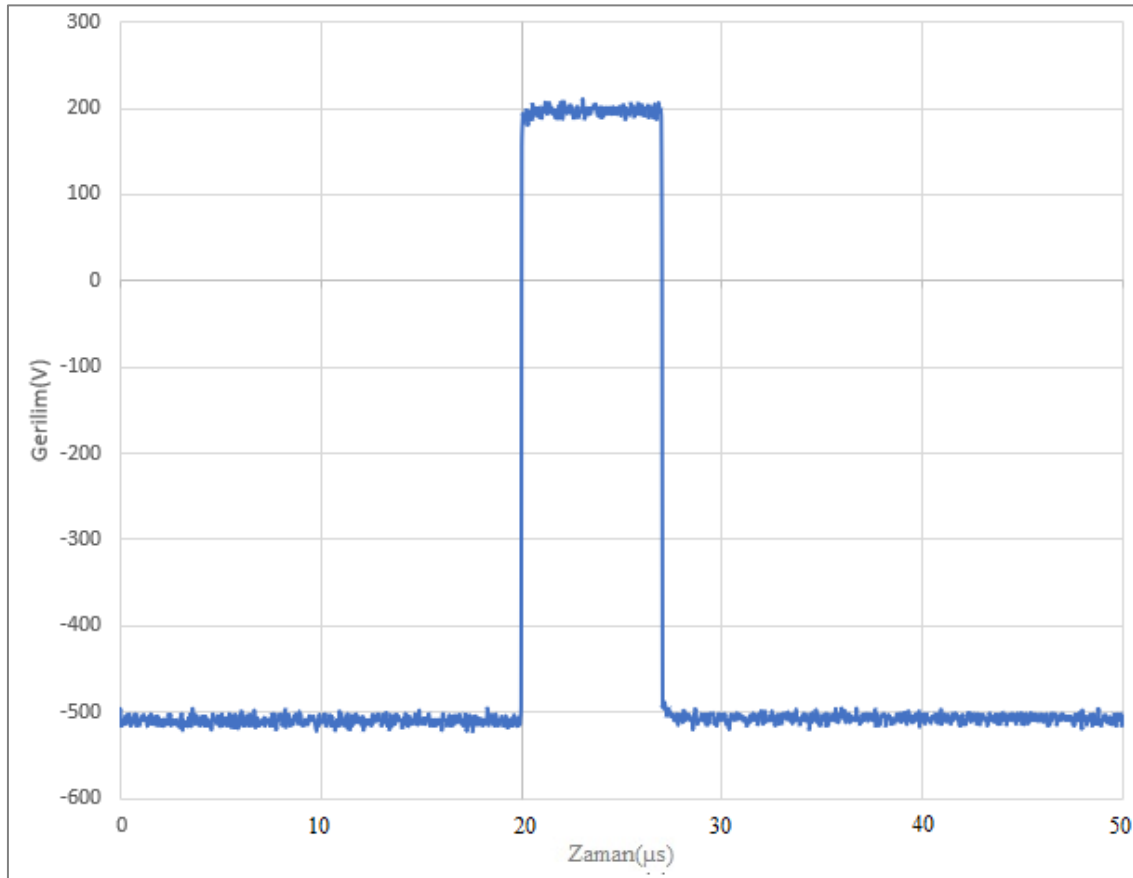
Şekil 7.15. Pozitif gerilim regülasyonu ve ayarlanabilirliği için Izgara Modülatörü çıkışı deneysel sonuçları (+100 V, -500 V)

Pozitif gerilim değeri, YDT içinde ızgaranın elektronların geçişini sağlayabileceği ve gerekli güç çıkışının elde edileceği seviyede olması gerekmektedir. Bu değer, YDT karakteristiğine, fiziksel yapısına ve RF istenilen çıkış gücüne göre farklılık göstermektedir. Elektronların ne zaman ve hangi ölçüde geçeceğinin kontrolü ızgara modülatörün çıkış gerilim değerine bağlıdır. Pozitif gerilimin elektronlar için oluşturacağı elektrik alan, elektronları doğru doğrultuda harekete geçirecek değerde olmalıdır. Pozitif gerilim değeri, gerekli alanı oluşturması için YDT adına istenilen değere ayarlanabilmelidir. Izgara modülatör, bu pozitif gerilim değerini güç geçişi anında sağlayabilmesi gerekmektedir.

Pozitif gerilim değerinin regülasyonun bozulması ya da istenilen değerden farklı olması durumunda elektron geçiş miktarının kontrolü sağlanamayacaktır. Negatif gerilimin ızgaraya uygulanmasından sonra pozitif gerilim süresinde gerilimin olmaması durumunda elektronların toplayıcı bloğuna ulaşması mümkün olamayacaktır. Bu RF çıkışının yeterli

düzeyde olmaması anlamına gelecektir. RF çıkış gücünün doyumda çalıştırılabilmesi için pozitif gerilim değerinin YDT özelinde belirlenerek sabit tutulması gerekmektedir. Tepe gücün ve ortalama gücün kontrolünün sağlanabilmesi için pozitif gerilimin regülasyonuna bağlıdır.

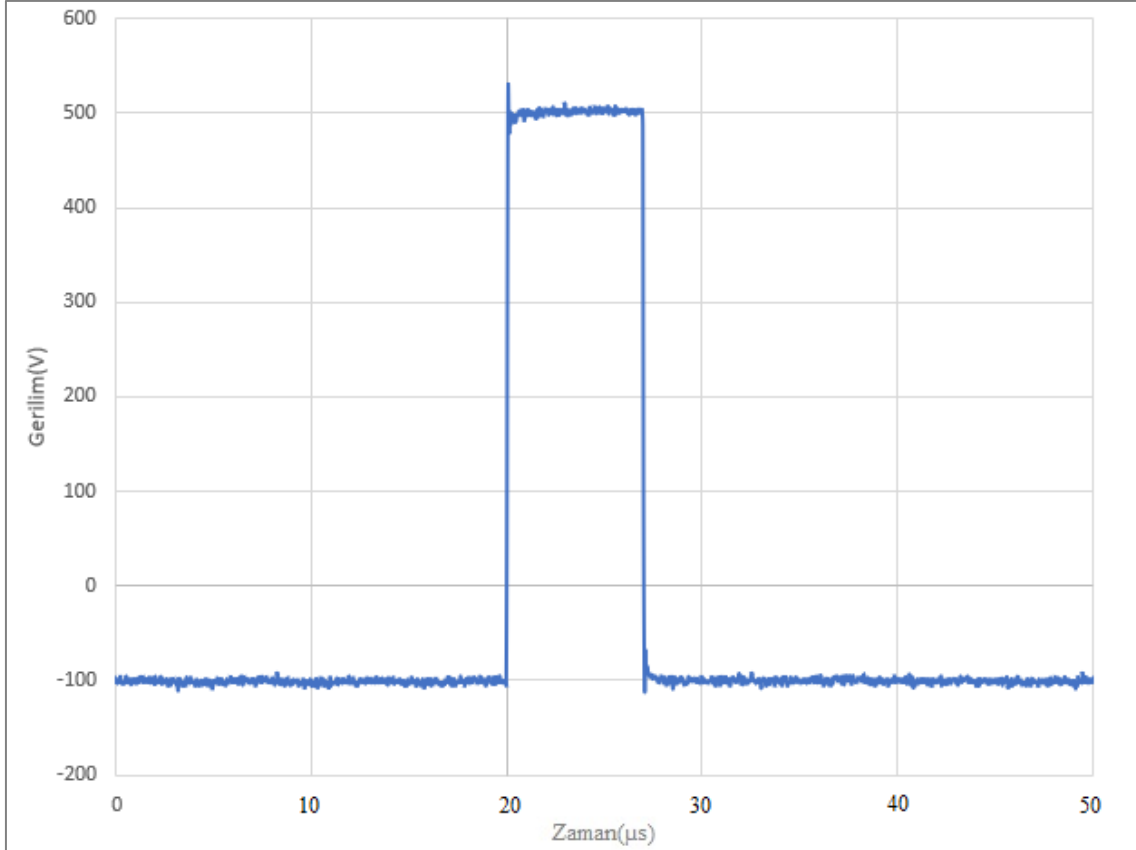
Izgara modülatörün pozitif gerilimi +100 V ve +500 V değerleri arasında ayarlanabilmektedir. Şekil 7.15’de ızgara modülatör çıkışından ölçüm alınmıştır ve +100 V değerine ayarlandığı gösterilmektedir. Negatif gerilim değeri en düşük genlik değeri olan -500 V değerinde sabit tutularak pozitif gerilim değeri +500 V ve +100 V arasında ayarlanmıştır. Gerilim regülasyonun bu aralıkta bozulmadığı ve ayarlanan değerler için sabit kalmıştır. Şekil 7.16’da pozitif gerilim değerinin +200 V seviyesine ayarlandığı gösterilmektedir. Aynı şekilde +500 V seviyesine kadar aralık değerlere de 1 V hassasiyetle ayarlanabilmektedir.



Şekil 7.16. Pozitif gerilim regülasyonu ve ayarlanabilirliği için Izgara Modülatörü çıkışı deneysel sonuçları (+200 V, -500 V)

YDT ızgarası, pozitif gerilim uygulandığında negatif gerilime göre daha fazla akım çekmektedir. Bu yüzden pozitif gerilimden tüm ayar aralığı için 5 mA akım çekilerek gerilim regülasyonu gözlemlenmiştir. Izgara modülatörden akım çekilmesi ile gerilim regülasyonu bozulmamıştır. Burada akım çekilirken rezistif yükler kullanılmıştır.

7.11. Negatif Gerilim Regülasyonu ve Ayarlanabilirliği



Şekil 7.17. Negatif gerilim regülasyonu ve ayarlanabilirliği için ızgara modülatörü çıkışı deneysel sonuçları (+500 V, -100 V)

Negatif gerilim değeri, YDT içinde ızgaranın elektronları durdurabileceği seviyede olması gerekmektedir. Bu değer, yine pozitif gerilim değeri gibi YDT karakteristiğine ve fiziksel yapısına göre bir YDT'den diğerine farklılık göstermektedir. Ayrıca zaman içerisinde YDT yapısındaki yıpranmadan ve çalışmaya bağlı değişimler yüzünden bu elektron durdurma gerilimi değişebilmektedir. Izgara modülatörün negatif geriliminin de bu değere ayarlanması gerekmektedir.

Negatif gerilim değerinin istenilen değerden daha farklı olması durumunda YDT içerisinde elektron geçişinde düzensizlik yaşanacaktır. Elektronların durdurulması için yetersiz

kalması durumunda elektronlar kontrolsüz geçecek ve toplayıcı bloğuna ulaşamayacaktır. Kontrolsüz geçen elektronlar helis noktası gibi belirsiz noktalara YDT içerisinde akım akmasına sebep olacaktır. Bu akım akan noktalarda tahribat söz konusu olacaktır. Aynı zamanda elektronların istenilen zamanda geçişinin sağlanamaması durumunda elektron darbe genişliği olumsuz bir şekilde değişebilir. Darbe genişliğinin değişimi ile tepe güçte ve ortalama güçte değişimler olacaktır. Ortalama gücün artması ya da azalması yine YDT sağlığını olumsuz etkileyecektir. İstenmeyen zamanda istenmeyen güçlerde YDT içerisinde güç harcanması gerçekleşecektir.

Bu ızgara modülatör tasarımında Negatif gerilim değeri -500 V ile -100 V değeri arasında ayarlanabilmektedir. Şekil 7.17’de negatif gerilimin -100 V seviyesine ayarlandığı görülmektedir. Pozitif gerilim en üst seviyede sabit tutularak negatif gerilim -500 V seviyesinde -100 V seviyesine doğru kademeli bir şekilde azaltılarak ölçüm alınmıştır. Bu aralıkta gerilimin regülasyonunun sağlandığı ve kararlılığını sürdürdüğü gözlemlenmiştir.

YDT ızgara birimleri yük olarak bakıldığında idealde çok düşük akımlar çekmektedir. Kapasitif etkiler yüzünden ızgara biriminden belirli miktarda akımlar çekilmektedir. Izgara modülatör biriminden 5 mA değerine kadar akımlar çekilmiş ve negatif gerilimin istenilen değerde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. YDT birimlerinden bu kadar yüksek akım değeri çekilmese de oluşabilecek arıza durumları için bu miktarda akım ile test edilmiştir. Arıza durumlarında da negatif gerilim kararlılığı sürdürülerek sistemdeki güç geçişi kontrol altında tutulmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Izgara modülatör için laboratuvar ortamında, kalibre ölçüm aletleri ile ölçümler alınmıştır. Yürüyen dalga tüplerinin giriş empedanslarına uygun olarak laboratuvar ortamında yüklenmiş ve çalışması doğrulanmıştır. Gerilim aralığı değiştirilerek çeşitli kapasitif yükler ile yüklenebilirliği de ayrıca test edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre ızgara modülatörün bir yürüyen dalga tüpü için uygun tasarım olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre yürüyen dalga tüpleri için kullanılabilir bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Yürüyen dalga tüplerinin çalışma gerilimlerinin, görev çevrimlerinin ve çalışma frekanslarının farklılıklarına göre ayar aralığının geniş olması ile çoğu yürüyen dalga tüpünü süreceğini göstermektedir.

Izgara modülatör üzerinde yükselme zamanı, düşme zamanı, aşma süresi ve darbe gecikme süresi gibi parametreler ölçülmüştür. Bu sürelerden YDT içerisinde RF sinyaline güç olarak aktarılmayan akımları belirleyen yükselme zamanı, düşme zamanı ve aşma süresi gibi zamanlar YDT ömrünü belirleyen süreler olmaktadır. Bu ızgara modülatör kullanılırken bu sürelerin dikkate alınması önerilmektedir.

Bu ızgara modülatörün tasarımı için ideal toplam anahtarlama gecikme süresi 250 ns olarak belirlenmiştir. Izgara modülatör ile bir RF sistemin senkron bir şekilde çalışması için bu 250 ns süresi efektif bir şekilde kullanılabilir. RF sistemi ile birlikte kullanıldığında 250 ns gecikmeli RF sinyalinin uygulanması önerilmektedir. YDT içerisinde RF sinyaline dönüştürülmeyen ve kayıp olarak atılan güç miktarını bu şekilde senkron çalışma ile en az seviyeye düşürmek mümkün olacaktır. Özellikle verimin önemli olduğu uygulamalarda ve YDT ömrünün uzatılması adına bu süre çok önemli olacaktır.

Negatif gerilim için YDT etiketinde yer alan elektron durdurma gerilim değerinden daha düşük bir seviyede gerilim ayarlanması ile başlanması tavsiye edilmektedir. Bu şekilde elektronların durdurulması kesin olacaktır. YDT sisteminin çalışması ile ince negatif gerilimin ayarlanması ile sınır değere yakın değer seçilmesi önerilmektedir.

Pozitif gerilim için YDT etiketinde yer alan elektron geçirme gerilim değerinden daha düşük bir seviyede gerilim ayarlanması ile başlanması tavsiye edilmektedir. YDT sistemi aktif bir şekilde çalıştırıldığında RF sinyali ve elektronların geçişinin sağlıklı bir şekilde sağlandığı

gözlemlendikten sonra RF sinyal seviyesi kontrolü ile pozitif gerilimin istenilen seviyeye ayarlanması önerilmektedir.

Yüksek frekans uygulamaları için ızgara modülatörün zaman parametrelerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Gelişen teknoloji ile izolasyon işlemlerinin optokuplörle tasarımlar kullanılarak yapılması durumunda zamanların ve eğrilerin yüksek frekans için değerlendirilmesi gerekecektir.

Bu anahtarlama modülatörü fokus elektrotlu yapılar için uygulanabilirliğini test edilmesi gerekecektir. Fokus elektrotlu yapılarda kapasitif etkilerin artması yüzünden eğrilerin değişmesi ve akım taşıma kapasitesine uygun değişiklikler yapılması gerekmektedir.

İzolasyon malzemeleri seçilirken katot gerilim seviyesine göre çok daha üst seviyede olmasına dikkat edilmelidir. Dielektrik seviyesine bağlı olarak kapasitif etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu etkilerin YDT performansını etkileyeceği unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

1. Kwack, J. Y., Kim, K. W., & Cho, S. (2011, April). 1kW S-band solid state radar amplifier. In *WAMICON 2011 Conference Proceedings*, 1-4. IEEE.
2. Minenna, D. F., André, F., Elskens, Y., Auboin, J. F., Doveil, F., Puech, J., & Duverdier, É. (2019). The traveling-wave tube in the history of telecommunication. *The European Physical Journal H*, 44(1), 1-36.
3. Skolnik, M. (2008). *An introduction and overview of radar*. Radar Handbook, 3, 1-1.
4. Skolnik, M. I. (1980). *Introduction to radar systems*. New York.
5. Raab, F. H., Asbeck, P., Cripps, S., Kenington, P. B., Popovic, Z. B., Potheary, N., ... & Sokal, N. O. (2002). Power amplifiers and transmitters for RF and microwave. *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 814-826.
6. Kazimierczuk, M. K. (2014). *RF power amplifiers*. John Wiley & Sons.
7. Gilmour, A. S. (2011). *Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons*. Artech House.
8. Basu, R., Billa, L. R., Letizia, R., & Paoloni, C. (2018). Design of sub-THz traveling wave tubes for high data rate long range wireless links. *Semiconductor Science and Technology*, 33(12), 124009.
9. Symons, R. S. (1998). Tubes: Still vital after all these years. *IEEE Spectrum*, 35(4), 52-63.
10. Paoloni, C., Gamzina, D., Letizia, R., Zheng, Y., & Luhmann Jr, N. C. (2021). Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st Century. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35(5), 567-603.
11. Faillon, G., Kornfeld, G., Bosch, E., & Thumm, M. K. (2008). Microwave tubes. In *Vacuum Electronics* (pp. 1-84). Springer, Berlin, Heidelberg.
12. Kompfner, R. (1947). The traveling-wave tube as amplifier at microwaves. *Proceedings of the IRE*, 35(2), 124-127.
13. Ertay, A. O., & Şimşek, S. Yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricilerinde iletim sabitlerinin incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 715-724.
14. Iqbal, M., & Fazal-e-Aleem. (2005, March). Theory and design Of thermionic electron beam guns. In *AIP Conference Proceedings*, 748(1), 376-386.
15. Nazari, M., Abbasi, F., Ghasemi, F., Haghalab, S., & Ahmadiannanim, S. (2017, May). *Design, simulation and compare of flat cathode electron guns with spherical cathode electron guns for industrial accelerators*. In 8th Int. Particle Accelerator Conf.(IPAC'17), Copenhagen, Denmark, 702-704. JACOW, Geneva, Switzerland.

16. Çetinkaya, H., Özbey, A., & Yüncü, A. (2021). Thermionic electron gun design and prototyping. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 702-709.
17. Staprans, A., McCune, E., & Ruetz, J. A. (1973). High-power linear-beam tubes. *Proceedings of the IEEE*, 61(3), 299-330.
18. Grant, T. J., Garcia, R., Miram, G. V., & Smith, B. (1983, December). Bonded grid electron gun for 95 GHz extended interaction amplifier (EIA). In *1983 International Electron Devices Meeting* (pp. 141-143). IEEE.
19. Goud, P. A. (1961). *Design study of accelerator electron guns* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).



Gazili olmak ayrıcalıktır