



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**REZONANS DEVRELERİN KAPASİTİF SENSÖRLERDE
KAZANÇ ARTIRIMI OLARAK KULLANIMI**

Alp Eren ALP
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Alp Eren Alp
Tarih: 22.05.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

REZONANS DEVRELERİN KAPASİTİF SENSÖRLERDE KAZANÇ ARTIRIMI OLARAK KULLANIMI

Alp Eren ALP

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2023, 75 sayfa

Jüri

Prof. Dr. Salih GÜNEŞ

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DEMİRTAŞ

İnsanoğlunun tarihsel gelişimi endüstriyel devrimlerin ortaya çıkması ve beraberinde teknolojinin gelişmesiyle devam etmiştir. Bu gelişmeler hala teknolojinin gelişmesiyle sürdürülebilir durumdadır. Bu yeni teknolojiler insan yaşamının her alanında yer alırken sensör teknolojisinin gelişmesine yardımcı olmuştur. Bu teknolojinin insan hayatında yer almasının sonucu olarak sensörlerin verimliliği ve güvenilirliği de son derece önem arz etmektedir. Bu durum akıllı sensörlerin hayatımızın oldukça farklı alanlarında yer almasına neden olmaktadır.

Kapasitif sensörler, endüstriyel, tıbbi, otomotiv ve birçok diğer uygulama alanında oldukça yoğun kullanılmaktadır. Bu yoğunlukta kullanılmalarının nedeni kapasitif sensörlerin sinyal işleme tekniğiyle ilgili olmasıdır. Sinyal işleme tekniğinin söz konusu olduğu durumda kapasitif sensörlerin ölçüm aralığını ve hassasiyetini artırmak için rezonans devreler önemli bir yere sahiptir. Bir kapasitif sensörün çıkış sinyalini bir bobine bağlı olarak rezonans devrelerin kullanılması ile sinyal güçlendirilebilirken sinyalin hassasiyeti artırılabilir. Sensörlerin ölçüm aralıklarının artırılması ise rezonans devrelerle sağlanabilir. Sensörlerin ölçüm aralığı sensör kapasitansına bağlı olarak sınırlandırılabilir. Böylelikle rezonans devreler kullanılarak ölçüm aralığı genişletilebilir ve kazanç sağlanabilir.

Rezonans frekansı sensörün kapasitans değerine bağlı olduğundan sensörün veya sensörün kapasitans değerinin değiştirilmesi durumunda devrenin yeniden ayarlanması gerekmektedir. Devreler seri rezonans durumunda kısa devre, paralel rezonansta açık devre gibi davranmaktadırlar. Seri bağlı olan bobin ve kondansatör devresi kısa devre görevi gördüğünden aktif olan devre kazanç üretmemektedir.

Düşük kapasitör ölçümü endüstriyel sensörlerde görülebilen bir durumdur. Ölçüm devrelerinde de ölçülen küçük kapasitöre yakın küçük kapasitörler kullanılabilir. Düşük kapasitans değerlerine sahip olan kapasitif elektrotları okumak için çok düşük kapasitörlerin kullanımında çeşitli problemler yaşanmaktadır. Bu problemler genellikle baskı devreden, lehimlemelerden ve komponentten kaynaklanmaktadır.

Bu tezde; endüstride kullanılabilir olan rezonans devrenin kapasitif sensörde kazanç artırımını sağlayacak bir devre tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımın amacı rezonans devrelerde farklı kapasitörler kullanarak kazanç elde etmedir. Bu durum için tasarlanan devrede düşük değerde bir kapasitör kullanılarak opamp girişinde bulunan kapasitör elektrot kapasitörü olarak kullanılmıştır. Tasarlanan devreden rezonans kazanç elde edilmesi için devrede kullanılan diğer kapasitörler devre girişinde bulunan kapasitörün on katı büyüklüğünde seçilmiştir. Kazanç elde edilmek üzere dört tip devre tasarlanmıştır. İlk iki tasarım kazanç artırımını konusunda faydalı olmadığından tercih edilmezken üçüncü tip devre osilasyon yapmasından dolayı tercih edilmemiştir. Dördüncü tip devre beklenen kazanç artırımını tüm testlerde istenilen düzeyde verdiği için üzerinde çalışılmıştır. Tasarlanan devre karışık bir devre filtresi olup kapasitör, bobin, direnç ve opamp bulunmaktadır. Opamp için yüksek frekansları geçiren LF351 opampı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rezonans devreler, Filtre, Osilaskop, Güç kaynağı, Kazanç, Okuma devreleri, Frekans, Sinyal

ABSTRACT

MSc THESIS

THE USE OF RESONANT CIRCUITS AS GAIN BOOSTS IN CAPACITIVE SENSORS

Alp Eren ALP

**The Graduate School of Natural and Applied Science of
Necmettin Erbakan University**

The Degree of Master of Science

In Electric Electronic Engineering

Advisor: Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

2023, 75 pages

Jury

Prof. Dr. Salih GÜNEŞ

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Assist. Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ

The historical development of mankind has continued with the emergence of industrial revolutions and the development of technology. These developments are still sustainable with the development of technology. While these new technologies take place in every aspect of human life, they have helped the development of sensor technology. As a result of the inclusion of this technology in human life, the efficiency and reliability of the sensors are also extremely important. This situation causes smart sensors to take place in quite different areas of our lives.

Capacitive sensors are used extensively in industrial, medical, automotive and many other application areas. The reason why they are used at this density is that the capacitive sensors are related to the signal processing technique. In the case of signal processing technique, resonance circuits have an important place to increase the measuring range and sensitivity of capacitive sensors. As a result of the use of resonant circuits that connect the output signal of a capacitive sensor to a coil, the signal is strengthened and the sensitivity of the signal is increased. Increasing the measuring range of the sensors is also provided by resonant circuits. The measuring range of the sensors depends on the sensor capacitance and is limited. Thus, gain can be achieved by expanding the measuring range by using resonant circuits.

Since the resonant frequency is dependent on the capacitance value of the sensor, the circuit must be readjusted in case the capacitance value of the sensor or sensor is changed. Circuits behave like short-circuit in series resonance and open-circuit in parallel resonance. Since the coil and capacitor circuit connected in series act as a short circuit, the active circuit cannot produce gain. There are several problems in using very low capacitors to read capacitive electrodes with low capacitance values. These problems are usually caused by the printed circuit board, soldering and component.

In this thesis; A circuit design has been made that will increase the gain in the capacitive sensor of the resonant circuit that can be used in the industry. The purpose of this design is to gain gain by using different capacitors in resonant circuits. In the circuit designed for this situation, a low value capacitor is used and the capacitor located at the opamp input is used as the electrode capacitor. In order to obtain resonance gain from the designed circuit, other capacitors used in the circuit were chosen ten times the size of the capacitor at the circuit input. Four types of circuits are designed for gain. While the first two designs are not preferred because they are not useful for gain increase, the third type circuit is not preferred because it oscillates. The fourth type circuit has been studied since it gives the expected gain increase at the desired level in all tests. The designed circuit is a mixed circuit filter and includes capacitor, coil, resistor and opamp. High frequency pass LF351 opamp is used for opamp.

Key words: Rezonans circuits, Filters, Oscilloscope, Power source, Gain, Readout circuits, Frequency, Signal

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde tüm desteklerinden dolayı danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ'e,

Bu günlere gelmemde bana daima destek veren babam Prof. Dr. Murat Alp, annem Nuray Alp, kardeşlerim Dr. Elifsenâ Canan Alp ve Hilal Ebrar Alp'e

Beni motive ederek tezimi bitirmeme yardımcı olan tüm çalışma arkadaşlarıma, Yüksek lisans eğitimimin başlangıcından bugüne kadar bana desteklerini esirgemen tüm hocalarıma, teşekkürlerimi sunarım.

Alp Eren Alp
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1 GİRİŞ VE KAYNAK TARAMASI	1
1.1 Endüstride Kapasitif Sensör	4
1.1.1 Endüstri Devrimleri	4
1.2 Sensör Gelişim Evreleri	5
1.2.1 Kapasitif Sensörler ve Kullanım Alanları	6
1.3 Kapasitif Sensörlerde Okuma Devreleri	8
1.3.1 RC: Doldur Boşalt Ölçüm Yöntemi	9
1.3.2 Faz Farkı	9
1.3.3 CFC: Kapasitansdan Frekansa Dönüştürücü	10
1.3.4 Demodülasyon	10
1.3.5 ASIC: Uygulamaya Özel Tümlşik Devre	11
1.4 Rezonans Devreler	11
1.4.1 Seri Rezonans Devreler	13
1.4.2 Paralel Rezonans Devreler	17
1.5 Tezin Amacı ve Önemi	19
1.5.1 Tezin Amacı	19
1.5.2 Tezin Önemi	19
2 TASARIM VE MODELLEME	21

2.1	Devre Alternatifleri	24
2.1.1	Tip 1	24
2.1.2	Tip 2	27
2.1.3	Tip 3	30
2.1.4	Tip 4	31
2.2	Simülasyonlar	32
2.2.1	AC Analiz	32
3	TEST ÇALIŞMALARI	34
3.1	Tip 4 Test Çalışmaları	34
4	SONUÇLAR	53
4.1	Tezin Amacının Doğrulanması	53
4.2	Gelecek Çalışmalar için Öneriler	54
5	KAYNAKLAR	55

TABLolar LİSTESİ

1	Tip 4 Devresinin Test Sonuçları	39
---	---	----

ŞEKİLLER LİSTESİ

1	Endüstri Devrimi Gelişim Evreleri [22]	5
2	Sensör Gelişim Evreleri [26]	6
3	Ülkelerin İhtiyaç Duyduğu Kapasitif Sensör Dağılımı [31]	7
4	Kapasitif Sensör ve Okuma Sisteminin Blok Diyagramı [30]	9
5	Eşdeğer Seri Rezonans Devresi [53]	13
6	İdeal Seri Rezonans Devresi [53]	14
7	Seri Rezonans Devresinin Fazör Diyagramı [53]	15
8	Paralel Rezonans Devresi [53]	17
9	Paralel Rezonans Devresinin Fazör Diyagramı [53]	17
10	İki Tür Algılama Devresi ve Anahtarlamalı Kapasitör Entegratörü [14]	23
11	Tasarımı Yapılan Devreler	24
12	Standart Transempedans Yükselteç	25
13	Tasarlanan Tip1 Devresi	25
14	Tip1 Bode ve Faz-Frekans Diyagramı	27
15	Tasarlanan Tip2 Devresi	28
16	Tip2 Bode ve Faz-Frekans Diyagramı	29
17	Tasarlanan Tip3 Devresi	30
18	Tip3 Transient Analizi	31
19	Tasarlanan Tip4 Devresi	32
20	Tip4 Devresi AC Analizi	33
21	Tip 4 Devresinin Proteus Çizimi	34
22	Tip 4 Devresinin Proteus PCB Komponent Yerleşimi	35
23	Tip 4 Devresinin Baskı Yapılan PCB Kartı	35
24	Tip 4 Devresinin PCB Kartı ve Komponentleri	36

25	Tip 4 Devresi	37
26	Tip 4 Devresinin Problarının Bağlanması	37
27	Tip 4 Devresinin Test Aşaması	39
28	Volt-Frekans Eğrisi	40
29	Tip 4 Devresinin 1kHz Test Aşaması	42
30	1kHz Faz Farkı Sonucu	42
31	Tip 4 Devresinin 10kHz Test Aşaması	43
32	10kHz Faz Farkı Sonucu	43
33	Tip 4 Devresinin 108kHz Test Aşaması	44
34	108kHz Faz Farkı Sonucu	44
35	Tip 4 Devresinin 130kHz Test Aşaması	45
36	130kHz Faz Farkı Sonucu	45
37	Tip 4 Devresinin 200kHz Test Aşaması	46
38	200kHz Faz Farkı Sonucu	46
39	Tip 4 Devresinin 503kHz Test Aşaması	47
40	503kHz Faz Farkı Sonucu	47
41	Tip 4 Devresinin 1MHz Test Aşaması	48
42	1MHz Faz Farkı Sonucu	48
43	Tip 4 Devresinin 1.5MHz Test Aşaması	49
44	1.5MHz Faz Farkı Sonucu	49
45	Tip 4 Devresinin 2MHz Test Aşaması	50
46	2MHz Faz Farkı Sonucu	50
47	Tip 4 Devresinin 2.3MHz Test Aşaması	51
48	2.3MHz Faz Farkı Sonucu	51
49	Tip 4 Devresinin Son Hali	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

R : Direnç,
 R_f : Geri besleme direnci,
 R_{in} : Giriş direnci,
 L : Bobin,
 C : Kapasitör,
 U : Kaynak,
 I : Akım, ω : Açısal frekans,
 ω_u : Üst kesim frekansı
 ω_A : Alt kesim frekansı,
 Q : Kalite faktörü,
 Δf : Bant genişliği,
 X_C, X_L : Rezonans empedansı,
 f : Frekans,
 Z_T : Toplam empedans,
 H : Henry,
 F : Farad,
 Ω : Ohm

1 GİRİŞ VE KAYNAK TARAMASI

Teknolojinin gelişimi insanoğlunun gelişmesini ve hayal ettiklerini aşama aşama hayata geçirmesini sağlamıştır. İnsanoğlunun gelişiminin en önemli süreçleri endüstri devrimi ile başlamış ve bu başlangıçla beraberde gelişim hızlanmıştır. Bu gelişime ve bu hıza ayak uydurmaya çalışan teknolojide de insan gücünün yerini çeşitli teknolojik araçlar almaya başlamıştır.

Endüstri devriminin insanoğluna kazandırdığı en büyük kazanç ise daha konforlu bir hayatın yaşanması olmuştur. Bu kazanıma sahip olan insanoğlu yaşam kalitesini daha da artırabilmek amacıyla hayatın her alanında gelişen teknolojinin yer almasına ve daha ucuz daha kaliteli parçaların sürekli bir şekilde elde edilmesini kolaylaştırmak için çalışmaya devam etmektedir. İnsanoğlunun yaşam kalitesindeki artırımını sağlayan ise endüstriyel üretim yapan şirketler olmuştur. Bu şirketler müşterilerine sunacakları ürünler için gerek tedarik zincirlerindeki darboğazlar ve gerekse de ürün çeşitliliği için son zamanlarda çeşitli ekonomik sıkıntılar yaşamaya başlamışlardır [1]. Bu durum bu işletmelerin müşterilerinin ihtiyaç duydukları ürünleri daha az maliyetle ve daha yüksek kalitede üretebilmek için gelişen bilgi ve teknolojinin kullanımını da beraberinde getirmiştir [2].

Dijitalleşen ve globalleşen dünya bunun en güzel bir örneği olarak göz önünde dururken bu dijitalleşmeyi ve globalleşmeyi sağlayan teknolojiler, aynı zamanda çok farklı disiplinlerinde bir araya gelerek [3] ürün çeşitliliğini artırmaya ve insanoğlunun hizmetine sunmaya devam etmektedir. Bu durum çok farklı alanlarda dijital dönüşümün dalga dalga büyümesini sağlamaktadır [4]. İlk endüstri döneminde insan gücü ve yer altı kaynakları son derece önemli iken son endüstri döneminde yeşil enerji ve teknolojik ürün son derece önemli olmaya başlamıştır.

İlk endüstri sanayi döneminde her şey ağır makineler, insan gücü ve insan algısına bağlı iken bugünkü sanayileşme döneminde ürünün üretilmesindeki hız, kalite ve minimum hasarlı üretim son derece önemli hale gelmiştir. Üretimin sağlanmasında insan algısı ve dikkati dış etkenlere bağlı olarak değiştiğinden burada kullanılan insan gücü yerine sensör teknolojisi kullanılmaya başlamış ve bu teknoloji üretimin hızlı, kaliteli ve kusursuz olmasını sağlamıştır [5]. Endüstride en önemli unsur olan kontrol kavramı sensöre olan ihtiyacı artırmıştır. Bu ise sensörlerin azami öneme haiz olan iş alanlarında kullanımını artırmıştır. Bu kullanım alanlarına oto-

mobil üretim teknolojileri, havacılık, uzay teknolojileri ve güvenlik kontrol sistemleri örnek verilebilir [5, 6]. Sensör teknolojisi de gelişmeye başlamış ve bu gelişim daha çok kazanç elde etmesi ilkesine dayanarak gelişimini sürdürmektedir.

Gelişen teknolojiyle beraber çeşitli kapasitif sensör önerileri yapılmakta ve bu sensörlerin kullanımları da günden güne artmaktadır. Bu sensörlerin günümüz teknolojilerinde uygulandığı alanlar çok çeşitlidir. Özellikle mikro cerrahi alanında tasarlanan tasarımlar ilgi görüp gerçek hayatta kullanılma olanağı bulurken robotik alanındaki tasarımlarda oldukça ilgi çekici hale gelmektedir. Robotik alanında kuvvet/tork bilgisi kullanılarak gerçekleştirilen verimli robot kontrolü geliştirilen robotlar için oldukça önemlidir. Bu robot uygulamalarına bacaklı ve cerrahi robotlar örnek olarak verilebilir [7, 8]. Robotik uygulamalar genellikle F/T bilgisini kullandığından bu tür sensörlerin ucuz, sağlam ve gürültüye karşı duyarsız olmaları nedeniyle bağımsız şekilde üretimini sağlayabilmek için [9, 10] çalışmaları yapılmıştır. Bir F/T sensörünün ölçüm prensibi uygulanan kuvvetler ve torklar tarafından sensör gövdesinin deformasyonu elektrik sinyallerine dönüştürmesidir [11, 8].

Kapasitif sensörlerin performansını artıtabilmek için literatürde yapılmış bir çok çalışma göze çarparken performans artırımı için kullanılan taktiklerden birinin de rezonans devre kullanımı olduğu gözlemlenir. Büyük bir deformasyon sensörün sertliğini düşük yaparken robotik mekanizmanın sertliğini de düşük yapar [12]. İlgili çalışmada performans artırmak için üç yöntem denendiği belirtilmiştir.

Birinci tip araştırmalar bu tip sensörlerin elektrotlarının büyüklüğünün artırılması çalışmalarıdır. İkinci tür çalışmalar kaldıraç prensibiyle elektrotların değiştirilmesidir. Elektrotların değiştirilmesi tasarlanan sensörlerin karmaşık yapıya dönüşmesine neden olmuştur. Üçüncü tür çalışmalar ise geçirgenliği olan dielektrik malzemelerin kullanılması çalışmalarıdır [10]. Geçirgenliği olan dielektrik malzemelerin kullanılması sonucunda bu tip malzemelerin milisaniyelerde gevşemesinden dolayı 100Hz' i aşan frekanslar oluşmuştur. Bu da bu frekansların okunmasını zorlaştırmıştır [13]. Tüm bu problemlerin üstesinden gelmek için C tipi sensörün performansını artırabilmek amacıyla seri rezonans devresi tasarımı yapılmıştır [14]. Bu tasarımda devre ve rezonans devrenin CDC çıkışı devresi üzerindeki etkisini analiz etmek için anahtarlamalı kapasitör simülatörü geliştirilmiştir. Bu simülasyonda sensöre endüktans ve direnç optimize edilmiştir [14]. Bu anahtarlamalı kapasitör entegratörü CDC çipinin içerisine yerleştirilmiştir [15]. Bu çipin çalışmasında oluşabilecek gürültüyü minimize edebilmek için sigma-delta modulatörü ve eksiltme

filtresi kullanılmıştır [16, 17]. Yüksek performanslı bir kalibrasyon elde edebilmek için daha önceki tasarımlarda var olan yapay sinir ağı kullanılmıştır [18].

Yine ilgili çalışmada var olan sensörlerle tasarlanan sensörler karşılaştırılarak analiz edilmiştir. İki sensör arasındaki fark, indüktör, sertlik ve boyut dahil olmak üzere diğer tüm koşullar aynı kalmak kaydıyla elektrot ve elektrot boşluğu aynı olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çözünürlük indüktörsüz sensör için 0.74 Nm iken tasarlanan rezonans devresi ile donatılan sensörün 0.29 Nm olduğu elde edilmiştir. Önerilen yaklaşım ile sensörün boyutunda herhangi bir artış söz konusu olmadan sensörün doğrusallığı ve tekrarlanabilirliği de iyileştirilmiştir. Bu ise bu yöntemin uygulanabilirliğini basit ve etkin kılmaktadır [15].

Bu tezde rezonans devrelerin kapasitif sensörlerde kazanç artırımı için kullanılabilmesi için tasarlanan devre ve bu devrenin tasarım aşamaları irdelenmiştir. Bu kazanımın sağlanabilmesi için rezonans devrelerde farklı kapasitörlerin kullanılması denenmiştir. Bu denemelerde, opamp girişinde bulunan kapasitör elektrot kapasitörü olarak kullanılmak koşuluyla tasarlanan devrede düşük değerde kapasitör kullanılmış ve diğer kapasitörler devre girişinde yer alan kapasitörlerin on katı büyüklüğünde seçilmiştir. Normalde kazanç kapasitörlerin oranı, yani 0.1 olacakken, tasarlanan rezonans devreleri ile kazancın 1'e yaklaştırılması hedeflenmiştir. Bu tasarımlar sonucunda dört farklı tasarım yapılmış ve kazanç artırımı sağlayan tasarım dördüncü tasarımda elde edilmiştir. Tasarlanan dört tip tasarım tezin ilerleyen bölümlerinde detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Tezde tasarlanan devrelerde, rezonans frekansının sensörün frekansına bağımlı olması nedeniyle sensörün kapasitans değerinin değiştirilmesi durumunda devreler her seferinde yeniden ayarlanmış ve kısa baskı devre kartları kullanılmıştır. Bu ayarlamalar yapılırken düşük kapasitans değerlerine sahip kapasitif elektrotların okunmasında düşük kapasitör kullanımından dolayı çeşitli problemler yaşanmıştır. Bu problemlerin baskı devrelerden kaynaklandığı tespit edilmiş olup bu problemlerin genellikle lehimlemelerden ve komponentlerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Lehimlemeden kaynaklı problemlerin baskı devre üzerindeki çizilen yolların birbirlerine kapasitif özellikleri taşıdığı ve iletken olmalarından dolayı bir kapasite oluşumuna neden olduğu gözlemlenmiştir. Komponentlerden kaynaklı problemlerin ise genellikle kapasitörün bacalarının kesilmemesi ve kapasitörün baskı devre kartına tam olarak sabitlenmemesi olduğu tespit edilmiştir.

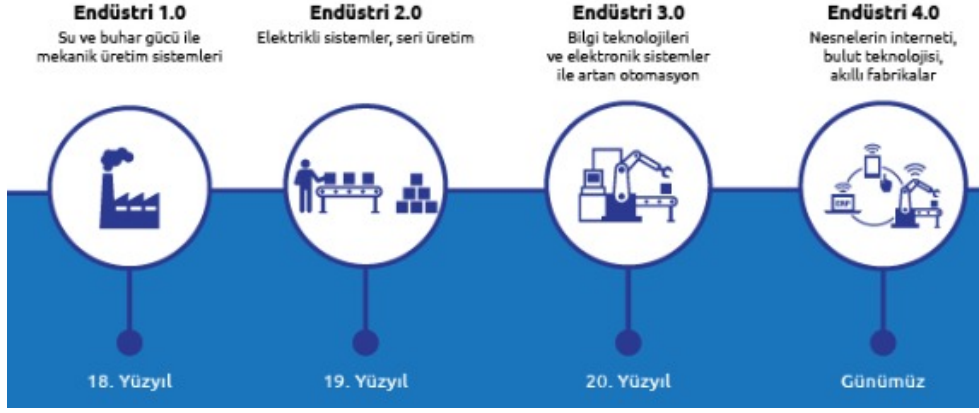
Devrelerin her seferinde yeniden tasarlanmaları sonucunda, devrelerin seri rezonans durumunda kısa devre, paralel rezonansta açık devre gibi davrandıkları gözlemlenmiştir. Seri rezonans durumundaki bobin ve kondansatör devresi kısa devre görevi gördüğünden aktif olan filtre kazanç üretemezken, paralel rezonansta kazanç artırımı sağlayan devre karışık bir devre filtresi olup kapasitör, bobin, direnç ve yüksek frekansları geçiren LF351 opampını içermektedir.

1.1 Endüstride Kapasitif Sensör

Bu bölümde endüstri devrimleri, sensör gelişim evreleri ve kapasitif sensörlerin endüstride kullanım alanları taranarak irdelenmiştir.

1.1.1 Endüstri Devrimleri

Günümüze kadar gelen endüstri devrimi dört evrede gerçekleşmiştir ve devam etmektedir. Birinci Endüstri devrimini James Watt'ın geliştirmiş olduğu buhar makinesi ile başlamış ve demiryolu ulaşımı, buharla çalışan makinelerin üretimiyle beraber demir çelik sektöründe gelişimine neden olmuştur [19]. İkinci endüstri devrimi; elektrik enerjisinin 20. yüzyılda kullanılmaya başlaması ve seri üretime geçilme süreciyle başlamıştır. Bu süreç hammadde teminini kolaylaştırdığından günümüzde de hala kullandığımız bir çok ürünün de ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bunlara örnek olarak telefon, telsiz, mikrofon daktilo, bisiklet gibi ürünler örnek verilebilir [20]. İkinci dünya savaşında kullanılan teknoloji üçüncü sanayi devriminin gelişmesine neden olmuştur. Bu evrede üretimde otomasyonun gerçekleşmesi ve yazılım sektörünün gelişmesiyle lazer, fiber, bilgisayar gibi ürünlerin üretimde mümkün olmuştur. Bu ürünlerin üretimi bilginin ve bilgi teknolojilerinin hızlı bir şekilde yayılmasını sağlayarak dünyayı da globalleştirmeye başlamıştır. Bu evre aynı zamanda bilgisayar çağı veya dijital çağ olarak adlandırılmaktadır [21]. İnsan, makine ve ürün arasındaki ilişki dördüncü sanayi evresinin oluşmasına neden olmuştur. Endüstri devrimlerinin gelişim evreleri Şekil 1' de verilmiştir [22].



Şekil. 1. Endüstri Devrimi Gelişim Evreleri [22]

1.2 Sensör Gelişim Evreleri

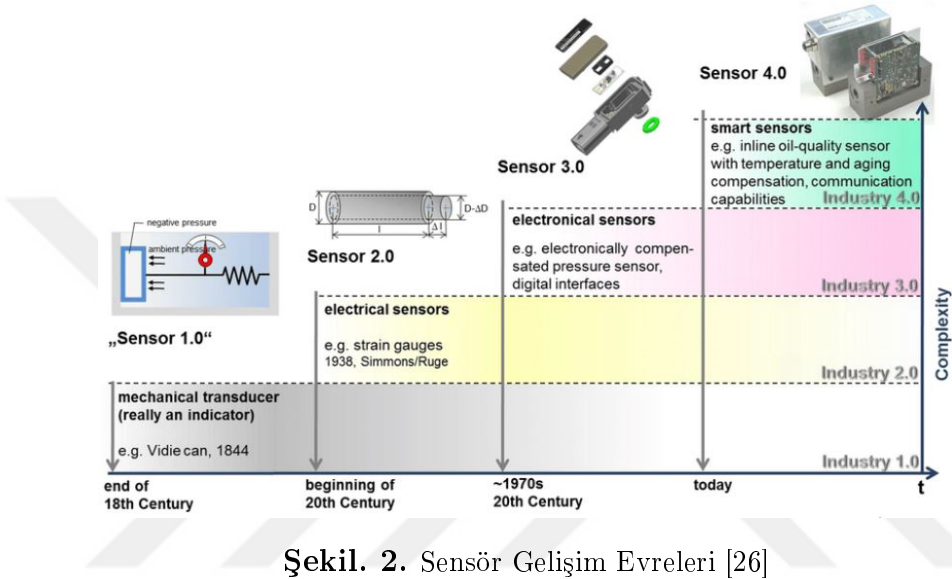
İnsan, makine ve üretim üçgeni kişilerin isteklerine göre ürün üretilmesini gerekli kıldığından akıllı üretim süreçlerinin başlamasına neden olmuştur [23]. Akıllı üretim teknolojisi de sensör kullanımını gerekli kılmıştır. Bu nedenle endüstride çok çeşitli sensör tasarlanmasına ve bu sensörlerin üretimi hızlı ve kaliteli bir şekilde yapabilmesi için kullanılmasına yol açmıştır [24]. Sensörlerde gelişimini dört aşamada sürdürmüşlerdir. İlk aşamadaki sensörler üç evrede gerçekleşmiştir ve basit algılamalar yapmaktadırlar. Bunlar: mekanik algılama yapan sensörler, elektriksel algılama yapan sensörler ve dijital arayüzlü çip teknolojisiyle beraber üretilen elektronik sensörler [25].

İkinci sensör gelişim evresinde çeşitli teknolojilerin hızlı gelişmesinin sonucunda sensör elemanlarının küçülmesiyle üretilen akıllı sensörler evresidir. Bu evrede sensörler küçüldüklerinden dolayı daha ucuza üretilebilme ve farklı alanlarda hizmet verme durumlarına göre programlanabilme özelliklerine sahiptirler. Gelişen teknolojiye uyumlarının sağlanmasıyla beraber kablolu ve kablosuz sensörler bu evrede tasarlanmışlardır [25].

Üçüncü sensör gelişim evresinde sensörlerin gittikçe küçülmeleri, programlanabilir olmaları ve internete bağlanabilmeleri sonucunda kullanım alanlarının genişlemesi sağlanmıştır. Böylelikle sensörler giyilebilir ve taşınabilir hale dönüştürülmüştür. Bu dönüşümün sonucunda sağlık alanında sensör kullanımı artmıştır [25].

Sensörlerin son dönem gelişim evresinde, internetin hemen hemen her alanda

kullanılmaya başlamasıyla birlikte sensörlerin bulut teknolojisine entegrasyonları sağlanmıştır. Bu entegrasyonla sensörler hayatın her aşamasında kullanılmaya başlanarak akıllı kavramının oluşturduğu yeni endüstriyel alanlar oluşturulmuştur [25]. Bu ise hayatın her alanında sensörlerin yer almasını sağlamıştır. Sensörlerin gelişim süreçleri ve endüstri devrimleri gelişim süreçleri matrisi Şekil 2’ de verilmiştir [26].



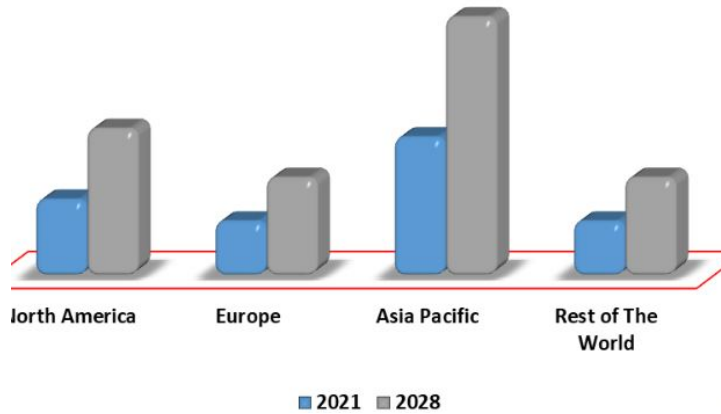
1.2.1 Kapasitif Sensörler ve Kullanım Alanları

Cisimlerin iletken olup olmadığına bakmadan oluşturulan elektrik alanı değişimi ile cisimleri algılayan, konumunu belirleyen, cisim ayrımı yapmayan, çevre koşullarından az etkilenen, cisimlerin mesafelerini ölçümleyen ve ekonomik olan sensörlere kapasitif sensörler denir [27]. Üretimde kapasitif sensör kullanımının ana nedeni fiziksel bir temas olmadan ürünlerin algılanmasını sağlamaktır. Bu algılama kapasitif sensörlerin farklı yalıtkan madde katmanlarını algılamasıyla mümkündür [28]. Her türlü cismi rahatlıkla belirleyip, algılayan, çevre şartlarından az etkilenen ve cisimlerin mesafesini anlamak için endüstride yoğun bir şekilde kapasitif sensörler kullanılmaktadır. İletkenlik özelliğine sahip bir cisim kapasitif sensörün elektrik alanı içerisine yaklaştığında sensörün kapasitesinde değişiklikler olur. Bu değişim miktarına bakılarak cismin sensöre yaklaşan veya dokunan bir cisim olup olmadığı algılanır [29]. Bir çok kapasitif sensör türü mevcut olup iki elektrot arasındaki kapasitansı ($C = \frac{\epsilon A}{d}$) biçiminde modelleyerek kapasitif sensörleri geçirgenliği, iki

elektrot arasındaki mesafeyi veya ölçülecek fiziksel miktardaki değişikliğin neden olduğu değişikliği ölçecek şekilde karakterize edilebilir.

İki elektrot arasındaki mesafe değişimine bağlı olarak çalışan kapasitif sensörlere örnek olarak kuvvet sensörleri, mikrometreler, rotary encoder, ivmeölçer, jiroskop, basınç sensörü ve mikrofon verilebilir [30]. İki elektrot arasındaki geçirgenlikteki değişikliklere dayanan sensörler: nem sensörü, partikül konsantrasyon sensörü, kimyasal ve biyomedikal madde konsantrasyon sensörleridir. Kapasitif sensörün okuma sistemi, sensörle arayüz oluşturan, gerilim veya akımın ölçülecek fiziksel değişimini kapasitansa dönüştüren bir analog ön uç devre, analog sinyalleri dijital sinyallere ve son işlemciye dönüştüren bir ADC içerir [30]. Kapasitif algılamayı hedefleyen bir çok entegre devre mevcuttur [6]. Bu devreler tek kanallı olabileceği gibi çok kanallı da olabilirler ve analog veya dijital çıkış verebilirler. Bu devrelerde kanal sayıları elektrot sayılarıyla orantılıdır. Cismin var olup olmadığı dijital çıkışlı devrelerde tespit edilebilirken analog çıkışlı devrelerde cismin maddesel özellikleri olan konum, pozisyon ve hız bilgileri elde edilir.

Kapasitif sensör endüstride bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlar: hava temizleme ekipmanları, akış, boşluk, kalınlık, sıvı seviyeleri ve basınç ölçme, gıda, otomotiv ve kimya endüstri alanlarıdır. Kapasitif sensörlerin kullanım alanları arttıkça ülkelerde kapasitif sensöre gün geçtikçe daha fazla ihtiyaç duymaya başlamıştır. Bu durum son yıllarda yapılan kapasitif sensör analiz raporlarına da yansımıştır. Rapora göre ülkelerin 2021-2028 yılları arasında ihtiyaç duydukları kapasitif sensör dağılımı [31] Şekil 3' te verilmiştir.



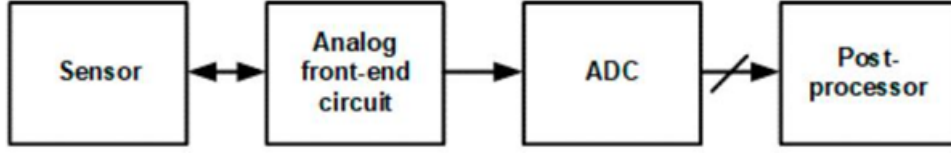
Şekil. 3. Ülkelerin İhtiyaç Duyduğu Kapasitif Sensör Dağılımı [31]

Kapasitif sensörler düşük yoğunluktaki cisimlerin ölçümünde çok avantajlı dergildirler. Bu dezavantaj kapasitif sensörün kazanç artırımı için yeniden tasarlanmasına neden olmaktadır. Kapasitif sensörlerin kazanç artırımı için yeniden tasarlanması günümüz teknolojilerinde de yoğunlukla kullanılmasını gerektirmiştir [32]. Malzeme kalınlığını ölçmek için kullanılan bir kapasitör sensörün ölçme aralığı malzemenin kalınlığının az olması durumunda oldukça düşük olacaktır. Bu durumda, sensörün ölçüm aralığını artırmak için kazanç artırımı yapılması gerekebilir. Bu kazanç artırımı kapasitif sensörün çıkış sinyalindeki düşük voltaj seviyesini artırmakla yapılarak sensörün daha hassas ölçümler yapabilmesini sağlar. Uzun mesafelerde ölçüm yapılması gerektiğinde ölçüm sinyalini işleyen bir amplifikatör kullanmakla sinyal gücü artırılarak, hassas ölçümler yapmak mümkündür. Böylelikle, sensörlerin ölçüm aralığını artırarak, daha hassas ölçümler yapılmasını sağlar [32].

1.3 Kapasitif Sensörlerde Okuma Devreleri

Kapasitif sensörlerin okuma devreleri yüksek hassasiyet, geniş ölçüm aralığı, yüksek çözünürlük, düşük gürültü seviyesi, dijital ve analog okuma, kolay entegrasyon düşük güç tüketimi, yüksek sinyal-gürültü oranı, yüksek hız ve küçük boyutlu olma özelliklerini taşımalıdır. Bu nedenle burada kapasitif sensörlerin okuma devreleri hakkındaki literatür burada sunulmuştur. Burada sunulan okuma devreleri tezde tasarlanan devrede kullanılmış olduğundan bu bölümde detaylandırılarak sunulmuştur.

Kapasitif sensörlerin tipik konfigürasyonu Şekil 4' te verilmiştir [30]. Sistemin çalışma prensibinde, sistem bir analog ön devre içermektedir. Bu devre sensörle arayüz oluşturan ve ölçülecek fiziksel nicelikteki değişikliğin meydana getirdiği kapasitans değişimini voltaj veya akıma dönüştürmektedir. Analog sinyalleri dijital sinyallere çeviren bir ADC ve sinyal son işlemesi için bir son işlemci bulunmaktadır. Uygulamaya bağlı olarak sensör ve ADC, analog ön uç devresi dışında doğrudan bağlanabilir. Çıkışın analog olması durumunda yalnızca sensörü ve analog ön uç devresini içerebilir [30].



Şekil. 4. Kapasitif Sensör ve Okuma Sisteminin Blok Diyagramı [30]

1.3.1 RC: Doldur Boşalt Ölçüm Yöntemi

Kapasitif sensörün okuma devresinde bulunan RC devresi sensörün çalışmasında en önemli parçadır. Kapasitans bir DC devrede akım akışı sürekli olmasa bile kondansatöre uygulanan gerilimin değişmesi durumunda anlık olarak geçecek dolma veya boşalma akımları olacaktır. Kapasitörün dolmasında veya boşalmasında geçen sürenin belirlenmesi için devre zaman sabiti RC bilinmelidir. Sabit bir R kullanıldığı zaman değişen C değeri zaman sabitinin ölçülmesi ile bulunmuş olur [33].

Doldur boşalt gibi kapasitif devreler en temel devreler olup Arduino Capacitancemeter gibi hobi devrelerinde popülerdir [33]. Genel olarak yüksek kapasitans değerini basit ve ucuz okuma yöntemi olarak kullanırlar [34]. Sıcaklık ile ölçümün etkilenmesi ve düşük kapasitans değerlerini okumadaki zorluk bu tür devrelerin hassas uygulamalar için çok tercih edilmemesine neden olmuştur [35].

1.3.2 Faz Farkı

Ölçülmesi istenen kapasitörün olduğu bir devreye bir AC sinyal uygulandığında devre kapasitöre bağlı olarak bir faz farkı oluşturur. Bu faz farkının ölçülmesi ile de ölçülmek istenen kapasitör bilgisine ulaşılmış olur [36].

Faz farkı yöntemi literatürde kapasitans ölçümü için oldukça kullanılan bir yöntemdir. Genel olarak düşük kapasitansları da başarı ile ölçebilen etkili bir yöntemdir [37]. İki sinyalin aynı frekansa sahip olması durumunda bile iki sinyal arasında faz farkı olması durumu sinyalin birisinin diğerine göre faz açısıyla kayması anlamına gelir [38].

Bir devrede kondansatör ve bobin kullanılması durumunda devrede faz farkı oluşur. Frekansı aynı olan işaretlerin durumu için faz farkı tanımlaması yapılır. Aynı frekanslı işaretlerin birinin diğerinden faz farkı ikinci işarette oluşan gecikme

biçiminde tanımlanır [36].

1.3.3 CFC: Kapasitansdan Frekansa Dönüştürücü

Kapasitanstan Frekansa Dönüştürücü (CFC), elektronik bir devre olup kapasitif sensörlerin sinyallerini frekans sinyallerine dönüştürür. Kapasitans, kapasitif sensördeki fiziksel bir değişikliğe bağlı olarak değiştiğinde, CFC, kapasitans değişimini ölçmek için kullanılır ve sonuçta frekans değişir [39]. Endüstriyel uygulaması oldukça fazla olan bu dönüştürücü, bir osilatör devresi ve kapasitörden oluşur. Kapasitörün kapasitansı değiştiğinde, osilatör devresinin frekansı değişir ve böylelikle çıkış ünitesinde frekans sinyali üretilir. Bu devre: geniş bir ölçüm aralığına sahip olup farklı kapasitans değerlerindeki sensörlerle kullanılabilme, yüksek doğruluk seviyesi ve hassas ölçümler için uygun olma, dijital ve analog çıkış sinyalleri sağlayabilme, analog çıkış ile sensör ölçümlerinin gerçek zamanlı okunmasına, dijital çıkış ile ölçümleri işlemek amacıyla dijital devrelere yönlendirme ve az güç tüketim özelliklerine sahiptir [40]. Endüstriyel alanda endüstriyel otomasyon, tıp, otomotiv, sıvı seviyesi, basınç, nem, sıcaklık ve hava kalitesi gibi parametrelerin ölçüleceği sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır [40, 39].

Kapasitanstan Frekansa dönüştürücünün en temel bileşeni kapasitör, kapasite değeri ve frekans sinyalinin ölçüm aralığını belirler ve bir sensörle kullanılır. Bu dönüştürücü aynı zamanda bir mikroişlemci veya sayıcı çipi olarak tasarlanan sayıcı bileşenine sahip olup bunun görevi frekansın sayılması ve dijital bir sinyal olarak çıkış vermesidir [41].

1.3.4 Demodülasyon

Ölçülmek istenen değişken bir kapasitörün bir AC sinyal ile sürülmesi durumunda kapasitansın büyüklüğünün AM olarak taşıyıcı AC sinyalin üstüne bindiği bir akım oluşur. Bu akımın akım-gerilim dönüştürücüler ile voltaja çevrilmesi ve sonra AM sinyalindeki bilginin geri alınabilmesi için demodülasyon yapılması temelli kapasitif okuma devrelerine demodülasyon tipi devreler denir [42, 43]. Taşıyıcı sinyalin demodülasyon sırasında aynı fazda olması ile senkron demodülasyon [44], farklı fazda olması ile asenkron demodülasyon [44], 90 derece faz farkı ile iki ayrı sinyal ile demodüle edilmesi durumunda da karesel demodülasyon [42] denilen farklı tipleri bulunur. Genel olarak bu devreler yüksek performans sağlayan kapasitif devrelerdir. C ölçümü, demodülasyon işlemi ile birlikte geniş bir uygulama alanı bulan

tekniktir. Bu teknikle, sinyallerin zaman ve frekans özellikleri analiz edilebilir. Bu tekniğin özellikle kullanıldığı alanlar elektrik mühendisliği, iletişim mühendisliği ve radyo yayıncılığı alanlarıdır [45].

1.3.5 ASIC: Uygulamaya Özel Tümlleşik Devre

Transistör temelli entegre devreler olan ASIC'ler kapasitif ölçüm devrelerinde oldukça yaygın olarak kullanılırlar [46]. Özellikle anahtarlamalı kapasitör denilen yöntem temellidirler [47]. Entegre devrelerde direnç üretiminin zorluğu ile anahtarlamalı kapasitörler direnç yerine entegre devrelerde farklı kullanımda olabilirler. Bu devrelerin kapasitif ölçümdeki temel işlemleri demodülasyon temelli devrelerdeki direnç yapılarının tamamen kaldırılması ve bu alanda özelleşmesidir. Birçok entegre devre üreticisi kapasitör ölçümleri için entegre devre çözümleri sunmuştur [48].

ADC, sinyallerin analog formdan dijital forma dönüştürülmesi olup dijital sinyal işleme uygulamalarında, veri toplama ve işleme işlemlerinde oldukça önemlidir. AD için ASIC tasarımı, özellikle yüksek hızlı ve yüksek doğruluk gerektiren endüstriyel kontrol sistemleri, tıbbi cihazlar ve telekomünikasyon gibi uygulamalarda önemlidir [48]. Özellikle dokunmatik ekran tipi genel uygulamalarda bu şirketlerin entegre devre çözümleri daha yaygın bir şekilde kullanılır [49].

1.4 Rezonans Devreler

Rezonans kavramı mühendislikte genliğin sonsuza gitmesi olarak bilinmekte olup en az iki bileşenden oluşan bir sistemin belli frekansta yüksek genlikte salınması olarak adlandırılır. Bu kavram fizikte ise birbirleriyle ilintili küçük kuvvet ve etkilerinin toplanması sonucunda elde edilen daha büyük etkilerin oluşturulmasına denir. Bu durum frekansların uyumu olarak da adlandırılmaktadır. Elde edilen bu uyumlu frekansa rezonans frekansı denir. Kullanılan genlik kavramı ise salınmalar esnasında sistemin belirli bir denge durumuna göre yaptığı değişme miktarına denir [50]. Sistemin rezonansa girmesi demek sistemde farklı nedenlerle oluşacak salınmalar sistemi rezonansa ulaştırabilirse salınım genliğinin çok artması demektir.

Rezonansın çok geniş uygulama alanları vardır [50]. Bu alanlar genellikle mekanik, akustik, elektrik, elektronik ve elektromanyetik alanları olup rezonansın bir başka uygulaması da nükleer manyetik rezonans ve elektron spin rezonans spekt-

roskopisi gibi zamansal ve periyodik değişimlerin var olduğu mekanizmalarda da var olmasıdır [50].

Rezonans devrelerin işleyişi ve devrenin tepki karakteristiği devrenin yüksek frekanslarda rezonansa girmesi sağlanarak değiştirilebildiğinden yüksek veya düşük frekanslı sinyalleri filtrelemek veya depolamak için kapasitörler; devrenin düşük frekanslarda rezonansa girmesi devrenin tepki karakteristiğini değiştirdiğinden düşük frekanslı sinyalleri filtrelemek, depolamak veya birleştirmek için endüktörler; devrenin güvenliği gerilim veya akım sınırlandırılarak sağlanabildiğinden devrenin kalitesini artırmak veya güç kayıplarını önlemek için dirençler; akım yönünün kontrolüyle devrenin karakteristiği değiştirilebildiğinden güç kaynaklarındaki dalgalanmaları azaltmak veya yüksek frekanslı sinyalleri doğru yönlendirmek için diyotlar kullanılarak sağlanır [51].

Rezonans devreler endüstride bir çok uygulama alanı bulmaktadır. Bu alanların başında AC gücünü DC güce dönüştürmek için güç dönüştürme anlamında kullanılması gelmektedir. Güç dönüştürme geleceğin enerji üretimi sayılan güneş panelleri, rüzgar tribünleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının rezonans devreleri kullanarak elektrik enerjisine dönüşümün sağlandığı en önemli alandır. İndüksiyon ısıtma ekipmanlarında elektromanyetik alan oluşturmak için rezonans devreler kullanılarak metal parçaların ısıtmasını sağlayan endüstriyel ısınmada kullanılmaktadır. Tıp alanının en önemli aracı olan MR insan bedenindeki organları görüntülemek için kullanılır ve rezonans devreler bu görüntülemeyi yapmak için manyetik alanın oluşmasına yardımcı olur. RF dalgalarının iletimi için kullanılan rezonans devreler telekomünikasyon alanında önemli bir yer tutmaktadır [52].

Rezonans devrelerin kazanç artırımı için kullanılmasının temelinde belirli bir frekansta maksimum kazanç elde etmek fikrini hayata geçirmek için tasarlanmaları yatar. Bu devreler aynı frekansta rezonans frekansı ile çalışarak, sinyal gücünü artırmak veya bir sinyali belirli bir frekansta daha keskin bir şekilde filtrelemek için kullanılabilir. Aynı zamanda bazı uygulamalarda da osilatör olarak kullanılabilirler. Genel olarak rezonans devreler, RLC devreleri olarak bilinir ve direnç (R), endüktans (L), kapasitans (C) şeklinde bileşenlerin bir bütününden oluşurlar. Böylelikle bu bileşenler aracılığıyla devrenin rezonans frekansını ve buna bağlı olarak maksimum kazancın elde edilebileceği frekans belirlenir. Belirli bir frekansta kazancı artırmak için rezonans devrenin filtreleme yapmak amacıyla kullanılması durumunda devre tasarımında kapasitör ve endüktörün doğru şekilde boyutlandırılması gerekmektedir.

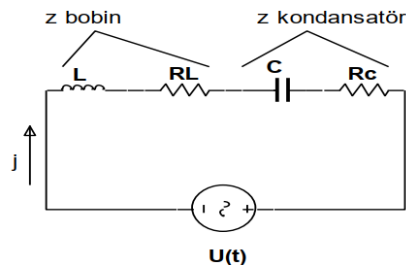
rılması oldukça önemlidir. Böylelikle devrenin rezonans frekansı istenilen frekansta olacağından maksimum kazanç elde edilecektir [51, 52].

1.4.1 Seri Rezonans Devreler

Bir rezonans devresinde bir bobin ile bir kondansatörün seri veya paralel bağlanması durumu seri rezonans devresini veya paralel rezonans devresini oluşturur. Buradaki ana amaç bobin ile kondansatörün seri veya paralel bağlı olması durumudur. Rezonans devrelerin oluşturulmasında kullanılan bobinler sargı dirençleri nedeniyle ideal bobinler değildirler [53]. Radyo uygulamalarında çeşitli yapıdaki bobinler kullanılmıştır. Endüktansın değeri bobinlerin sarım sayısının karesi ile ortamın bağıl manyetik geçirgenliği ile orantılıdır. Bu tür bobinlerle gerekli dikkat gösterilmesi durumunda 100 – 1000 derecesinde Q değerleri kolayca sağlanır. Rezonans devreleri ile ilgili yapılan bilimsel araştırmalarda ortaya konan bağıntılarda $Q \gg 1$ olarak alınarak sonuçlar ortaya konulmuştur [53].

Seri rezonans devreleri, belirli bir frekans aralığında maksimum kazanç sağlamak için tasarlanabilir. Bu devrelerde endüktans ve kapasitansın seri bağlantısı, devrenin rezonans frekansını belirler. Rezonans frekansında, devredeki impedans minimuma düşer ve maksimum akım geçişi sağlanır. Bu da, belirli bir frekansta maksimum kazanç elde etmek için kullanılabilir [54].

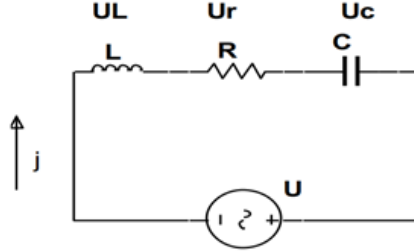
Seri rezonans devresi Şekil 5' te şematik olarak verilmiştir [53]. Devrede RL selfin, RC kondansatörün kayıp dirençleridir [53].



Şekil. 5. Eşdeğer Seri Rezonans Devresi [53]

Devreden akan I akımı RL direncinde akımla aynı yönde olan $U_R = IRL$ gerilim düşümüne, selfte akımdan 90° ileri kaymış $U_L = I\omega L$ gerilim düşümüne ve kondansatörde, akımdan 90° kaymış $U_C = \frac{1}{\omega C}$ gerilim düşümüne sebep olacaktır.

Bu ise Şekil 6' da verilen ideal seri rezonans devresinin oluşmasına neden olacaktır [53].



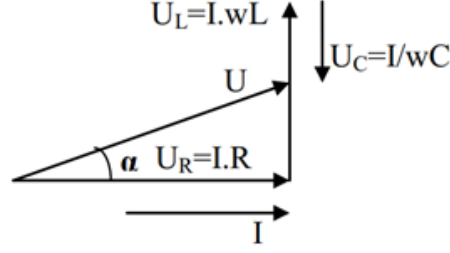
Şekil. 6. İdeal Seri Rezonans Devresi [53]

Bir frekans değeri için olması durumunda reaktif terimi sıfır olur ve devrenin toplam empedansı $Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ denklemi ile bulunur ve tamamen dirençsel olur. Bu durum seri rezonans frekansına seri rezonans frekansı denir. Bu frekans aşağıda verilen formülle hesaplanır [53].

$$X_L = X_C \rightarrow 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Devrenin empedansı f_0 frekansında minimum ($Z_{\text{toplam}}=R_s$) olduğundan akım maksimum değerde ve gerilimle aynı fazda olur. Bobin ve kondansatördeki gerilimler ± 90 faz farklıdır. Rezonans durumunda bu açılar toplamı sıfır olur. Rezonans frekansı ise akımın en yüksek değeri aldığı frekanstır. Rezonans frekansının (f_0) altında ve üstünde gerilimin en yüksek değerinin yani gücün yarıya düştüğü frekanslar ise alt kesin frekansı ve üst kesin frekansı olarak adlandırılır. Oluşan alt ve üst kesin frekanslarının farkına rezonans devresinin frekans bant genişliği denir [53]. Seri rezonans devreler için herhangi bir frekansta akım-gerilim fazör diyagramını Şekil 7' deki gibidir [53]. I devreye etki eden akım frekansını göstermek üzere,



Şekil. 7. Seri Rezonans Devresinin Fazör Diyagramı [53]

devreye etki eden gerilim U devreden akan akım I ya α karşı açısının ölçüsü kadar ön tarafa kaymış olacaktır. Faz kayması U ile I arasında olacaktır. Bu faz kayması U_L ile U_C değerlerine göre pozitif, negatif veya $\alpha = 0$ değerlerini alabilecektir. Oluşan açı $-90 < \alpha < 90$ aralığında değişeceğinden ve U_L ile U_C değerleri w değerine bağlı olduğundan her bir frekans için ayrı bir fazör diyagram çizmek gerekir. Devre $U_L = U_C$ olması durumunda rezonansa olacağından $\alpha = 0$ olacaktır. Bu durumda devre $\alpha = 0$ durumunda veya $U_L = U_C$ olması durumunda rezonans-tadır denir [53]. Var olan ters orantısal ilişki kullanıldığında, rezonansa $R_L < wL$ olması durumunda kondansatördeki ve bobindeki gerilim giriş geriliminden büyük olacaktır. Rezonans frekansında kullanılan U_L ile U_C eşitliğinden;

$$I.w_0.L = I.\frac{1}{w_0C} \quad (3)$$

$$w_0^2 = \frac{1}{LC} \quad (4)$$

buradan

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

bulunur. Devrenin giriş direnci R_g devrenin rezonans halinde olması durumunda en küçük değerini alacaktır. Buna göre giriş direnci $R_g(jw)$:

$$\begin{aligned} R_g(jw) &= R_L.j(wL - 1/wC) \\ &= R_L^2(wL - \frac{1}{wC})^2.e^{j\arctg\frac{wL - \frac{1}{wC}}{R_L}} \end{aligned} \quad (6)$$

biçiminde hesaplanır [50]. Giriş direncinin modülü frekansla değişeceğinden dolayı giriş gerilimi U sabit kalmasına rağmen rezonansa yaklaşıldığında giriş akımı I

büyür. Böylelikle, akım rezonansda en büyük değerini alır ve frekansın rezonans frekansını geçmesi durumunda tekrar küçülür. Devrenin giriş direncinin frekansla değişimi devrenin kalitesine bağlıdır. Devrenin kalitesi devrenin bant genişliğiyle ters orantılı olup eğride devrenin direnci $R = \sqrt{2} | R_g |$ olan frekanslar bulunarak üst kesim frekansı ile alt kesim frekansı farkı bulunarak $\Delta_w = w_U - w_A$ biçiminde hesaplanır. Δ_w küçüldükçe filtrenin kalitesi artar ve filtrenin kalitesi kalite faktörü olan Q ile hesaplanır [53]. Burada;

$$\begin{aligned} Q &= \frac{w_0}{\Delta w} \\ &= \frac{f_0}{f_U - f_A} \end{aligned} \quad (7)$$

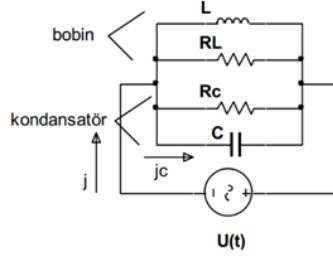
şeklinde bulunur. Aynı zamanda $Q = \frac{\text{devrede biriken enerji}}{\text{periyotta harcanan güç}}$ biçiminde de formüle edildiğinden $Q = \frac{w_0 L}{R} = \frac{1}{w_0 RC}$ eşitliği elde edilir. Kalite faktörünün büyük olması selfin indüklenmesinin büyük, direncinin küçük olmasını gerektirir [53].

Seri rezonans devreler, belirli bir frekans aralığında filtreleme yaparak güç sistemindeki harmonik bozulmaları azaltan elektrik güç sistemlerinde, belirli bir frekans aralığına sahip sinyalleri geçirip diğer frekanslardaki sinyalleri engellediğinden ve sinyallerin belirli bir frekans aralığında tutulmasını sağladığından radyo frekansı uygulamalarında, belirli bir frekans aralığında sinyallerin modüle edilmesine ve yeniden çıkarılmasına yardımcı olduğundan modülasyon yöntemlerinin uygulanmasında veri iletiminde, belirli bir dalga boyunda işlem yaparak optik sinyalleri filtreleyebilme veya yönlendirebilme amacıyla optik iletişim sistemlerinde kullanılarak endüstride kullanılmaktadır [32].

Seri rezonans devreler kazanç artırımı içinde kullanılır. Seri rezonans devreleri, belirli bir frekans aralığında maksimum kazanç sağlamak için tasarlanabilir. Bu devrelerde endüktans ve kapasitansın seri bağlantısı, devrenin rezonans frekansını belirler. Rezonans frekansında, devredeki impedans minimuma düşer ve maksimum akım geçişi sağlanır. Bu da, belirli bir frekansta maksimum kazanç elde etmek için kullanılabilir. Bu durum devredeki enerjinin rezonans frekansındaki belirli bir frekans aralığına odaklanmasını sağlar. Bu, frekans aralığı da maksimum kazancın elde edilmesini sağlar. Genellikle elektromanyetik türbülans giderme, filtreleme ve amplifikasyon uygulamalarında kullanılır [55].

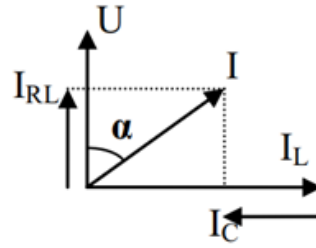
1.4.2 Paralel Rezonans Devreler

Paralel rezonans devresi Şekil 8' de şematik olarak verilmiştir [53]. R_L ve R_C bobinle kondansatörün kayıp dirençleri olup kondansatörlerdeki kayıplar çok küçük olduklarından dolayı $R_C = \infty$ olarak alınacaktır [53].



Şekil. 8. Paralel Rezonans Devresi [53]

Devrede gerilimi frekans olarak paralel rezonansın fazör diyagramını oluşturabiliriz. Selfteki akım $I_L = \frac{U}{\omega L}$ gerilime göre 90 derece geri kayacak olup direnç R_L den geçen akım $I_{RL} = \frac{U}{R_L}$ gerilimiyle aynı yönlü olacaktır. Bu durumda kondansatörden geçen akım $I_C = U \cdot \omega C$ gerilimine göre 90 derece ileri kayacaktır. Bütün bu verilere göre paralel rezonansın fazör diyagramı Şekil 9' da görüldüğü gibi olacaktır [53].



Şekil. 9. Paralel Rezonans Devresinin Fazör Diyagramı [53]

Frekansla beraber I_C ile I_L değerleri değişeceğinden dolayı gerilim U ile akım I arasındaki α açısı $-90 < \alpha < 90$ arasında her değeri alabilecektir. Devre $I_C = I_L$ olması durumunda rezonans durumunda olacaktır. Bu durumda $I_C = I_L$ eşitliğinden

$$U\omega_0 C = \frac{U}{\omega_0 L} \quad (8)$$

$$w_0^2 = \frac{1}{LC} \quad (9)$$

buradan

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

bulunur. Bu durumda devrenin iletkenliği rezonans frekansında en küçüktür.

$$G = \frac{1}{R_L} + j \underbrace{\left(w_0 C - \frac{1}{w_0 L} \right)}_{=0} = \frac{1}{R_L} \quad (11)$$

Var olan ters orantısal ilişki nedeniyle rezonans devreye giren akım en küçük değerini alırken selften ve kondansatörden geçen akımlar oldukça büyük olacaktır. Seri rezonans devrelerde olduğu gibi paralel rezonans devrenin kalite faktörü devrenin bant genişliğinden bulunur ve bu kalite faktörü $Q = \frac{w_0}{\Delta w}$ dır. Buna benzer olarak $Q = \frac{\text{devrede biriken enerji}}{\text{periotta harcanan güç}}$ formülü kullanılarak

$$Q = \frac{R_L}{w_0 L} = w_0 R_L C \quad (12)$$

biçiminde de hesaplanır [53].

Paralel rezonans devreler, radyo ve televizyon alıcılarında belirli frekanslardaki sinyalleri geçirip diğerlerini engelleme filtre görevi yaptığundan frekans filtrelerinde, daha düzgün bir güç çıkışı sağlayabilmek için AC güç kaynağındaki dalgaları azaltması nedeniyle güç kaynaklarında, bir indüktörün içinde bir akım akarken manyetik alan üretilmesi sonucu manyetik alanın şiddetini ölçmek için manyetik alan ölçümünde, belirli frekanslardaki sinyallerin amplifikasyonunu sağladığından amplifikatör görevi yapmasında, manyetik alanın üretilmesi için yüksek frekanslı sinyallerin kullanılması ve bu sinyallerin manyetik alanın üretildiği bobinlere gönderilmesinden ötürü Manyetik Rezonans Görüntüleme cihazlarında ve RF sinyallerini filtrelemesi nedeniyle de radyo frekansı uygulamalarında kullanılmaktadır [56].

Paralel rezonans devreleri, frekans seçiciliği ve filtreleme özellikleriyle ilgili olduğundan genellikle kazanç artırımı için kullanılmazlar [56].

1.5 Tezin Amacı ve Önemi

Rezonans devreler kapasitif sensörlerde kazanç artırımı olarak kullanılabilir mi? sorusu literatüre yeni bir orjinal cevap ekleyeceğinden bu cevabın olumlu veya olumsuz olması durumu tezin amacı olarak belirlenmiştir. Bu kazancın elde edilme yöntemleri ve bu kazancı elde eden devre tasarımlarını ortaya koyabilme, sonuçlarını analiz ederek doğru sonuçların elde edilmesi de tezin önemini ortaya koyduğundan bu bölümde tezin amacı ve önemi verilmiştir.

1.5.1 Tezin Amacı

Tezin amacı; kapasitör ve direnç içeren devrelere, seri veya paralel olarak bobin ve direnç eklenmesi durumunda devrenin BODE analizinin yapılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda literatürde var olan devrelerin BODE diyagramlarındaki farklılıklar detaylandırılarak eklenen bobin ve direnç devrelerinin BODE analizindeki performanslarının incelenmesidir. İnceleme sonucunda kapasitif sensörlerin tasarlanan hangi rezonans devresinde kazanç artırımı sağladığı tespit edilerek düşük kapasitör kullanmadan çeşitli rezonans devreler tasarlanıp bu devrelerde yine düşük kapasitansların ölçülmesine çözüm aranmasıdır. Baskı devre üretimi esnasında üretimden kaynaklı çeşitli problemler oluşabileceğinden devre tasarımlarında bu problemlerin çözümleri de yapılarak kazanç artımı sağlayan devre tasarımının yapılmasıdır.

1.5.2 Tezin Önemi

Düşük kapasitörlerin etkin bir şekilde ölçülmesi endüstride oldukça karşılaşılan bir sorundur. Bu soruna çözüm bulmak amacıyla genellikle yine düşük kapasitörler içeren okuma devreleri kullanılmaktadır. Bu tez ile düşük kapasitör kullanmadan rezonans devreler ile oluşturulacak kazanç ile yine düşük kapasitansların ölçülmesine çözüm aranmaktadır. Düşük kapasitörlerin okuma devrelerinden çıkarılması ile baskı devre üretiminde, üretimden kaynaklanan istenmeyen parazitik kapasitanslar ve komponent toleranslarından kaynaklanacak problemleri minimize edecektir.

Gelişen teknolojiyle birlikte çeşitlendirilen ve kalite kavramının da ön plana çıktığı tüm iş ve işlemlerde kapasitif sensörlerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kapasitif sensörlerin yapılan işlere beklenen düzeyde ve zaman aralığında cevap vermesi de ekonomik anlamda tercih edilebilirliğini artırmaktadır. Bu nedenle bu sensörlerin BODE diyagramlarının yapılması ve daha kısa zamanda daha verimli

işlerin ortaya konulmasını sağlayacak şekilde güncel tutulmasının sağlanabilmesi oldukça önemlidir. Demodülasyon kullanılarak tasarlanan paralel rezonans devrenin kazanç artırımı sağladığının gözlemlendiği bu tez üç açıdan oldukça önemlidir.

Birincisi, rezonans devrelerin kapasitif sensörlerde kazanç artırımı olarak kullanılması konusunda literatüre orjinal çalışma ekleyebilme potansiyelidir. İkincisi, tezde tasarlanan devre ve analiz sonuçlarıdır. Şöyle ki; Seri bağlı bobin ve kondansatör rezonans devrede kısa devre görevi gördüğünden dolayı aktif olan filtre kazanç artırımı sağlamazken, kazanç artırımı sağlayan tasarım paralel rezonans devresi olup bu devrede düşük değerde bir kapasitör kullanılarak opamp girişinde bulunan kapasitör elektrot kapasitörü olarak kullanılmıştır. Devrede kullanılan diğer kapasitörler devre girişinde bulunan kapasitörün on katı büyüklüğünde seçilmiştir. Üçüncüsü ise tasarlanan devrenin analizlerinde kapasitör kullanımından kaynaklı hataların giderilerek orjinal bir paralel rezonans devre elde edilmesidir.

2 TASARIM VE MODELLEME

Sensörlerin kullanılmasında bir çok avantajlar vardır ancak sensör kazancı elde etmede sensörün doğru çalışabilmesi için özelliklerin doğru seçilmesi gerekir. Bunun nedeni sensör kazancının sensörün çıkış sinyalinin giriş sinyaline oranı olmasıdır. Bu oranın anlamlı olması için sensörün doğru çalışması ve gürültünün en aza indirgenmesi önemlidir. Çıkış sinyali ne kadar hassas ve doğru olursa kazançta o derece yüksek olur. Aşırı kazançta sensörün gürültüye daha hassas hale gelmesini sağlarken sensörün doğruluğunu da azaltabilir [57].

Kapasitif sensörlerde kazanç aynı zamanda sensörün kapasitif değerinin artırılmasıyla da yapılabilir. Kazancın artırılmasıyla sensörün duyarlılığı ve doğruluğu artarken gürültü de artabilir. Bu nedenle kazancın doğru şekilde ayarlanması son derece önemlidir. Kazanç artırımı sensörün çalışma prensibine ve kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak ta değişebilir. Bu nedenle sensörlerin kazancını etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak kazanç seviyeleri seçilmelidir. Kazancın ayarlanması, sensörün kullanım amaçlarına, uygulama şartlarına ve istenilen çıkış sinyalinin türüne bağlı olmakla birlikte direnç, kondansatör ve amplifikatörler gibi elektronik bileşenler kullanılarak ayarlanabilir [58].

Rezonans devreler kapasitif sensörün kazancını artıracak en önemli yöntemlerden birisidir. Bu devreler sensörün hassasiyetini ve doğruluğunu artırmak suretiyle sensörün performansını iyileştirebilir [59]. Yine rezonans devreler kapasitif sensörün kapasitansını artırarak kazanç artırımı biçiminde kullanılabilir. Kapasitansını artırmak için bir indüktör veya bobin kullanılır ve bu indüktör kapasitif sensör ile birlikte bir rezonans devre oluşturur [55].

Rezonans devresi, kapasitif sensörün girişinde ve çıkışında yer alan bir dizi komponent içerir. Bu komponentler, bir indüktör, bir kapasitör ve bir direnç gibi bileşenlerden oluşabilir. Kapasitif sensörün çıkış sinyali, rezonans devresindeki komponentler aracılığıyla filtrelendirilir, amplifikatörlere yönlendirilir ve bu şekilde artırılır. Bunun için doğru devre tasarımı oldukça önemlidir. Bu tasarımın doğruluğu ise sensörün çalışma frekansına, kapasitansına ve uygulama koşullarına bağlıdır. Rezonans devre sensörün doğru çalışmasını sağlamak için, uygun bir frekans seçer ve doğru bir indüktör ve kapasitör kombinasyonu kullanarak, sensörün çalışma frekansında bir rezonans oluşturur. Bu sayede, sensörün çıkış sinyali artırılır ve doğru

ölçüm sonuçları elde edilir [60].

Rezonans devresi, sensör sinyalinin filtreler ve amplifikatörlere yönlendirilerek, sinyal gürültüsünü azaltır ve hassasiyetini artırır. Ayrıca, rezonans devresi kullanımı, sensörün doğru çalışması için gerekli olan sinyal gücünü artırarak, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu artırır. Bu kazanç artırımını sağlayabilmek için gerekli olan bileşenler: Kapasitif sensör, indüktör, kapasitör ve dirençtir. Bu bileşenler sensörün kazanç artırımında kullanılabilmesi için birlikte uyumlu ve doğru çalışmalıdır [58].

Rezonans devrelerin kapasitif sensörlerde kazanç artırımını sağlayacak temel matematiksel uygulama aşağıdaki gibi verilebilir [61]. Rezonans frekansı, kapasitif sensörün kapasitansına (C) ve indüktansına (L) bağlı olarak

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

biçiminde hesaplanır. Güç amplifikasyonu sensörün çıkış sinyalini amplifikasyon yaparak artırır ve rezonans devresindeki dirençlerin birbirine oranı şeklinde hesaplanır. Yani,

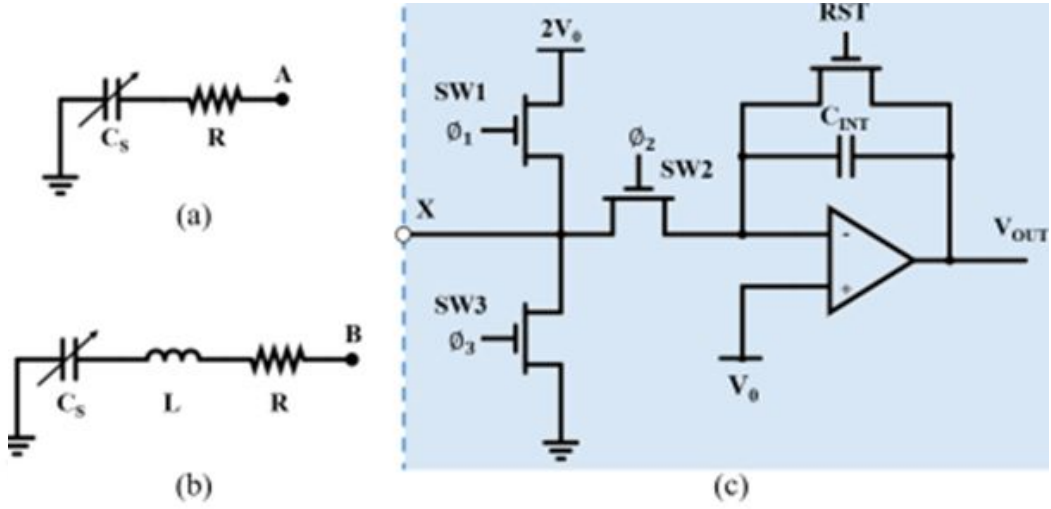
$$A = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

burada R_f geri besleme direnci iken R_{in} giriş direncidir. Sensörün ölçüm doğruluğunu etkileyen kalite faktörü, devrenin direnci (R) olmak üzere,

$$Q = R\sqrt{\frac{C}{L}}$$

formülüyle hesaplanır [62].

Yük dengeleme ilkesine dayanan anahtarlamalı kapasitör entegratörü [15] kapasitansı ölçmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalar iki tür algılama devresi sunar. Bu devreler: daha önceden yapılmış olan indüktörsüz devre [11, 8] ve seri rezonans olan bir indüktörlü devredir [13]. Kapasitansı voltaja dönüştürmek için entegratör kullanılır ki bu entegratör CDC çipinin içinde bulunur [15, 62]. Şekil 10' da yapılan diğer iki konfigürasyon gösterilmektedir [14].

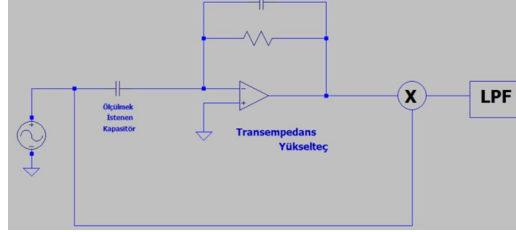


Şekil. 10. İki Tür Algılama Devresi ve Anahtarlamalı Kapasitör Entegratörü [14]
a) İndüktörsüz Devre b) İndüktörlü Devre c) Anahtarlamalı Kapasitör Entegratörünün Basitleştirilmiş Devre Şeması

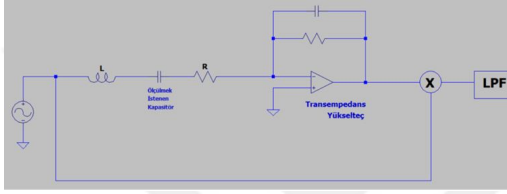
İndüktörsüz devrede Düğüm A, Düğüm X'e bağlanırken ikinci konfigürasyonda Düğüm B bir seri rezonans devresi olarak Düğüm X' e bağlanmıştır. Anahtarlamalı kapasitör entegratörü dört anahtardan oluşur. Bunlar: devreyi çalıştırmak için SW1, SW2 ve SW3 anahtarları, sıfırlamak için de RST anahtarıdır [63]. Çıkış voltajını yükseltmek için bir seri rezonans algılama devresi kullanılmıştır. Bu indüktörlü rezonans devre rezonans frekansında minimum empedansa sahip olup hem kapasitörün hem de devrenin voltajını yükseltir [59]. Seri rezonansın bu özelliği kullanılarak indüktörlü rezonans devresi; indüktörsüz devrede kullanılan algılama sensörünün frekansına ve uyarma sinyali frekansına bağlı kalarak tasarlanmıştır [14]. Rezonans devre kullanılarak sinyalin yükseltilebileceği gösterilirken rezonansa bağlı olarak sinyalin stabil duruma gelmesi zaman almaktadır. Bu problemin nedeni rezonans devrelerin ikinci tip devre olmasıdır.

Yapılmış tüm bu uygulamalar kullanılarak Şekil 11 (a), (b) ve (c)' de verilen devreler tasarlanmasının yapılması ve bu devreler için yapılan tüm analizlerin ve karşılaştırmalarının yapılması bu tezde planlanmıştır. Ancak küçük değişken kapasitansı C_x , küçük kapasitörler kullanmadan yüksek kazanç elde etmek amacıyla planlanan tasarımlardan vazgeçilmiştir. Şekil 11 (a)' daki standart senkron demodülasyon olup kazanç yaklaşık $\frac{C_x}{C_f}$ şeklindedir. Burada C_x elektrot kapasitörü olarak

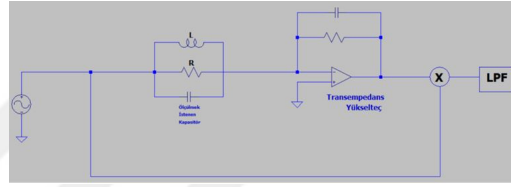
kullanılmıştır. Rezonans devreler yardımı ile bu kazancın $\frac{C_x}{C_f} = \frac{1}{10}$ durumunda olduğunda 0.1 değil de 1' e yaklaşması hedeflenmektedir.



(a) Klasik Senkron Demodülasyon



(b) Seri Rezonanslı Senkron Demodülasyon



(c) Paralel Rezonanslı Senkron Demodülasyon

Şekil. 11. Tasarımı Yapılan Devreler

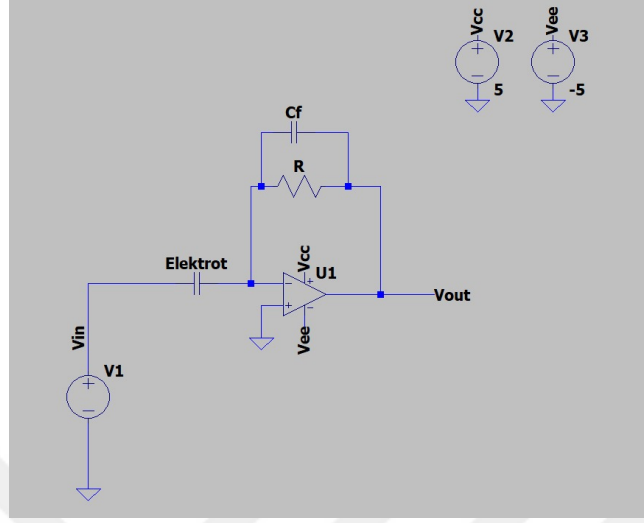
Düşük kapasitör okumalarında devrede komponent olarak düşük kapasitörlü komponentler kullanmamak için rezonans devreler ile kazanç artırımı yapmanın yöntemleri araştırılarak devre tasarımlarını yapabilmek için dört farklı tipteki devreler incelenmiştir. Bu bölümde tasarlanan tüm devre tipleri detaylı olarak sunulacaktır. Tasarlanan devrelerin hepsinde okuma devresi olarak demodülasyon yöntemi kullanılmıştır.

2.1 Devre Alternatifleri

Bu bölümde tasarlanan dört tip devre detaylı olarak sunulmuştur.

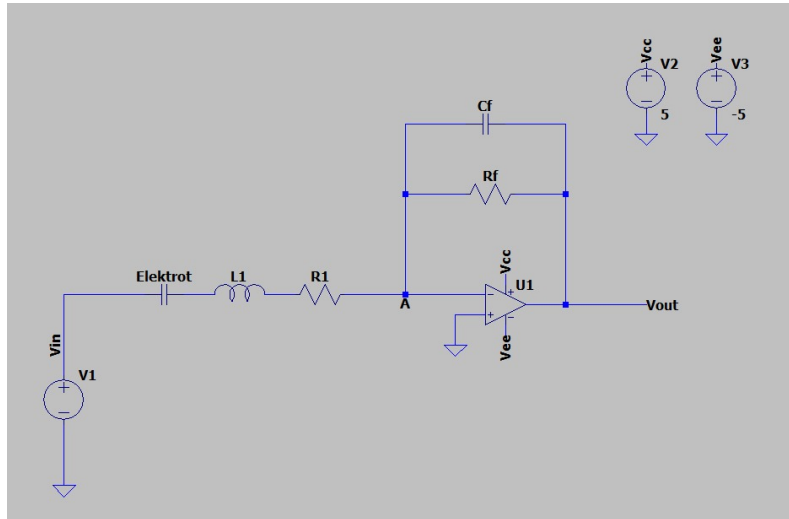
2.1.1 Tip 1

Tip 1 devresinin tasarlanmasında, Şekil 12' de verilen standart bir transempeans yükseltec devresi baz alınarak kazanç elde etmek amacıyla yeni bir transempeans yükseltec geliştirilmiştir.



Şekil. 12. Standart Transempedans Yükselteç

Geliştirilen transempedans yükselteç demodülasyon yöntemlerinde kullanılmıştır. Transempedansın ön tarafında RLC devreleri kullanılarak Şekil 13’ te verilen birinci tip seri RLC devre oluşturulmuştur. Tip 1 devresinden kazanç elde edebilmek için transempedans yükselteçe kapasitör, bobin ve direnç olmak üzere farklı komponentler eklenmiştir. Bu eklemelerde giriş kapasitörünün yanına seri olarak bobin ve direnç eklenmiştir.



Şekil. 13. Tasarlanan Tip1 Devresi

Tasarlanan devrenin öncelikle matematiksel modellemesi ve analizleri yapılmıştır. Matematiksel modellemede A noktasına göre yapılan düğüm denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\frac{V_{in} - 0}{R + sL + \frac{1}{sC_x}} = \frac{0 - V_{out}}{\frac{1}{sC_f} // R_f}$$

$$\frac{sC_x V_{in}}{s^2 LC_x + sRC_x + 1} = \frac{-V_{out}(1 + sR_f C_f)}{R_f}$$

Kullanılan transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{sR_f C_x}{(s^2 LC_x + sRC_x + 1)(1 + sR_f C_f)}$$

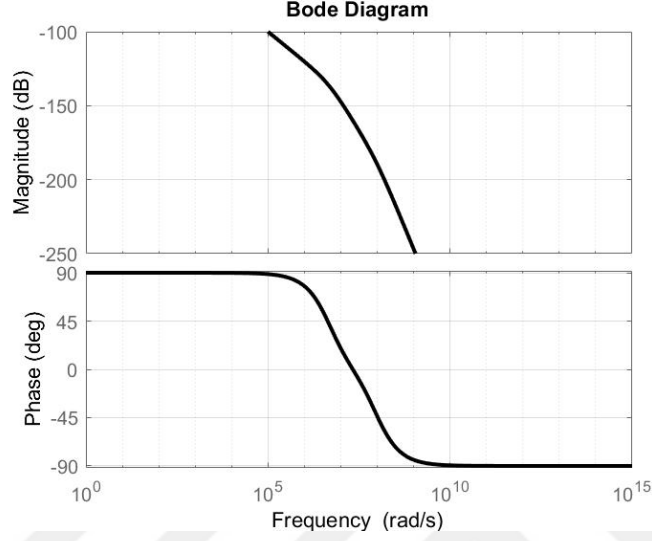
Düğüm formüllerinde ve transfer fonksiyonunda aşağıda verilen değerler kullanılarak

$$\begin{aligned} R &= 1000\Omega \\ L &= 10^{-5}H \\ C_x &= 22 \times 10^{-12}pF \\ R_f &= 10\Omega \\ C_f &= 220 \times 10^{-12}pF \end{aligned}$$

devrenin analizi tamamlanmıştır. Devreyi gözlemlemek için LTSpice ve MATLAB kullanılmıştır. Bu gözlemlenmelerde devreye ait BODE diagramı çıkarılarak MATLAB yardımıyla aşağıda bulunan BODE diyagramını ve faz-frekans şekilleri gözlemlenmiştir. Kullanılan MATLAB kodu

```
%Serial Connection
R=1000; %Ohm
L=10^(-5); %H
Cx=22*10^(-12); %pF
Rf=10;%Ohm
Cf=220*10^(-12);%pF
s = tf('s');
h=-((s*Cx*R) / ((L*Cx*s^2+s*R*Cx+1)*(s*Rf*Cf*s))); %Transfer function
bode(h), grid
```

şeklinde kodlanarak Tip1 devresinin BODE ve faz-frekans diyagramları Şekil 14' te verilmiştir.

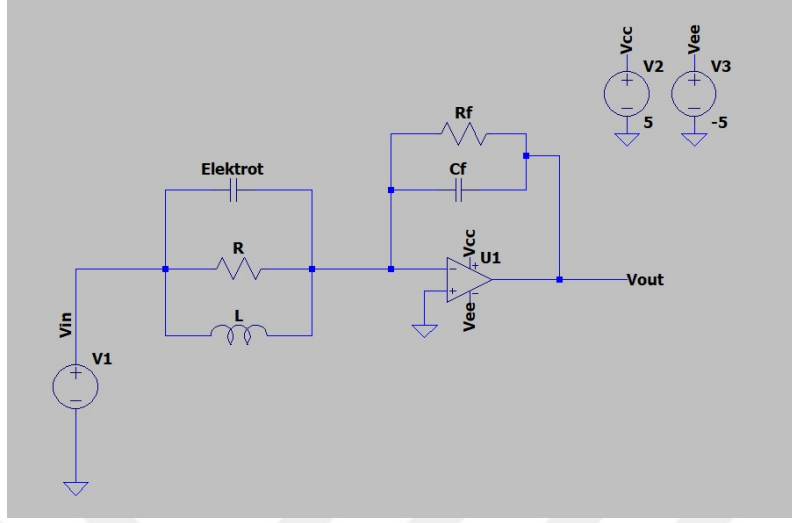


Şekil. 14. Tip1 Bode ve Faz-Frekans Diyagramı

Gözlemlendiği üzere BODE diyagramı ve faz-frekans diyagramı analizlerinden beklenen kazanç elde edilemediğinden seri Tip1 devresi başarılı bulunmamıştır.

2.1.2 Tip 2

Tip1 devresinde seri RLC devresi kullanılıp kazanç elde edilmediğinden paralel RLC devresinde kazanç elde edilmesi sağlanabilir düşüncesiyle Tip2 paralel RLC tasarlanmıştır. Bu devrenin tasarlanmasında da demodülasyon yöntemlerinde kullanılan transempedans yükseltecin ön tarafında RLC devreler kullanılmıştır. Şekil 15' te paralel RLC devresi verilmektedir.



Şekil. 15. Tasarlanan Tip2 Devresi

Bu devrede giriş kapasitörüyle birlikte direnç ve bobinde paralel olarak devreye bağlanmıştır. Tasarlanan devrenin öncelikle matematiksel modellemesi ve analizleri yapılmıştır. Matematiksel modellemede yapılan düğüm denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned}
 \frac{0 - V_{out}}{R_f \parallel \frac{1}{sC_f}} &= \frac{V_{in} - 0}{\frac{1}{sC_x} \parallel R \parallel sL} \\
 R_f \parallel \frac{1}{C_x} &\Rightarrow \frac{R_f}{1 + sR_fC_f} \\
 \frac{1}{sC_x} \parallel R \parallel sL &\Rightarrow \frac{sRL}{s^2RLC_x + sL + R} \\
 \frac{-V_{out}(1 + sR_fC_f)}{R_f} &= \frac{V_{in}(s^2RLC_x + sL + R)}{sRL}
 \end{aligned}$$

Kullanılan transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f(s^2RLC_x + sL + R)}{sRL(1 + sR_fC_f)}$$

Düğüm formüllerinde ve transfer fonksiyonunda aşağıda verilen değerler kullanılarak

$$R = 1000\Omega$$

$$L = 10^{-3}H$$

$$C_x = 22 \times 10^{-12}pF$$

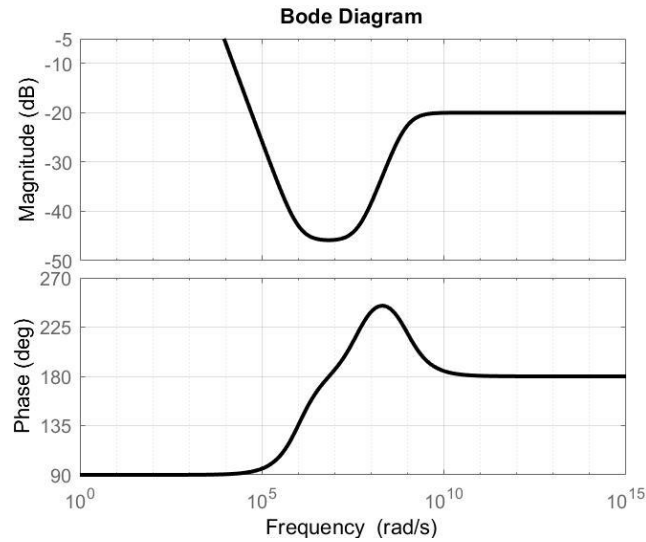
$$R_f = 5.1\Omega$$

$$C_f = 220 \times 10^{-12}pF$$

devrenin analizi tamamlanmıştır. Devreyi gözlemlemek için LTSpice ve MATLAB kullanılmıştır. Bu gözlemlerle devreye ait BODE diagramı çıkarılarak MATLAB yardımıyla aşağıda bulunan BODE diyagramını ve faz-frekans şekilleri gözlemlenmiştir. Kullanılan MATLAB kodu

```
%Parallel Connection
R=1000; %Ohm
L=10^(-3); %H
Cx=22*10^(-12); %pF
Rf=5.1;%Ohm
Cf=220*10^(-12);%pF
s = tf('s');
h=-((Rf*(s^2*R*L*Cx+s*L+R)) / ((s*R*L)*(1+s*Rf*Cf))); %Transfer function
bodeplot(h), grid
```

şeklinde kodlanarak BODE ve faz-frekans diyagramları Şekil 16' da verilmiştir.

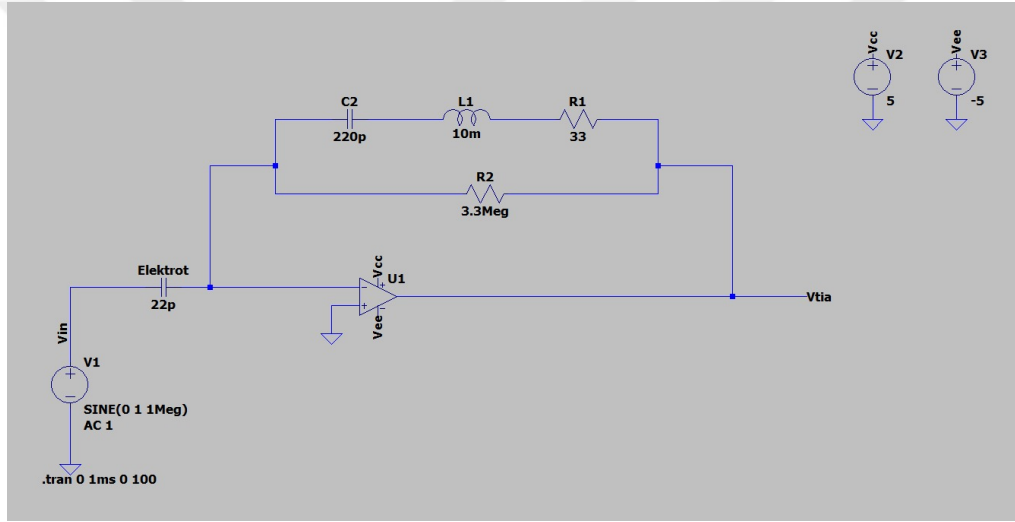


Şekil. 16. Tip2 Bode ve Faz-Frekans Diyagramı

Gözlemlendiği üzere BODE diyagramı ve faz-frekans diyagramı analizlerinden beklenen kazanç elde edilemediğinden paralel Tip2 devresi başarılı bulunmamıştır.

2.1.3 Tip 3

Transempeans yükseltecin geri besleme kolu üzerine RLC devreleri konularak Şekil 17' de verilen Tip3 devresi oluşturulmuştur. Yapılan matematiksel modelleme ve analiz sonuçlarına göre güzel sonuçlar vermiş olmasına rağmen pratikte LTSpice çizimi sonrasında osilasyona neden olduğu gözlemlendiğinden stabil bir devre olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil. 17. Tasarlanan Tip3 Devresi

Tasarlanan devrenin öncelikle matematiksel modellemesi ve analizleri yapılmıştır. Matematiksel modellemede yapılan düğüm denklemleri aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\frac{V_{in}}{\frac{1}{sC_x}} = \frac{0 - V_{out}}{R_f \parallel \left(\frac{1}{sC_f} + sL + R \right)}$$

$$Z_{out} = \frac{s^2 R_f L C_f + s R_f R C_f + R_f}{s^2 L C_f + s(R_f C_f + R C_f) + 1}$$

$$sC_x V_{in} = -\frac{V_{out}}{Z_{out}}$$

Kullanılan transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$H(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -sC_x(Z_{out})$$

Düğüm formüllerinde ve transfer fonksiyonunda aşağıda verilen komponent değerleri kullanılarak

$$R = 10^6 \Omega$$

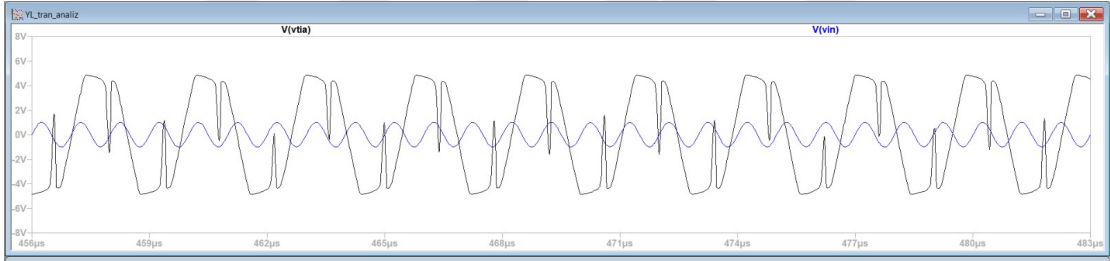
$$L = 10^{-3} H$$

$$C_x = 22 \times 10^{-12} pF$$

$$R_f = 1 \times 10^6 \Omega$$

$$C_f = 220 \times 10^{-12} pF$$

devrenin analizi tamamlanmıştır. Devreyi gözlemek için LTSpice kullanılmıştır. Tip3 devresinin transient analizi yapılarak Şekil 18' de verilmiştir.

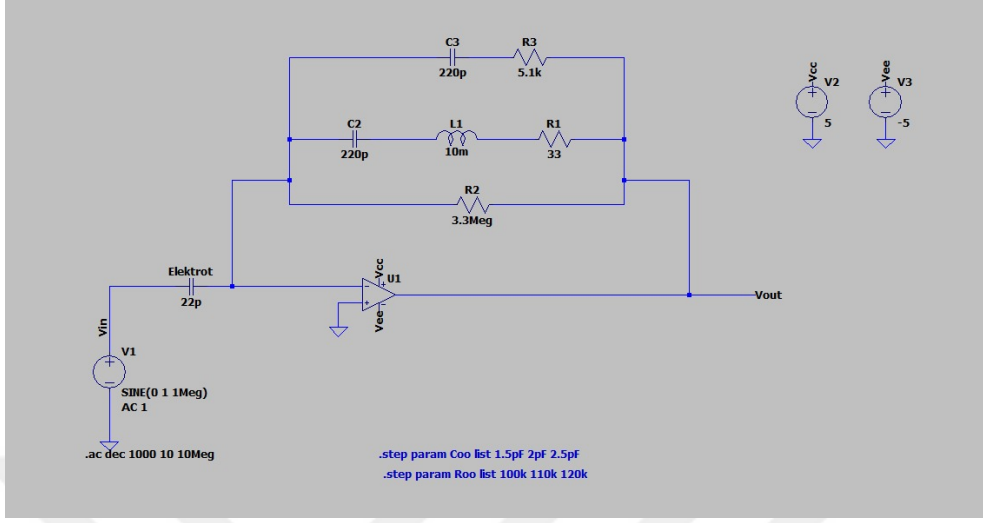


Şekil. 18. Tip3 Transient Analizi

Şekil 18' den de görüleceği üzere giriş ve çıkış frekanslarının farklı olması devrenin osilasyon yaptığını göstermektedir. Stabil bir devre olmayışı ve kazanç sağlamayacağı nedeniyle Tip3 devresi tercih edilmemiştir.

2.1.4 Tip 4

Tip 3 devresinde oluşan osilasyonu ortadan kaldırabilmek amacıyla yeni devre tasarımları yapılmıştır. Tip 3 devresinde yapılan devredeki transempedans yükseltecin geri besleme kolu üzerine ek olarak bir adet kapasitör ve direnç eklenerek devre modifiye edilmiştir. Bu yeni devrede Tip 3 devresinde oluşan osilasyon ortadan kaldırılarak stabilize edilmiştir. Şekil 19' da Tip 4 devresi yer almaktadır.



Şekil. 19. Tasarlanan Tip4 Devresi

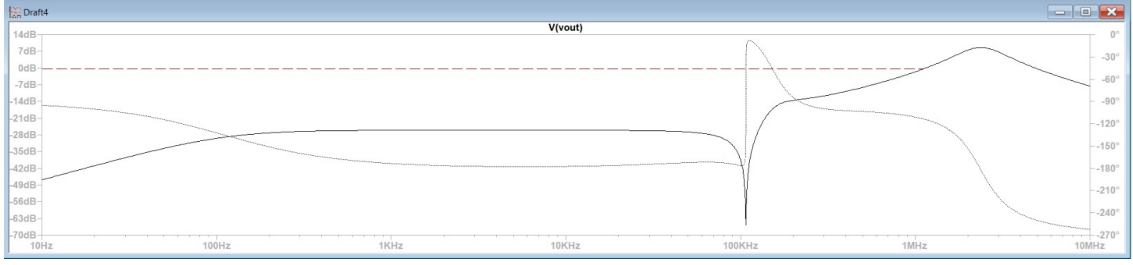
Tip 4 devresi LTSpice'da tasarlanıp AC simülasyon testleri yapılmıştır. Yapılan simülasyon testi bölümde sunulacaktır. Simülasyon testinden beklenen kazanç elde edildikten sonra fiziksel olarak devrenin test edilmesi ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasının yapılması amacıyla LTSpice' da çizilen devre baskı kartına aktarılmıştır. Baskı devre ve yapılan testler bir sonraki bölümde sunulmuştur.

2.2 Simülasyonlar

Tip 4 devresinin baskı devresi yapıldıktan sonra yapılan simülasyonlar ve testler bu bölümde sunulmaktadır.

2.2.1 AC Analiz

Devrede kazanç artırımını elde edebilmek için farklı değerlerde farklı frekanslar denenmiştir. Denenen bu frekans değerlerine karşılık gelen çizim simülasyon sonuçları Şekil 20' de verilmiştir.



Şekil. 20. Tip4 Devresi AC Analizi

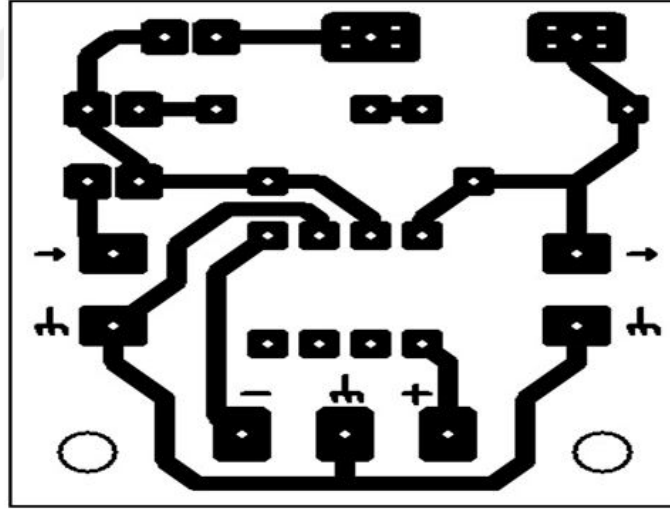
Şekil 20' de verilen AC analizinde tasarımı yapılan Tip4 devresi görülmektedir. Devrenin çalışma noktası kırmızı çizgiyle şekilde gösterilmiştir. Tasarlanan ilk üç tip devrelerde kazanç elde edilemezken $\frac{C_x}{C_f}$ oranı $\frac{1}{10}$ olmasına rağmen Tip4 devresinde kazanç elde edilmesi gözlenmiş ve değeri 0 dB' e yakın olarak bulunmuştur.

3 TEST ÇALIŞMALARI

Bu bölümde simülasyonları başarılı olan ve osilasyona uğramadan kazanç elde edilen Tip 4 devresinin baskı devreyle yapılan testleri ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırması yapılacaktır.

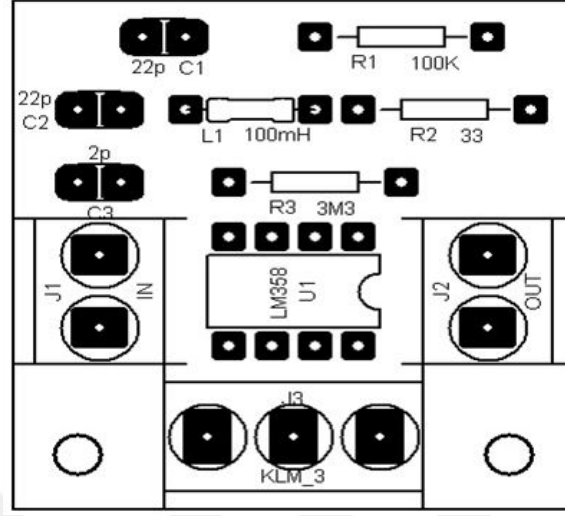
3.1 Tip 4 Test Çalışmaları

Matematiksel modellemesi yapılan ve simülasyonlardan başarılı sonuçlar veren Tip 4 devresidir. Tip 4 devresinin baskı devre modellemesi, PCB karta yerleşimi yapıldıktan sonra baskı devresi yapılmış olan kartın osiloskop, sinyal jeneratörü ve güç kaynağı kullanılarak yapılan testler ve bu testlerin sonuçları bu bölümde yer almaktadır. LTSpice' da çizimi yapılan ve simülasyon şemaları Bölüm 2.2' de verilen Tip 4 devresinin Şekil 21' de verilen baskı devre çizimleri Proteus' da gerçekleştirilmiştir.



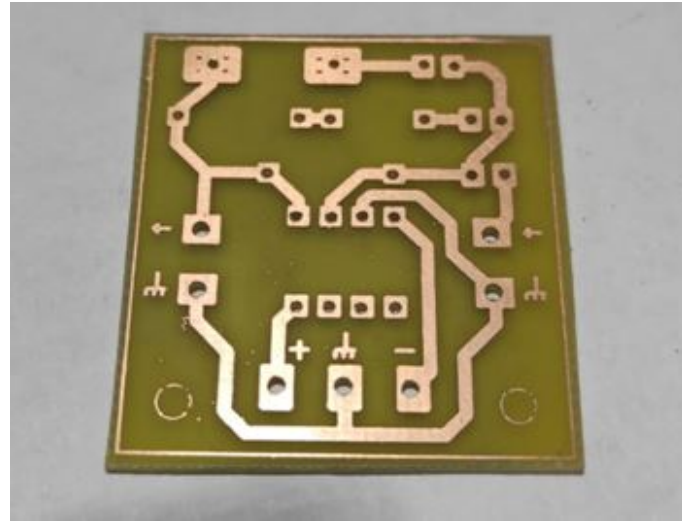
Şekil. 21. Tip 4 Devresinin Proteus Çizimi

Devre çizimi tamamlanan kartın üzerine komponentlerin yerleşimi Proteus' da gerçekleştirilerek Şekil 22' de verilmiştir.



Şekil. 22. Tip 4 Devresinin Proteus PCB Komponent Yerleşimi

Devrede oluşabilecek kayıpları önlemek ve kazancı tam anlamıyla elde edebilmek amacıyla kurulacak devrenin PCB kartı, çizim aşamasında olabildiğince küçük seçilmiştir. Çizimi tamamlanan, baskı devreden çıkan ve komponentlerin yerlerinin açılmış olduğu devre kartı Şekil 23' te sunulmuştur.



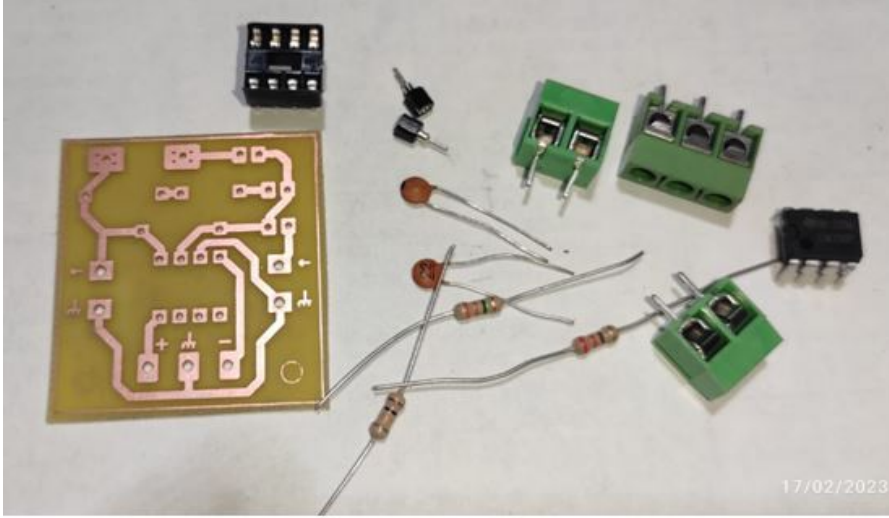
Şekil. 23. Tip 4 Devresinin Baskı Yapılan PCB Kartı

Devre kartının seçim işleminden hemen sonra tasarlanan Tip 4 devresinin matematiksel modellemesinde verilen değerlere karşılık gelecek olan malzemeler tedarik

edilerek PCB karta montaj işlemlerine başlanmıştır. PCB karta monte edilen malzeme listesi ve değerleri:

- 1 adet Elektrot Kapasitörü olarak 2pF değerinde bir kapasitör
- 1 adet LM358 OPAMP
- 1 adet 3.3 M Ω direnç
- 2 adet elektrot kapasitörünün 10 katı değerinde yani 22pF değerinde kapasitör
- 1 adet 100mH değerinde bobin
- 1 adet 100k Ω değerinde direnç kullanılmıştır.

biçiminde kullanılmıştır. PCB kart ve malzemelerinin görseli Şekil 24' te yer almaktadır.



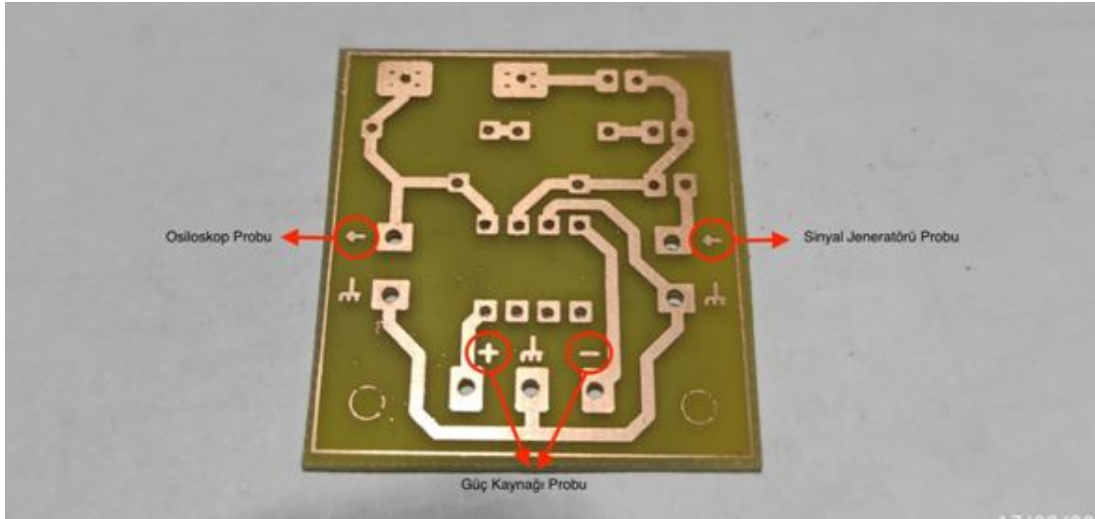
Şekil. 24. Tip 4 Devresinin PCB Kartı ve Komponentleri

Bütün bu hazırlık aşamalarından sonra PCB karta komponentler yerleştirilerek teste hazır hale getirilen devre Şekil 25' te sunulmuştur.



Şekil. 25. Tip 4 Devresi

Tip 4 devresi hazırlanıp test aşamasına geçildiğinde herhangi bir şeyden etkilenmemesi ve kısa devre olmaması için devre bir masaya sabitlenmiştir. Yapılan simülasyonda 1kHz-2.5MHz seviyelerinde test yapılması gerekliliğinden bu frekans aralıklarında test yapılacak osiloskop ve sinyal jeneratörü kullanılmıştır. Şekil 26' da görüldüğü üzere sinyal jeneratörü probları, osiloskop probları ve güç kaynağı probları devrede yerlerine bağlandı.

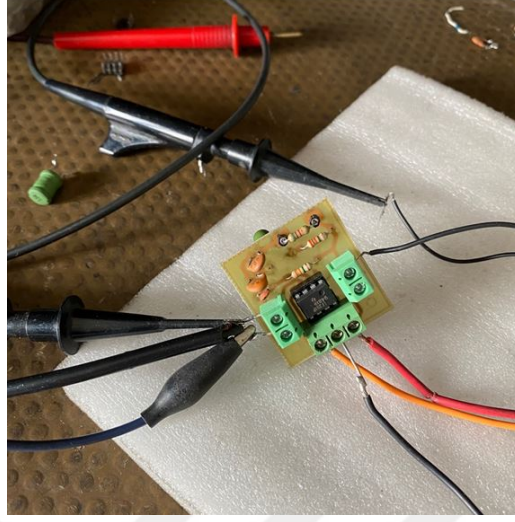


Şekil. 26. Tip 4 Devresinin Problarının Bağlanması

Opamp' ın beslenmesinin yapılabilmesi için güç kaynağından $\pm 15V$ değerini, AC voltajı olarak 1V ve ilk başlangıç frekansı olarakta 1kHz ile çalışıldı. Devrenin bu değerlerle test edilmesinde multimetre yardımıyla opampa $\pm 15V$ gelmediği ve opampın çalışmadığı gözlemlenmiştir. Bu problemin nedenini bulabilmek için devre güç kaynağından ayrılarak incelenmeye başlandı. İnceleme sonucunda opamp bacaklarında hata olduğu tespit edilerek opamp bacakları düzeltilmiş ve opamp değiştirilmiştir. Devreye daha uygun olduğu düşüncesiyle LM358 opampı yerine daha yüksek frekans aralıklarında çalışan LF351 opampı tercih edilmiştir. Bu tercihle beraber, devre üzerinde bobin, kondansatör ve dirençlerde de değişiklikler yapılmış olup devre revize edilmiştir. Revize edilen devrede aşağıda detayları verilen komponentler

- 1 adet elektrot kapasitörü olarak 22pF değerinde bir kapasitör,
- 1 adet LM358 opampı yerine yüksek frekanslarda çalışması amaçlanan LF351 opampı,
- 1 adet 3.3 M Ω direnç,
- 2 adet elektrot kapasitörünün 10 katı değerinde yani 220pF değerinde kapasitör,
- 1 adet 10mH değerinde bobin,
- 1 adet 5.1k Ω değerinde direnç

kullanılmıştır. Revize edilen devre tekrar osiloskop, sinyal jeneratörü ve güç kaynağına bağlanarak testlere tabi tutulmuş ve test aşamasındaki devre Şekil 27' de verilmiştir.



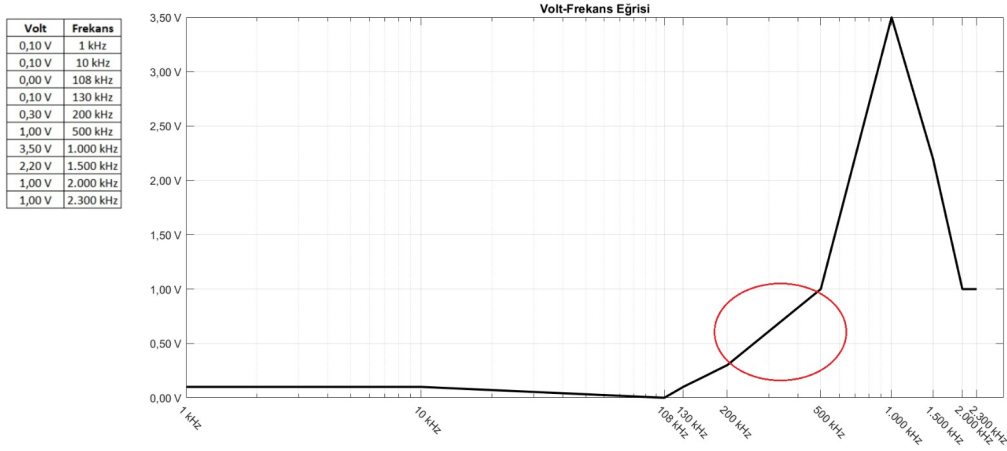
Şekil. 27. Tip 4 Devresinin Test Aşaması

Yapılan testler 1kHz ile başlayıp 2.3MHz'e kadar devam etmiştir. Bu testlerde AC 1V iken yapılan analizle giriş ve çıkış arasındaki sinüsoidal dalgaların genlik ve faz farkı da incelenmiştir. Testlerde bulunan sonuçlar Tablo 1' de verilmiştir.

INPUT		OUTPUT	FAZ FARKI
Frekans	V_i (Pick to Pick)	V_o (Pick to Pick)	
1kHz	1V	100mV	180°
10kHz	1V	100mV	180°
108kHz	1V	0V	Faz Farkı yok
130kHz	1V	100mV	+10° (Harmonik Oluşum)
200kHz	1V	300mV	+20°
503kHz	1V	1V (Giriş=Çıkış)	+40°
1MHz	1V	3.5V	180°
1.5MHz	1V	2.2V	80°
2MHz	1V	1V (Giriş=Çıkış)	45°
2.3MHz	1V	1V (Giriş=Çıkış)	90°

Tablo 1: Tip 4 Devresinin Test Sonuçları

Tüm bu dataların Excel ile grafiği çizilerek Şekil 28' de verilmiştir.



Şekil. 28. Volt-Frekans Eğrisi

Rezonans devreleri kapasitif sensörlerden gelen sinyalleri işlemek için tasarlanırlar ve genellikle sinyal kazancını artırmak amacıyla kullanılırlar. Kazanç artırımı için rezonans devrelerin kullanılmasında devrenin frekans karakteristiğini göstermek ve devredeki voltaj kazancının farklı frekanslardaki değişimi ortaya koyabilmek için volt frekans eğrisi oldukça önemlidir. Simülasyon sonuçları ile gerçek ölçümler arasındaki farkları belirleyebilmek amacıyla simülasyon yapılması önemlidir. Böylelikle, tasarlanan devrenin nasıl davranacağı konusunda bilgi edinilir.

Tasarlanan Tip4 devresinin simülasyonunda LTSpice simülasyon programı kullanılarak devrenin voltaj kazancının frekans değıştikçe ne şekilde değıştiğini gösteren dB-f grafiği Şekil 20’ de verilmiştir. Tasarlanan Tip4 devresinde sensöre farklı frekanslarda sinyaller verilerek devreden çıkan sinyallerin ölçülmesi sonucunda da voltaj kazancının frekansa göre nasıl değıştiğini gösteren volt frekans eğrisi elde edilmiş ve Şekil 28’ de verilmiştir.

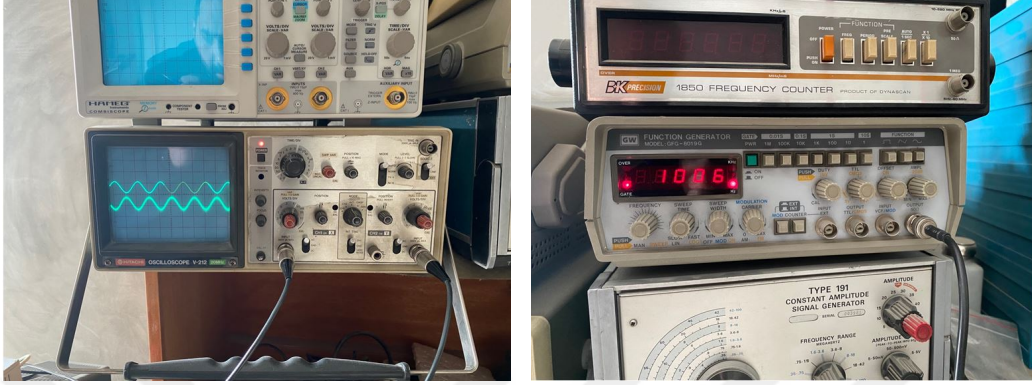
Devre simülasyon ve baskı devre arasında az da olsa farklar bulunmaktadır. Bu farkın olmasının nedeni baskı devre kartında lehimlemelere ve bacaklara bağlı olarak fiziksel etmenlerin etkili olmasıdır. Tasarlanan devrelerde bu farklılıklara çözümler sunulurken tasarlanan tip4 devresinde $\frac{C_x}{C_f}$ oranının $\frac{1}{10}$ olmasına rağmen kazanç elde edilmesi durumu simülasyon ve baskı devre sonucundan gözlemlenmiştir.

Şekil 20’ de belirli frekans aralıklarında devrenin gösterdiği eğilimlerle beraber kırmızı çizgilerle belirlenen noktada da kazancın 0dB’ e yakın olduğu gözlemlen-

mektedir. Şekil 28' de verilen volt frekans eğrisi, baskı devrede yapılan osiloskop ve sinyal jeneratörü ile birlikte yapılan testlerin sonucunda, simülasyonda kullanılan frekans aralıklarına göre testlerin gerçekleştirilmesiyle birlikte voltaj değerlerinin grafiksel gösterimidir.

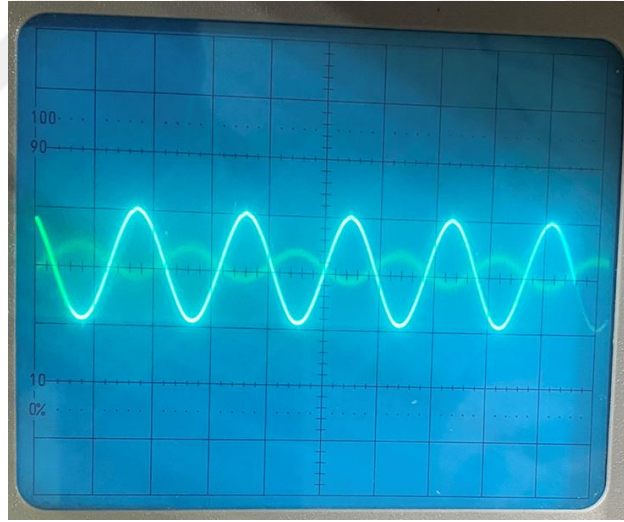
Bu iki grafiğin karşılaştırılması sonucunda elde edilen kazanç gözlemlenmiştir. Şekil 28 üzerinde bulunan kırmızı daire devrenin çalışma noktasıdır. Bu noktaya bakıldığında, devre 100kHz'e kadar belirli bir aralıkta (100mV) çalışmış ve 100kHz seviyelerinde 0 V'a düşmüştür. 100kHz'den sonra devre çalışma noktasına gelmiş ilk başta stabil olarak 100mV da çalışırken frekans değerleri arttıkça devre 130kHz'de önce 100mV' a ulaşmış daha sonrasında 200kHz'de 300mV seviyelerine çıkmıştır. Yani Şekil 20' de 0 dB' e denk gelen kısım Şekil 28' de 200-500kHz arasında bulunan kısma yani kırmızı ile işaretlenen alana denk gelmektedir.

Yapılan 1kHz testinin sonucu Şekil 29' da verilmiştir.



Şekil. 29. Tip 4 Devresinin 1kHz Test Aşaması

Yapılan 1kHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 30' da verilmiştir.



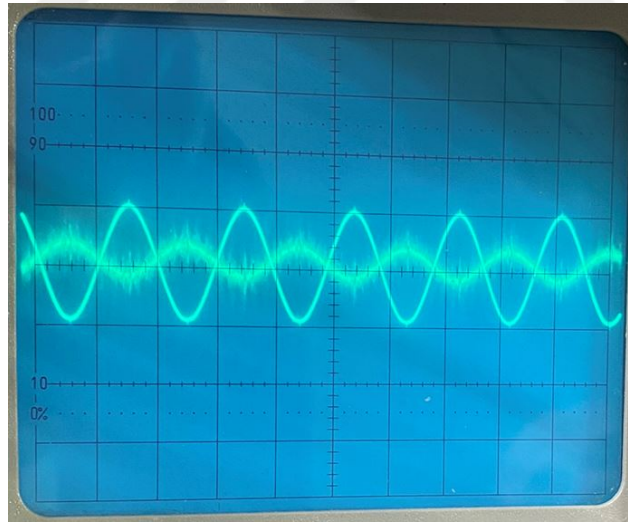
Şekil. 30. 1kHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 10kHz testinin sonucu Şekil 31' de verilmiştir.



Şekil. 31. Tip 4 Devresinin 10kHz Test Aşaması

Yapılan 10kHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 32' de verilmiştir.



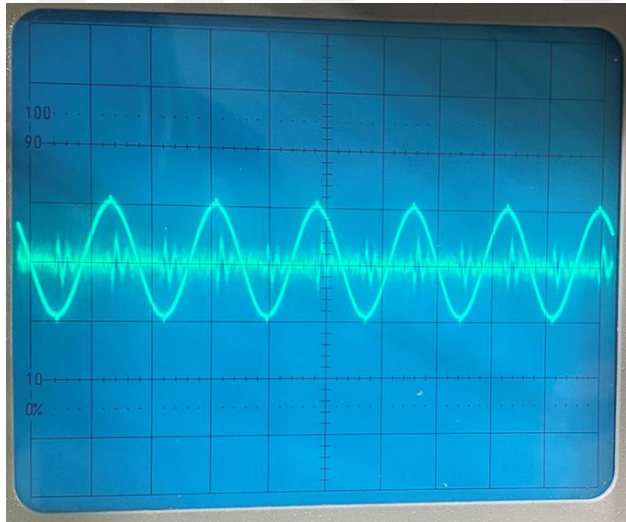
Şekil. 32. 10kHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 108kHz testinin sonucu Şekil 33' te verilmiştir.



Şekil. 33. Tip 4 Devresinin 108kHz Test Aşaması

Yapılan 108kHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 34' te verilmiştir.



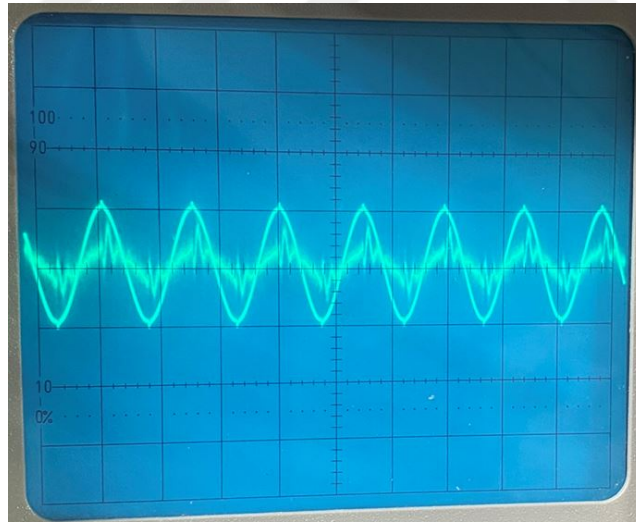
Şekil. 34. 108kHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 130kHz testinin sonucu Şekil 35' te verilmiştir.



Şekil. 35. Tip 4 Devresinin 130kHz Test Aşaması

Yapılan 130kHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 36' da verilmiştir.



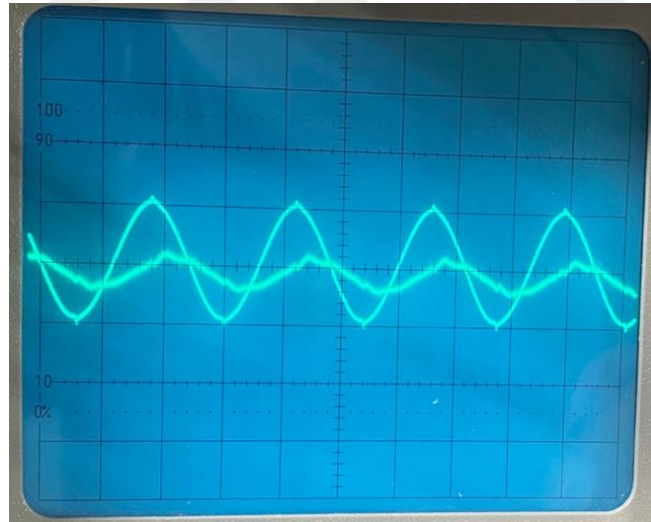
Şekil. 36. 130kHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 200kHz testinin sonucu Şekil 37' de verilmiştir.



Şekil. 37. Tip 4 Devresinin 200kHz Test Aşaması

Yapılan 200kHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 38' de verilmiştir.



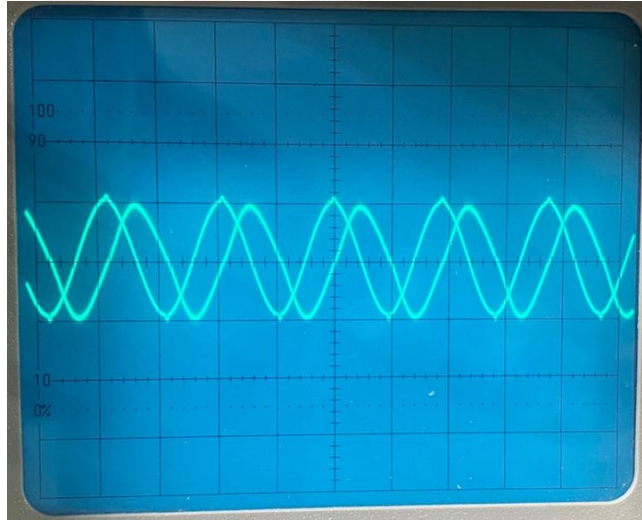
Şekil. 38. 200kHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 503kHz testinin sonucu Şekil 39' da verilmiştir.



Şekil. 39. Tip 4 Devresinin 503kHz Test Aşaması

Yapılan 503kHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 40' ta verilmiştir.



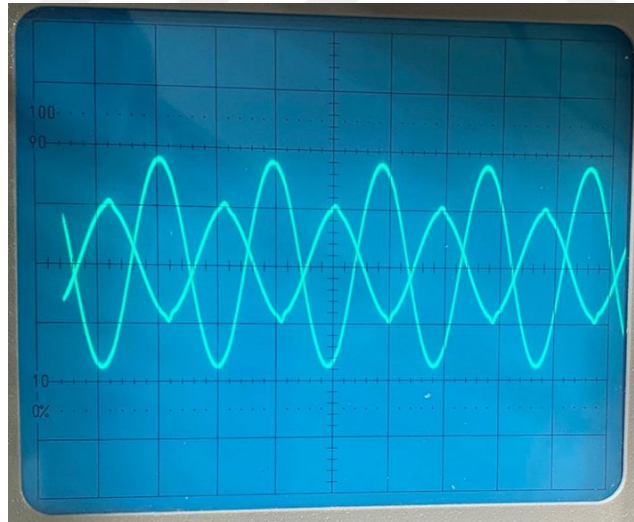
Şekil. 40. 503kHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 1MHz testinin sonucu Şekil 41' de verilmiştir.



Şekil. 41. Tip 4 Devresinin 1MHz Test Aşaması

Yapılan 1MHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 42' de verilmiştir.



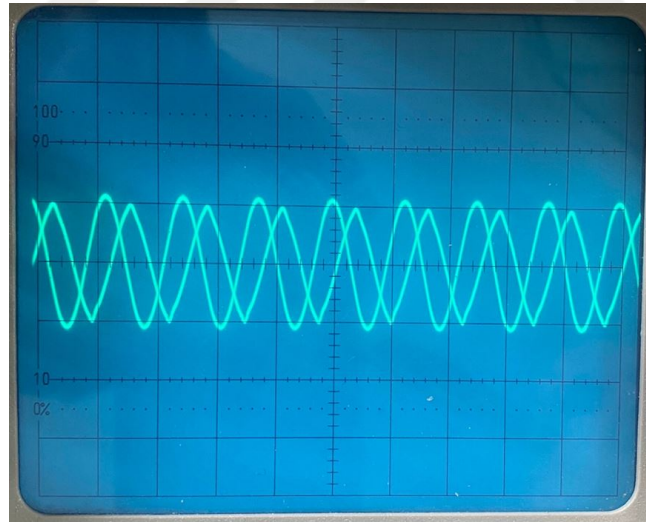
Şekil. 42. 1MHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 1.5MHz testinin sonucu Şekil 43' te verilmiştir.



Şekil. 43. Tip 4 Devresinin 1.5MHz Test Aşaması

Yapılan 1.5MHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 44' te verilmiştir.



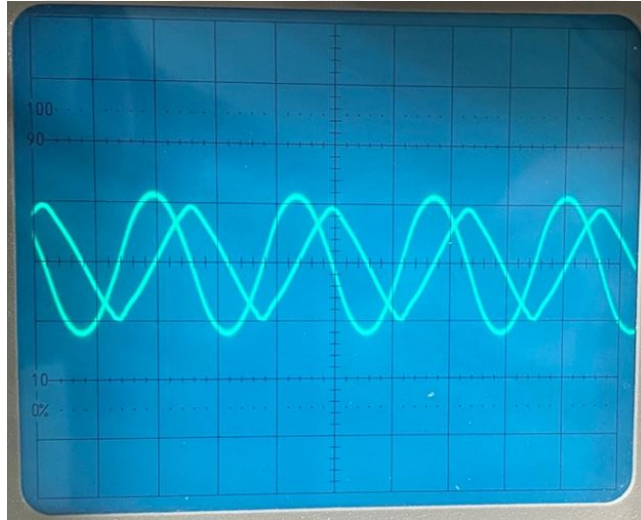
Şekil. 44. 1.5MHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 2MHz testinin sonucu Şekil 45' te verilmiştir.



Şekil. 45. Tip 4 Devresinin 2MHz Test Aşaması

Yapılan 2MHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 46' da verilmiştir.



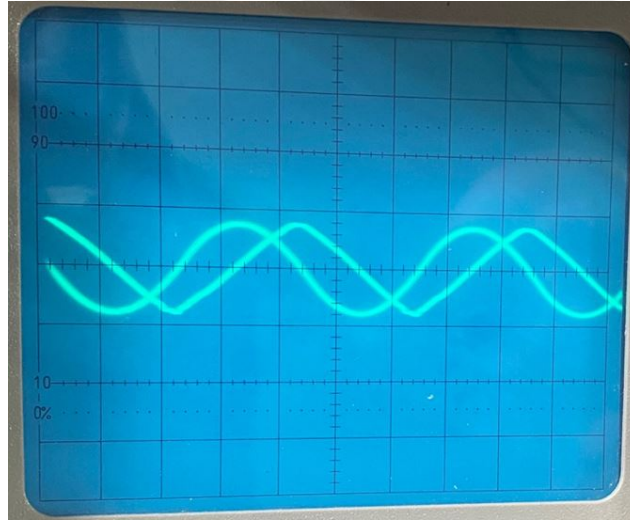
Şekil. 46. 2MHz Faz Farkı Sonucu

Yapılan 2.3MHz testinin sonucu Şekil 47' de verilmiştir.



Şekil. 47. Tip 4 Devresinin 2.3MHz Test Aşaması

Yapılan 2.3MHz testinden elde edilen faz farkı sonucu Şekil 48' de verilmiştir.



Şekil. 48. 2.3MHz Faz Farkı Sonucu

Tasarlanan ve kazanç artırımı sağlayan devrenin en son hali Şekil 49' da verilmiştir.



Şekil. 49. Tip 4 Devresinin Son Hali

4 SONUÇLAR

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, rezonans devrelerin kapasitif sensörler kazanç artırımı olarak kullanımı hakkında literatür çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Küçük kapasitörler kullanmadan yüksek kazanç elde etmek amacıyla tasarlanan 4 tip devreden bahsedilmiştir ve bu devreler Şekil 13, Şekil 15, Şekil 17 ve Şekil 19' de verilmiştir. Tasarlanan tüm devrelerin belirli değerlerde analizleri yapılarak, kazanç artırımı sağlayan tip 4 devresinin tüm test ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Tasarlanan devrenin testlerden sonra üretilen prototipi Şekil 49' de verilmiştir.

4.1 Tezin Amacının Doğrulanması

Bu çalışma ile rezonans devrelerin kapasitif sensörlerde kazanç artırımı şeklinde kullanılabilmesi konusunda geniş bir bilgi birikimi edinilmiş ve bu kazanç artırımını sağlayabilmek için çeşitli tiplerde devreler tasarlanarak optimum devre tasarlanması tamamlanmıştır.

Tasarlama esnasında dört tip devre tasarlanmış ve bu devrelerin üç tanesindeki test sonuçlarında kazanç artırımı sağlamada yetkin oldukları anlaşılmıştır. Bu devrelerin beklenen düzeyde kazanç artırımı sağlayamama nedenleri ortaya konulmuş ve bu problemler tasarlanan tip 4 devresinde çözüme kavuşturularak son tasarımda beklenen kazanç elde edilmiştir. İlk üç tasarımda karşılaşılan problemler:

- rezonans frekansının sensörün frekansına bağımlı olması nedeniyle sensörün kapasitans değerinin değiştirilmesi durumunda devreler her seferinde yeniden ayarlanması ve bu ayarlamalar yapılırken düşük kapasitans değerlerine sahip kapasitif elektrotların okunmasında düşük kapasitör kullanılması,
- Kısa baskı devre kartları kullanılmasıyla birlikte lehimlemelerden ve komponentlerden kaynaklanması,
- Lehimlemeden kaynaklı problemlerin baskı devre üzerindeki çizilen yolların birbirlerine kapasitif özellikleri taşıdığı ve iletken olmalarından dolayı bir kapasite oluşumuna neden olması,
- Komponentlerden kaynaklı problemlerin ise genellikle kapasitörün bacaklarının kesilmemesi ve kapasitörün baskı devre kartına tam olarak sabitlenmemesi

biçiminde tespit edilmiştir. Bu problemlerin hepsi tasarlanan devrede çözüme kavuşturulmuştur. Tasarlanan devrede düşük değerde bir kapasitör kullanılarak opamp girişinde bulunan kapasitör elektrot kapasitörü olarak kullanılmıştır. Tasarlanan devreden rezonans kazanç elde edilmesi için devrede kullanılan diğer kapasitörler devre girişinde bulunan kapasitörün on katı büyüklüğünde seçilmiştir. Tasarlanan devre karışık bir devre filtresi olup kapasitör, bobin, direnç ve opamp bulunmaktadır. Opamp için yüksek frekansları geçiren LF351 opampı kullanılmıştır.

Normalde kazanç kapasitörlerin oranı 0.1 olması gerekirken yapılan simülasyon ve test sonuçlarına göre tasarlanan tip4 rezonans devresi ile kazanç 1'e yaklaştırılmıştır.

4.2 Gelecek Çalışmalar için Öneriler

Bu yüksek lisans tezinde endüstriyel uygulamalarda kullanılması uygun olan bir rezonans devrenin kapasitif sensörlerde kullanımı sonucunda kazanç artırımı sağlaması nedeniyle tasarımı yapılmış, baskı devresi yapılmış ve sonuçların doğru olduğuna ilişkin test sonuçları sunulmuştur. Ortaya konulan çalışmayla bu konuda yapılması planlanan benzer öalışmalara bir kaynak olabilecek şekilde değerlendirilebilir. Yine bu tezde uygulanan materyal ve yöntem gerçekleştirilecek olan başka çalışmalarda daha farklı donanımsal değişiklikler yapılarak başka kapasitif sensörlerin kazanç artırımında kullanılarak endüstride kullanılacak daha ekonomik kapasitif sensörlerin ortaya çıkarılmasına yardımcı olabileceği değerlendirilmektedir..

5 KAYNAKLAR

- [1] Hofmann, E., ve Rüsç, M., (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34.
- [2] Kumar, K., Zindani, D., ve Davim, J. P., (2019). *Industry 4.0: Developments Towards the Fourth Industrial Revolution*. Springer.
- [3] Herter, J., ve Ovtcharova, J., (2016). A model based visualization framework for cross discipline collaboration in Industry 4.0 scenarios. *Procedia CIRP*, 57, 398-403.
- [4] Büchi, G., Cugno, M., ve Castagnoli, R., (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 15.
- [5] Ranky, P. G., (2002). Advanced digital automobile sensor applications, *Sensor Review*, 22(3), 213-217.
- [6] Wimmer, R., Holleis, P., Kranz, M., ve Schmidt, A., (2006). "Thracker - Using capacitive sensing for gesture recognition," *Proc. - Int. Conf. Distrib. Comput. Syst.*, Doi:10.1109/ICDCSW.2006.109.
- [7] Cherubini, A., Passama, R., Crosnier, A. Lasnier, A., ve Fraisse, P., (2016), "Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction," *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 40, pp. 1-13.
- [8] Lee, Y. H., Lee, H., Kang, H., Phan, L. T., Jin, S., Kim, Y. B., Seok, D. Y., Lee, S. Y., ve Choi, H. R., (2019). "Force-controllable quadruped robot system with capacitive-type joint torque sensor," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, pp. 6777-6782.
- [9] Kim, D., et al., (2013). "Six-axis capacitive force/torque sensor based on dielectric elastomer," *Proc. SPIE*, vol. 8687, pp. 868-72J.
- [10] Kim, U., Lee, D. H., Kim, Y. B, Seok, D. Y., ve Choi, H. R. (2017). "A novel 6-axis force/torque sensor for robotic applications," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1381-1391.
- [11] Kim, U., Kim, Y.B., Seok, D. Y., So, J., ve Choi, H. R., (2018). "A surgical palpation probe with 6-axis force/torque sensing capability for minimallyinvasive surgery," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 3, pp. 2755- 2765.

- [12] Nakamura, Y., (1990). *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*, Boston, MA: Addison-Wesley.
- [13] Kim, J., Kim, Y. B., Seok, D. Y., Lee, S. Y., Sim, J. Y., ve Choi, H.R., (2021). Performance Enhancement of Capacitive-type Torque Sensor by using Resonant Circuit, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [14] Mannsfeld, S. C., Tee, B. C., Stoltenberg, R. M., Chen, C. V. H., Barman, S., Muir, B. V., Sokolov, A. N., Reese, C., ve Bao, Z., (2010). "Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers," *Nat. Mater.*, vol. 9, no. 10, pp. 859–864.
- [15] Scarlett, J., (2014). "Capacitance-to-digital converter facilitates level sensing in diagnostic systems." *Analog Dialogue*, Vol. 48, No. 2.
- [16] Yu, Y., (2017), *Resonance-Based Capacitive Sensing Using LDC2114*, Application Report, Texas Instruments.
- [17] Schreier, R., ve Temes, G. C., (2005). *Understanding Delta-Sigma Data Converters*. Piscataway, NJ: IEEE Press/Wiley.
- [18] Oh, H. S., Kim, U., Kang, G., Seo, J. K., ve Choi, H. R., (2018). "Multi-axial force/torque sensor calibration method based on deep-learning," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 13, pp. 5485–5496.
- [19] Başer, N. E. (2011). *I. Sanayi Devriminde Teknolojik Gelişmenin Rolü*, (Yayımlanmamış Doktora Tezi), Dokuz Eylöl Üniversitesi, İzmir.
- [20] Sander, O. (1989). *Siyasi Tarih İlkçağlardan 1918'e*, Ankara: İmge.
- [21] Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. New York: Crown Business.
- [22] Bkm blog: <https://bkm.com.tr/adim-adim-endustri/>
- [23] Fırat, S. Ü., Fırat, O. Z. (2017). Sanayi 4.0 Devrimi Üzerine Karşılaştırmalı Bir İnceleme: Kavramlar, Küresel Gelişmeler ve Türkiye, *Toprak İşveren Dergisi*, 114, 10-23.
- [24] Vehec, I., Livovsky, L., ve Pietrikova, A. (2020). Capacitive sensors for saturated vapour height sensing in VPS soldering. 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE).

- [25] Kahraman, A., Aşık, M., Göverdik, M., Büyükbayraktar, M., Güneş, M., ve İşbilen, T, Sensörler, Milli Eğitim Bakanlığı.
- [26] Schütze, A., Helwig, N., ve Schneider, T., (2018). Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0, *J. Sens. Sens. Syst.*, No:7, 359–371.
- [27] Mamishev, A. V., Sundara-Rajan, K., Fumin Yang, Yanqing Du, ve Zahn, M. (2004). Interdigital sensors and transducers. *Proceedings of the IEEE*, 92(5), 808–845.
- [28] Nikolov, G., Gieva, E., Nikolova, B., ve Ruskova, I. (2020). The effect of a pattern of capacitive sensors for liquid level measurements. 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE).
- [29] Yirmibeş, S. (2021). Kapasitif algılama devreleri ve bazı uygulamaları, Yüksek Lisans tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [30] Yoo Y, Choi B. D., (2021). Readout Circuits for Capacitive Sensors. *Micromachines* (Basel). 2021 Aug 13;12(8):960. doi: 10.3390/mi12080960. PMID: 34442582; PMCID: PMC8400189.
- [31] Global Capacitive Sensor Market Size By Sensor Type (Touch Sensors, Motion Sensors, Position Sensors), By Industry (Consumer Electronics, Food And Beverages, Oil And Gas, Healthcare), By Geographic Scope And Forecast Report ID: 35037, Pages: 202
- [32] Braun, A., Wichert, R., Kuijper, A., ve Fellner, D. W., (2015). “Capacitive proximity sensing in smart environments,” *J. Ambient Intell. Smart Environ.*, vol. 7, no. 4, pp. 483–510. Doi: 10.3233/AIS-150324.
- [33] Ongun, I., (2014). Devre Çözümleme Temelleri, Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu, 1-376.
- [34] Yingprayoon, J., (2020). An Accurate Time Measurement of Short Interval Using an Electronic RC-Charging Circuit, *Proceedings of the 25th Asian Technology Conference in Mathematics*, 287-294.
- [35] Aezinia, F., (2014). Design of Capacitive Sensing Circuit Using RC Filter, PhD thesis, Simon Frazer University, 1-137.

- [36] Karakaş, M. F., İstanbullu, Ö. B., ve Batbat, T., Ölçme ve Analiz laboratuvarı deney föyü, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği, 1-55.
- [37] Hekimia, C, Grant, B., Liu, X., Zhang, Z., ve Kumar, P. (2010). Accurate localization of RFID tags using phase difference, IEEE International Conference on RFID, 14-16 April.
- [38] Çolak, İ., ve Bayındır, R., (2003). Güç Katsayısının bir Mikrodenetleyici olarak Ölçümü, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Vol. 19 (1-2), 50-58
- [39] Cicalini, M., Piotto, M., Biruschi, P., and Dei, M., (2022). Design of a Capacitance-to-Digital Converter Based on Iterative Delay-Chain Discharge in 180 nm CMOS Technology, Sensors, Vol. 22, No. 1. <https://doi.org/10.3390/s22010121>.
- [40] Marcellis, A., Reig, C., ve Beltran, M. D. C., (2019). A Capacitance-to-Time Converter-Based Electronic Interface for Differential Capacitive Sensors, Electronics, Vol. 8, No. 1, 1-14. <https://doi.org/10.3390/electronics8010080>.
- [41] Aydemir, A., Terzioğlu, Y., ve Akın T., (2016). A new design and a fabrication approach to realize a high performance three axes capacitive MEMS accelerometer. Sens. Actuators A Phys. 244, 324–333.
- [42] Byju's: Modulation and Demodulation, <http://www.byjus.com/physics/modulation-and-demodulation/>
- [43] Lu, T. C., Huang, Y. J., ve Chou, H. P., (2008). A Novel Interface Circuit for Capacitive Sensors Using Correlated Double, Sampling Demodulation Technique, The Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, 396-400.
- [44] Chou, W. C., Hsu, Y. C., ve Liao, L. P., (2006). "Modulation/ Demodulation System for Capacitive Sensors" Industrial Technology Research Institute.
- [45] Amos, R. K. (2003) "C Measurement Techniques," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, No. 6.

- [46] Üstündağ, M. C. B., (2015). A Low-Power Memory CMOS Integrated Circuit for Image Sensors, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1-65.
- [47] Sundström, T., (2015). Design of High-Speed, Low-Power, Nyquist Analog-to-Digital Converters, Linköping Studies in Science and Technology, Thesis No. 1423, 1-75.
- [48] Alvandpour, A., (2010). "A 6-bit 2.5-GS/s Flash ADC using Comparator Redundancy for Low Power in 90nm CMOS, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 64, No. 3, 215-222.
- [49] Paavola, M., Kamarainen, M., ve Laulainen, E., (2009). A Micropower-Based Interface ASIC for a Capacitive 3-Axis Micro-Accelerometer. IEEE J. Solid-State Circuits , 44, 3193–3210.
- [50] Anonim, (2019). RLC Devrelerinde Rezonans ve Q Faktörü, Erciyes Üniversitesi biyomedikal Mühendisliği Elektronik Labotatuvarı Deney Föyü, Kayseri, <https://biomed.erciyes.edu.tr/upload/HKL5DXMdeney-9-rlc-devrelerinde-rezonans-ve-q-faktoru.pdf> [Ziyaret Tarihi: 25 Ağustos 2021].
- [51] URL: <https://eepower.com/technical-articles/resonance-explained/>
- [52] Kazimierczuk, M. K., ve Czarkowski, D., Resonant Power Converters (İkinci Baskı), Wiley yayınları.
- [53] Bolat, M., (2019) Seri ve Paralel Rezonans Devre Uygulaması, Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Elektrik Devre Laboratuvarı Deney Föyü 5, Siirt, 1-8.
- [54] Fincan, B., (2015). Elektrikli Araçlar için Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [55] Zimmerman, T. G., Smith, J. R., Paradiso, J. A., Allport, D., ve Gershenfeld, N., (1995). "Applying electric field sensing to human-computer interfaces," Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc., vol. 1, pp. 280–287. Doi:10.1145/223904.223940.
- [56] Wibowo, P., Lubis, S. A., Hermansyah, H., ve Tharo, Z., (2017). "Smart Home Security System Design Sensor Based on Pir and Microcontroller," Int. J. Glob. Sustain., vol. 1, no. 1, p. 67. Doi: 10.5296/ijgs.v1i1.12053.

- [57] Li, X., Hu, J., ve Liu, X., (2018). A High-Performance Digital Interface Circuit for a High-Q Micro-Electromechanical System Accelerometer, *Micromachines*, Vol. 9, No. 12. <https://doi.org/10.3390/mi9120675>
- [58] Wang, W., Qiu, W., Yang, H., Wu, H., Shi, G., Chen, Z., Lu, K., Xiang, K., ve Ju, B., (2019). An Improved Capacitive Sensor for Detecting the Micro-Clearance of Spherical Joints, *Sensors* , Vol. 19, No. 12, 1-16. doi:10.3390/s19122694
- [59] Kim, J., Jeon, H., Jeong, Y., Kim, Y., (2017), "High stiffness capacitive type torque sensor with flexure structure for cooperative industrial robots," 14th Int. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), pp. 433-437.
- [60] Kim, S., Takahito, O., ve Masayoshi, E., (2006). Capacitive resonant mass sensor with frequency demodulation detection based on resonant circuit, Vol. 88, No. 1, *Applied Physics Letters*, doi:10.1063/1.2171650.
- [61] Reinhold, L., ve Gene, B., (2008). *RF Circuit Design: Theory ve Applications* (ikinci baskı).
- [62] Razavi, B., (2017). "A circuit for all seasons—The switched capacitor integrator," *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 9-11.
- [63] Rizzoni, G., (2016). *Principles and Applications of Electrical Engineering*, 6th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill.