

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT TERMİNAL ÇİFT KAPASİTANS
STANDARTLARININ 30'MHZ'E KADAR
KARAKTERİZASYONU İÇİN YENİ BİR YÖNTEM**

DOKTORA TEZİ

Turgay ÖZKAN

Enstitü Anabilim Dalı : **ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Enstitü Bilim Dalı : **ELEKTRONİK**
Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Nigar Berna TEŞNELİ**

Ağustos 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖRT TERMİNAL ÇİFT KAPASİTANS
STANDARTLARININ 30 MHZ'E KADAR
KARAKTERİZASYONU İÇİN YENİ BİR YÖNTEM

DOKTORA TEZİ

Turgay ÖZKAN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 8 / 8 /2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr..
Osman ÇEREZCİ
Jüri Başkanı



Prof. Dr.
Nejat YUMUŞAK.
Üye



Doç. Dr.
Fatih ÜSTÜNER
Üye

Doç. Dr.
Ali TANGEL
Üye



Yrd. Doç. Dr
Nigar Berna TEŞNELİ
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Turgay ÖZKAN

30.06.2016

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde yapılan birçok çalışma, herbiri ayrı bir doktora çalışmasına konu olabilecek çalışmadır. Fakat bu çalışmaların çok azı tez konusu olabilmektedir. Yoğun iş hayatının yanında bir o kadar yoğun doktora eğitimi için yüksek motivasyon gerekmektedir. Bana bu motivasyonu veren, 17 Ağustos 1999 depreminde kaybettiğim babam Abdulkadir ÖZKAN'ın vasiyetini yerine getirmenin mutluluğunu yaşıyorum.

Bu tez çalışmasına konu olan Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Nigar Berna TEŞNELİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında hesaplamalar konusunda bana büyük katkı sağlayan sembolik hesaplamaları öğrendiğim, Sakarya Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden ders hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yahya TEŞNELİ'ye, her daim yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Osman ÇEREZCİ'ye, ölçümler konusunda yardımcı olan TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nden Gülay GÜLMEZ'e, destekleri için çalışma arkadaşlarım Yakup GÜLMEZ'e ve Enis TURHAN'a teşekkür ederim.

Çalışırken eğitimime devam etmeme izin veren ve kurum imkanlarını kullanmama fırsat tanıyan TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'ne, bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2011-50-02-029) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv

BÖLÜM 1.

METROLOJİYE GİRİŞ.....	1
1.1. Metroloji Nedir ?	1
1.2. Metrolojinin Önemi.....	1
1.3. Temel Metrolojik Kavramlar.....	2
1.3.1. Kalibrasyon	2
1.3.2. Ölçüm/Ölçme	3
1.3.3. Nominal değer (anma değeri)	3
1.3.4. Duyarlılık	3
1.3.5. Çözünürlük.....	3
1.3.6. Kararlılık	3
1.3.7. Doğruluk.....	3
1.3.8. Tekrarlanabilirlik.....	3
1.3.9. Ölçüm belirsizliği.....	4
1.3.10. İzlenebilirlik	4
1.3.11. Ulusal standart.....	4
1.3.12. Referans standart	4
1.3.13. Transfer standardı.....	4

1.3.14. Çalışma standardı	5
1.3.15. En küçük ölçüm belirsizliği.....	5
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
BÖLÜM 3.	
EMPEDANS STANDARTLARI	11
3.1. Empedans Standartlarının Bağlantı Şekilleri	15
3.1.1. İki-uçlu bağlantı şekli.....	16
3.1.2. Üç-uçlu bağlantı şekli.....	17
3.1.3. Dört-uçlu bağlantı şekli.....	18
3.1.4. Beş-uçlu bağlantı şekli	20
3.1.5. Dört uçlu ekranlı bağlantı şekli	21
3.2. N-Uçlu Çift Empedans Standartları	23
3.2.1. Bir-uçlu çift empedans standardı.....	23
3.2.2. İki-uçlu çift empedans standardı	24
3.2.3. Dört-uçlu koaksiyel empedans standardı	25
3.2.4. Dört-uçlu çift empedans standardı	25
3.3. Empedans, Admitans Parametreleri	26
3.4. Saçılma Parametreleri.....	28
BÖLÜM 4.	
KAPASİTANS.....	33
4.1. Kapasitansın Tanımı.....	33
4.2. Kapasitans Birimi	37
4.3. Kapasitans Standartları.....	42
4.3.1. Fused-silika dielektrikli kapasitans standartları	42
4.3.2. Hava dielektrikli kapasitans standartları	44
4.3.3. Mika dielektrikli kapasitans standartları	45
4.3.4. Dekat kapasitans standartları.....	46
4.3.5. Ayarlı kapasitans standartları	47

4.3.6. Transformatörlü kapasitans standartları	47
4.4. Kapasitans Ölçüm Yöntemleri	49
4.4.1. İki uçlu kapasitans ölçümü	49
4.4.1.1. İki uçlu ölçüm yönteminin avantaj ve dezavantajları	51
4.4.1.2. İki uçlu ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gereken hususlar.....	52
4.4.2. Üç uçlu kapasitans ölçümü.....	53
4.4.2.1. Üç uçlu ölçüm yönteminin avantajları dezavantajları	55
4.4.2.2. Köprü tipi kapasitans ölçüm cihazları	56
4.4.2.3. Üç uçlu ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gerekenler	57
4.4.3. İki uçlu ekranlı kapasitans ölçümü.....	58
4.4.3.1. İki uçlu ekranlı ölçüm yönteminin avantajları dezavantajları	59
4.4.3.2. İki uçlu ekranlı ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gerekenler	59
4.4.4. Dört-uçlu ekranlı ölçüm	60
4.4.4.1. Dört-uçlu ekranlı ölçüm yönteminin avantajları dezavantajları	61
4.4.4.2. Dört-uçlu ekranlı ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gerekenler	62
4.5. Kapasitörlerin Özellikleri	63
4.6. Kapasitansın Frekans Karakteristiği.....	65

BÖLÜM 5.

S-PARAMETRE REZONANS YÖNTEMİ	68
5.1. S-Parametre Rezonans Yönteminin Ortaya Çıkışı	68
5.2. S-Parametre Rezonans Yönteminin Teorisi	76
5.3. S-Parametre Ölçümleri İle Rezonansların Bulunması	79
5.4. Artık Parametrelerin Hesaplanması	89
5.5. C_{4TP} Kapasitansının Değerinin Hesaplanması.....	91

5.6. Belirsizliğin Hesaplanması.....	93
5.6.1. L_{CM} belirsizliğinin hesaplanması	93
5.6.2. L_H ve L_L belirsizliğinin hesaplanması.....	99
5.6.3. C_{4TP} belirsizliğinin hesaplanması	104

BÖLÜM 6.

TARTIŞMA VE SONUÇ	111
-------------------------	-----

KAYNAKLAR	119
-----------------	-----

EKLER.....	121
------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	147
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ϵ_R	Bağıl dielektrik katsayısı
ϵ_0	Boşluğun dielektrik katsayısı $8,854 \times 10^{-12}$ F/m
ϵ	Dielektrik katyayısı
4TP	4 Terminal Pair
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternative Current
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNC	Bayonet Neill-Concelman
CCC	Cryogenic Current Comparator
CCEM	Consultative Committee for Electricity and Magnetism
CIPM	Comité international des poids et mesures
CMC	Calibration and Measurement Capabilities
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DC	Direct Current
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
LF	Low Frequency
NBS	National Bureau of Standards
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPL	National Physical Laboratory
ppm	Part per million
PTFE	Polytetrafluoroethylene
RF	Radio Frequency
SI	Système international d'unités
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü
VNA	Vektör Netvörk Analizör

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Empedansın vektörel gösterimi.....	11
Şekil 3.2.	Empedansın paralel ve seri olarak gösterimi	13
Şekil 3.3.	Empedans düzleminde indüktif ve kapasitif vektörün gösterimi.....	14
Şekil 3.4.	Admitans düzleminde kapasitif ve indüktif vektörün gösterimi.....	14
Şekil 3.5.	Artık parametrelerle birlikte bir kondansatör.....	15
Şekil 3.6.	Frekansa karşın reaktans grafiği	16
Şekil 3.7.	İki uçlu empedans standardının gösterimi	17
Şekil 3.8.	TÜBİTAK UME’de bulunan CARDWELL 97 model iki uçlu kapasitans standardı	17
Şekil 3.9.	Üç uçlu empedans devresinin gösterimi	18
Şekil 3.10.	TÜBİTAK UME’de bulunan QuadTech 1409-T model üç uçlu kapasitans standardı	18
Şekil 3.11.	Dört uçlu empedans devresinin gösterimi.....	19
Şekil 3.12.	TÜBİTAK UME’de bulunan TINSLEY 1659 model dört uçlu direnç standardı	19
Şekil 3.13.	Beş uçlu empedans devresinin gösterimi	20
Şekil 3.14.	TÜBİTAK UME’de bulunan TEGAM SR104 beş uçlu direnç standardı	21
Şekil 3.15.	Dört uçlu ve ekranlı empedans devresinin gösterimi.....	22
Şekil 3.16.	TÜBİTAK UME’de bulunan HP16384A model 1000 pF dört uçlu ve ekranlı kapasitans standardı.....	22
Şekil 3.17.	Bir uçlu çift yapıdaki empedans standardı.....	23
Şekil 3.18.	Bir uçlu çift Agilent marka 50Ω empedans standardı.....	23
Şekil 3.19.	İki uçlu çift empedans yapısı	24
Şekil 3.20.	İki uçlu çift yapıdaki General Radio 1404 kapasitans standardı.....	24

Şekil 3.21.	Dört uçlu koaksiyel empedans yapısı.....	25
Şekil 3.22.	Dört uçlu koaksiyel yapıda 50Ω feed trough.....	25
Şekil 3.23.	Dört-uçlu çift empedans yapısı	26
Şekil 3.24.	İki uçlu devre	26
Şekil 3.25.	N uçlu devre	27
Şekil 3.26.	İki uçlu devrede saçılma parametrelerinin gösterimi.....	29
Şekil 3.27.	Kapasitörlerin çeşitli bağlantı şekilleri	30
Şekil 4.1.	(a) Paralel iki plaka (b) bu plakalar arasında oluşan elektrik alan çizgileri.....	34
Şekil 4.2.	İletken plakalar arasındaki yalıtkan malzemenin elektrik alan çizgilerine etkisi	35
Şekil 4.3.	Farklı gerilimle yüklenmiş başka bir iletkenin etkisi.....	35
Şekil 4.4.	Elektrik alanın ekranlanması.....	36
Şekil 4.5.	Sonsuz uzunluklu silindirik iletkenin dört parçaya bölünmesi	37
Şekil 4.6.	Hesaplanabilir Kapasitör.....	38
Şekil 4.7.	Gerçekleştirilen Hesaplanabilir Kapasitör	39
Şekil 4.8.	Hesaplanabilir kapasitörün çalışması.....	40
Şekil 4.9.	Hesaplanabilir Kapasitör ile DC direnç arasındaki izlenebilirlik zinciri	41
Şekil 4.10.	Kuantum Hall direnci ile kapasitans arasındaki izlenebilirlik zinciri	42
Şekil 4.11.	Fused-silica kapasitans standardı	43
Şekil 4.12.	Sıcaklık kontrollü bir yapı içerisindeki 4 adet Fused-Silica standart	44
Şekil 4.13.	Azot tipi kapasitans standardı	44
Şekil 4.14.	Mika tipi kapasitans standardı.....	45
Şekil 4.15.	Dekat Kapasitör.....	46
Şekil 4.16.	Banana çıkışlı dekat kapasitör.....	46
Şekil 4.17.	Ayarlı kapasitör.....	47
Şekil 4.18.	Transformatörlü kapasitör yapısı	48
Şekil 4.19.	Transformatörlü kapasitör.....	49
Şekil 4.20.	2 Uçlu kapasitans ölçümünde ortaya çıkan kapasitanslar	50

Şekil 4.21.	Açık devre kısa devre testleri.....	52
Şekil 4.22.	Kabloları birbirinden uzak sabitleme.....	52
Şekil 4.23.	Kabloları birbirine yakın sabitleme.....	53
Şekil 4.24.	3 Uçlu kapasitör gösterimi ve kapasitanslar	54
Şekil 4.25.	3 uçlu bir standart kapasitörde oluşan kapasitanslar	54
Şekil 4.26.	3 Uçlu kapasitörde bağlantı şekli	55
Şekil 4.27.	Kapasitans köprüsü	56
Şekil 4.28.	3 uçlu kapasitans köprüsü	57
Şekil 4.29.	2 uç ekranlı bağlantı şekli	58
Şekil 4.30.	4 Uçlu ekranlı bağlantı şekli	60
Şekil 4.31.	4 uçlu ekranlı bir ölçüm cihazı.....	61
Şekil 4.32.	4 uçlu ekranlı bir kapasitör.....	61
Şekil 4.33.	Açık devre ve kısa devre testleri için kullanılan aparatlar	62
Şekil 4.34.	Ölçüm kablosu ile açık devre ve kısa devre test bağlantısı.....	63
Şekil 4.35.	Kapasitörün özellikleri.....	65
Şekil 4.36.	Kapasitörün eşdeğer devresi ve empedans eşitliği.....	65
Şekil 4.37.	Kapasitansın frekans bağımlılığı.....	66
Şekil 4.38.	Kayıp faktörünün frekans bağımlılığı	67
Şekil 5.1.	Awan tarafından geliştirilen ölçüm yönteminin temel gösterimi.....	69
Şekil 5.2.	Dört terminal çift empedans gösterimi.....	70
Şekil 5.3.	Suzuki tarafından geliştirilen ölçüm yönteminin gösterimi.....	72
Şekil 5.4.	Callegaro tarafından geliştirilen yöntemin ölçüm düzeneği	74
Şekil 5.5.	Yonekura ve Wakasugi tarafından HP16380A kapasitans seti için geliştirilen devre modeli	76
Şekil 5.6.	HP16380A Kapasitans standardının iç yapısı.....	77
Şekil 5.7.	Yonekura ve Wakasugi modelinin sadeleştirilmiş şekli	78
Şekil 5.8.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1000 pF empedans ölçümleri	81
Şekil 5.9.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1000 pF admitans ölçümleri ..	82
Şekil 5.10.	1000 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği.....	82

Şekil 5.11.	1000 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği	83
Şekil 5.12.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 100 pF empedans ölçümleri ..	83
Şekil 5.13.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 100 pF admitans ölçümleri	84
Şekil 5.14.	100 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği.....	84
Şekil 5.15.	100 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği	85
Şekil 5.16.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 10 pF empedans ölçümleri	85
Şekil 5.17.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 10 pF admitans ölçümleri	86
Şekil 5.18.	10 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği.....	86
Şekil 5.19.	10 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği	87
Şekil 5.20.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1 pF empedans ölçümleri	87
Şekil 5.21.	30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1 pF admitans ölçümleri	88
Şekil 5.22.	1 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği.....	88
Şekil 5.23.	1 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği	89
Şekil 6.1.	BIPM veri tabanında sonuçların yayınlanması	111
Şekil 6.2.	1000 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması	116
Şekil 6.3.	100 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması	116
Şekil 6.4.	10 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması	117
Şekil 6.5.	1 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması	117

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1.	S parametreleri ölçümleri için yapılması gereken bağlantılar.....	80
Tablo 5.2.	HP16380A kapasitans setinin artık parametreleri.....	90
Tablo 5.3.	1000 pF için yapılan hesaplamının diğer yöntemlerle karşılaştırılması	92
Tablo 5.4.	100 pF için yapılan hesaplamının diğer yöntemlerle karşılaştırılması	92
Tablo 5.5.	10 pF için yapılan hesaplamının diğer yöntemlerle karşılaştırılması	92
Tablo 5.6.	1 pF için yapılan hesaplamının diğer yöntemlerle karşılaştırılması	93
Tablo 5.7.	L_{CM} ifadesinde yer alan parametrelerin açıklanması.....	94
Tablo 5.8.	L_{CM} belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan belirsizlik bileşenleri	96
Tablo 5.9.	1000 pF kapasitans standardı için L_{CM} belirlenme belirsizliği	97
Tablo 5.10.	100 pF kapasitans standardı için L_{CM} belirlenme belirsizliği	97
Tablo 5.11.	10 pF kapasitans standardı için L_{CM} belirlenme belirsizliği.....	98
Tablo 5.12.	1 pF kapasitans standardı için L_{CM} belirlenme belirsizliği	98
Tablo 5.13.	L_H ve L_L ifadesinde yer alan parametrelerin açıklanması.....	99
Tablo 5.14.	L_H ve L_L belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan belirsizlik bileşenleri	101
Tablo 5.15.	1000 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri	102
Tablo 5.16.	100 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri	102
Tablo 5.17.	10 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri	103

Tablo 5.18.	1 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri...	103
Tablo 5.19.	C_{4TP} ifadesinde yer alan parametrelerin açıklanması	104
Tablo 5.20.	C_{4TP} belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan belirsizlik bileşenleri	106
Tablo 5.21.	1000 pF için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği	107
Tablo 5.22.	100 pF için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği	108
Tablo 5.23.	10 pF için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği	109
Tablo 5.24.	1 için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği.....	110
Tablo 6.1.	1000 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri	112
Tablo 6.2.	100 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri	113
Tablo 6.3.	10 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri	114
Tablo 6.4.	1 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri	115

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kapasitans, Dört-terminal çift, Rezonans, S-Parametreleri, Kalibrasyon, Belirsizlik, İzlenebilirlik

Elektriksel metrolojide frekans bölgesi temel olarak üç ana bölgeye ayrılır. Doğru akımdan 100 kHz'e kadar olan bölgeye LF (Low Frequency); 100 kHz – 1 GHz arası bölge RF (Radio Frequency) ve 1 GHz – 100 GHz arası bölge MW (Microwave Frequency) olarak adlandırılır. Literatürde farklı adlandırmalar olsa da burada yapılan ayırım temel olarak metrolojik izlenebilirlik zincirinin ayrıldığı bölge açısından değerlendirilmektedir.

LF ve RF arası bölge LF-RF boşluk olarak adlandırılmakta ve bu bölgede metrolojik izlenebilirlik sorununun çözülmesi için ulusal metroloji enstitüleri tarafından çalışmalar yürütülmektedir. Bu frekans bölgesinde RLC metreler, güç algılayıcılar, network analizörler gibi ticari cihazlar ölçüm yapabilmekte ve düşük ölçüm belirsizliklerine ihtiyaç duymaktadır. Haberleşme, ilaç, otomotiv, havacılık, tıbbi analiz ve görüntüleme cihazları, uzay çalışmaları ile spektroskopik yöntemle malzeme analizinde bu bölgede alınan ölçümler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ticari olarak pazarda fazla sayıda cihaz olmasına karşın firmaların belirttiği doğruluk limitlerini güvenilirlik altına alacak bir izlenebilirlik zinciri kurulabilmiş değildir. Firma ve yöntem bağımlılığı mevcuttur. Ayrıca herhangi bir uluslararası karşılaştırma düzenlenmiş değildir.

Bu çalışmada 1 pF – 1000 pF aralığında hava dielektrikli dört terminal çift (4TP) Agilent 16380A kapasitans standartlarının 30 MHz'e kadar karakterize edilebilmesi için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem 4TP hava dielektrikli kapasitans standartlarının tüm artık indüktans parametrelerinin rezonans frekanslarından belirlenmesine dayanmaktadır. Bu rezonans frekansları 500MHz'e kadar Vektör Netvörk Analizör ile elde edilen saçılma parametreleri kullanılarak elde edilen empedans ve admitans değerleri ile hesaplanmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve yayınlar neticesinde Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) yüksek frekans kapasitans ölçümleri alanında Uluslararası Ölçüler ve Ağırlıklar Bürosu (BIPM) veri tabanına yeni bir CMC satırı ekleyerek Türkiye'nin bu alandaki uluslararası izlenebilirliğini sağlamıştır.

A NEW METHOD FOR CHARACTERIZATION OF THE FOUR TERMINAL PAIR CAPACITANCE STANDARDS UP TO 30 MHz

SUMMARY

Keywords: Capacitance, Four-terminal pair, Resonance, S-parameter, Calibration, Uncertainty, Traceability

Frequency region in the electrical metrology is mainly divided by three ranges. According to the frequency region, frequency ranges are entitled as Low Frequency (LF), Radio Frequency (RF) and microwave (MW). Beginning from DC to 100 kHz range is called as LF, 100 KHz - 1 GHz is called as RF and 1 GHz – 100 GHz is called as MW. Despite of different classifications in the literature, this nomination is mainly based on metrological traceability chain researches.

Region between LF and RF is named as LF-RF gap. In order to solve this problem several research project have been performed by national metrology institutes. Commercial devices like, RLC meter, power detectors, network analyzer, etc. can take measurements in this frequency range and demands better measurements uncertainty. Measurements taken in the LF-RF gap region are widely used in, medical analysis, medical monitoring devices, drug developments and productions, automotive, aviation, space, spectroscopic material analysis and. communication sector. Although numerous devices are available in the market, in order to reach accuracy limits declared by companies' confidence traceability chain has not been established. Moreover, calibration methods are company and method dependent. Besides that, international inter-comparison has not been organized.

In this work, in order to characterize Agilent air dielectric four terminal pair (4TP) 16380A capacitance standards between the ranges 1 pF – 1000 pF up to 30 MHz, a new method has been developed. The method is based on determination of the residual inductance parameters of the 4TP air dielectric capacitance standards from resonance frequencies. These resonance frequencies up to 500 MHz have been calculated from impedance and admittance values derived from S parameter measurements taken by vector network analyzer.

International traceability of high frequency capacitance measurements of Turkey has been established by results of this work. The Scientific And Technological Research Council of The TURKEY (TÜBİTAK) National Metrology Institute (UME) has added a new Calibration and Measurement Capabilities (CMC) into BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) database.

BÖLÜM 1. METROLOJİYE GİRİŞ

1.1. Metroloji Nedir ?

Metroloji sözcük anlamı olarak "ölçme bilimi" olarak tanımlanmaktadır. Bütün ölçü sistemlerinin temeli olan birimlerin (SI) tanımlanması metrolojinin başlıca görevidir. Bu birimlerin mümkün olan en yüksek doğrulukla tanımlanabilmesi için, yüksek doğruluğa sahip ölçme tekniklerinin ve fiziğin güncel bilgilerinin kullanılması gereklidir. Bu görev de her ülkede ulusal metroloji enstitüleri tarafından yapılmaktadır [1].

1.2. Metrolojinin Önemi

Teknolojinin baş döndürücü bir hızla geliştiği günümüzde, bilimsel araştırma, sanayi, ticaret, ulusal savunma, sağlık gibi alanlarda yapılan çalışmaların başarıyla sonuçlandırılması için hassas, güvenilir ve doğru ölçümlere ihtiyaç duyulduğu tartışılmaz bir gerçektir. Bu nedenle, ölçüm bilimi, metroloji, günümüz toplumunda önemli bir rol oynamaktadır.

Bugün toplumun geniş kesiminin sahip olduğu çeşitli ürünlerin ekonomik olabilmesini sağlayan seri üretim, bu ürünleri oluşturan yüzlerce parçanın hassas olarak aynı karakterde yapılabilmesinin sonucudur. Bunun yanı sıra giderek artan uluslararası işbölümü, bir ürünü oluşturan parçaların değişik ülkelerde üretilip daha sonra birleştirilmesini kaçınılmaz kılmıştır. Dolayısıyla, ürün kontrolü için ölçülen parametrelerin benzer koşullarda aynı sonuçları vermesi gerekmektedir. Bu ise boyutların, sıcaklığın, ağırlığın, gücün, empedansın, akımın, basıncın ve çeşitli malzeme karakteristiklerinin doğru olarak ölçülebilmesiyle sağlanmaktadır.

Uluslararası alanda ölçüm birliğine duyulan ihtiyaç, 19. yüzyılın ikinci yarısında gelişen uluslararası ticaret ile kendini göstermiştir. Aralarında Osmanlı İmparatorluğu'nun da bulunduğu 17 ülke temsilcisi bu amaçla 1875 yılında bir araya gelerek Metre Konvansiyonu'nu (The convention du Mètre) oluşturmuştur. Konvansiyon tarafından uluslararası standartları oluşturmak, muhafaza etmek ve doğruluklarını yayarak uluslararası karşılaştırmalarda merkez olması amacıyla BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) Uluslararası Ölçü ve Ağırlıklar Bürosu kurulmuştur. BIPM faaliyetleri, Uluslararası Metroloji Yönetim Komitesi (CIPM-Comité International des Poids et Mesures) tarafından idare edilmektedir. CIPM'nin altında ise dünya çapında alanlarında uzman kişilerin bir araya geldiği 9 komite yer almaktadır. Bu komitelerin görevleri, BIPM laboratuvarlarında gerçekleştirilen bilimsel faaliyetler konusunda CIPM'e bilgi sunmak, uluslararası karşılaştırma ölçümlerini teşvik etmek ve gerekli konuları CIPM gündeminde tartışmaya sunmaktır. Elektriksel ölçümlerden sorumlu komite Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM)'dir.

Ölçümlerde uluslararası seviyede ölçü birliğine entegrasyon, ölçümlerin temelini oluşturan standartların her ülkenin ulusal metroloji enstitülerinde oluşturularak muhafaza edilmesi ve uluslararası karşılaştırmalar yoluyla uluslararası standartların aralarındaki farkların gözlenmesi ile sağlanır.

1.3. Temel Metrolojik Kavramlar

1.3.1. Kalibrasyon

Belirli koşullarda, ilk aşamada ölçüm standartları tarafından sağlanan büyüklük değerleri ve ölçüm belirsizlikleri ile bunlara karşılık gelen gösterge değerleri ve ilgili ölçüm belirsizlikleri arasında bir ilişkinin oluşturulduğu, ikinci aşamada ise bu bilginin ölçüm sonucunun göstergeden elde edilmesinde kullanıldığı işlemler dizisidir.

1.3.2. Ölçüm/Ölçme

Bir büyüklüğün değerinin belirlenmesine yönelik işlemler dizisi.

1.3.3. Nominal değer (anma değeri)

Kullanımında rehber olmak üzere, bir ölçme cihazı özelliğinin yaklaşık veya yuvarlatılmış değeri.

1.3.4. Duyarlılık

Ölçme cihazının tepkisindeki değişimin, uyarımda ona karşılık gelen değişime oranı. (Duyarlılık, uyarımın değerine bağlı olabilir.)

1.3.5. Çözünürlük

Bir gösterge elemanının, gösterge değerleri arasındaki anlamlı olarak algılanabilir en küçük fark.

1.3.6. Kararlılık

Ölçme cihazının, metrolojik özelliklerini zaman içinde sabit tutabilmesi kabiliyeti.

1.3.7. Doğruluk

Ölçme cihazının gerçek değere yakın tepkiler verme kabiliyeti.

1.3.8. Tekrarlanabilirlik

Ölçme cihazının aynı ölçüm koşulları altında aynı ölçüm büyüklüğünün tekrarlı uygulamaları için birbirine yakın tepkiler verme kabiliyeti.

1.3.9. Ölçüm belirsizliği

Ölçüm sonucu ile beraber yer alan ve ölçülen büyüklüğe makul bir şekilde karşılık gelebilecek değerlerin dağılımını karakterize eden parametre.

1.3.10. İzlenebilirlik

Bir ölçüm sonucunun, her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan kalibrasyonlardan oluşan belgelendirilmiş kesintisiz bir zincir.

1.3.11. Ulusal standart

Ele alınan büyüklüğe ait diğer standartların değerlerini belirlemek için ülke içindeki temel olarak ulusal bir karar ile kullanılacağı kabul edilmiş standart.

Not: Ülkedeki ulusal standart genelde uluslararası alanda kabul görmüş en iyi doğruluğa sahip birinci seviyede standarttır.

1.3.12. Referans standart

Genel olarak belirli bir mekanda veya belirli bir organizasyonda elde edilebilir en yüksek metrolojik vasma sahip olan ve orada yapılan ölçümlerin kendisinden türetildiđi standart.

Not: Referans standart bir ölçme cihazı, bir ölçme sistemi veya bir maddi ölçüt olabilir.

1.3.13. Transfer standardı

Bazen özel yapısı olan ve değişik yerler arasında aktarma yapmak için kullanılan standarttır.

Örneğin; batarya ile çalışan taşınabilir sezyum frekans standardı.

1.3.14. Çalışma standardı

Maddi ölçütleri, ölçme cihazlarını veya referans malzemeleri kalibre veya kontrol etmek için rutin olarak kullanılan standart.

1.3.15. En küçük ölçüm belirsizliği

Bir laboratuvardaki her bir ölçüm büyüklüğü ve belirlenmiş ölçme bölgelerinde, ölçüm belirsizlikleri bütçeleri ile ilgili raporlar ve gerektiğinde, yapılan karşılaştırmalı ölçümler esas alınarak mümkün olan, en küçük ölçme belirsizliği olarak kabul edilen ölçüm belirsizliği.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektriksel metrolojide frekans bölgesi temel olarak üç ana alana ayrılmıştır. Doğru akımdan 100 kHz'e kadar olan bölgeye LF (Low Frequency); 100 kHz - 1 GHz aralığındaki frekanslar RF (Radio Frequency), 1 GHz – 100 GHz frekans aralığı mikrodalga frekans bölgesi olarak adlandırılır. Literatürde farklı adlandırmalar olsa da burada yapılan ayırım temel olarak metrolojik izlenebilirlik zincirinin ayrıldığı bölge açısından değerlendirilmektedir.

LF ve RF arası bölge LF-RF boşluk olarak adlandırılmakta ve bu bölgede izlenebilirlik sorununun çözülmesi için birçok ülke metroloji enstitüsü tarafından çalışmalar yürütülmektedir. Bu frekans bölgesinde RLC metreler, güç algılayıcılar, network analizörler gibi çeşitli ticari cihazlar ölçüm yapabilmekte ve düşük ölçüm belirsizliklerine ihtiyaç duymaktadır. Haberleşme, ilaç, otomotiv, havacılık, tıbbi analiz ve görüntüleme cihazları, uzay çalışmaları ile spektroskopik yöntemle malzeme analizinde bu bölgede alınan ölçümler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ticari olarak pazarda fazla sayıda cihaz olmasına karşın firmaların belirttiği doğruluk limitlerini güvenilirlik altına alacak bir izlenebilirlik zinciri kurulabilmiş değildir. Firma ve yöntem bağımlılığı mevcuttur. Ayrıca herhangi bir uluslararası karşılaştırma düzenlenmiş değildir.

Empedans ölçümleri açısından LF ve RF bölgelerinin SI birim sisteminde farklı izlenebilirlik zincirleri bulunmaktadır. Düşük frekanslarda empedans ölçümleri için temel olarak Kuantum Hall standardından yararlanılmakta iken, yüksek frekanslarda boyutsal ölçümlerinden izlenebilirlik sağlanmaktadır.

Kuantum Hall etkisinin gözlemlenmesi için çok düşük sıcaklık (-269 °C) ve yüksek manyetik alana (14 Tesla) gereksinim vardır. Düşük sıcaklıktaki yarıiletken bir

malzemenin üzerine yüksek manyetik alan uygulanması sonucu elde edilen kuantum basamaklarının belirli direnç değerlerine karşılık gelmesi ve bu direnç değerlerinin sabit olmasından yola çıkarak direnç biriminin elde edilmesi prensibine dayanmaktadır [2]. Bu sistemde elde edilen direnç değeri CCC (Cryogenic Current Comparator) adı verilen ve süper iletken ortamda çalışan karşılaştırma köprüsü ile standart dirençlere aktarılır [3]. Kuantum Hall sistemi ile 10^{-9} 'lar mertebesinde doğruluk elde edilebilmekte ve bu değer hesaplanabilir dirençler ve RC Quadrature köprü yardımı ile 10^{-6} 'dan daha iyi bir belirsizlik ile kapasitans standartlarına aktarılabilmektedir [4].

RC Quadrature köprüsü temel olarak değeri bilinen direnç standartları yardımı ile kapasitans değerini belirlenmesinde kullanılır. SI birim sisteminde kapasitans değerinin birincil seviye olarak elde edilmesinde kullanılan en hassas ölçüm sistemidir.

RC Quadrature köprüsü kullanılarak yapılan ölçümlerde değeri bilinmeyen üç adet standart kapasitör için yapılacak üç ölçümle bu kapasitans standartlarının değeri belirlenebilir. Burada değer aktarımında kullanılacak direnç standardı iki tanedir. Bu köprü ile tüm kapasitans değerlerinin belirlenmesi mümkün değildir. Yüksek doğruluk elde edebilmek amacı ile belirli bir kapasitans değerini belirlemek üzere tasarlanırlar.

Yüksek frekanslarda empedans ölçümlerinin izlenebilirliği airline adını verdiğimiz transmisyon hatları ile sağlanabilmektedir. Burada airline'ların empedansı, bilinen boyutları ve Maxwell denklemlerinin çözümleri ile elde edilmektedir. Buradaki sorun Maxwell denklemlerinin dalga boyunun çok altındaki bölgede çözümleri için doğruluklarının düşük olması nedeni ile belirsizliklerinin yüksek olmasıdır [5], [6].

ABD'de uzay çalışmalarına ağırlık verilmesi ile 1960'lı yıllarda yüksek frekans alanında yüksek doğruluğa sahip ölçüm ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle o zamanki ismi ile NBS'de (National Bureau of Standards), bugünkü adı NIST (National Institute of Standards and Technology), empedans alanında yapılan

çalışmalar esnasında yüksek frekanslarda empedans ölçümlerini gerçekleştirebilmek için standartların artık parametrelerinden bağımsız olarak ölçülebilmesini sağlayacak 4TP (4 terminal pair) standart yapısı geliştirilmiştir [7]. Bu empedans standardını elektriksel olarak 4 uçlu bir eleman olarak ele alabiliriz. Cutkosky tarafından geliştirilen yöntem ile 4TP empedans yapısında mevcut bulunan bağlantı hataları giderilebilmektedir.

Bu yöntem temel olarak DC direnç ölçümlerinde uygulanan dört uçlu direnç ölçüm tekniğinin AC ölçümlere uygulanmış halidir. Bu yöntemde temel koşul, gerilim kolunun akım çekmemesi sağlanarak, akımın gerilime dönüşümü tam olarak standardın üzerinde oluşturulmaya çalışılmasıdır.

Empedans ölçümlerini tarihi açıdan incelediğimizde yüksek frekans ifadesinin yıllara göre farklı frekans değerleri için kullanıldığını görmekteyiz. 1960'lı yıllarda 1kHz yüksek frekans kabul edilirken, 1970'li yıllarda bu 1 MHz'ler seviyesine, 1990'lı yıllarda 10 MHz'ler seviyelerine ve günümüzde ise 30 MHz ve üzerine taşınmıştır.

NIST'de Jones simetrik yapıda kapasitans standardını geliştirerek rezonans yöntemi ile ölçümler gerçekleştirmiştir [8]. Bugün metroloji dünyasında 4 terminal çift kapasitans standardı olarak Jones tarafından geliştirilen ve HP (Hewlett Packard) tarafından ticari olarak piyasa sunulan kapasitans standartları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı kullanılan algılayıcının hassasiyetinin çözünürlüğe olan etkisi ve giriş empedansının yeterince büyük olmaması nedeni ile tüm standartlar için uygulanamayışıdır.

Yonekura, Jones tarafından geliştirip HP tarafından ticari olarak üretilen ve kalibrasyon laboratuvarları için tüm dünyada yaygın bir kullanım alanı bulan 16380A hava dielektrikli kapasitans standartlarının gelişmiş bir elektriksel modelini temel alarak artık parametrelerinin hesaplanmasına dayanan bir ölçüm yöntemi ortaya atmıştır [9].

Suzuki artık parametrelerin ölçülmesine yönelik çalışmaları geliştirerek bu ölçüme ilişkin belirsizlik hesaplarını yapmış ve yayınlamıştır [10].

NPL'de (Natiolan Physical Laboratory) Shakil Awan ve Brian Kibble yüksek frekans standartlarının 1:1 ve 1:10 değerlerinde karşılaştırmalarını gerçekleştirebilecek bir köprü yapısı tasarlamıştır. Burada çalışma frekansı 1 MHz'dir [11].

Callegaro iki terminalli S parametre ölçümlerinden yola çıkarak 4TP empedans parametrelerini hesaplama temeline dayanan bir ölçüm yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntem diğer yöntemlerden temelde farklılık göstermesine karşın düşük frekans cihazlarına göre daha yüksek belirsizliğe sahip olan VNA'nın (Vektör Netvörk Analizör) doğrudan ölçme belirsizliğine bağlı olması ve MHz ile kHz arasındaki bölgeyi matematiksel eğri uydurma yöntemleri ile gerçekleştirmesi nedeni ile yüksek belirsizliğe sahiptir [12].

Awan ve Kibble piyasaya o yıllarda yeni çıkmakta olan RF lock-in kullanarak Jones'in yöntemini geliştirmiştir. Aynı sorunlar nedeni ile 1000 pF ve 100 pF değerlerini ölçebilmiş diğer kapasitans değerleri için çalışmayı gerçekleştirememiştir [13].

Buraya kadar 1960'dan günümüze kadar empedans ölçümleri konusunda gelişen ihtiyaçlara cevap verebilmek amacı ile bilim insanlarının yapmış oldukları çalışmalar konusunda kısa bilgiler verildi. Bu çalışmalardan anlaşılacağı üzere empedans ölçümleri gelişen teknoloji ile birlikte üzerinde sürekli çalışılan bir konudur ve bu özelliğini uzun yıllar koruyacağı açıktır.

Bu tez çalışmasında, bu alanda devam eden ve uluslararası camiada ihtiyaç duyulan çalışmalara katkı sağlamak amacı ile yeni yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle buraya kadar anlatılan çalışmaların ışığında ve yapılan çalışmaların zayıf noktalarını göz önüne alarak uygulaması kolay, çabuk anlaşılır ve ek yatırım maliyeti gerektirmeyen 4 terminal çift kapasitans standartlarının daha geniş frekans ve ölçüm

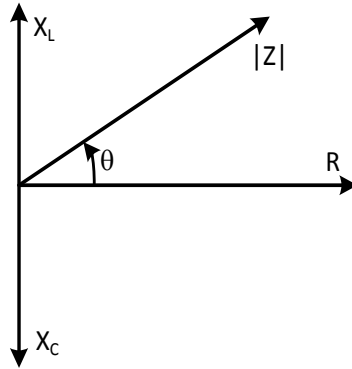
bölgesinde kalibrasyonlarını gerçekleştirebilecek bir yöntem geliştirilerek ülkemizin bu alandaki ölçüm izlenebilirliği ihtiyacı karşılanmıştır.



BÖLÜM 3. EMPEDANS STANDARTLARI

İletken bir nesnenin üzerine DC akım uygulandığında, cismin üzerinde gerilim düşümü oluşur ve bu gerilim uygulanan akım ile doğru orantılıdır. Oluşan gerilim ve akım oranı sabit olup direnç olarak adlandırılır. Temelde OHM kanunu olarak bildiğimiz bu ilişki ilk kez Alman bilim adamı George Ohm tarafından 1827 ortaya konmuştur [14]. Bu durumu AC akımda incelediğimizde uygulanan AC akım ile oluşan gerilim arasında bir oran vardır ve bu oran empedans olarak adlandırılır. Empedans ifadesini ilk olarak Oliver Heaviside kullanmış [15] ve Arthur Kenelly empedansı karmaşık sayılarla ifade etmiştir [16].

DC ve AC akım altında iletkenin davranışının farklı olmasının nedeni AC akımda iletkenin içyapısı ve çevre etkileri ile oluşan indüktans ve kapasitans parametrelerinin etkileridir. Teoride saf direnç sadece DC akım altında geçerlidir. AC akım altında deri etkisi, karşılıklı indüktans, self indüktans, toprak kapasitansları kablo kapasitans ve indüktansları gibi birçok etki ile karşı karşıya kalmaktayız ve bu etkiler frekansa bağlı olarak değişmektedirler. Şekil 3.1.'de empedans vektörel olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Empedansın vektörel gösterimi

Burada X_L ifadesi indüktans parametresi tarafından oluşturulan büyüklüğü, X_C ifadesi kapasitans parametresi tarafından oluşturulan büyüklüğü ve R ifadesi ise direnç parametresi tarafından oluşturulan büyüklüğü ifade etmektedir. X_L ve X_C terimlerinin oluşturduğu sanal bileşen reaktans olarak adlandırılır, R ile gösterilen gerçel kısım ise direnç olarak adlandırılır. Empedans ise bu üç parametrenin bileşkesine verilen addır. Empedans ifadesi kartezyen olarak karmaşık sayı gösterimi olarak gösterilmiştir (Denklem 3.1)

$$Z = R + j \cdot (X_L - X_C) \quad (3.1)$$

Burada Z toplam empedansı, R empedansı oluşturan direnç parametresini, X_L empedans ifadesini oluşturan indüktansın oluşturduğu reaktansı ve X_C empedans ifadesini oluşturan kapasitansın oluşturduğu reaktansı ifade etmektedir.

Empedansı kutupsal formda: $|Z| \angle \theta$ olarak gösterebilmek için (Denklem 3.2) ve (Denklem 3.3)'de verilen ifadeler kullanılır.

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right) \quad (3.3)$$

Burada θ , Empedansın faz açısını ifade etmektedir. reaktans ile direnç büyüklükleri arasındaki açıyı ifade eder.

Şekil 3.1.'de gösterilen reaktans ifadeleri X_L ve X_C (Denklem 3.4) ve (Denklem 3.5) yardımı ile hesaplanabilir.

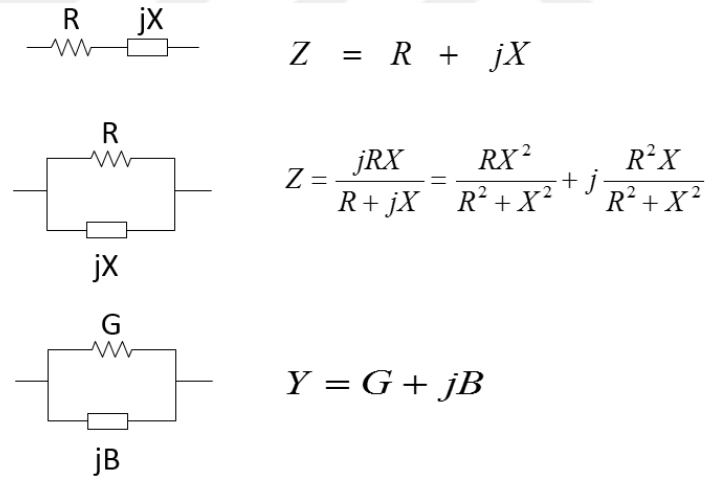
$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (3.4)$$

Burada f , (Denklem 3.4)'de gösterilen X_C kapasitif reaktans ifadesinin hesaplanacağı frekansı, C ise değeri hesaplanacak olan kapasitörün büyüklüğünü ifade etmektedir.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (3.5)$$

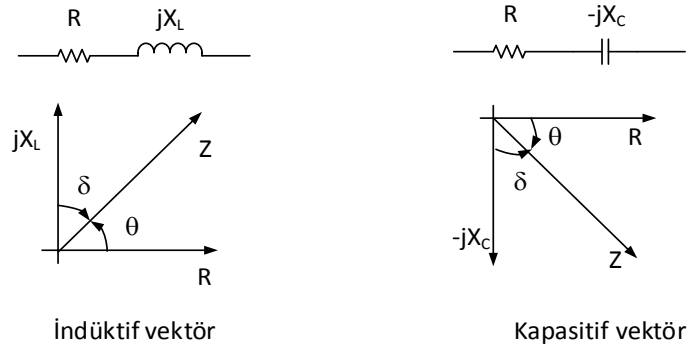
Burada f , (Denklem 3.5)'de gösterilen X_L indüktif reaktans ifadesinin hesaplanacağı frekansı, L ise değeri hesaplanacak olan indüktörün büyüklüğünü ifade etmektedir.

Empedans ifadesi bileşenlerinin birbirine seri veya paralel olması durumuna göre farklı şekillerde gösterilip ifade edilebilir. Şekil 3.2.'de empedansın paralel ve seri olarak gösterimleri ve bu durumlarda empedans büyüklüğünün nasıl hesaplanacağı verilmiştir.

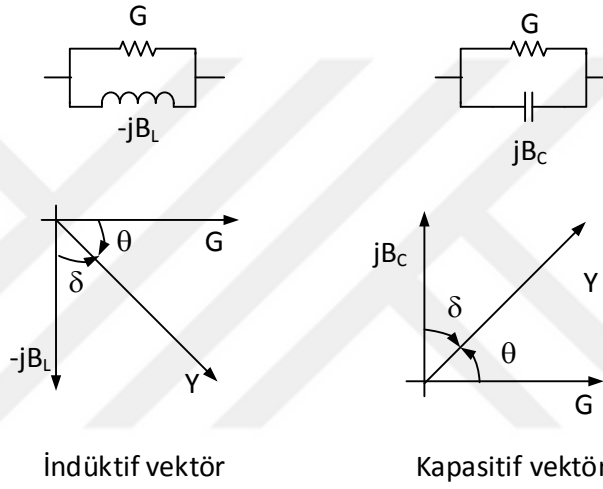


Şekil 3.2. Empedansın paralel ve seri olarak gösterimi

Yukarıda belirtildiği gibi empedans ifadesi R , X ve θ bileşenlerinden oluşmaktadır. Fakat empedans ölçen cihazlar bu iki bileşenden faydalanarak hesaplanan çeşitli parametreleri ekran çıktısı olarak gösterebilmektedir. Kullanıcılar açısından kolaylık sağlayan bu terimler Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



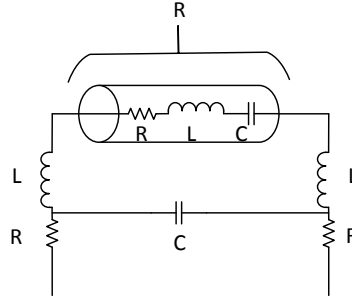
Şekil 3.3. Empedans düzleminde indüktif ve kapasitif vektörün gösterimi



Şekil 3.4. Admitans düzleminde kapasitif ve indüktif vektörün gösterimi

$$Q = \frac{1}{D} = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{X_L}{R} = \frac{-X_C}{R} = \frac{-B_L}{G} = \frac{B_C}{G} \quad (3.6)$$

(Denklem 3.6)'da empedans ölçen cihazların ekranında görülebilecek parametrelerin birbiri ile ilişkisi verilmiştir.

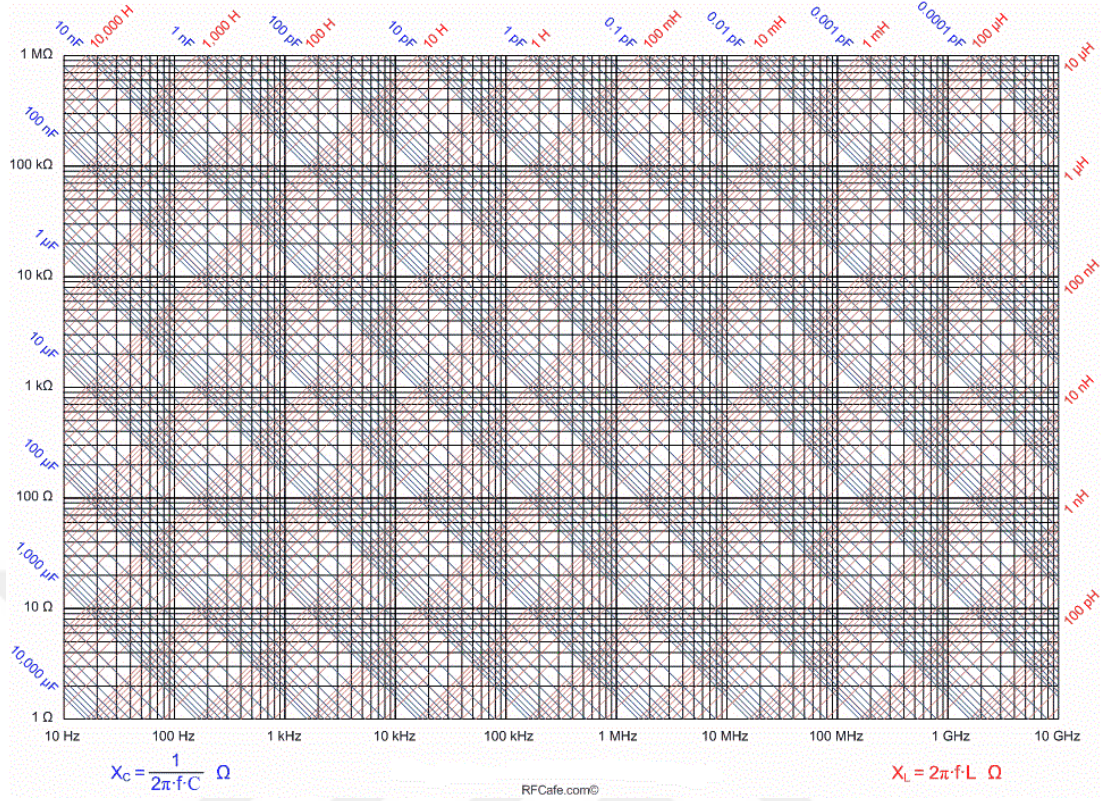


Şekil 3.5. Artık parametrelerle birlikte bir kondansatör

Empedans devreleri ana bileşenlerinin yanında çevre koşulları veya yapılarından kaynaklı oluşan artık parametreler içerir. Bu nedenle standart olarak kullanılmaları durumunda yada kullanıldıkları sistemlerde doğru olarak çalışabilmeleri için özel olarak tedbirler alınması gerekmektedir.

3.1. Empedans Standartlarının Bağlantı Şekilleri

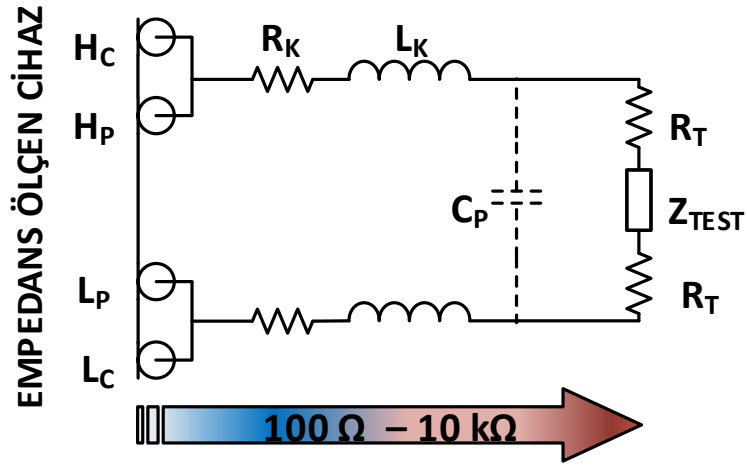
Herhangi bir empedans devresinin değerini çevre etkilerinden bağımsız olarak doğru ölçülebilmesi için özel tedbirler almak gerekir. Bu tedbirler empedans devresini etkileyen artık parametreleri yok etmeyi amaçlar. Şekil 3.6.'da gösterilen frekans reaktans grafiğine göre ölçülmek istenilen empedans değerine uygun aşağıda anlatılan yöntemlerden biri seçilmelidir.



Şekil 3.6. Frekansa karşın reaktans grafiği

3.1.1. İki-uçlu bağlantı şekli

İki uçlu bağlantı şekli herkes tarafından bilinen ve uygulanan bağlantı şeklidir. Bu bağlantı şekli el tipi ölçü aleti ile bir direnç ölçtüğümüzde kullandığımız yöntemle benzer. AC akımda bu yöntem ile 100 Ω - 10 kΩ aralığında ölçüm alınması tavsiye edilir. Tavsiye edilenden daha düşük veya yüksek değerli empedans standartları için bu yöntem kullanıldığında kablo ve artık parametrelerin etkisiyle doğrulukta azalma olmaktadır. Şekil 3.7.'de iki uçlu bağlantının empedans ölçen cihazlara nasıl yapılacağı ve artık parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 3.7. İki uçlu empedans standardının gösterimi

Şekil 3.8.'de ise TÜBİTAK UME Empedans Laboratuvarı'nda bulunan iki uçlu kapasitans standardının fotoğrafı gösterilmektedir.

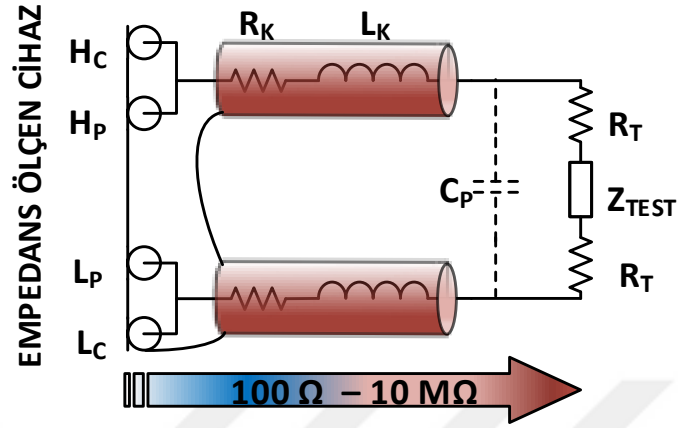


Şekil 3.8. TÜBİTAK UME'de bulunan CARDWELL 97 model iki uçlu kapasitans standardı

3.1.2. Üç-uçlu bağlantı şekli

Bu bağlantı şekli ile iki uçlu bağlantı yapısındaki ölçüm bölgesi 100 Ω - 10 M Ω aralığına genişletilmiştir. Kablo bağlantılarından kaynaklanan artık kapasitans etkisi koaksiyel yapı kullanılarak giderilmiştir. Burada koaksiyel yapının ekranı gard olarak adlandırılır. Yüksek doğruluğa sahip ölçüm sistemlerinde ekrana uygulanan

gerilim eş potansiyel devresi ile kapasitif etkiyi yok edecek şekilde ayarlanır. Şekil 3.9.'da üç uçlu bağlantı yapısının şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Üç uçlu empedans devresinin gösterimi

Şekil 3.10'da üç uçlu empedans standartlarına örnek olarak TÜBİTAK UME'de bulunan kapasitans standardı gösterilmektedir.

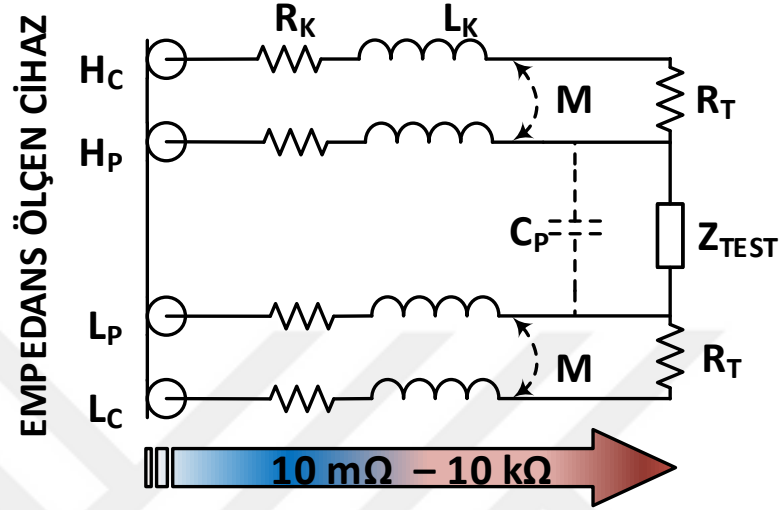


Şekil 3.10. TÜBİTAK UME'de bulunan QuadTech 1409-T model üç uçlu kapasitans standardı

3.1.3. Dört-uçlu bağlantı şekli

Üç uçlu bağlantı şeklinde 100Ω empedans değerinden başlayarak doğru ölçümler alınabiliyordu. 100Ω altındaki empedans değerlerini doğru olarak ölçebilmek için üç uçlu bağlantı şeklinde giderilemeyen ölçüm kablosu direncini ve ölçüm kablosunun indüktansını yok edecek bir bağlantı şekli olarak geliştirilmiştir. Bu teknikte akım,

akım kolundan akarken empedansın gerilimi gerilim kolundan okunmaktadır. Böylece kablo direncinin ve indüktansının etkisi yok edilmektedir. Şekil 3.11.'de dört uçlu bağlantı şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Dört uçlu empedans devresinin gösterimi

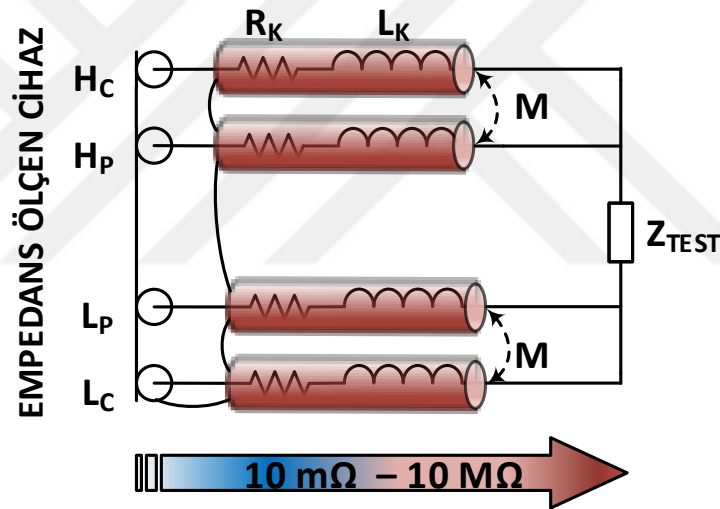
Bu yöntemde empedans değeri düştükçe akım kolundan akan akım artmakta bu gerilim kolunda bir akım inküklenmesine yol açmaktadır. Böylece akım ve gerilim kolları arasında bir karşılıklı indüktans (mutual inductance) oluşur. Bu nedenle dört uçlu ölçüm tekniği ile $10 \text{ m}\Omega - 10 \text{ k}\Omega$ aralığında empedans değerleri doğru olarak ölçülebilir. Şekil 3.12.'de TÜBİTAK UME'de bulunan dört uçlu bir direnç standardı örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.12. TÜBİTAK UME'de bulunan TINSLEY 1659 model dört uçlu direnç standardı

3.1.4. Beş-uçlu bağlantı şekli

Dört terminalli yapı ile $10\text{ k}\Omega$ değerine kadar empedanslar doğru okunabilmektedir. Daha yüksek değerlerde empedansların okunabilmesi için ölçülen empedans devresine paralel olarak gelen artık kondansatörün yok edilmesi gerekmektedir. Dört uçlu bağlantı şeklini Şekil 3.13.'de gösterildiği gibi koaksiyel kablolar ile gerçekleştirilirse beş uçlu bağlantı yapısı elde edilmiş olur. Bu bağlantı şeklinde gerilim ve akım kolları arasında oluşan karşılıklı indüktans sorunu devam etmektedir. Bu nedenle düşük değerli empedansların ölçümünde doğruluk sorunu devam etmektedir.



Şekil 3.13. Beş uçlu empedans devresinin gösterimi

Şekil 3.14.'de TÜBİTAK UME'de bulunan 5 uçlu bir direnç standardı bu bağlantı yapısı ile gerçekleştirilmiş empedans devresine örnek olarak gösterilmiştir.

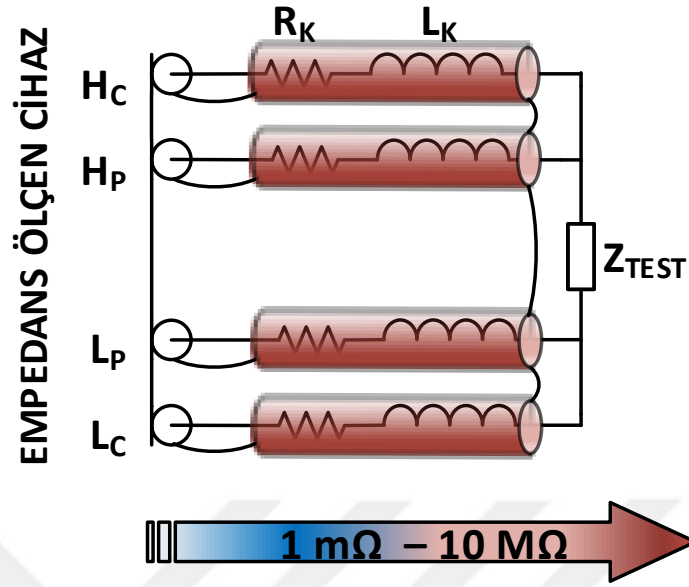


Şekil 3.14. TÜBİTAK UME’de bulunan TEGAM SR104 beş uçlu direnç standardı

3.1.5. Dört uçlu ekranlı bağlantı şekli

Beş uçlu ölçüm tekniği ile çözülemeyen akım kolunun gerilim kolunu indüklemesi sonucu oluşan karşılıklı indüktans etkisi giderilememektedir. Dört uçlu ve ekranlı bağlantı şeklinde tüm bağlantı kabloları koaksiyel yapıdadır. Bağlantı kablosunun iç iletkeninden akım zıt yönde ekrandan dönmektedir. Böylece bağlantı kablosunun oluşturduğu net manyetik akı sifıra yakındır. Bu durum sayesinde bağlantı kablolarının birbirini indüklemesi sonucu oluşan karşılıklı indüktans etkisi yok edilmiş olur. Burada dikkat edilecek husus bu koaksiyel yapının toprağa bağlanmaması gerekir. Eğer sistem toprağa bağlanırsa farklı yönlerde oluşan akım döngüleri karşılıklı indüktans oluşturacağından bu yöntemin avantajını ortadan kaldırır.

Dört uçlu ekranlı bağlantı tekniği ile artık parametrelerin etkileri ortadan kaldırılmıştır. Bu nedenle düşük değerli empedans standartlarının ölçüm doğruluğu artırılmıştır. Ayrıca karşılıklı indüktansın yüksek frekanslarda daha etkisi olması nedeni ile ölçülemeyen yüksek değerli empedanslar da yüksek doğrulukla ölçülebilmektedir. Şekil 3.15.’de dört uçlu ve ekranlı empedans devresinin yapısı ve ölçüm cihazına bağlantısı gösterilmiştir. Bu yöntem günümüzde piyasada bulunan modern yüksek doğruluğa sahip empedans ölçüm cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Dört uçlu ve ekran tekniği ile empedans ölçüm aralığı 1 m Ω - 10 M Ω aralığına genişletilmiştir.



Şekil 3.15. Dört uçlu ve ekranlı empedans devresinin gösterimi

Şekil 3.16.'da TÜBİTAK UME'de bulunan dört uçlu ve ekranlı kapasitans standardı bu yönteme örnek olarak gösterilmiştir. Dört uçlu ve ekranlı ölçüm tekniği buraya kadar anlatılan tüm yöntemlerden daha geniş ölçüm frekansı ve empedans değeri aralığına sahiptir.



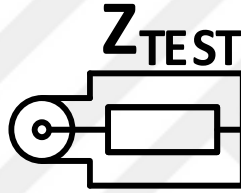
Şekil 3.16. TÜBİTAK UME'de bulunan HP16384A model 1000 pF dört uçlu ve ekranlı kapasitans standardı

3.2. N-Uçlu Çift Empedans Standartları

Empedans standartlarının artık parametrelerini azaltmak amacı ile simetrik, ekranlı ve koaksiyel yapılar şeklinde geliştirilmektedir. Bu sayede doğruluğu yüksek ve artık parametrelerin etkisi ile oluşan frekans bağımlılıkları düşürülmektedir.

3.2.1. Bir-uçlu çift empedans standardı

Bir terminal çift yapısı Şekil 3.17.'de gösterildiği gibi bir adet bağlantı noktasına sahip empedans devresi yapısıdır. Bu yapı yukarıda anlatılan iki uçlu bağlantı şeklinin koaksiyel halidir.



Şekil 3.17. Bir uçlu çift yapıdaki empedans standardı

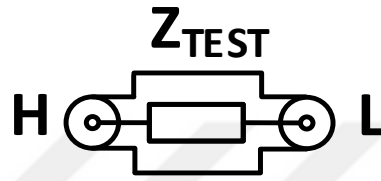
Burada akım ve gerilim bu bağlantı noktası üzerinden yapılır. Genellikle mikrodalga ve radyo frekanslarında kullanılan standart türü olup konnektörün kalitesi ve empedansın anım noktası doğruluğu etkiler. Bu tip standartlar genellikle düşük doğruluğa sahiptirler. Şekil 3.18.'de bir terminal çift yapısına örnek olarak verilen Agilent marka 50 Ω empedans standardı gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Bir uçlu çift Agilent marka 50 Ω empedans standardı

3.2.2. İki-uçlu çift empedans standardı

İki uçlu çift yapısında iki adet H ve L olarak adlandırılan iki adet bağlantı ucu bulunmaktadır. Şekil 3.19.'da bu yapı gösterilmektedir. Bu bağlantı şekli üç uçlu yapıya benzer fakat burada tüm sistem koaksiyel yapıda ve simetrik olduğundan artık parametrelerin etkisi azaltılmıştır.



Şekil 3.19. İki uçlu çift empedans yapısı

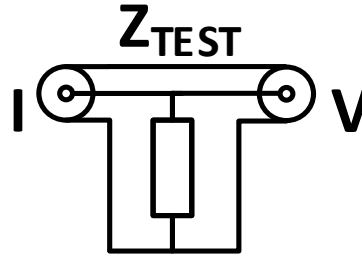
İki uçlu çift bağlantı yapısı genellikle orta değerli ve düşük frekanslardaki metrolojik ölçümlerde kullanılmaktadır. Bunun yanında bu yapı yüksek direnç ölçüm sistemlerinde de karşımıza çıkmaktadır. Şekil 3.20.'de General Radio firmasının 1404 tipi hava dielektrikli iki uç çift yapısındaki kapasitans standardı gösterilmektedir.



Şekil 3.20. İki uçlu çift yapıdaki General Radio 1404 kapasitans standardı

3.2.3. Dört-uçlu koaksiyel empedans standardı

Şekil 3.21.'de yapısı gösterilen bu bağlantı şekli, yukarıda anlatılan dört-uçlu bağlantı şeklinin koaksiyel yapıda olan halidir.



Şekil 3.21. Dört uçlu koaksiyel empedans yapısı

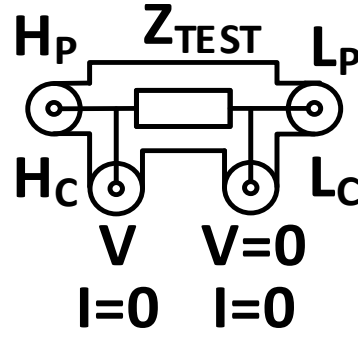
Bu yapıda karşılıklı indüktans etkisi azaltıldığından yüksek frekanslarda kullanılabilir. Genellikle AC akım şöntlerinde ve feed-trough olarak adlandırılan devre elemanlarında kullanılmaktadırlar. Şekil 3.22.'de HP 110488 model 50Ω feed trough bu yöneme örnek olarak verilmektedir.



Şekil 3.22. Dört uçlu koaksiyel yapıda 50Ω feed trough

3.2.4. Dört-uçlu çift empedans standardı

Bölüm 3.1.5.'de ayrıntılı olarak anlatılan bu yöntem Cutkosky tarafından bulunmuştur [7]. Şekil 3.23.'de dört-uçlu çift empedans yapısı ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Dört-uçlu çift empedans yapısı

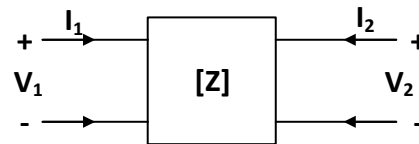
Bu yöntemde temel olarak H_C bağlantı noktasından ölçüm sinyali uygulanır. Uygulanan ölçüm sinyali L_C bağlantı ucundan akar. H_P ve L_P uçlarından gerilim okunur. Burada H_P ve L_P uçlarından akım akmaz. Bu şartlar altında dört-uçlu çift empedans değeri (Denklem 3.7)'deki gibi olur. Bu durum $I_{HP}=0$, $V_{LP}=0$ ve $I_{LP}=0$ koşulları altında geçerlidir.

$$Z_{TEST} = \frac{V_{HP}}{I_{LC}} \quad (3.7)$$

3.3. Empedans, Admitans Parametreleri

Elektriksel devreleri düşük frekanslarda analiz ederken devreleri bağlantı uçlarına göre matrisler şeklinde tanımlamak devrenin iç yapısını analiz etmede bize kolaylık sağlar.

Örneğin Şekil 3.24.'de verilen iki uçlu devre analiz edildiğinde,



Şekil 3.24. İki uçlu devre

İki uçlu devre için empedans ifadeleri (Denklem 3.8), (Denklem 3.9), (Denklem 3.10) ve (Denklem 3.11)'deki gibi yazılır.

$$Z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (3.8)$$

$$Z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad (3.9)$$

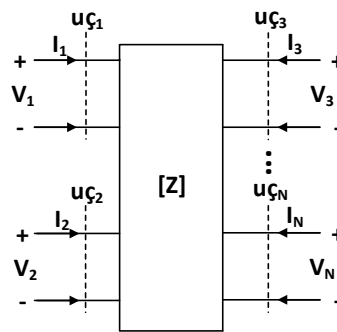
$$Z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0} \quad (3.10)$$

$$Z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} \quad (3.11)$$

Yukarıda verilen denklemler matris formda yazılırsa empedans matrisleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Elektriksel devre Şekil 3.25.'de gösterildiği gibi N adet bağlantı ucuna sahipse, empedans matrisi yukarıda verilen denklemlere benzer şekilde (Denklem 3.13) yardımı ile hesaplanırsa, (Denklem 3.14)'de verilen N bağlantı ucuna sahip devre için empedans matrisi bulunur.



Şekil 3.25. N uçlu devre

$$Z_{ij} = \frac{V_i}{I_j} \Big|_{I_k=0, \forall k \neq j} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

(Denklem 3.14)'de bulunan ifade (Denklem 3.15)'deki gibi ifade edilebilir.

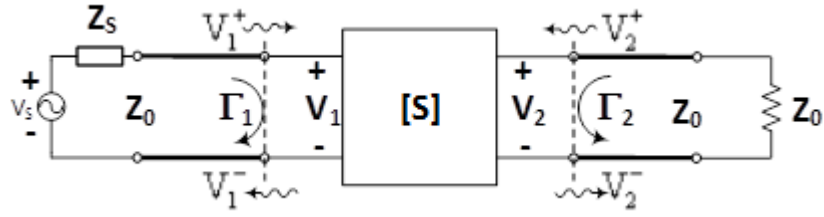
$$[V] = [Z] \cdot [I] \quad (3.15)$$

Aynı şekilde admitans ifadesi de (Denklem 3.16) yardımıyla hesaplanır.

$$[I] = [Y] \cdot [V] \quad (3.16)$$

3.4. Saçılma Parametreleri

Yüksek frekanslarda empedans devreleri üzerinde gerilim ve akım ölçmek kolay değildir. Yüksek frekanslarda gerilim ve akım ölçümlerinde ilave birçok etki ile karşı karşıya kalınır. Yüksek frekanslarda kolayca ölçülebilen büyüklük güç ve uygulanan gerilim ile yansıyan gerilim arası fazdır. Vektör netvörk analizör (VNA) olarak adlandırılan cihazlarla bu ölçümler kolayca yapılabilmektedir. Bu nedenle yüksek frekanslarda empedans ve admitans matrisleri yerine uygulanan ve yansıyan gerilimler arası faz ve güç ölçümleri kullanılarak elde edilen saçılma parametreleri adı verilen S-parametreleri kullanılmaktadır.



Şekil 3.26. İki uçlu devrede saçılma parametrelerinin gösterimi

Şekil 3.26.'da gösterilen ve karakteristik empedansı Z_0 olan bir empedans devresinde 1 numaralı uca uygulanan gerilim V_1^+ ve 1 numaralı uçtan yansıyan gerilim V_1^- , 2 numaralı uca uygulanan gerilim V_2^+ ve 2 numaralı uçtan yansıyan gerilim V_2^- , olur ise saçılma parametreleri matrisi ya da $[S]$ matrisi olarak adlandırılan matris (Denklem 3.17)'de gösterildiği şekilde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Bir numaralı uca ait bir parametre olan S_{11} parametresini ölçebilmek için 1 numaralı uca uygulanan gerilim V_1^+ ve 1 numaralı uçtan yansıyan gerilim V_1^- , (Denklem 3.18)'de yerine konulur ise S_{11} parametresi hesaplanmış olur. (Denklem 3.18)'de verilen $V_2^+ = 0$ koşulu ise iki numaralı ucun karakteristik empedans olan Z_0 ile sonlandırılması ile sağlanır.

$$S_{11} = \left. \frac{V_1^-}{V_1^+} \right|_{V_2^+=0} \quad (3.18)$$

Aynı şekilde S_{12} , S_{21} ve S_{22} parametreleri (Denklem 3.19), (Denklem 3.20) ve (Denklem 3.21) yardımı ile hesaplanır. Burada karşılıklılık teoremi gereğince S_{12} ve S_{21} tüm bağlantı uçlarının aynı karakteristik empedansa sahip olduğu sistemler için eşittir.

$$S_{12} = \left. \frac{V_1^-}{V_2^+} \right|_{V_2^+ = 0} \quad (3.19)$$

$$S_{21} = \left. \frac{V_2^-}{V_1^+} \right|_{V_1^+ = 0} \quad (3.20)$$

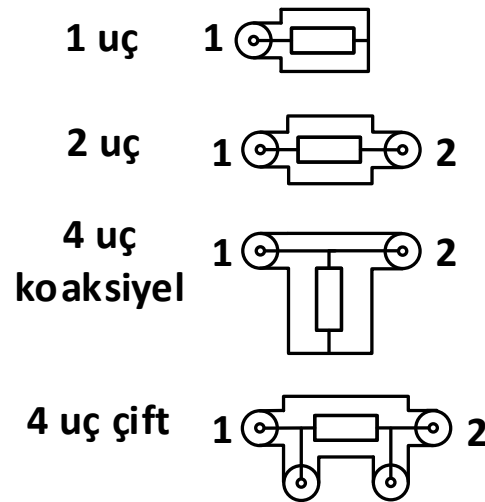
$$S_{22} = \left. \frac{V_2^-}{V_2^+} \right|_{V_1^+ = 0} \quad (3.21)$$

Saçılma empedans ve admitans parametreleri birbiri ile ilişkili matrisler olup bir matristen diğeri elde edilebilir. Admitans parametreleri Z parametrelerinden (Denklem 3.22)'deki gibi hesaplanabilir.

$$[Y] = [Z]^{-1} = \frac{adj[Z]}{\det[Z]} \quad (3.22)$$

S parametreleri ise Z parametrelerinden (Denklem 3.23) yardımı ile hesaplanabilir.

$$[S] = ([Z] - [U]) \cdot ([Z] + [U])^{-1} \quad (3.23)$$



Şekil 3.27. Kapasitörlerin çeşitli bağlantı şekilleri

Yukarıdaki bölümlerde anlatılan bağlantı şekillerini ve bu bağlantı şekillerine ilişkin empedans, admitans ve S parametreleri arasındaki ilişkileri özetlenecek olursa Şekil 3.27.'de gösterilen empedans yapıları aşağıdaki denklemlerde verilen bağıntılar elde edilir:

1 uçlu empedans yapısı için empedans parametreleri kullanılarak empedans değeri (Denklem 3.24) kullanılarak hesaplanabilir.

$$Z_{1P} = Z_{11} \quad (3.24)$$

2 uçlu empedans yapısı için admitans parametreleri kullanılarak admitans değeri (Denklem 3.25) kullanılarak hesaplanabilir.

$$Y_{2P} = -Y_{21} \quad (3.25)$$

4 uç koaksiyel empedans yapısı için empedans değeri empedans parametreleri kullanılarak (Denklem 3.26) kullanılarak hesaplanabilir.

$$Z_{4C} = Z_{21} \quad (3.26)$$

4 uç çift empedans yapısı için empedans parametreleri kullanılarak hesaplanan dört terminal çift empedans değeri (Denklem 3.27) kullanılarak hesaplanabilir [7].

$$Z_{4P} = \frac{Z_{34} \cdot Z_{21} - Z_{24}Z_{31}}{Z_{31}} \quad (3.27)$$

Aynı şekilde 4 uç çift empedans yapısı için empedans değeri S parametreleri kullanılarak (Denklem 3.28) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
 Z_{4TP} &= 2 \cdot Z_0 \{S_{21}S_{34} - S_{31}S_{24}\} / \dots \\
 &(S_{31} + S_{21}S_{32} - S_{31}S_{44} - S_{31}S_{22} + S_{41}S_{34} - S_{21}S_{32}S_{44} + S_{21}S_{34}S_{42} \\
 &\quad + S_{31}S_{22}S_{44} - S_{31}S_{42}S_{24} - S_{41}S_{34}S_{22} - S_{41}S_{24}S_{32})
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$



BÖLÜM 4. KAPASİTANS

4.1. Kapasitansın Tanımı

Kapasitans bir cismin elektriksel yükü depolama kapasitesidir. Kapasitans, cisme uygulanan elektriksel gerilime karşılık depolanan elektriksel yük miktarının bir ölçüsü olarak da tanımlanabilir. C ile gösterilir, birimi Farad'dır. 1 Farad, 1 Coulomb/Volt'a eşittir ve bu ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (4.1)$$

Bir kapasitörün içerisinde depolanan enerji ise aşağıdaki gibi gösterilir.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (4.2)$$

Kapasitans, aralarında gerilim farkı olan ve birbirine temas etmeyen iki iletken arasında oluşur. Bir başka deyişle bir elektriksel düzeneğin yük depolama kapasitesine sahip olabilmesi için bir yalıtkan ile birbirinden izole edilmiş iki iletkene ihtiyaç vardır. Böyle bir yapıda kapasitans, iletkenlerin yüzeyleri büyüdükçe büyür, iletkenler arasındaki mesafe arttıkça azalır. Buna göre C, kapasitans değeri şu şekilde formüle edilir:

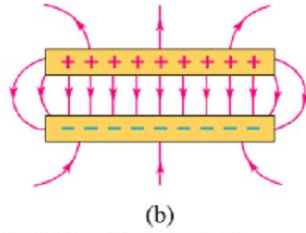
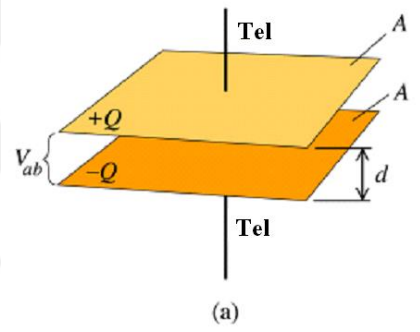
$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte A iletkenlerin birbirlerine bakan yüzeylerinin m² birimi ile ifadesi; d iletkenler arası mesafenin m birimi ile ifadesi; ε ise iletkenler arasındaki yalıtkanın

dielektrik katsayısıdır ve birimi F/m'dir. Yalıtkanın dielektrik katsayısı ise şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon = \varepsilon_R \cdot \varepsilon_0 \quad (4.4)$$

ε_0 boşluğun dielektrik katsayısıdır ve yaklaşık değeri $8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m'dir; ε_R ise söz konusu yalıtkanın bağıl dielektrik katsayısıdır. Bu katsayı o malzemenin, üzerinden geçen elektrik alana karşı gösterdiği geçirgenliğin bir göstergesidir. Örneğin hava için bu değer 1, kağıt için 3,6, su için 80'dir. Bir kapasitör yapısında potansiyel farkları olan iki iletken arasında elektrik alan oluşur. Bir başka deyişle kapasitör plakaları arasındaki etkileşim elektrik alan vasıtası ile gerçekleşir.



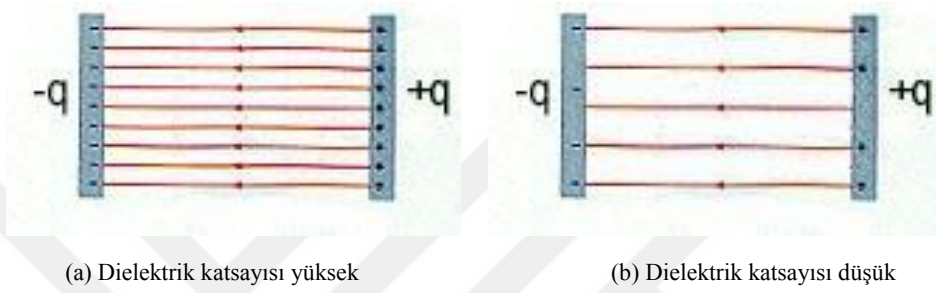
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Şekil 4.1. (a) Paralel iki plaka (b) bu plakalar arasında oluşan elektrik alan çizgileri

Birbirine değmeyen iki plakadan biri diğerine göre farklı gerilimle kutuplandığında plakalar üzerindeki yük dağılımı Şekil 4.1. (b)'deki gibi olur. Bu durumda (+) yükle yüklenmiş olan plakadan (-) yükle yüklenmiş plakaya doğru bir elektrik alan akışı olur. Kapasitörlerde enerji iletimi bu elektrik alan aracılığı ile gerçekleşir. Elektrik alan çizgilerinin yoğunluğu uygulanan gerilim farkının artması ile veya plakaların

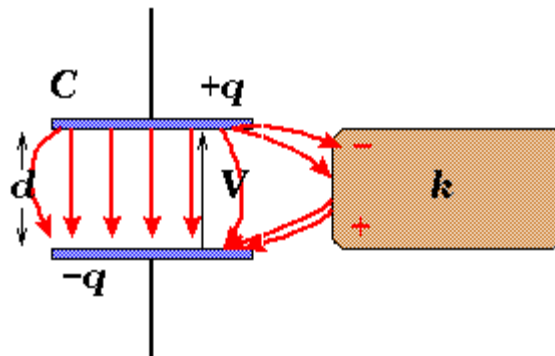
birbirine yaklaştırılması ile artar. Bu durum kapasitans değerinin yükseldiğini gösterir.

Gerilimleri farklı iki plaka arasındaki malzemenin dielektrik katsayısının büyük olması kapasitansın büyük olmasına neden olur. Dielektrik katsayısının yüksek olduğu kapasitörde iki plaka arasındaki elektrik alan çizgilerinin akışı kolaylaşır ve Şekil 4.2. (a)'daki gibi daha yoğun olur.



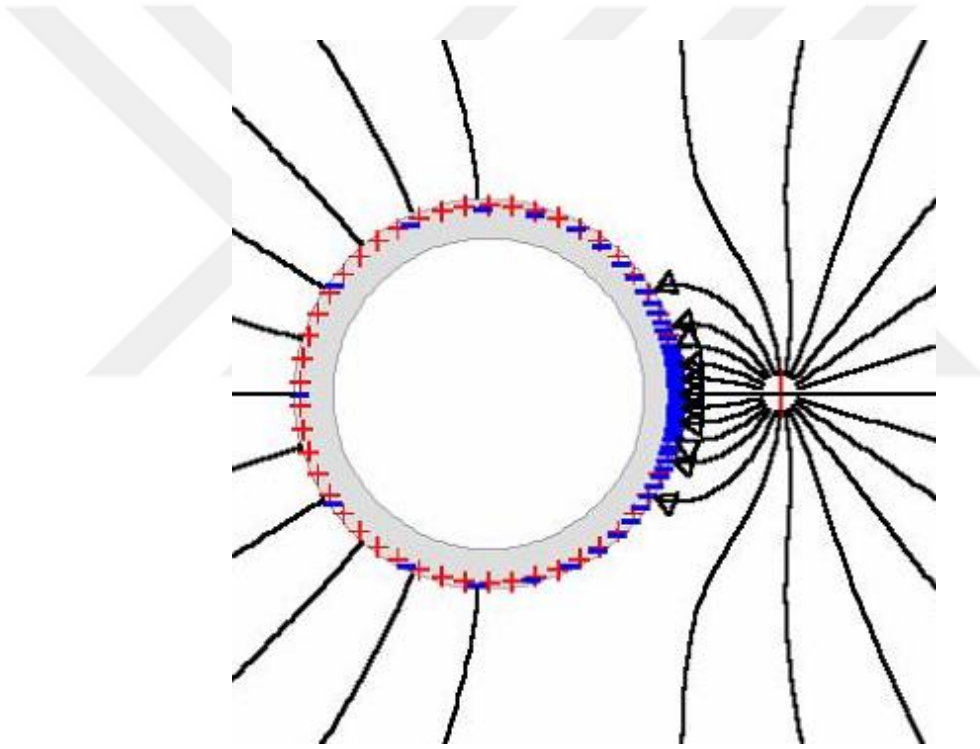
Şekil 4.2. İletken plakalar arasındaki yalıtkan malzemenin elektrik alan çizgilerine etkisi

Gerçekte kapasitans plakaları arasındaki elektrik alan çizgileri Şekil 4.2.'deki gibi düzgün değildir. Plaka kenarlarında daha çok Şekil 4.1.(b)'deki gibi bozulmalar görülür. Buna ek olarak çevrede bulunan ve farklı gerilimle yüklenmiş başka iletkenler olması durumunda elektrik alan çizgilerinin bir kısmının o iletkene doğru yönelmesi de kaçınılmazdır.



Şekil 4.3. Farklı gerilimle yüklenmiş başka bir iletkenin etkisi

Bu durum karşılıklı iki iletken plaka arasındaki kapasitans değerini değiştirir. Örneğin Şekil 4.3.'te görülen karşılıklı iki plaka arasındaki kapasitans ölçülmek istenseydi yanlış bir ölçüm sonucu elde edilmiş olurdu. Doğru kapasitans ölçümleri gerçekleştirebilmek için elektrik alan akışının kontrol altına alınması gereklidir. Aralarında elektrik alan akışı olmayan iletkenler arasında bir kapasitans bahsedilemez. Elektrik alan akışının kontrolü ekranlama (shielding) ile gerçekleştirilir. Ekranlama elemanı olarak iletken malzemeler kullanılır. Elektrik alan boşlukta ilerlerken bir iletkene rastladığında bu iletken üzerinden akmaya meyillidir. Bu iletken, kapalı bir yapıda ise Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi bu yapının içerisinde elektrik alan oluşmaz.



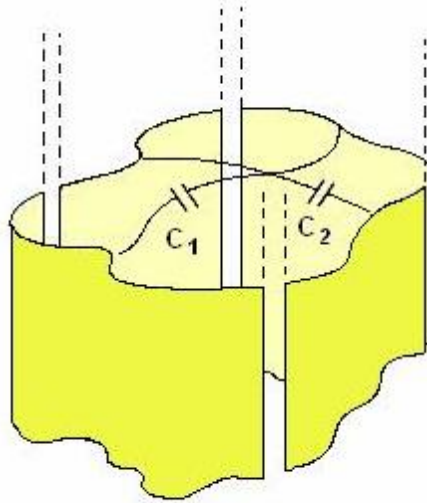
Şekil 4.4. Elektrik alanın ekranlanması

Eğer Şekil 4.3.'teki plakalar Şekil 4.4.'teki gibi ekranlanırsa dışarıda bulunan farklı gerilime sahip iletkenlerin kapasitans değerine etkisi olmayacaktır. Bir başka deyişle karşılıklı iki plaka arasında oluşan elektrik alan çizgilerinin bir kısmının başka bir iletkene yönelmesinin önüne geçilecek böylelikle kapasitans değeri doğru bir şekilde belirlenebilecektir. Bu konuya kapasitans ölçümü bölümünde tekrar değinilecektir [1].

4.2. Kapasitans Birimi

1950’li yıllara kadar kapasitans standardının izlenebilirliği, değeri daha iyi bilindiğinden bir “Hesaplanabilir Karşılıklı İndüktans Standardı” kullanılarak elde edilmekteydi. Bir takım karşılaştırma sistemleri kullanılarak bu indüktans standardının değerinden kapasitans standartlarının değeri elde ediliyordu Bu değer belirsizliği de 10 ppm civarında idi. 1957 yılında Avustralya Metroloji Enstitüsü’nde (CSIRO) iki araştırmacının buluşu [17] kapasitans ölçümlerinin günümüzde $2-3 \cdot 10^{-8}$ belirsizlikle kapasitans ölçümü yapılabilmesinin önünü açtı.

CSIRO’daki bu iki araştırmacı ortaya attıkları teoriyi kullanarak 1958 yılında “Hesaplanabilir Kapasitör” ürettiler. Thompson ve Lampard’ın ortaya attıkları teoriye göre, sonsuz uzunlukta şekli önemsiz kapalı bir iletken Şekil 4.5.’deki gibi sonsuz küçük aralıklarla 4 parçaya bölünsün. Bu yapıda karşılıklı oluşan C_1 ve C_2 kapasitansları hakkında aşağıdaki formül yazılabilir.



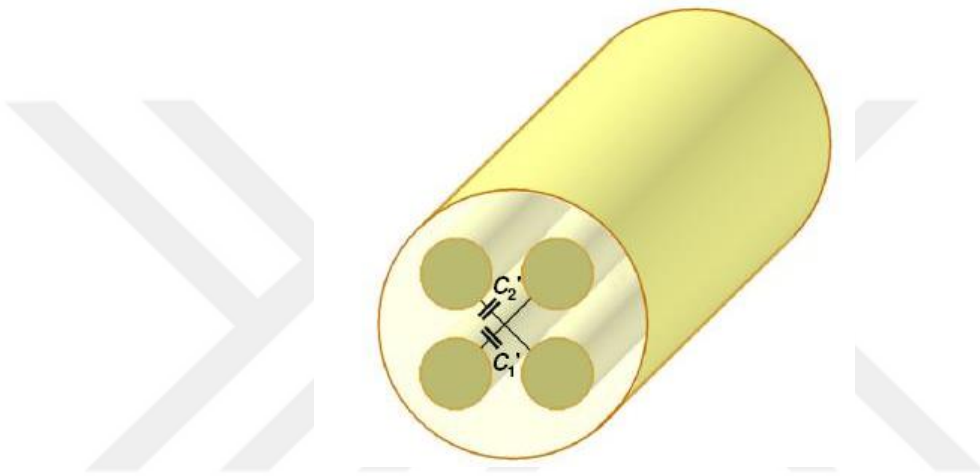
Şekil 4.5. Sonsuz uzunluklu silindirik iletkenin dört parçaya bölünmesi

$$e^{-\frac{\pi C_1}{\epsilon_0}} + e^{-\frac{\pi C_2}{\epsilon_0}} = 1 \quad (4.5)$$

Eğer bu yapı simetrik bir yapı olursa C_1 ve C_2 kapasitansları birbirine eşit olur ve formül şu şekli alır:

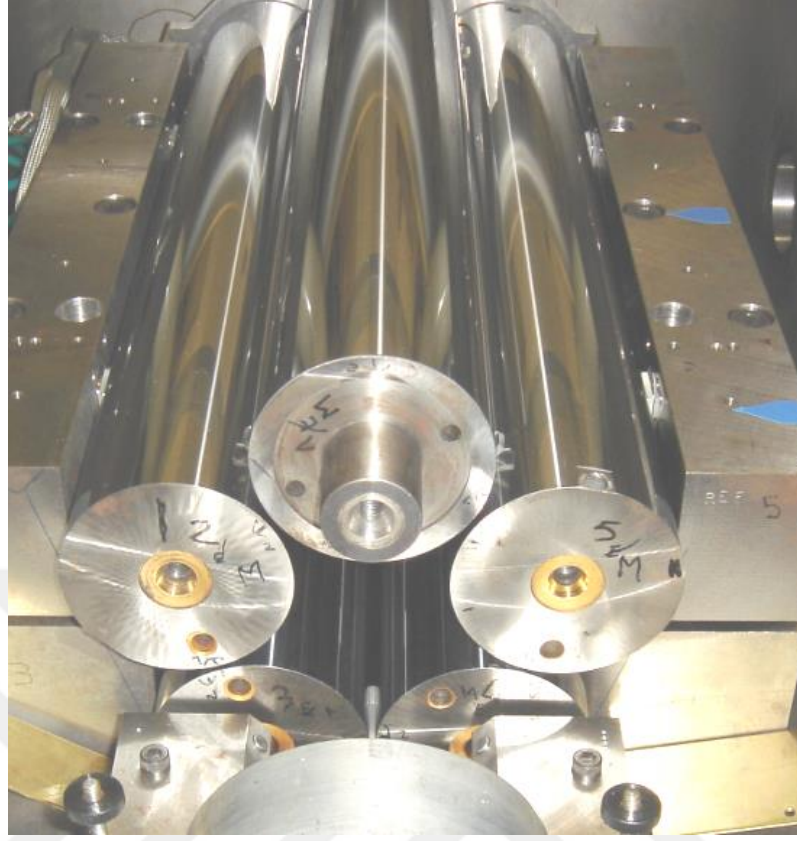
$$C = \left(\frac{\epsilon_0}{\pi}\right) \ln 2 \approx 1,95 \text{ pF/m} \quad (4.6)$$

(Denklem 4.6) incelendiğinde bu teori sonucunda elde edilen kapasitans değeri yalnızca uzunluk değeri ile değişmektedir.



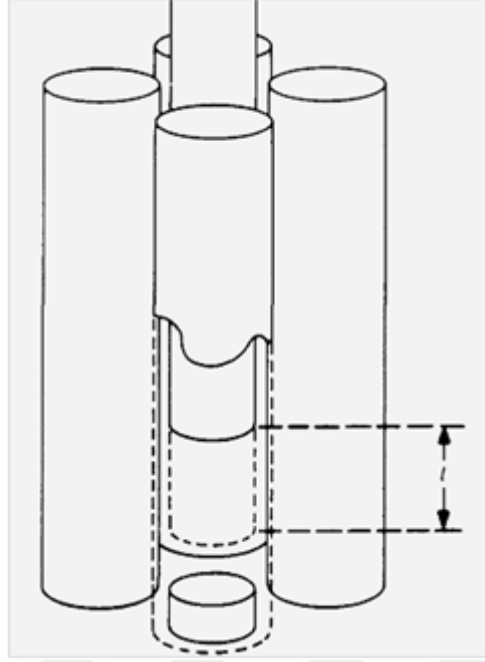
Şekil 4.6. Hesaplanabilir Kapasitör

Yani uzunluk ölçümünün yapılması kapasitans değerinin elde edilmesi için yeterlidir. Bu durumda kapasitans biriminin izlenebilirliği uzunluk ölçümlerinden sağlanmış olmaktadır. Hesaplanabilir kapasitör yapısı Şekil 4.6.'da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.7. Gerçekleştirilen Hesaplanabilir Kapasitör

Şekil 4.7.'de kullanılan bir hesaplanabilir kapasitör görülmektedir. Bu yapının simetrik olması, çubukların pürüzsüz olması ve tüm yapının vakumda olması gerekmektedir. Kurulması ve çalıştırılması çok zor olan bu sistem şu anda dünyada 4 ya da 5 metroloji enstitüsünde bulunmaktadır. Şu anda güncel teknolojik imkânlar ile yeni bir hesaplanabilir kapasitör yapma çalışmaları sürmektedir.



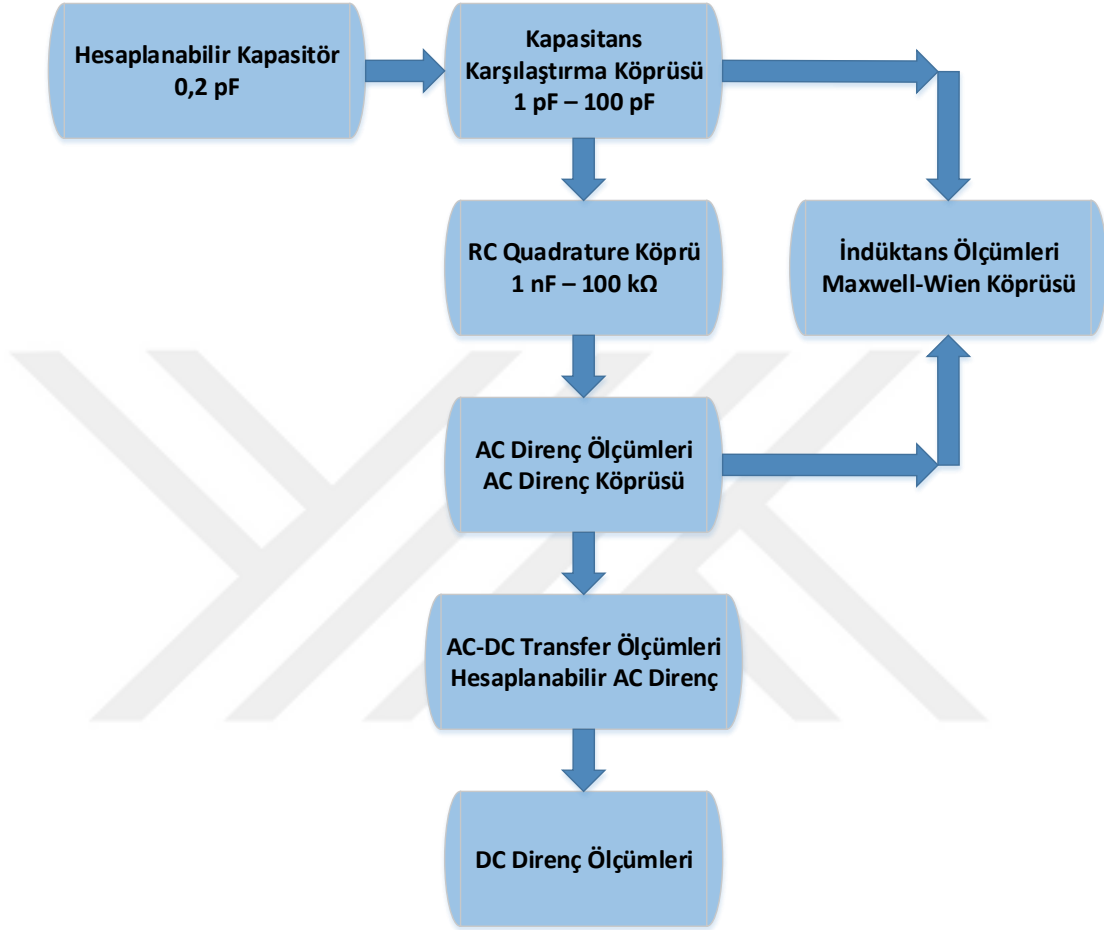
Şekil 4.8. Hesaplanabilir kapasitörün çalışması

Hesaplanabilir kapasitörde kapasitans değeri ortadaki toprak elektrodunun hareket ettirilmesi ile değiştirilir. Toprak elektrotları arasındaki mesafe kapasitans değerini belirler. Hesaplanabilir kapasitörde elde edilen kararlı kapasitans değeri 0,2 pF değerindedir.

Hesaplanabilir kapasitör, 1990 yılında Kuantum Hall direnci uluslararası direnç standardı olarak kabul görene dek direnç ve indüktans birimlerine izlenebilirliğini sağlamıştır. 1980 yılında Kuantum Hall etkisi keşfedilmiş ve yapılan çalışmalar ile Kuantum Hall DC direnç standardı oluşturulmuştur. 1990 yılından bu yana Kuantum Hall standardı DC direnç biriminin birinci seviye standardı olarak kullanılmaktadır [17]. Aynı zamanda kapasitans ve indüktans birimlerinin izlenebilirliği de Kuantum Hall standardından sağlanmaktadır.

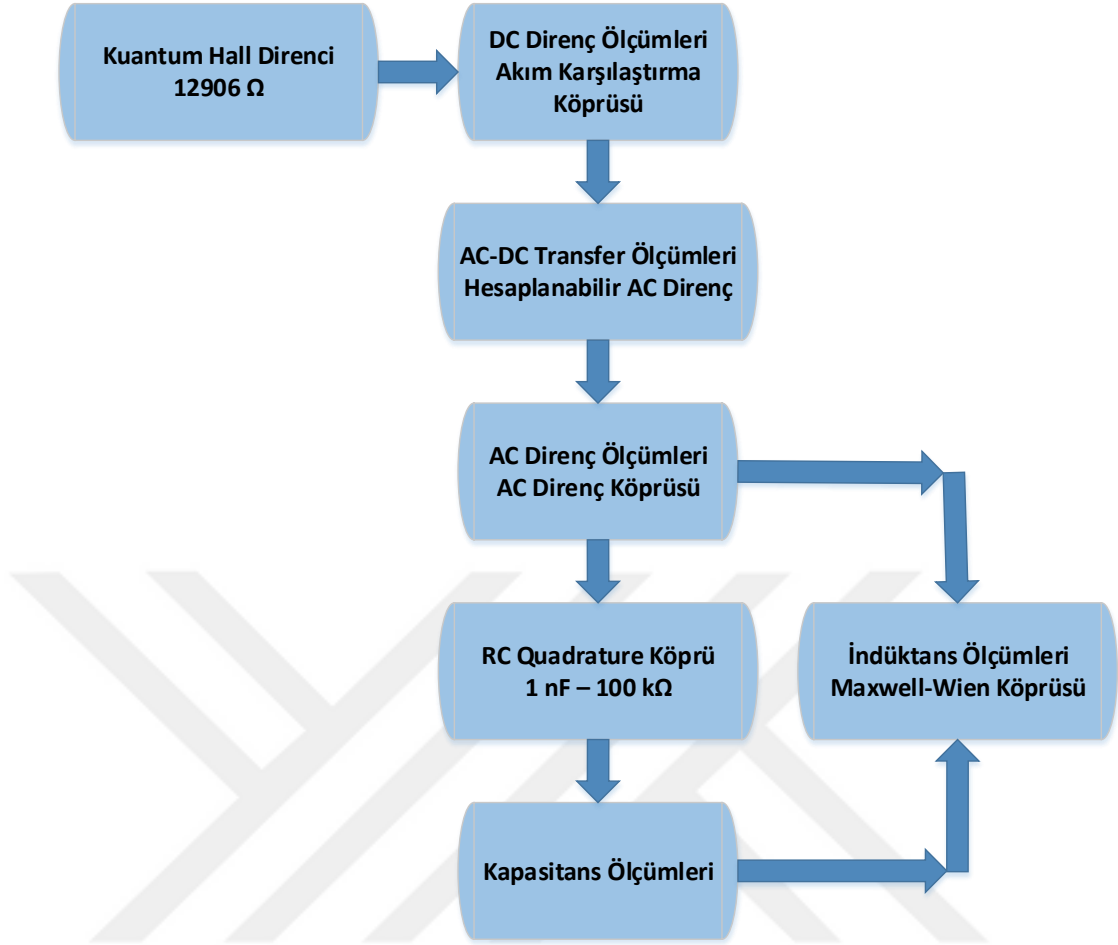
Günümüzde yaygın olarak kullanılan standart, Kuantum Hall standardı olmakla birlikte direnç, kapasitans ve indüktans birimlerinin izlenebilirliği hem Kuantum Hall standardı hem de hesaplanabilir Kapasitör kullanılarak elde edilmektedir.

Bir birimden başka bir birimi elde etme süreci izlenebilirlik zinciri olarak tanımlanır. Kapasitans birimi ile DC direnç arasındaki izlenebilirlik zinciri Şekil 4.9.'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Hesaplanabilir Kapasitör ile DC direnç arasındaki izlenebilirlik zinciri

Kuantum Hall DC direnç standardının icat edilmesine kadar kullanılan tek izlenebilir zinciri Şekil 4.9.'da görüldüğü gibiydi. Günümüzde halen bu izlenebilirlik zincirini kullanan metroloji enstitüleri vardır. Kuantum Hall DC direnç standardının kullanıldığı izlenebilirlik zinciri ise Şekil 4.10.'da görüldüğü gibidir.

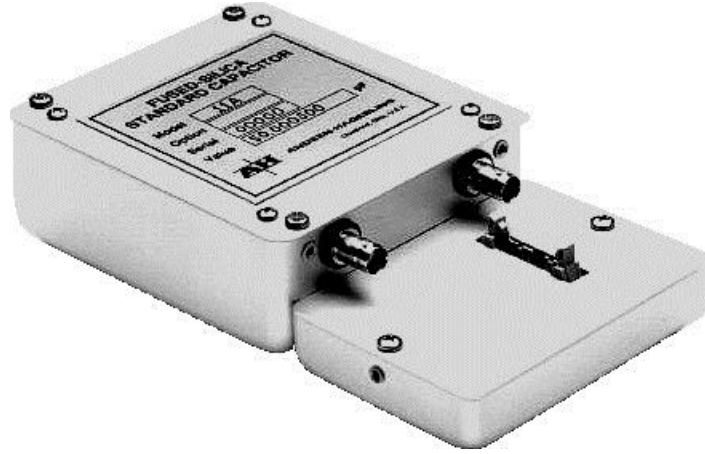


Şekil 4.10. Kuantum Hall direnci ile kapasitans arasındaki izlenebilirlik zinciri

4.3. Kapasitans Standartları

4.3.1. Fused-silika dielektrikli kapasitans standartları

Metroloji enstitüleri ve kalibrasyon laboratuvarlarında çeşitli tipte kapasitans standartları kullanılmaktadır. Bu standartlar performanslarına ve ihtiyaç duyulan ölçüm belirsizliklerine göre referans standartlar, transfer standartları ve çalışma standartları olarak kullanılırlar. Performansları ve kullanım amaçları kullanılan malzemeye ve terminal sayılarına göre farklılık gösterir.



Şekil 4.11. Fused-silica kapasitans standardı

Dünyadaki metroloji enstitülerinde sıklıkla kullanılan en kararlı standart kapasitörler, izolasyon malzemesi olarak Fused-Silica tipi malzeme kullanılan sıcaklık kontrollü standartlardır. Şekil 4.11.'de bir Fused-Silica kapasitans standardı görülmektedir.

Hesaplanabilir kapasitörden elde edilen kapasitans değerini aktarmak için kullanılan standartların uzun dönem kararlılıklarının çok iyi olması gerekir. Bunun yanında sıcaklık duyarlılıklarının az olması ve kararlılıklarının yüksek olması gereklidir. Dünyada bu amaçla kullanılan Fused-Silica dielektrikli kapasitans standartlarının yıllık kararlılıkları 0,3 ppm/yıl'dan düşüktür.

Fakat sıcaklık katsayıları 12 ppm/°C gibi bir standart için iyi sayılmayacak bir değerdir. Bu nedenle Fused-Silica tipi kapasitans standartları sıcaklık kontrollü ortamlarda tutulurlar. Bu kapasitörler ya sıcaklık kontrollü yağ banyolarında ya da Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi sıcaklık kontrollü bir yapı içerisinde muhafaza edilirler. Bu durumdaki sıcaklık katsayıları 0,01 ppm/°C'dan düşüktür.



Şekil 4.12. Sıcaklık kontrollü bir yapı içerisindeki 4 adet Fused-Silica standart

4.3.2. Hava dielektrikli kapasitans standartları

Fused-Silica kapasitans standartları 0,1 pF – 115 pF aralığında üretilebilmektedirler. Bu nedenle 100 pF değerinin üzerinde başka tip standartlar kullanılmaktadır. Bu amaçla 10 pF – 1000 pF aralığında üretilen azot tipi kapasitans standartları bulunmaktadır. İsminden de anlaşılacağı gibi bu tip standartlar içerisinde dielektrik malzeme olarak azot kullanılmaktadır. Azot gazının sızdırmazlığı da sağlanmıştır. Bu tip standartların başlıcası General Radio firmasının GR1404 tipi standardıdır (Şekil 4.13.). Hemen hemen tüm metroloji enstitüsü laboratuvarlarında bulunurlar.



Şekil 4.13. Azot tipi kapasitans standardı

Fused-Silica tipi standartlar referans standart olarak kullanılırken bu tip standartlar çalışma standardı olarak kullanılırlar. Fakat 1000 pF değerinde Fused-Silica standart bulunmadığından azot tipi standartlar referans standart olarak kullanılmaktadırlar. Uzun dönem kararlılıkları 20 ppm/yıl'dan daha iyidir. Bunun yanında sıcaklık katsayıları 4 ppm/°C'den daha iyidir. Fakat dielektrik malzeme olarak gaz kullanıldığından mekanik titreşimlere karşı duyarlılığı Fused-Silica tipi standartlara göre yüksektir.

4.3.3. Mika dielektrikli kapasitans standartları

Azot tipi standartlar da 1000 pF değerinin üzerinde üretilmediğinden 10 nF – 1 µF arasındaki değerlerde mika dielektrik malzeme kullanılan kapasitans standartları kullanılır. Şekil 4.14.'de bu tip standartlara bir örnek görülmektedir.



Şekil 4.14. Mika tipi kapasitans standardı

Bu kapasitörün bağlantılarının koaksiyel olmadığı görülmektedir. Genellikle 10 nF ve üzerindeki kapasitans standartlarının çıkışları bu şekilde görüldüğü gibi üretilmektedir.

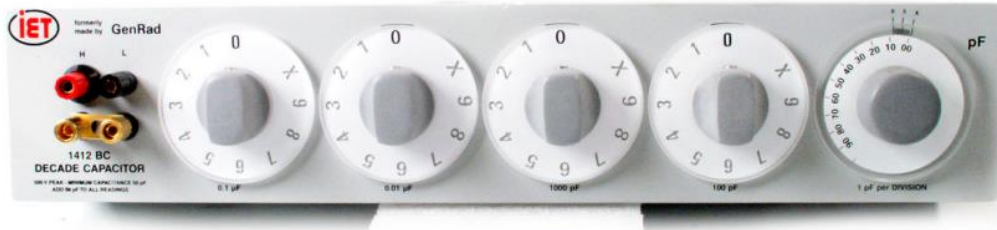
4.3.4. Dekat kapasitans standartları

Laboratuvarlarda standart olarak kullanılan bu tür kapasitörlerin yanında çalışma standardı olarak da kullanılabilen dekat kapasitörler de mevcuttur. Bu kapasitörler de doğruluklarına göre değişiklikler göstermektedir.



Şekil 4.15. Dekat Kapasitör

Şekil 4.15.'de koaksiyel çıkışlı 6 dekatlik bir dekat kapasitör görülmektedir. 1pF çözünürlüğe sahiptir. Dekat kapasitörler arasında en yüksek doğruluğa sahip modeldir. Bu nedenle koaksiyel çıkışlı olarak üretilmiştir. Düşük değerlerde hava tipi kapasitörler yüksek değerlerde ise mika kapasitörler kullanılmıştır. Daha düşük doğruluğa sahip başka bir dekat kapasitör Şekil 4.16.'da görülmektedir. Bu kapasitörün bağlantı terminalleri ise banana konektör şeklindedir.



Şekil 4.16. Banana çıkışlı dekat kapasitör

Çıkış terminallerinin banana olması kapasitörün doğruluğu hakkında da bilgi verir.

4.3.5. Ayarlı kapasitans standartları

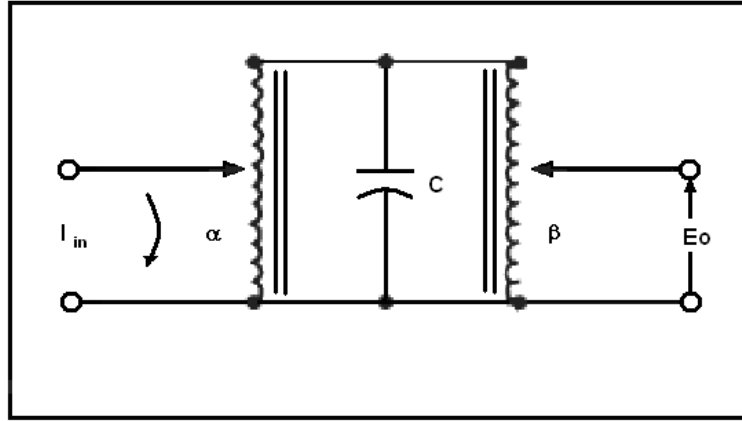
Dekat kapasitörlerin yanı sıra bir de değişken kapasitör yapıları vardır. Hava tipi olan bu kapasitörler çözünürlükleri ve kararlılıkları ile oldukça hassas kapasitörlerdir. Ayarlı kapasitör olmalarına rağmen kayıp faktörleri de 10^{-5} 'in altına inebilir.



Şekil 4.17. Ayarlı kapasitör

4.3.6. Transformatörlü kapasitans standartları

1 μF 'tan yüksek değerlerde 1 F'a kadar transformatörlü kapasitör yapısı kullanılır. Bu yapıda 1 μF değerinde referans bir kapasitör transformatör oranları yardımıyla büyütülür ve 1 F'a kadar kapasitans değeri elde edilmiş olur.



Şekil 4.18. Transformatörlü kapasitör yapısı

Şekil 4.18.'de görülen transformatörlü kapasitör yapısında ortada görülen bir adet 1 μF değerinde standart kapasitördür. Sağında ve solunda 2 adet indüktif gerilim bölücü bulunur. Bu bölücü oranları ayarlanarak elde edilmek istenen kapasitans değeri elde edilir. İstenen kapasitör değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edilir.

$$C_T = \frac{C}{\alpha \cdot \beta} \quad (4.7)$$

Bu yapı içerisinde kullanılan kapasitör yerine, istenen değerde başka kapasitörler de kullanılarak istenen kapasitans değerleri elde edilebilir. Ayrıca bu yapı iki adet indüktif gerilim bölücü ve bir standart kapasitörle de kurulabilir. Bu tür kapasitörler 1 kHz üzerinde kullanılamazlar ve kararlılıkları çok iyi değildir. RLC metrelerin yüksek değerli kapasitans ölçüm performanslarının kontrolünde kullanılır.



Şekil 4.19. Transformatörlü kapasitör

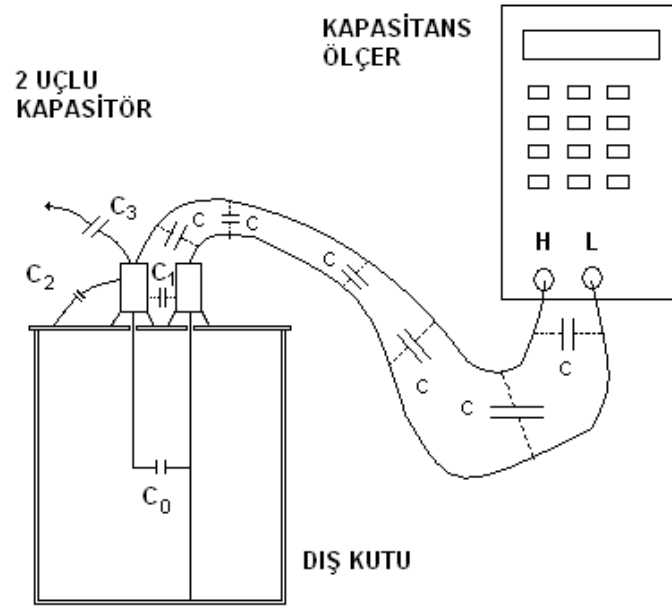
4.4. Kapasitans Ölçüm Yöntemleri

Ölçülmek istenen kapasitans büyüklüğü, ölçüm hassasiyeti, ölçme frekansı gibi değişkenlere göre doğru kapasitans ölçümü yapabilmek için çeşitli ölçme yöntemleri geliştirilmiştir. Kullanıcı da ihtiyacı olduğu ölçüm belirsizliklerine göre anlatılacak olan yöntemler içerisinde uygun bir ölçüm yöntemi belirlemelidir.

4.4.1. İki uçlu kapasitans ölçümü

Ölçüm cihazından gelen ekransız iki kablo ile yapılan kapasitans ölçümüdür. 2 uçlu kapasitans ölçümü, doğruluğu en düşük kapasitans ölçümüdür. 0 – 1000 pF aralığındaki kapasitörlerin düşük doğruluklu ölçümleri ile 1 μ F ve üzeri kapasitörlerin yüksek doğruluklu ölçümleri bu yöntemle gerçekleştirilebilir.

2 uçlu ölçümde gerek ölçüm kablolarından gerekse ölçümü yapılan kapasitörden gelen birçok istenmeyen kapasitans ölçüm sonucunu etkiler. Basit bir el multimetresi ile 2 uçlu bir kapasitans ölçümünü ele alalım. Bu ölçümde oluşacak kapasitanslar yaklaşık olarak Şekil 4.20.'deki gibidir.



Şekil 4.20. 2 Uçlu kapasitans ölçümünde ortaya çıkan kapasitanslar

Şekil 4.20.'de görüldüğü gibi 2 uçlu ölçümde, değeri ölçülmek istenen C_0 kapasitansına ek olarak birçok kapasitans ölçüm devresini etkiler. Bu da doğru ölçüm alınmasını engeller. Söz gelimi 100 pF değerinde bir kapasitör ölçümü gerçekleştirilmek istensin. Bu durumda ortaya çıkabilecek kapasitans büyüklükleri aşağı yukarı şu şekilde olacaktır:

C_0 : (Ölçülecek kapasitans değeri): 100 pF

C_1 : (Kapasitörün uçları arasındaki kapasitans): 0,2 pF

C_2 : (Kapasitörün uçları ile dış kutusu arasındaki kapasitans): 1,3 pF

C_3 : (Kapasitör ile dış ortam nesnelere arasındaki kapasitans): 0,02 pF

C : (Ölçüm kabloları arasındaki kapasitans): 0,5 pF

Bu değerler göz önüne alınırsa 100 pF değerindeki bu kapasitörü ölçerken, eğer ölçüm cihazı hatasız okuyorsa, ölçüm cihazında okunan değer yaklaşık olarak 102 pF olacaktır. Ortaya çıkan doğruluk hatası % 2'dir.

Eğer kullanıcının ihtiyaç duyduğu ölçüm doğruluğu % 2 veya daha yüksek ise bu ölçüm kullanıcı için uygun ve yeterli bir ölçüm sayılabilir.

4.4.1.1. İki uçlu ölçüm yönteminin avantaj ve dezavantajları

Yapılan hesaptan da görülebileceği gibi bu yöntem kapasitans değeri düştükçe ölçüm hatasının payı artacağından 0-1000 pF aralığındaki kapasitans değerlerinin ölçümü için çok uygun bir yöntem değildir. Fakat bu tamamen kullanıcının ihtiyacıyla ilgilidir. Örneğin bu yöntemle 1000 pF değerinde bir kapasitörü % 0,2 hata ile ölçebilmek mümkündür. Kullanıcı için bu hata yeterli görülebilir. Yeterli görülmediği takdirde diğer yöntemler kullanılmalıdır.

Bu yöntemin önemli dezavantajlarından bir diğeri de ölçülmek istenen kapasitans dışında ortaya çıkan kapasitans değerlerinin değişken olabilmesidir. Kabloların konumlarının değişmesi (birbirlerine yaklaştırılması veya uzaklaştırılması) kapasitans değerini etkilediği gibi ölçüm esnasında etrafta bulunan cihazlar da ölçüm sonucunu etkilerler. Çünkü elektrik alan kaynaklarından gelen elektrik alanın geçişini önleyen bir kalkan (ekran) yoktur. Bu durum ölçüm doğruluğunu etkilediği gibi ölçüm kararlılığını da kötü bir şekilde etkiler.

Bu tür ölçüm yapan cihazlar genelde ucuz ve karmaşık olmayan cihazlardır. Eğer kullanıcı çok hassas ölçüm almayacaksa (yukarıda bahsedilen hata miktarı yeterli ise) ölçümler hızlı bir biçimde alınabilir.

Yüksek değerli kapasitörlerin düşük frekans (1 kHz'e kadar) ölçümünde ise 2 uçlu kapasitans ölçüm yöntemi kullanılır. Örneğin 1 μF değerinde bir kapasitans aynı sistemle ölçülse kablolar ve diğer dış etkenlerden kaynaklanan hata $2 \text{ pF} / 1 \mu\text{F} = 2 \text{ ppm}$ olacaktır. Bu hata kabul edilebilir seviyede bir hatadır.

4.4.1.2. İki uçlu ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gereken hususlar

İki uçlu ölçümde ölçüm doğruluğunu arttırmak için özellikle dikkat edilmesi gerekenler şu şekilde özetlenebilir.

Cihazın kısa devre ve açık devre testleri (varsa) gerçekleştirilmelidir.

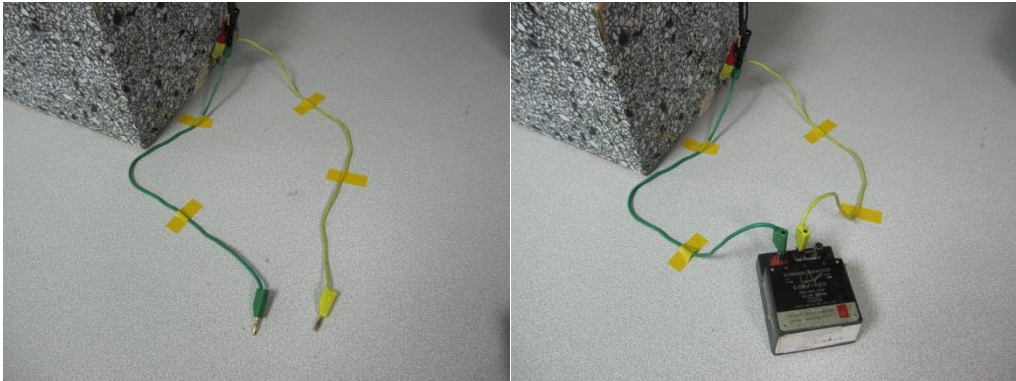


a) Kısa devre testi

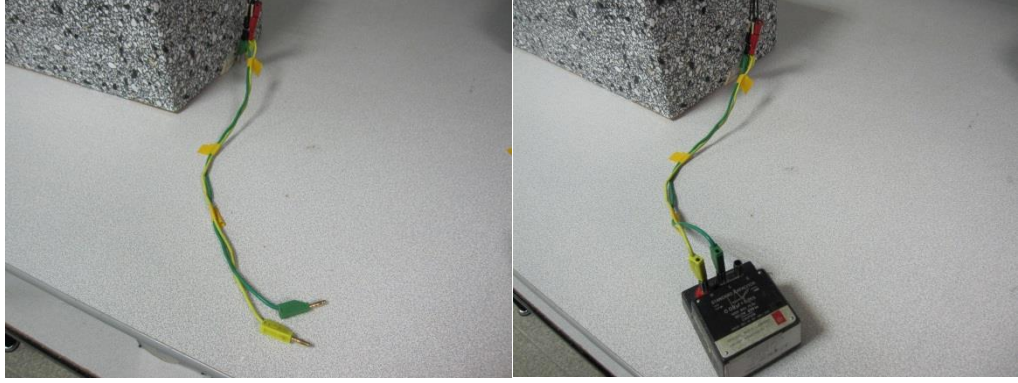
b) Açık devre testi

Şekil 4.21. Açık devre kısa devre testleri

Kısa ve açık devre testleri esnasında kabloların 30 cm yakınında başka bir cihaz ya da metal cisim bulundurulmamalıdır. (Şekil 4.21.)



Şekil 4.22. Kabloları birbirinden uzak sabitleme



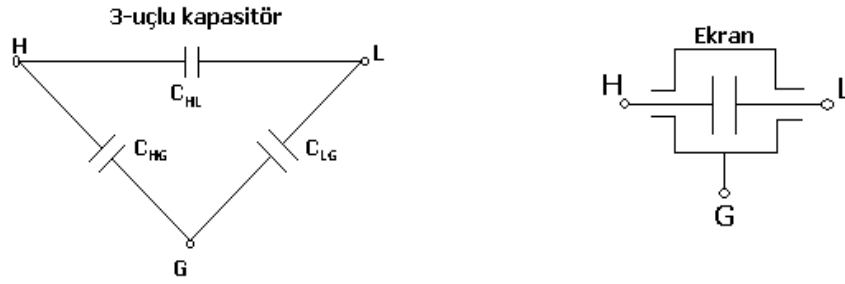
Şekil 4.23. Kabloları birbirine yakın sabitleme

Ölçüm esnasında kabloların, kısa ve açık devre testleri yapıldığı konumda olmaları gereklidir, bu nedenle kablolar sabitlenmelidir. Kısa devre ve açık devre testi ölçüm yapılacak frekansta yapılmalı farklı bir frekansta ölçüm alınacaksa o frekansta kısa devre ve açık devre testi tekrarlanmalıdır. Kısa devre ve açık devre testi yaptıktan sonra ölçüm cihazında okunan açık devre kapasitans değeri kaydedilmelidir. Ölçümü yapılacak kapasitör bağlandıktan sonra da 30 cm'den daha yakında başka bir metal ya da cihaz bulunmamalıdır. Alınan ölçüm sonucundan açık devre kapasitans değeri çıkarılarak ölçüm sonucu hesaplanmalıdır.

4.4.2. Üç uçlu kapasitans ölçümü

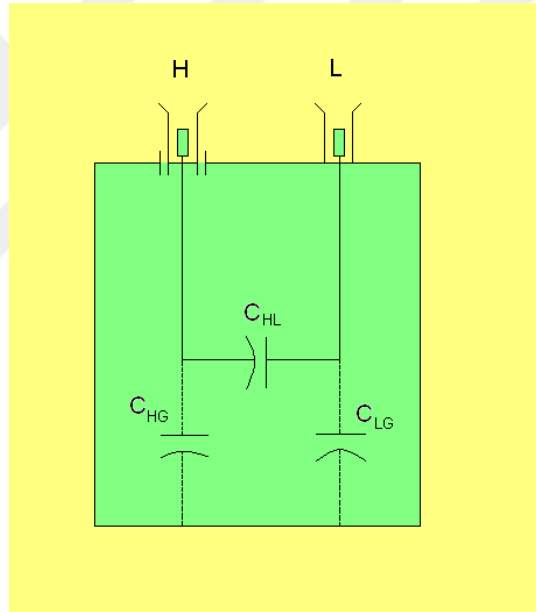
2 uçlu ölçüm yöntemi kapasitans ölçerken çevresel etkenlerin ölçüm üzerinde etkili olduğu bir yöntemdir. Bu etkilerin ölçülen kapasitans değerine bağlı olduğu, kapasitans değeri arttıkça hata etkisinin azaldığı bir önceki bölümde açıklanmıştır.

Çevresel kaynaklardan gelen elektrik alanın ölçmek istediğimiz kapasitans üzerinde etkili olmasının önüne geçebilmek için ölçümü yapılan kapasitörün Şekil 4.24.'deki gibi ekranlanması gereklidir. Kapasitörü ekranlayan bu yapı kapasitörün H ve L uçlarına bağlanmaz, ayrı bir uç olarak kullanılır ve G ucu olarak adlandırılır. Böylece kapasitör yapısı üç uçlu hale gelir.



Şekil 4.24. 3 Uçlu kapasitör gösterimi ve kapasitanslar

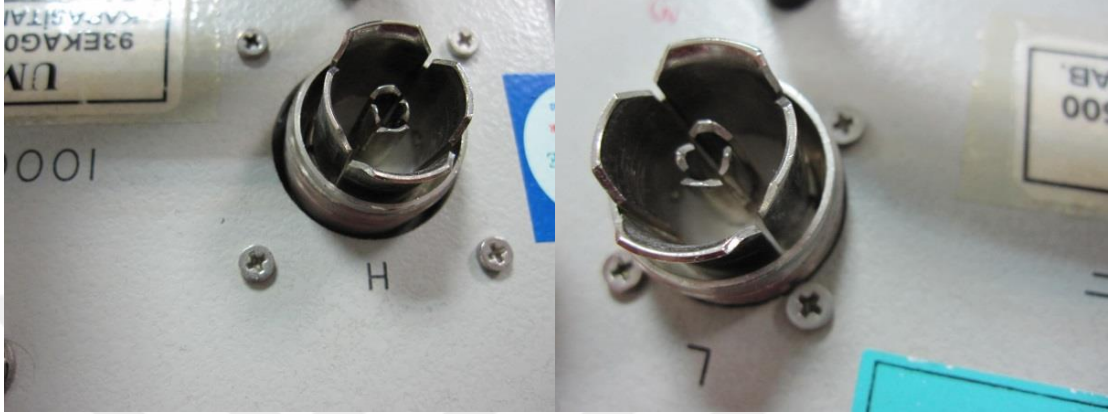
Burada ölçülmek istenen kapasitans C_{HL} 'dir. H ucu ile dış ekran (kutu) arasında oluşan kapasitans C_{HG} , L ucu ile dış ekran (kutu) arasında oluşan kapasitans C_{LG} 'dir



Şekil 4.25. 3 uçlu bir standart kapasitörde oluşan kapasitanslar

Bir 3 uçlu bir standart kapasitör içerisinde oluşan kapasitanslar Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'de görülmektedir. Bu yapı ile istenmeyen kapasitansların önüne tam olarak geçilmez ancak bu kapasitansların dış etkilerden etkilenmemesi sağlanır. Böylece doğru ölçme teknikleri kullanılarak yok edilmesinin önü açılmış olur. 3 uçlu kapasitans yapısında çevreden kaynaklanan elektrik alan kutu içerisinde herhangi bir etkide bulunmamaktadır. Böylece tüm istenmeyen kapasitanslar (yani elektrik alan) kutu içerisinde hapsedilmiş olur ve değeri değişmez.

Hassas kapasitans ölçüm cihazları C_{LG} ve C_{HG} kapasitanslarını yok edecek şekilde tasarlanmaktadır. 3 uçlu bağlantıda H ucuna gelen kablonun ekranı kapasitansın kutusuna bağlı değildir. Yalnız L ucuna gelen kablo kutuya bağlıdır.



Şekil 4.26. 3 Uçlu kapasitörde bağlantı şekli

Bu tasarım General Radio firmasının üretmiş olduğu kapasitans standartlarında kullanılmıştır. Günümüzde bu standartlar kullanıldığından bu bağlantı şekli de kullanılmaktadır. Ancak ekranın devam etmemesi manyetik ekranlama yapılmasını engellediğinden bu bağlantı yüksek kapasitans ve yüksek frekans değerlerinde kullanılmamaktadır.

4.4.2.1. Üç uçlu ölçüm yönteminin avantajları dezavantajları

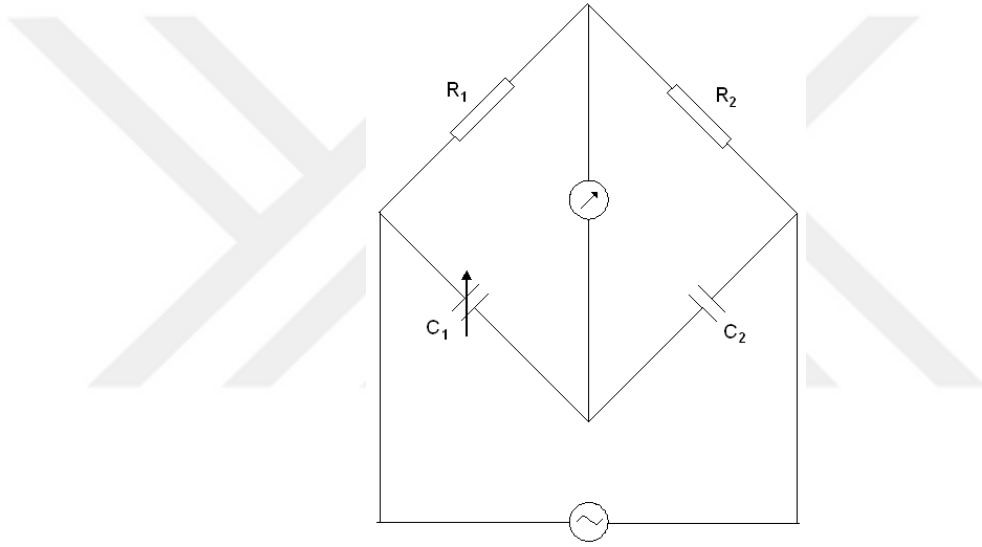
Elektriksel ekran süreklilik göstermediğinden manyetik ekranlama gerçekleşmemektedir. Bu durumda standardın çektiği akımın yükseldiği yüksek kapasitans ve yüksek frekans değerleri için bu yöntemin kullanılması uygun değildir.

Ancak 2 uçlu ölçümden farklı olarak çevreden gelen elektrik alan etkilerinin giderildiği bir yöntemdir. Bu yöntemde kapasitörün dışındaki metal kutu (ekran) sayesinde kapasitörün uçları ile ekran arasında oluşan kapasitanslar sabitlenmiştir. Ekranın dışında kalan bölgedeki elektrik alanın ekran içerisine nüfuz etmesi engellenmiştir. Fakat doğru ölçüm alabilmek için kapasitörün uçları ile ekran

arasındaki kapasitansların etkisinin de giderilmesi gereklidir. Bunun nedenini açıklamak için bazı kapasitans ölçüm sistemleri hakkında bilgi vermekte fayda vardır. En temel kapasitans ölçüm sistemi kapasitans karşılaştırma köprüsüdür.

4.4.2.2. Köprü tipi kapasitans ölçüm cihazları

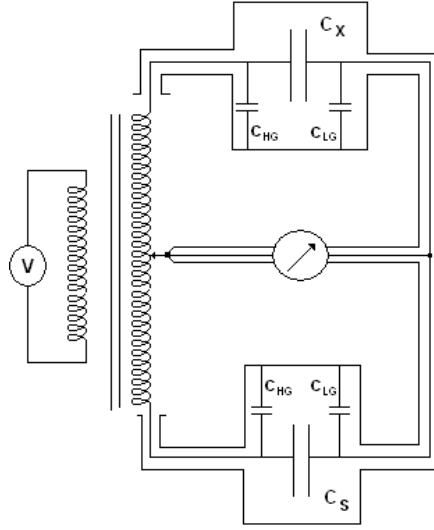
Karşılaştırma köprüsü tipi kapasitans ölçüm cihazları oldukça hassas cihazlardır. 1 ppm ve altında doğruluk ile karşılaştırma yapabilirler. Halbuki en hassas RLC metre 200 ppm civarında bir doğruluk hatası ile ölçüm gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 4.27. Kapasitans köprüsü

Yüksek doğruluğa sahip kapasitans ölçümlerinde Şekil 4.27.'deki gibi karşılaştırma prensibine dayanan kapasitans ölçme sistemleri kullanılmaktadır. Bu köprülerde

denge durumunda $\frac{R_1}{R_2} = \frac{C_1}{C_2}$ eşitliği geçerli olur.



Şekil 4.28. 3 uçlu kapasitans köprüsü

Günümüzde R_1 ve R_2 dirençleri yerine indüktif gerilim bölücüler kullanılır. Gerilim oranları kapasitans oranına eşit olduğunda köprü dengededir. Denge durumunda ortadaki dedektörden akım akmaz. Şekil 4.28.'deki gibi ekranlı bir köprüde C_{HG} kapasitansları gerilim bölücünün çıkışına paralel gelir. Gerilim bölücünün çıkış empedansı çok düşük olduğundan gerilim bölücünün değerini etkilemez. C_{LG} kapasitansları da dedektöre paralel gelir. Denge durumunda bu kol üzerinden akım akmayacağı için bu kapasitans değeri de ölçüm sonucu için önemsiz hale gelir. Bu şekilde C_{HG} ve C_{LG} kapasitanslarının ölçüm sonucuna etkisi ortadan kaldırılmış olur.

4.4.2.3. Üç uçlu ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gerekenler

Ölçülmesi istenen kapasitörlerin 3 uçlu ekranlı tanımına uygun olması gerekir. Ölçüm sonuçlarını karşılaştırırken ölçümlerin aynı bağlantı şeklinde alınmış olmasına dikkat edilmelidir.

Bu ölçüm yönteminde ekran sürekli olmadığından manyetik ekranlama yoktur. Bu da yüksek akım çeken düşük empedansların ölçüm doğruluğunu etkilemektedir. Düşük empedans değerleri yüksek kapasitans ölçümlerinde ya da yüksek frekans kapasitans ölçümlerinde karşımıza çıkmaktadır.

4.4.3. İki uçlu ekranlı kapasitans ölçümü

3 uçlu ölçüme göre çok küçük bir farkı vardır ve daha yaygın olarak kullanılan bağlantı şeklidir. 3 uçlu ölçüme göre farkı ekranın sürekli olmasıdır. Böylece hem H ucuna hem de L ucuna bağlanan kablo ekranları kutuya bağlanmaktadır. İngilizce literatürdeki ismi “2 terminal pair” olarak geçmektedir.



Şekil 4.29. 2 uç ekranlı bağlantı şekli

Bu bağlantı şekli ile ölçüm sisteminde ekran kesintisiz olarak devam etmektedir. Bunun sonucu olarak 2 uçlu ekranlı yöntemde çevresel elektrik alan etkisi ile beraber çevresel manyetik alan etkisi de yok edilmiştir. Ölçüm sistemi ile kapasitör arasındaki ekran kesintisiz olarak devam ettiğinden canlı uçtan gelen akımın ekran üzerinden geri dönmesi sağlanır. Bu akımlar birbirine eşit olduğunda, aynı zamanda ters yönde olduklarından, üretilen net manyetik alan sıfır olacaktır. Burada karşılıklılık ilkesi devreye girer: “Eğer bir sistemin içerisindeki akımlar sistem dışında net bir manyetik alan üretmiyorsa, sistemin dışında üretilen manyetik alanlar da sistemin içerisindeki akımlara etki etmezler”. Bu nedenle 2 uçlu ve ekranlı ölçüm sistemleri hem doğruluğu hem de kararlılığı yüksek sistemler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu köprüler kullanılarak 10^{-8} seviyesinde doğruluğa sahip ölçüm kapasitans ölçüm sistemleri üretilebilir. Bu yöntem kullanılarak ticari olarak üretilip satılan en iyi ölçüm sistemi belirsizliği $3 \cdot 10^{-6}$ seviyesindedir.

4.4.3.1. İki uçlu ekranlı ölçüm yönteminin avantajları dezavantajları

2-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi daha çok yüksek değerli empedanslar için kullanılan bir yöntemdir. 2-uçlu bağlantı olması nedeniyle kablo empedanslarının ölçüm sonucuna etkisi vardır. Ancak düşük değerli kapasitans ölçümlerinde (1-1000 pF) empedans değerleri yüksek olduğundan kablo etkileri ihmal edilebilir. Ayrıca bu yöntemde ölçüm doğruluğu ve kararlılığı kabloların konumu ile ya da hareket etmesi ile değişmez.

Ölçüm frekansı yükseldikçe kapasitörlerin empedansı da düşer. Bu durumda 2-uçlu ekranlı ölçümde kablo empedansları ölçüm doğruluğunu olumsuz yönde etkilemeye başlar. Bu nedenle genellikle 100 kHz'e kadar olan ölçümlerde kullanılan bu yöntem yüksek frekans kapasitans ölçümlerine uygun değildir. Bunun için bir sonraki bölümde anlatılan 4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi kullanılır.

2-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi komponent türü kapasitörlerin ekranı olmadığından bu kapasitörlerin ölçümüne uygun değildir. Daha çok standart kapasitörleri ölçmek için üretilmiş cihazlar olduğundan ölçüm cihazlarının çok ucuz olmaması da başka bir dezavantaj olarak görülebilir.

4.4.3.2. İki uçlu ekranlı ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gerekenler

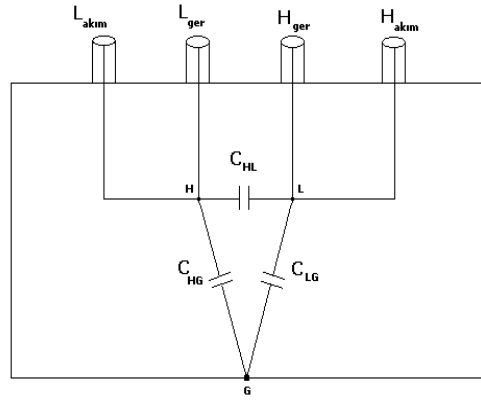
Ölçümü yapılacak olan kapasitörün 2 uçlu ekranlı tanımına uygun olması gereklidir. Aksi halde doğru ölçüm alınmaz. Kapasitörün metal bir dış kutusu olmalı hem H hem de L ucuna gelen ekranlı kablonun ekranı bu metal kutuyla birleşmelidir. H ve L uçlarının metal kutuya temas etmemesine de dikkat edilmelidir.

4.4.4. Dört-uçlu ekranlı ölçüm

İngilizce literatürdeki ismi “4 terminal pair” olarak geçen bu ölçüm yöntemi düşük frekans ölçümlerine ek olarak 100 kHz üzeri frekanslarda da yüksek doğruluğa sahip kapasitans ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. DC direnç ölçümlerinde 4-uçlu ölçüm düşük değerli dirençlerin daha iyi doğrulukla ölçülmesi için kullanılır. Bu yöntemin kapasitans ölçümlerinde kullanılma mantığı da aynıdır. Çünkü bir kapasitansın empedansı:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (4.8)$$

olarak verilmektedir. Bu eşitlikte görüldüğü gibi frekans değeri yükseldikçe kapasitörün empedans değeri düşer. Bu durumda kullanılan kabloların empedansı ölçüm sonucunu doğrudan etkileyecek bu nedenle 2-uçlu ekranlı ölçüm yönteminin ölçüm hatası artacaktır.



Şekil 4.30. 4 Uçlu ekranlı bağlantı şekli

Düşük değerli empedansların ölçümünde kablo empedansının dışında ortaya çıkan bir sorun daha vardır. Empedans değeri düştükçe ölçüm devresinin kapasitansa uyguladığı akım miktarı artar. Bu durum akım kollarında akan akımın gerilim kollarında akım indüklemesine neden olur. Fakat 4 uçlu ekranlı ölçüm yönteminde canlı uçtan geçen akım, ekran üzerinden geri akar. Bu durumda oluşan net manyetik alan sıfırlanmış olur, böylelikle akım kolları üzerinde akım indüklenmesinin önüne

geçilmiş olur. Bunun sonucu olarak 4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi en geniş empedans aralığında ölçüm alınmasını sağlar.



Şekil 4.31. 4 uçlu ekranlı bir ölçüm cihazı



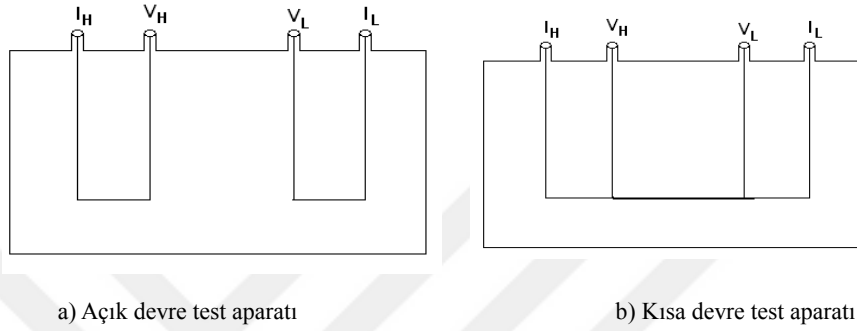
Şekil 4.32. 4 uçlu ekranlı bir kapasitör

4.4.4.1. Dört-uçlu ekranlı ölçüm yönteminin avantajları dezavantajları

4-uçlu ekranlı ölçüm yöntemi çok geniş bir empedans aralığında doğru ölçüm almak için uygun bir yöntemdir. Fakat kapasitörlerin 50 Hz ile 10-20 kHz frekansına kadarki ölçümlerinde kullanılan en hassas ölçüm cihazları 2-uçlu ekranlı ölçüm cihazlarıdır. Çünkü bu frekans değerlerinde 0-1000 pF aralığındaki kapasitörlerin empedans değerleri 2-uçlu ekranlı ölçüme daha uygundur. Manyetik alan ve elektrik alana karşı bağımsız ölçüm sistemleridir.

4.4.4.2. Dört-uçlu ekranlı ölçüm yönteminde dikkat edilmesi gerekenler

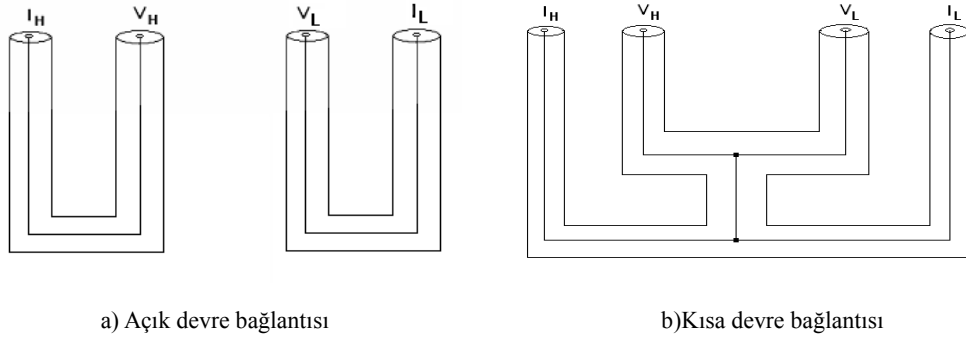
Açık devre ve kapalı devre testlerinin gerçekleştirilmesi önemlidir. Bu testlerin her bir frekans için ayrı ayrı gerçekleştirilmesi gereklidir. Bu cihazların açık devre ve kapalı devre testleri için uygun aparatların kullanılması gerekir.



Şekil 4.33. Açık devre ve kısa devre testleri için kullanılan aparatlar

Açık devre ve kısa devre testlerinin ölçümün gerçekleştiği şartlarla aynı olması çok önemlidir. Aynı şekilde, ölçümü yapılacak olan kapasitörün de 4 uçlu ekranlı ölçüm yöntemine uygun şekilde yapılmış ve bağlanmış olması önemlidir. Bu bağlamda kapasitörün metal bir dış kutusunun olması, tüm konektörlerinin koaksiyel olması ve tüm koaksiyel konektörlerinin ekranlarının kapasitörün dış kutusuna bağlı olması gereklidir.

Eğer Şekil 4.33.'deki gibi bağlantı aparatları yoksa kabloların ucunda kısa devre ve açık devre yaparak da bu testler yapılabilir.



Şekil 4.34. Ölçüm kablosu ile açık devre ve kısa devre test bağlantısı

Açık devre bağlantısında H ekranları ile L ekranlarının birleştirilmesine özellikle dikkat edilmelidir.

4.5. Kapasitörlerin Özellikleri

Elektrik devrelerdeki ihtiyaçları karşılamak için çok çeşitli kapasitörler üretilmektedir. Seramikten yapılmış kapasitörler düşük seri indüktansa sahip olduklarından dolayı yüksek frekans uygulamaları için uygundur. Seramik malzemeden yapılmış kapasitanslar (NPO) oldukça kararlıdır. Sıcaklık katsayıları ($10 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) ve kayıp faktörleri de (<0.0001) oldukça düşüktür. Bu standartlar uygun şekilde ekranlandığı zaman standart kapasitör olarak da kullanılabilir. Ancak yüksek değerlerde üretilmezler.

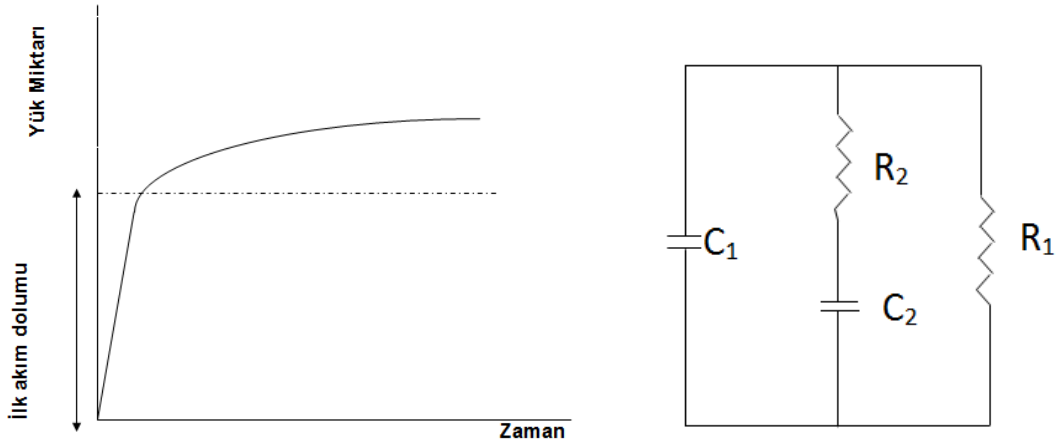
Plastik film kapasitörler hemen hemen kâğıt tipi kapasitörlerin yerini almıştır. Çeşitli polimerler (polistren, polipropilen, polietilen sülfid, PTFE v.b.) kullanılarak çok farklı özellikte kapasitörler yapılabilmektedir. Polistren'den yapılmış kapasitörler ticari uygulamalar için uygun olup kararlılığı iyidir.

Elektrolitik kapasitörler alüminyum ve tantal üzerine ince okside film kaplanarak yapılmaktadırlar ve küçük boyutlarda yüksek değerli kapasitans değeri elde edilebilmektedir. Tantal kapasitörler amorf yapıya sahiptir ve yüksek frekans

performansları oldukça iyidir fakat yüksek akıma dayanımları düşüktür. Bütün elektrolitik kapasitörlerin kayda değer ölçüde kaçak akımları vardır (1 mA).

Vakumlanmış veya hava dielektrikli kapasitörler düşük değerlere sahiptir. Kararlılıklarının iyi olması (yaklaşık 10 $\mu\text{F}/\text{F}/\text{yıl}$) nedeni ile üst 1000 pF altındaki değerlerde standart kapasitör olarak kullanılırlar.

Uygun tasarımlanmış vakum kapasitörler yüksek gerilim uygulamalarında kullanılmaktadır. İdealde kapasitans plakaları yüklendikten sonra plakalar arasında oluşan gerilimin azalmaması (boşalmaması) veya plakalar arasında bir akım akışı olmaması beklenir. Fakat pratikte kapasitans yapımında kullanılan dielektrik malzemelerden dolayı plakalar arasında bir sızıntı akımı akar. Kapasitör dolar fakat uzun bir periyotta sönümlenir. Bu etki dielektrik emilimi olarak adlandırılır. Her dielektrik malzemenin farklı derecede emilim özelliği vardır (Şekil 4.35.). Akım emiliminden sonra dielektriğin direncinin sonsuz olmamasından dolayı çok küçük bir akım izolasyon malzemesinin üzerinden akar. Eğer dolmuş kapasitör boşaltılmaya başlanırsa ve kısa bir süreliğine boşalma direnci kaldırılırsa kapasitör tekrar dolma eğilimi gösterir. Bir kapasitör Şekil 4.35. a'daki gibi modellenenir. Burada C_1 dielektriğin ideal olarak kabul edildiğinde oluşan kapasitör, R_1 ; paralel dielektrik direnci, seri R_2 ve C_2 ise dielektrik malzemenin emilim parametreleridir. Bu da pratikte hesaplanan emilim ve boşalım zamanıyla gerçekte oluşan emilim ve boşalım zamanlarının birbirinden farklı çıkmasına sebep olmaktadır. Bu etkiden dolayı düşük frekansta kapasitans ve kayıp faktörü yükselme gösterir.



a) Kapasitörün yük dolum grafiği

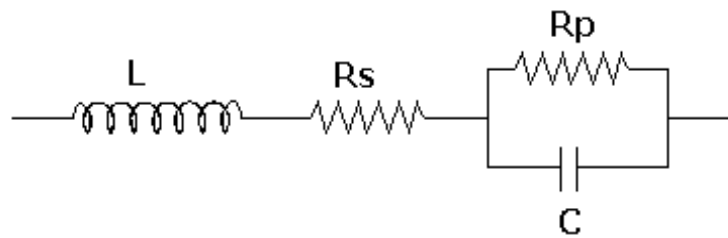
b) Yük boşalımı için Kapasitör eşdeğer devresi

Şekil 4.35. Kapasitörün özellikleri

Güç kaynaklarında ripple akımını yok etmek için kullanılan kapasitörlerin düşük seri dirençleri olmalıdır. Bu seri direncin değeri kapasitörün yapımına bağlı olarak değişir. Düşük gerilimlerde ve yüksek değerli kutuplu kapasitörlerde değeri 10 ile 50 mΩ arasında değişirken yüksek gerilim ve düşük değerli kapasitörlerde 100 ile 500 mΩ arasında değişir.

4.6. Kapasitansın Frekans Karakteristiği

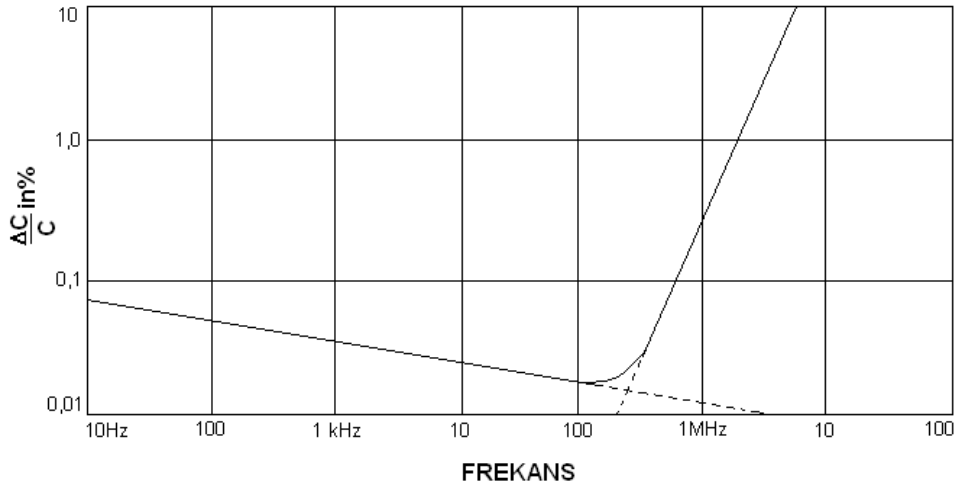
Kapasitör olarak adlandırılan elektriksel eleman yalnızca bir kapasitanstan oluşmamaktadır. Bunun dışında artık parametre olarak direnç ve indüktansı da vardır



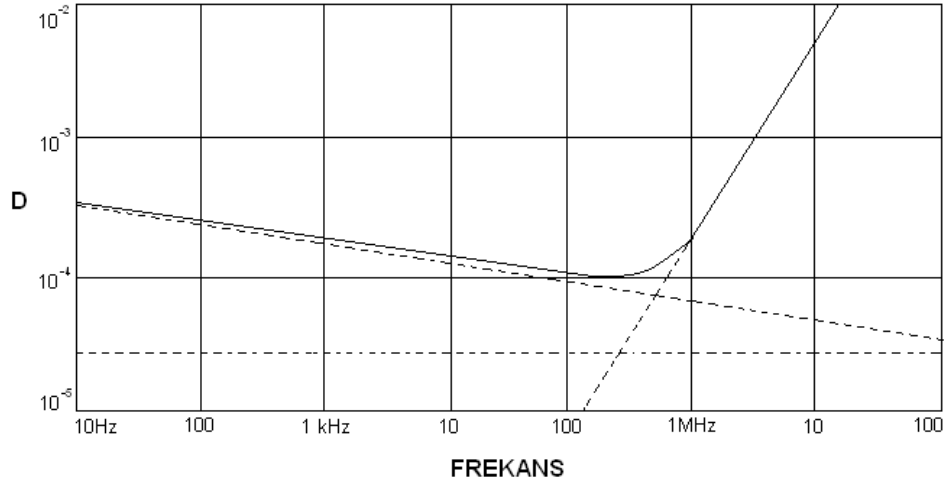
Şekil 4.36. Kapasitörün eşdeğer devresi ve empedans eşitliği

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2} + \frac{\omega L - \omega^2 R_p^2 C + \omega^2 R_p^2 L C^2}{1 + \omega^2 R_p^2 C^2} \quad (4.9)$$

Burada R_s plakaların ve bağlantı kablolarının direnci, L plaka ve bağlantı parçalarının indüktansı, R_p ise kapasitörün izolasyon malzemesinin direncidir. 1000 pF kapasitans standardında bu parametreler yaklaşık şu seviyelerde olur: $L=0.1 \mu\text{H}$, $R_s=0.1 \Omega$, $R_p= 10^{10} \Omega$. Bu artık parametreler nedeniyle frekans değiştiğinde kapasitörün empedansı doğrusal bir değişim göstermeyecek, düşük frekanslarda dielektrik malzemenin direnci R_p etkili olurken yüksek frekanslarda ise L etkili olacaktır. 1000 pF mika kapasitör için kapasitans değerinin frekansla değişimi aşağıdaki grafikte verilmiştir. Buna göre bir kapasitörün kapasitans değeri belli bir frekansa kadar doğrusal olarak azalırken bu frekanstan sonra da daha büyük bir hızla doğrusal olarak artmaktadır. Herhangi bir kapasitörün yalnızca kapasitanstan ibaret olmayıp artık direncinin de olması nedeniyle üzerine düşen işaretin tamamı aynı fazda olmayıp gerçel kısmı da direnç üzerine düşer.



Şekil 4.37. Kapasitansın frekans bağımlılığı



Şekil 4.38. Kayıp faktörünün frekans bağımlılığı

Herhangi bir kapasitör, eşdeğer devre ile ifade edilebilir ve D kayıp faktörü frekansa bağlı olarak kapasitans ve direnci ile tanımlanabilir.

Standart kapasitörlerde kayıp faktörünün çok düşük tutulmasına dikkat edilir. Metroloji laboratuvarlarında bulunan standart kapasitörlerin kayıp faktörleri 10^{-6} seviyesindedir. Bu kayıp faktörü değeri, uygulanan gerilimin ne kadarının izolasyon malzemesi tarafından iletildiğinin bir göstergesidir. Kapasitansın plakaları arasında bulunan dielektrik malzemenin direnci artarsa kayıp faktörü düşer. Kayıp faktörü düşük olan kapasitans standartlarının uzun dönem kararlılıkları da iyidir. Şekil 4.37. ve Şekil 4.38.'e bakıldığında kayıp faktörünün düşük frekanslarda değişimin az olduğu yüksek frekanslara çıkıldıkça da bu değer arttığı görülür.

BÖLÜM 5. S-PARAMETRE REZONANS YÖNTEMİ

Elektronik teknolojilerinde özellikle yüksek frekanstaki hızlı gelişmeden dolayı daha yüksek frekanslarda çalışan RLC Metre ve empedans ölçen cihazlar üretilmeye başlanmıştır. Bu nedenle de bu ölçüm cihazlarının yüksek frekanslardaki kalibrasyon ihtiyacı artarak devam etmektedir. Türkiye’de de endüstri ve Silahlı Kuvvetlerin daha yüksek frekansta ölçüm alan empedans ölçerleri kullanmaya başlaması ile TÜBİTAK UME’den bu cihazların yüksek frekanslarda kalibrasyonu için talepler gelmeye başlamıştır. 50 MHz’lere kadar bu cihazların kalibrasyonunda 4-terminal çift empedans standartları kullanılmaktadır. TÜBİTAK UME Empedans Laboratuvarı’nda HP 16380A tipi 4 terminal-çift kapasitörler empedans ölçüm cihazlarının kapasitans kısmının kalibrasyonunda kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntem ile 1 pF -1000 pF aralığındaki bu kapasitörlerin 30 MHz’e kadar kalibrasyonu hedeflenmiştir.

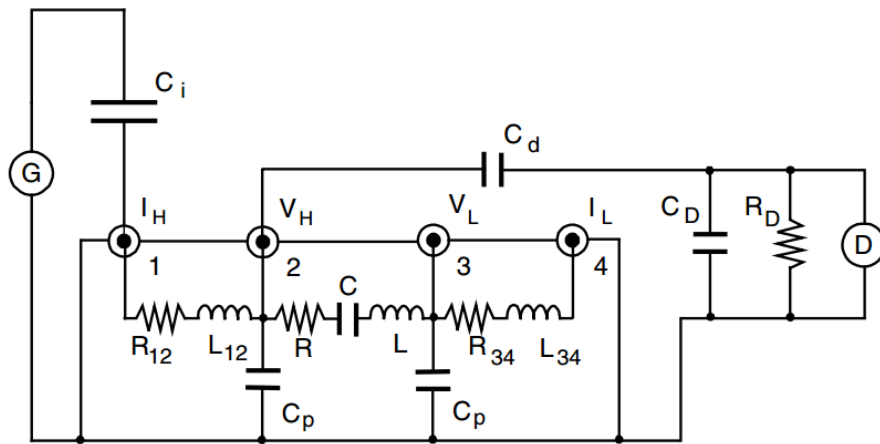
5.1. S-Parametre Rezonans Yönteminin Ortaya Çıkışı

TÜBİTAK UME Empedans Standartları Laboratuvarı’na yurt içi ve yurtdışı kurumlardan yüksek frekanslarda ölçüm yapabilen empedans ölçer cihazlarının kalibrasyonu konusunda 2005 yılında başlayıp takip eden yıllarda artarak devam eden talepler gelmeye başladı. Bu taleplere cevap verebilmek açısından ve Türkiye’deki kurum ve kuruluşların ihtiyaçlarını karşılayabilmek için laboratuvar bünyesinde bir çalışma başlatıldı.

Yüksek frekanslarda empedans ölçen cihazların kalibrasyonlarını uluslararası ölçüm standartlarına izlenebilir olarak sağlamak amacı ile başlatılan çalışmada amaç diğer metroloji enstitülerinde kullanılan mevcut yöntemlerden birini kullanarak yüksek frekansta ölçüm yapan cihazların kalibrasyonunda kullanılacak kapasitans standartlarının kalibrasyon aralığını yüksek frekanslara taşımaktır.

İlk aşamada yapılan Bölüm 1’de ayrıntılı olarak yazılan literatür çalışması sonucu hangi çalışmaların esas alınacağı belirlendi. Burada amaç yeni bir yöntem geliştirmek değil, acil olarak ülke ihtiyacını karşılamaktı. Bu amaçla üç çalışma temel alındı ve bu yöntemlerin nasıl uygulanabileceği konusunda çalışmalar yapıldı. Bu yöntemlerden birincisi: Awan tarafından geliştirilen yöntem [13], ikincisi Suzuki tarafından geliştirilen yöntem [10] ve üçüncüsü Callegaro tarafında geliştirilen yöntemdir [12].

Birinci yöntemde: klasik kapasitans ölçüm köprüleriyle çalışma aralığı 100 kHz’e kadar sınırlı iken son zamanlarda NPL’de yapılan çalışmalarla bu sınır 10 MHz’lere kadar çıkartılmıştır [11]. Fakat bu köprülerin tasarlanması ve yapılması zaman ve tecrübe gerektirmektedir. Bunun yanında frekans bağımlılığı belirlenmiş bir standarda ihtiyaç vardır. NPL bu referans problemini çözmek amacıyla 1000 pF değerindeki bir kapasitörün frekans bağımlılığını bulmak için Lock-in amplifier adı verilen dedektör kullanarak kapasitörün rezonans frekansını bulmaya dayanan bir yöntem geliştirmişlerdir [13]. Kullanılan ölçüm düzeneği Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Awan tarafından geliştirilen ölçüm yönteminin temel gösterimi

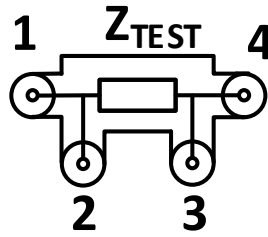
Rezonans frekansı kapasitörün indüktif artık parametresini bulmak için kullanılmıştır. Kapasitans standardının frekans bağımlılığı,

$$C = C_0 \cdot (1 + \omega^2 \cdot L \cdot C_0) \quad (5.1)$$

Burada C_0 kapasitörün düşük frekanstaki değeri, L kapasitörün indüktif artık parametresidir. Artık indüktans değeri rezonans frekansında aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır,

$$L = \frac{1}{\omega_r^2 \cdot C_0} \quad (5.2)$$

ω_r :açısal rezonans frekansıdır. Burada kullanılan model oldukça basittir. 1000 pF değeri için 1 MHz frekansına kadar doğru sonuç elde edilebilmektedir. Fakat daha düşük değerli kapasitans standartları için doğruluk azalmaktadır. Bunun yanında Lock-in Amplifier'ın frekansı 250 MHz ile sınırlı olduğundan 250 MHz'in üzerindeki rezonans frekanslarını bulmak için yetersiz bir yöntemdir. Bu nedenle rezonans frekansları yüksek olan 1 pF ve 10 pF kapasitörlerin rezonansları bu yöntemle bulunamaz. Bu nedenle bu yöntemin kullanılması uygun görülmemiştir.



Şekil 5.2. Dört terminal çift empedans gösterimi

İkinci ve üçüncü yöntem HP 16380A tipi hava dielektrikli kapasitörler için geliştirilmiştir. HP 16380A tipi hava dielektrikli 4 terminal çift (4TP) kapasitans standartları kalibrasyon laboratuvarlarında düşük sıcaklık ve frekans bağımlılıkları nedeni ile MHz seviyesindeki kalibrasyonlarında referans standart olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek frekanslarda hassas ve doğru ölçümler 4

TP terminal pair ölçüm tekniği ile gerçekleştirilmektedir. 4TP tanımlaması ilk olarak Cutkosky'nin 1964'deki çalışmasında yapılmıştır [7].

4TP netvörk şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Burada Şekil 5.2.'de verilen 1=I_H 2=V_H 3=V_L 4=I_L terminalleridir. 4TP tanımına göre $I_2 = 0$, $I_3 = 0$ ve $V_3 = 0$ koşulları gerekli şarttır. Bu şartın anlamı potansiyel ölçümü yapılan 2 ve 3 nolu terminallerden akım akmaması ve 3 nolu terminal ile 4 nolu terminalin eş potansiyelde olması gerekmektedir. Bu koşullar (Denklem 5.3)'de verilen matriste yerine konulduğunda Z_{4TP} aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Z_{4TP} \text{ [2]} = \frac{V_2}{I_4} \quad (5.4)$$

Burada ara işlemler yapıldığında 4 terminal çift ifadesini Cutkosky aşağıdaki gibi ifade etmiştir.

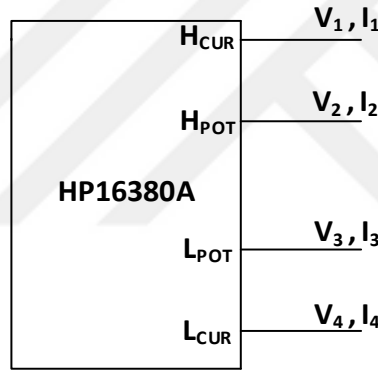
$$Z_{4TP} = \frac{Z_{24} \cdot Z_{31} - Z_{21} \cdot Z_{34}}{Z_{31}} \quad (5.5)$$

$$Y_{4TP} = \frac{Z_{31}}{Z_{24} \cdot Z_{31} - Z_{21} \cdot Z_{34}} \quad (5.6)$$

Suzuki ve Callegaro'nun yöntemleri temel olarak birbirinden farklı olmasına karşın ortak yönleri HP16380A tip kapasitans standart setinde bulunan kapasitans standartlarının değerini, bir mikrodalga ve yüksek frekans cihazı olan ve S parametre

ölçümlerinde kullanılan vektör netvörk analizör (VNA) cihazını kullanarak belirlemeye çalışmalarıdır. Suzuki VNA kullanarak yüksek frekans kapasitans standartlarının yüksek frekanslarda değerlerini önemli ölçüde etkileyen artık parametrelerini yüksek frekanslarda belirleyerek eğri uydurma yöntemleri ile ara frekanslardaki kapasitans değerlerini belirlemeye çalışmıştır. Callegaro ise VNA ölçümlerinden elde edilen S parametre ölçümlerini kullanarak empedans matrisini elde etmiş ve bu matrisi kullanarak Cutkosky tarafından geliştirilen [7] dört terminal çift empedans değerini hesaplamıştır.

Burada bahsedilen iki yöntemde denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Suzuki [10] tarafından geliştirilen yöntemde yüksek frekanslarda kapasitans değeri VNA ölçümleri kullanılarak elde edilmektedir.

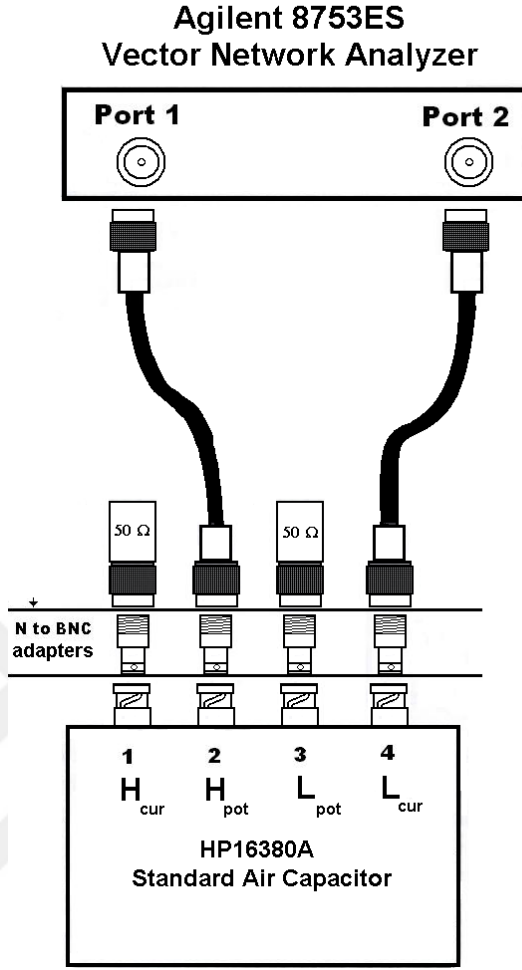


Şekil 5.3. Suzuki tarafından geliştirilen ölçüm yönteminin gösterimi

Suzuki kapasitörü kapalı bir kutu olarak düşünmüş ve Vektör Netvörk Analizör (VNA) ile kapasitörün her bir terminalinden 1 port ölçümler almıştır. 1 port yönteminde Z_{ij} doğrudan ölçülür. Z_{ii} ve Z_{iisj} ölçümlerinde ise; Z_{ii} için Port kapasitörün “i” ucuna bağlanıp diğer uçları açık bırakılır, Z_{iisj} ölçümünde port “i” ucuna bağlanıp “j” ucuna kısa devre aparatı takılır. Diğer terminaller açık bırakılır. Z_{4TP} aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$Z_{4TP} = \sqrt{\frac{Z_{22}}{Z_{11} - Z_{11s3}}} (\sqrt{(Z_{11} - Z_{11s2})(Z_{44} - Z_{44s3})} - \sqrt{(Z_{11} - Z_{11s3})(Z_{44} - Z_{44s2})}) \quad (5.7)$$

Bu yöntemde kullanılmayan terminaller açık devre veya kısa devre edilmektedir. Bu nedenle kullanılan konnektörler, bağlantı aparatları, açık devre kısa devre adaptörlerinden kaynaklanan hatalar oluşmaktadır. Bunun yanında 1 pF ve 10 pF kapasitörlerin ölçüm hassasiyeti de yeterli seviyede değildir. Bu yöntemde ölçümler 40 MHz - 200 MHz aralığında gerçekleştirilmektedir. Yine düşük frekanslardaki kapasitans değerleri ise düşük frekanslarda ölçüm yapabilen cihazlar sayesinde ölçülmektedir. Değerini hesaplamak istediğimiz düşük frekans ile yüksek frekans bölgesi arasındaki değerler ise eğri uydurma yöntemleri ile tespit edilmektedir. Ancak ölçüm izlenebilirliğinin sağlanabilmesi açısından belirsizlik hesaplarının Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [18] dokümanına göre hesaplanması gerekmektedir. Kapasitans değerlerini hesaplamak için ikinci dereceden polinomial eğri uydurma yöntemi ile elde edilen matematiksel fonksiyon kullanılmaktadır. Bu konuda incelenen Dietrich, C. F.'nin kitabında [19] ayrıntılı ve açıklayıcı örnekler olmasına rağmen istatistik bilimine olan uzaklık ve zaman darlığı nedeni ile belirsizlik hesaplama çalışmaları başarı ile neticelenememiştir. Yöntemle ilgili yukarıdaki dezavantajlardan ve belirsizlik hesabının zorluğundan dolayı yeni bir yöntem arayışına gidildi. Callegaro tarafında geliştirilen ve Şekil 5.4'de gösterilen yöntem [12], kolay ve uygulanabilir olduğu değerlendirilerek çalışmaların bu yönde devam etmesine karar verildi.



Şekil 5.4. Callegaro tarafından geliştirilen yöntemin ölçüm düzeneği

Suzuki'den sonra Luca Callegaro yine VNA kullanarak Z_{ij} değerlerini direk ölçebilecek bir yöntem kullanmıştır. Bu yöntemde S parametreler ile Z matrisi arasında aşağıdaki ilişki kullanılmıştır [20].

$$Z = Z_0 \cdot (U - S)^{-1} \cdot (U + S) \quad (5.8)$$

$$Z = Z_0 \cdot \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} \end{bmatrix} \right) \quad (5.9)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

VNA ile S_{ij} ölçümleri 2 port olarak alınmaktadır. Burada “i” ve “j” kapasitörün bağlandığı terminalleri göstermektedir. Bağlantı yapılmamış terminaller 50 Ω değerinde yük ile sonlandırılmaktadır. Burada Suzuki tarafından kullanılan Açık Devre ve Kısa Devre adaptörleri kullanılmadığı için bunlardan gelen hatalar yok edilmiştir. Bu yöntemde Callegaro 100 kHz – 150 MHz aralığında ölçümler almıştır. 1 kHz frekanslarında alınan ölçümler ve S parametre ölçümleri sonucu elde edilen ölçümler kullanılarak elde edilen sonuçlar polinomial eğri uydurma yöntemine uygulanır. Elde edilen eğri uydurma denklemi yardımı ile istenilen frekanstaki kapasitans değeri elde edilir. Bu yöntemde de VNA ölçüm doğruluğu önem taşımaktadır. VNA ile özellikle 100 MHz’in altındaki frekanslarda faz ölçümleri yüksek belirsizlikle yapılabilmektedir. Bu nedenle burada elde edilen 4 terminal çift kapasitans değeri yüksek belirsizlikle elde edilebilmektedir.

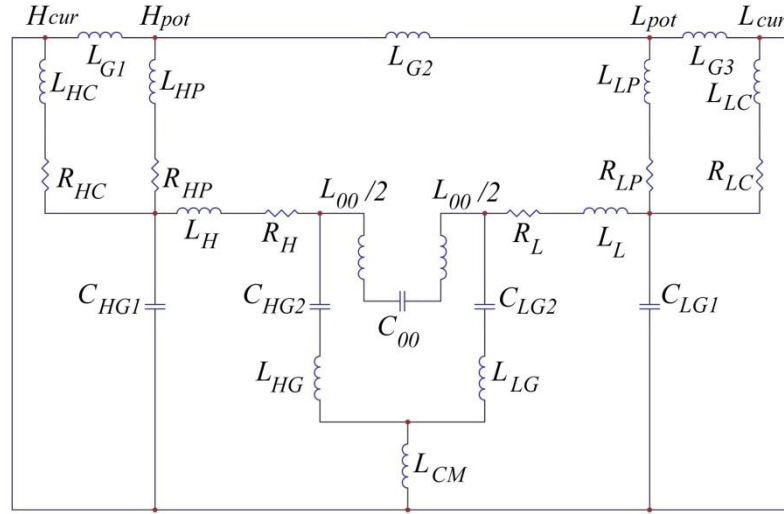
Yukarıda anlatılan üç yöntem denenerek uygulanabilirliği incelenmiştir. Birbirlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları olan yöntemlerin Yüksek frekans kapasitans izlenebilirliğinin sağlanması açısından daha iyi bir yöntem gerekliliği sonucuna varılmıştır. Bu aşamada incelenen yöntemlerin yayınlandığı makaleler daha derinlemesine incelenerek referans aldıkları makaleler üzerine ayrıntılı araştırmalar yapılmıştır. İncelenen makaleler arasında Yonekura ve Wakasugi tarafından yayınlanmış olan makale [9] çalışmayı başka bir sayfaya taşımıştır.

Awan çalışmasında basit bir model kullanarak HP16380A standardının 1000 pF için kapasitans değerini kısıtlı frekanslar için yapabiliyordu. Suzuki ve Callegaro ise doğrudan VNA ölçümlerini kullanarak elde ettikleri yüksek frekans değerleri ve ölçtükleri düşük frekans değerlerini kullanarak kapasitans değerlerini hesaplayabiliyorlardı. Üç yöntemde tüm 1pF, 10 pF, 100 pF ve 1000 pF’den oluşan

HP16380A kapasitans setinin tüm kapasitörlerine uygulanamıyor ve uygunabildikleri değerler için kısıtlı frekanslarda ölçüm alınabiliyordu. Callegaro kapasitanslar için bu çalışmayı yapsa da VNA'nın faz ölçüm belirsizliği yüksek olduğundan kapasitans ölçüm belirsizliği yüksek elde edilmektedir.

5.2. S-Parametre Rezonans Yönteminin Teorisi

Bu tez çalışmasında geliştirilen yöntem kullanılarak VNA belirsizliğine bağlı kalmadan, yüksek çözünürlük ile HP16380A kapasitans setinde yer alan tüm kapasitanslar için geniş frekans aralığında kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem diğer yöntemlerin olumlu yönlerinin bir araya getirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Geliştirilen yöntem temel olarak Yonekura ve Wakasugi [9] tarafından HP16380A kapasitans seti için önerilen ve Şekil 5.5.'de gösterilen devre modelini temel almaktadır.



Şekil 5.5. Yonekura ve Wakasugi tarafından HP16380A kapasitans seti için geliştirilen devre modeli.

Yonekura ve Wakasugi HP HP16380A 4-terminal çift kapasitörlerin modelini Cutcosky'i referans alarak oluşturmuştur. Bu çalışmada HP 16380A model kapasitans standartları için Şekil 5.5.'de gösterilen modeldeki artık parametreleri, 1 pF, 10 pF, 100 pF, 1000 pF değerleri için, rezonans frekanslarından yararlanılarak

nasıl hesaplandığı aynı zamanda rezonans frekanslarının saçılma parametre yöntemiyle nasıl belirlendiği açıklanacaktır.

Şekil 5.5.'de gösterilen 4-terminal-pair kapasitörün empedans değeri (Denklem 5.11)'de verilmiştir.

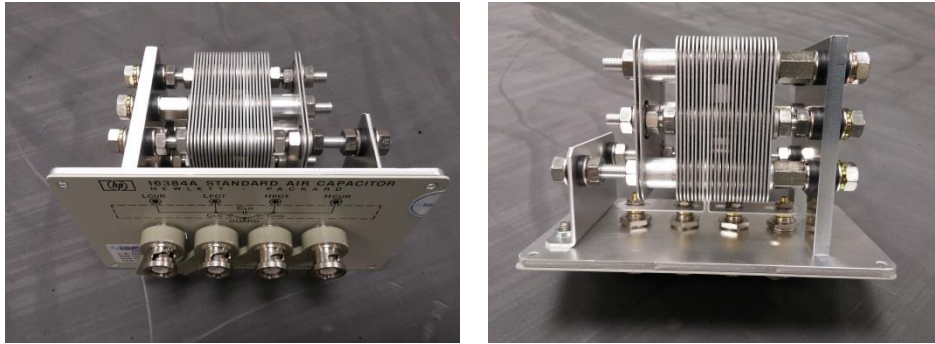
$$Z_{4TP} = (1 + Z_H Y_{HG})(1 + Z_L Y_{LG})Z_0 + (1 + Z_L Y_{LG})Z_H + (1 + Z_H Y_{HG})Z_L \quad (5.11)$$

$|Z_H Y_{HG}| \ll 1$, $|Z_L Y_{LG}| \ll 1$, $|Z_H Y_{HG}| \ll |Z_0 Y_{LG}|$, $|Z_L Y_{LG}| \ll |Z_0 Y_{HG}|$ olduğundan (Denklem 5.12) tekrar düzenlenirse (Denklem 5.13) elde edilir.

$$C_{4TP} = \frac{C}{1 - \omega^2 L_E C} \quad (5.12)$$

C kapasitörü C_0 ve C_{12} kapasitörlerinin paralel eşleğidir.

$$C = C_0 + C_{12} \quad (5.13)$$



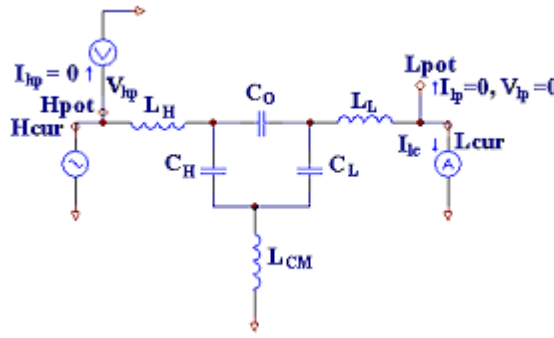
Şekil 5.6. HP16380A Kapasitans standardının iç yapısı

HP16380A kapasitans standardı paralel iletken plakaların art arda dizilmesi ile yapılmıştır. Paralel plakaların toplam kapasitansı C_{00} kapasitans değerini oluşturur. Paralel plakaların öz indüktansları ve karşılıklı indüktans etkisi nedeni ile L_{00} toplam

indüktansı meydana gelir. Bu durumda frekans ile değeri değişen bir C_0 kapasitansı oluşur ve (Denklem 5.14)'de ifade edilmiştir.

$$C_0 = \frac{C_{00}}{1 - \omega^2 \cdot L_{00} \cdot C_{00}} \quad (5.14)$$

Şekil 5.5.'de gösterilen devre modeli matematiksel olarak yerine koyma ve sadeleştirme işlemleri yapılırsa Şekil 5.7.'de gösterildiği şekilde ifade edilebilir. C_{12} kapasitörü, Şekil 5.7.'de gösterilen C_H , C_L ve L_{CM} empedanslarının yıldız üçgen dönüşümü ile C_0 kapasitansına paralel gelen empedansı ifadesi etmektedir. Bu empedans ifadesini bir kapasitif etki olarak değerlendirildiğinde (Denklem 5.15)'de ifade elde edilir.



Şekil 5.7. Yonekura ve Wakasugi modelinin sadeleştirilmiş şekli

$$C_{12} = \frac{-\omega^2 \cdot L_{CM} \cdot C_H \cdot C_L}{1 - \omega^2 \cdot L_{CM} \cdot (C_H + C_L)} \quad (5.15)$$

Burada dört terminal kapasitans standardındaki C_{HG2} , C_{LG2} terminal kapasitansları ve bu terminal kapasitanslarının bağlantı noktalarında yapısal olarak oluşan L_{HG} , L_{LG} terminal indüktanslarının bir araya gelmesinden frekans bağımlılığı olan (Denklem 5.16) ve (Denklem 5.17)'de ifade edilen C_H ve C_L terminal kapasitansları ortaya çıkar.

$$C_H = \frac{C_{HG2}}{1 - \omega^2 \cdot L_{HG} \cdot C_{HG2}} \quad (5.16)$$

$$C_L = \frac{C_{LG2}}{1 - \omega^2 \cdot L_{LG} \cdot C_{LG2}} \quad (5.17)$$

(Denklem 5.11)'de verilen ifadeyi (Denklem 5.12)'deki gibi sade bir şekilde yazabilmek için (Denklem 5.18)'de verilen yerine koyma işlemi uygulanır.

$$L_E = \left(1 + \frac{C_H}{C}\right) \cdot L_H + \left(1 + \frac{C_L}{C}\right) \cdot L_L \quad (5.18)$$

(Denklem 5.13), (Denklem 5.14), (Denklem 5.15), (Denklem 5.16), (Denklem 5.17), ve (Denklem 5.18), (Denklem 5.12)'de yerine koyulup ifade düzenlenirse, (Denklem 5.19) elde edilir [9].

$$C_{ATP} = \frac{C_0 \cdot \left(1 - \omega^2 \cdot L_{CM} \cdot \left(C_H + C_L + \frac{C_H \cdot C_L}{C_0}\right)\right)}{\left(1 - \omega^2 \cdot L_{CM} \cdot (C_H + C_L)\right) \cdot \left(1 - \omega^2 L_E C_0\right) + \omega^4 \cdot L_{CM} \cdot L_E \cdot C_H \cdot C_L} \quad (5.19)$$

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen yöntem: L_{CM} , L_H ve L_L indüktanslarının, (Denklem 5.8) kullanılarak S parametre ölçümleri ile bulunan empedans değerleri yardımı ile elde edilen, rezonans frekanslarından hesaplanmasına dayanmaktadır.

5.3. S-Parametre Ölçümleri İle Rezonansların Bulunması

S parametrelerini ölçmek için kullanılan ölçme devresi, Şekil 5.4.'de gösterilen Callegaro tarafından yapılan çalışmada kullanılan ölçüm düzeneği ile aynıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan cihaz Agilent marka HP8753ES Netvörk Analizörüdür. 30 kHz – 3 GHz frekans aralığında ölçüm alabilen cihazın bağlantı kabloları 7mm konnektör yapısına sahiptir. HP16380A kapasitans setinin bağlantı kabloları BNC olduğundan 7mm konnektörden BNC konnektöre özdeş dönüştürücü kullanılır. Bu şekilde VNA, HP16380A set kapasitörlerin ölçümlerini yapabilecek yapıya getirilir. Özdeş konnektörler kullanılması ile konnektörlerden gelebilecek hatalar karşılıklıdır.

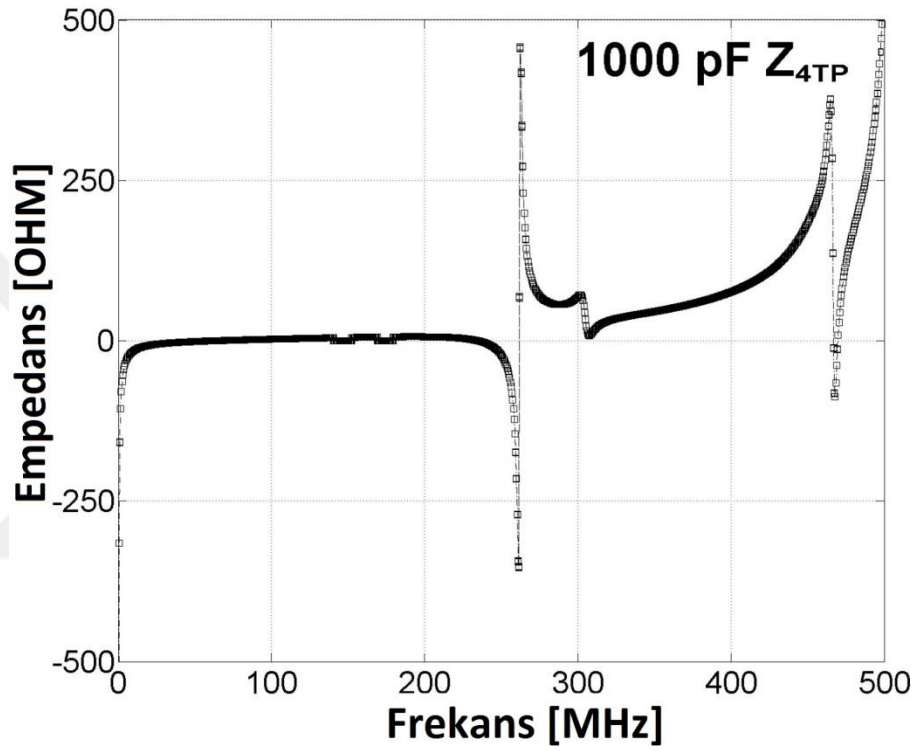
ilkesi gereği en aza indirilir. Ölçümleri gerçekleştirmek için uygun port bağlantıları kurularak boşta kalan terminalleri 50 ohm yük ile sonlandırılır. Örneğin S_{23} ölçümlerini yapabilmek için VNA'nın port 1 kablosu Şekil 5.4'de gösterilen HP1630A kapasitans standardının 2 numaralı terminaline, VNA'nın port 2 kablosu yine aynı şekilde gösterilen kapasitans standardının 3 numaralı terminaline bağlanır. HP16380A kapasitans standardının boşta kalan 1 ve 4 numaralı terminallerine 50 Ω geniş frekans aralığına sahip yük adaptörü bağlanır. Bu bağlantı yapısı ile S_{22} , S_{33} , S_{23} , S_{32} ölçümleri alınabilir. S matrisinin tüm elemanlarını ölçebilmek için Tablo 5.1.'de gösterilen altı adet bağlantı şeklinin sıra ile yapılarak S parametre ölçümlerinin 10 MHz 500MHz frekans aralığında kayıt altına alınması gerekmektedir.

Tablo 5.1. S parametreleri ölçümleri için yapılması gereken bağlantılar

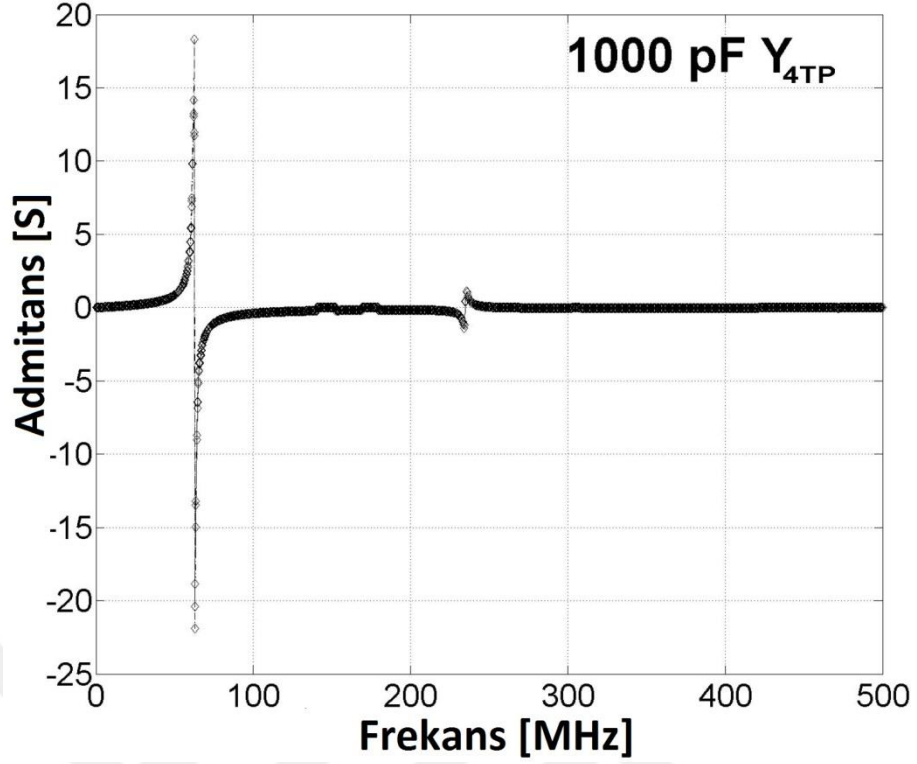
Bağlantı Şekli	Port 1 Ölçümü	Port 1-2 Ölçümü	Port 2-1 Ölçümü	Port 2 Ölçümü
Terminal 1 - Terminal 2	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
Terminal 1 - Terminal 3	-	S_{13}	S_{31}	S_{33}
Terminal 1 - Terminal 4	-	S_{14}	S_{41}	S_{44}
Terminal 2 - Terminal 3	-	S_{23}	S_{32}	-
Terminal 2 - Terminal 4	-	S_{24}	S_{42}	-
Terminal 3 - Terminal 4	-	S_{34}	S_{43}	-

İşlemler çok sayıda verinin karmaşık sayı düzleminde hesaplanmasını gerektirdiğinden matrislerle işlem yapabilen matematiksel hesaplama programlarının kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu hesaplamalar için MATLAB veya açık kaynak kodlu OCTAVE programı kullanılabilir. Elde edilen S parametre verileri (Denklem 5.8)'de yerine konulursa (Denklem 5.9) ve (Denklem 5.10) elde edilir. Böylelikle HP16380A kapasitans standardı için S parametresi ölçümlerinden Z parametreleri 10 MHz 500 MHz frekans aralığı için elde edilmiş olur. Z matrisi her bir frekans için (Denklem 5.5) ve (Denklem 5.6)'da yerine konulursa kapasitans standardına ait dört terminal çift empedans değerleri hesaplanmış olur.

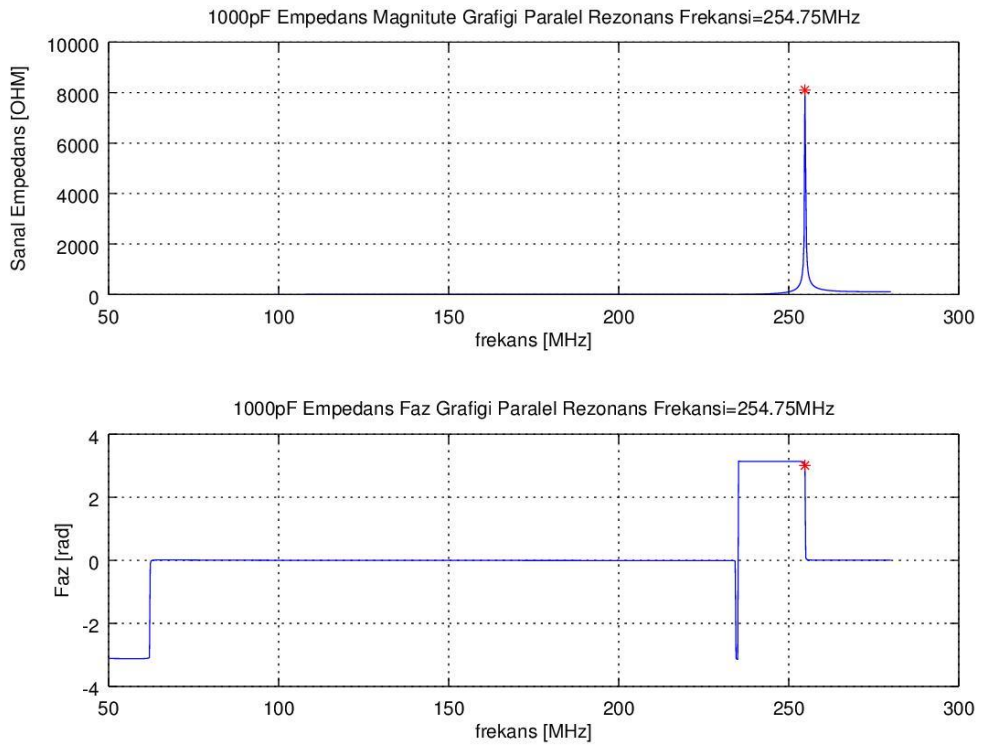
Elde edilen Z_{4TP} ve Y_{4TP} sonuçları grafiğe aktarılarak rezonans frekansları bulunur. Şekil 5.10., Şekil 5.11., Şekil 5.14., Şekil 5.15., Şekil 5.18., Şekil 5.19., Şekil 5.22. ve Şekil 5.23.'de verilen grafiklerde $Z_{4TP} = 0$ ve $Y_{4TP} = 0$ şartı gerçekleştiği durum rezonansın ortaya çıktığı durumdur. $Z_{4TP} = 0$ olduğu frekans seri rezonans, $Y_{4TP} = 0$ olduğu frekans ise paralel rezonans frekanslarıdır. Bu frekans değerleri artık parametrelerin hesaplanmasında kullanılır.



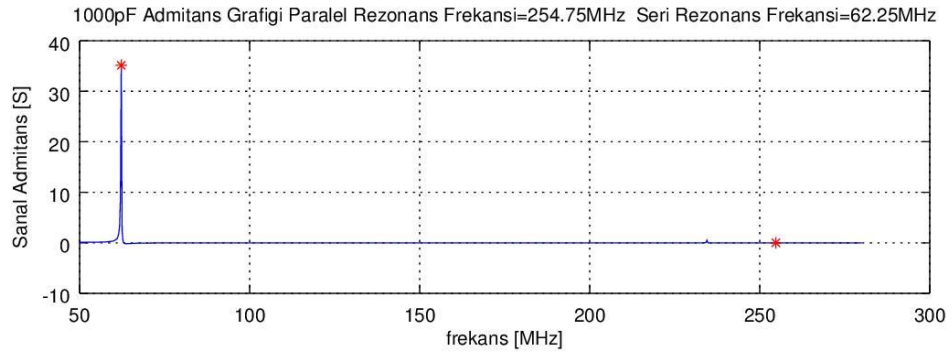
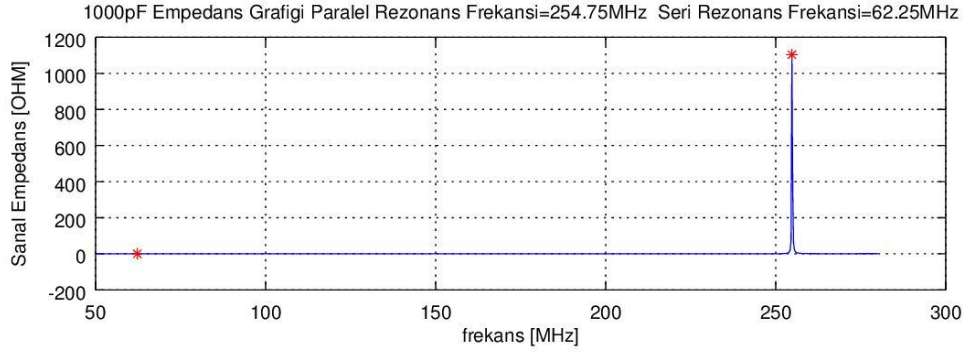
Şekil 5.8. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1000 pF empedans ölçümleri



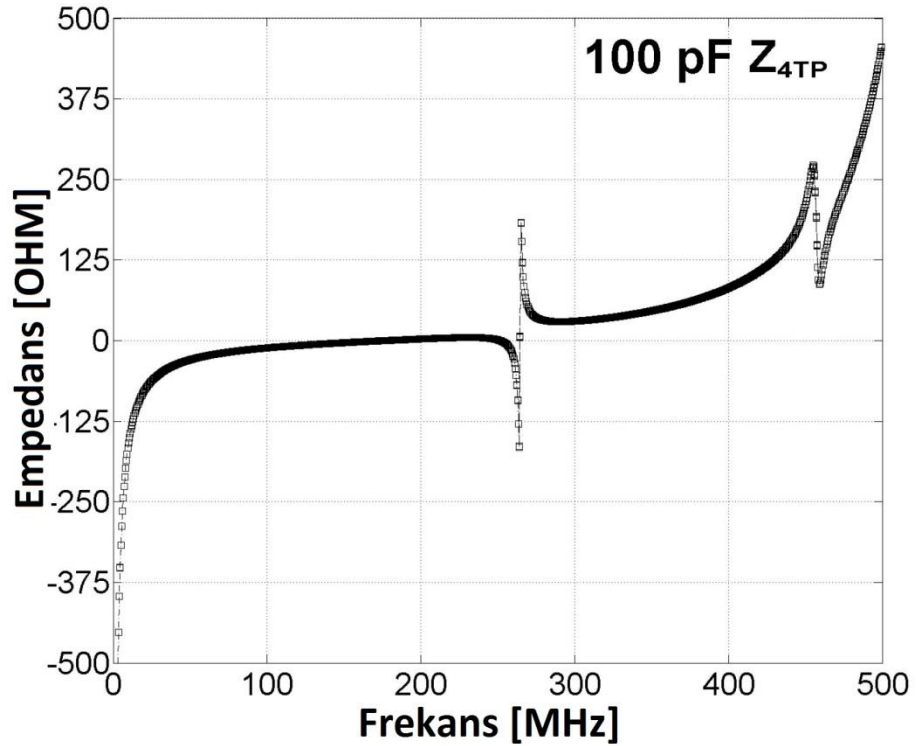
Şekil 5.9. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1000 pF admitans ölçümleri



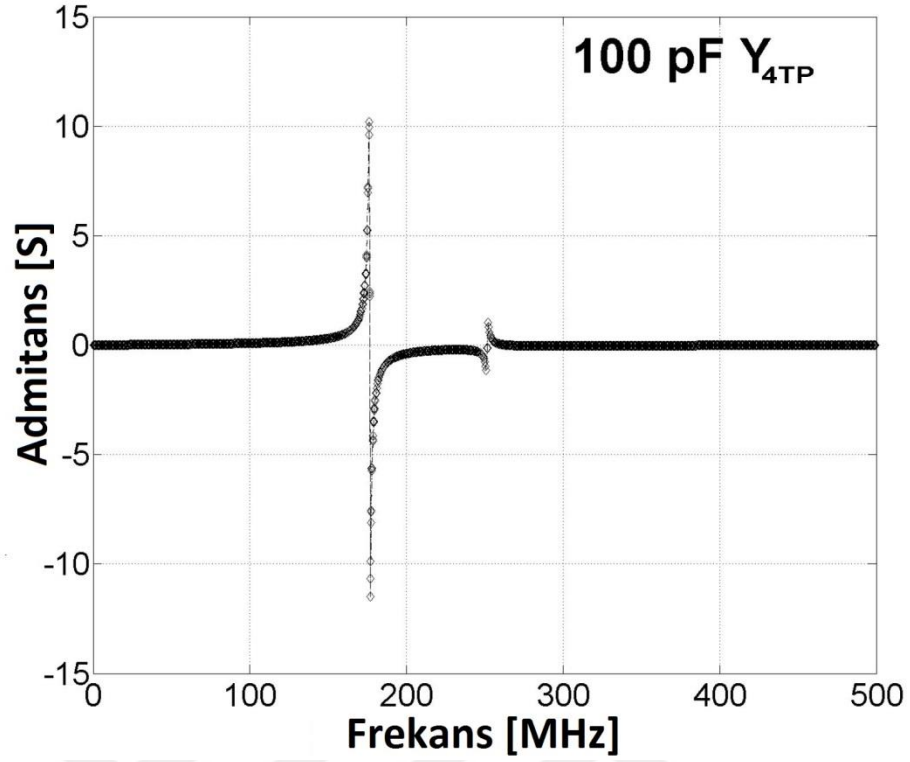
Şekil 5.10. 1000 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği



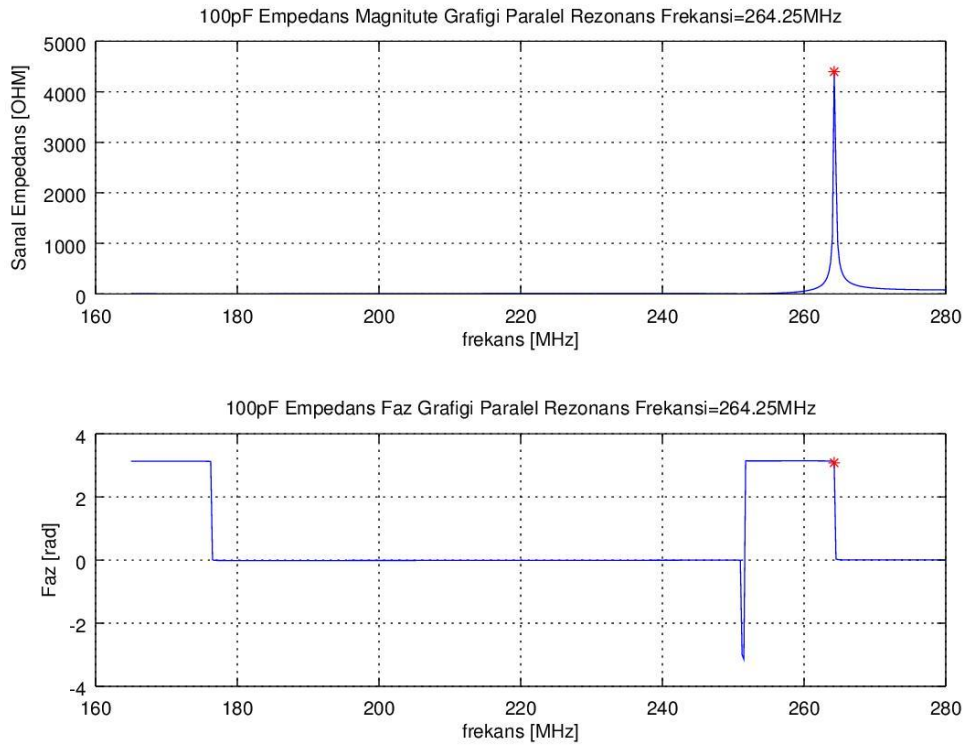
Şekil 5.11. 1000 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği



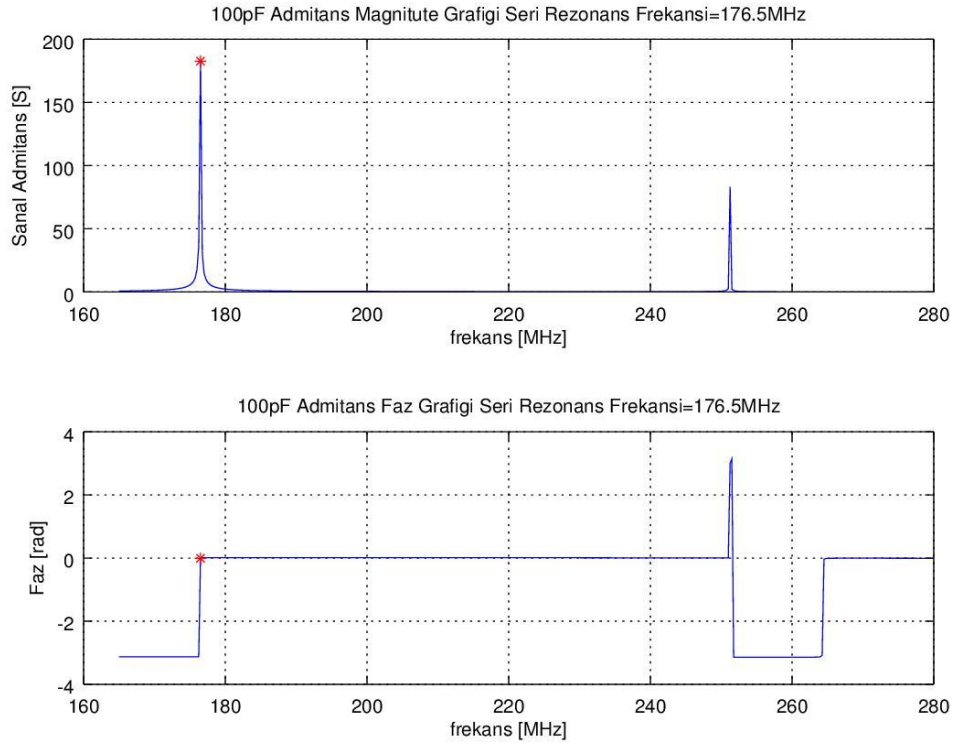
Şekil 5.12. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 100 pF empedans ölçümleri



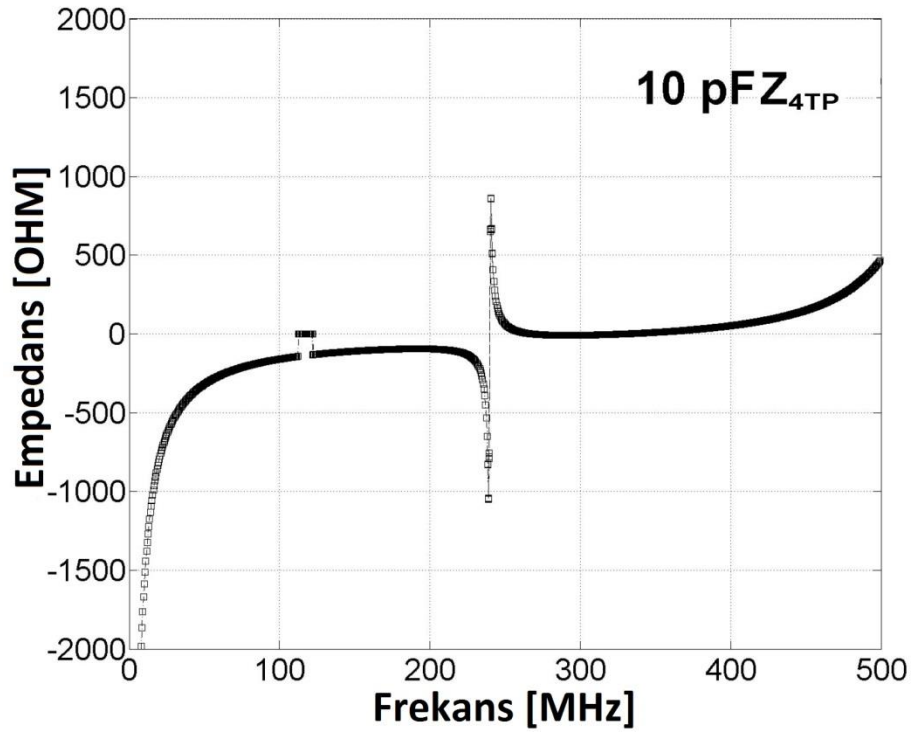
Şekil 5.13. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 100 pF admittans ölçümleri



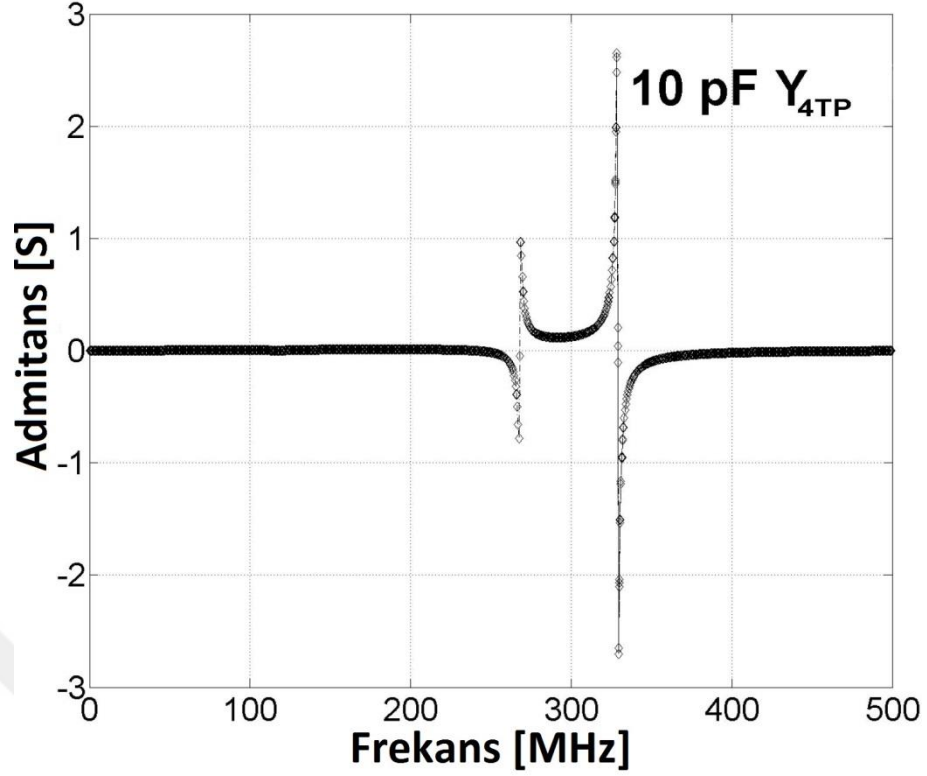
Şekil 5.14. 100 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği



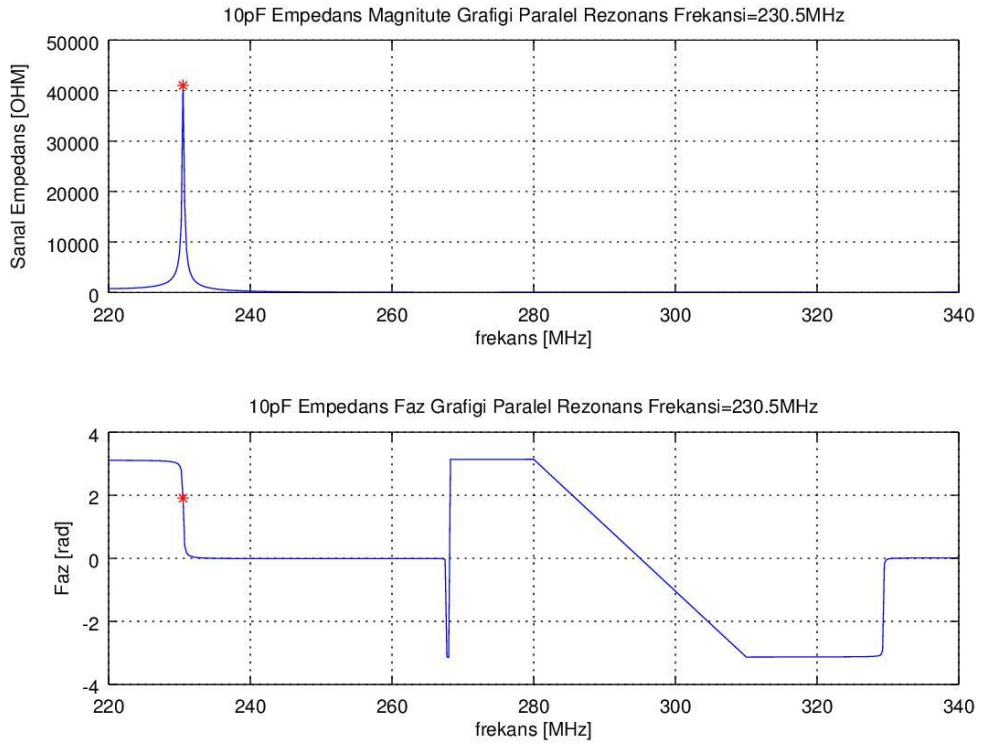
Şekil 5.15. 100 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği



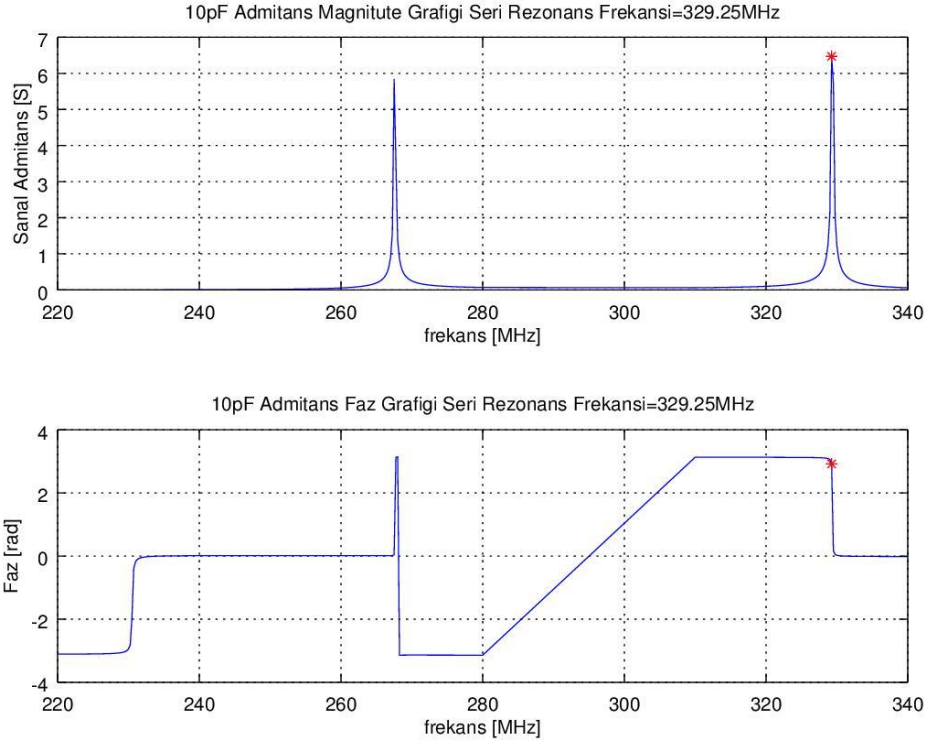
Şekil 5.16. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 10 pF empedans ölçümleri



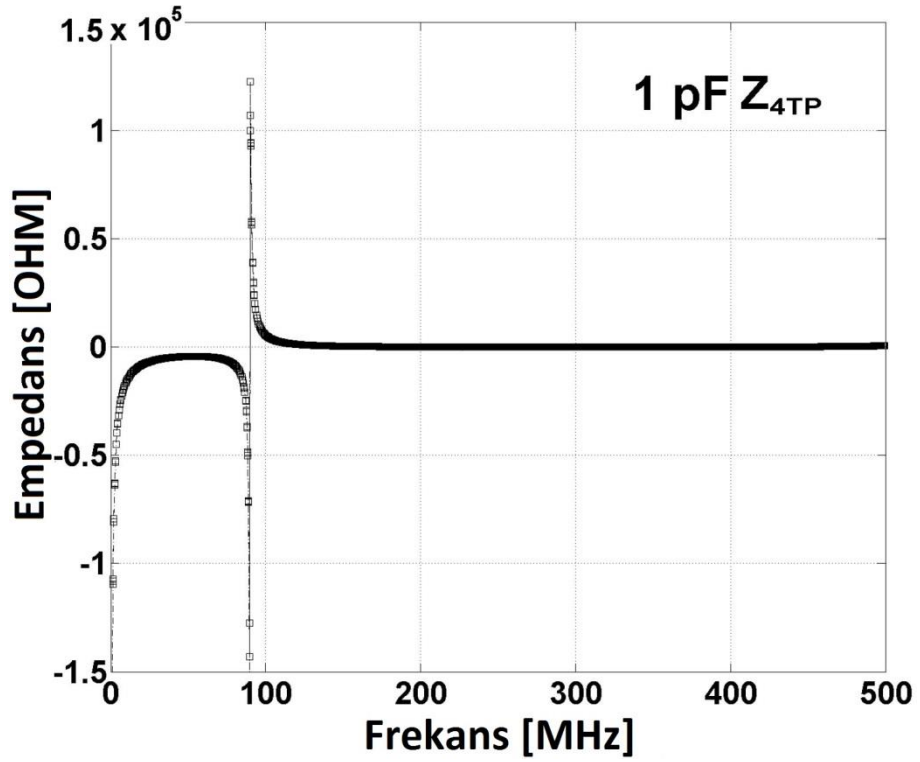
Şekil 5.17. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 10 pF admittans ölçümleri



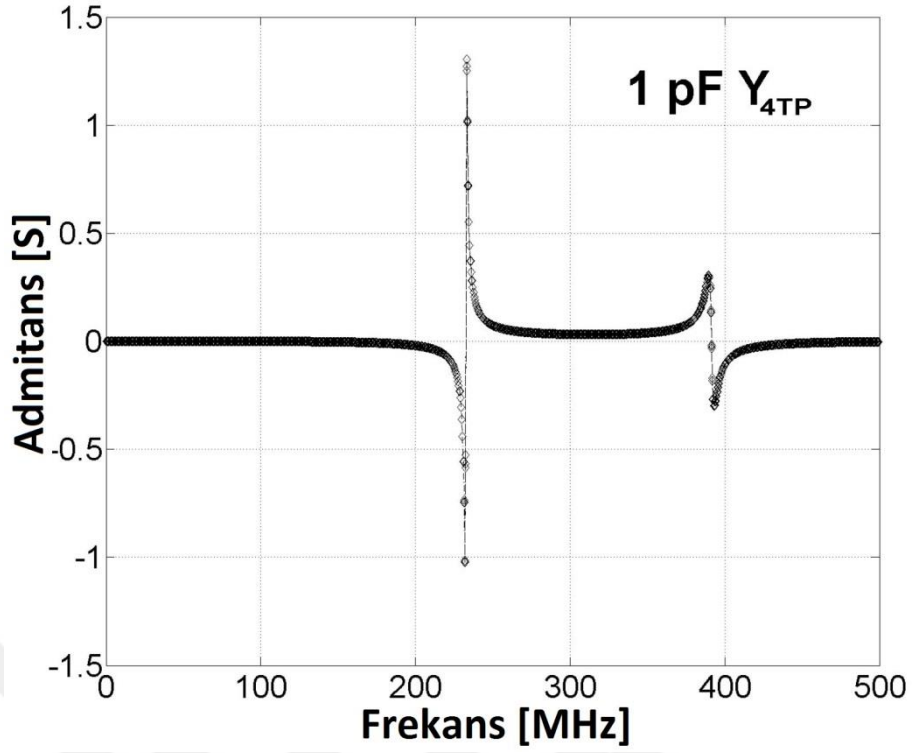
Şekil 5.18. 10 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği



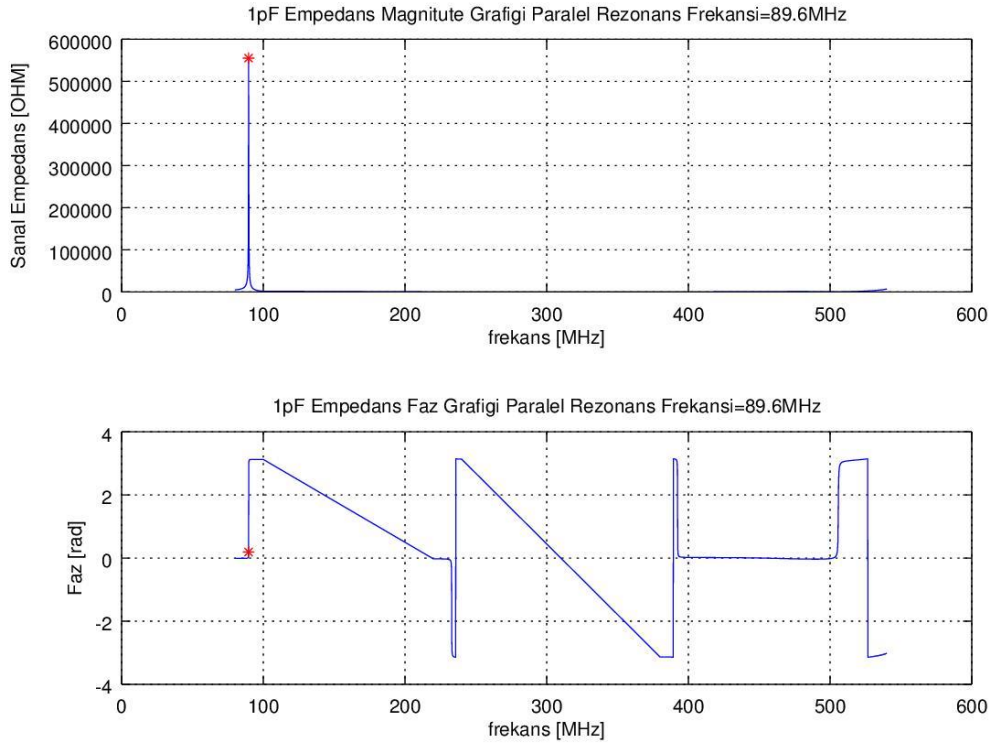
Şekil 5.19. 10 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği



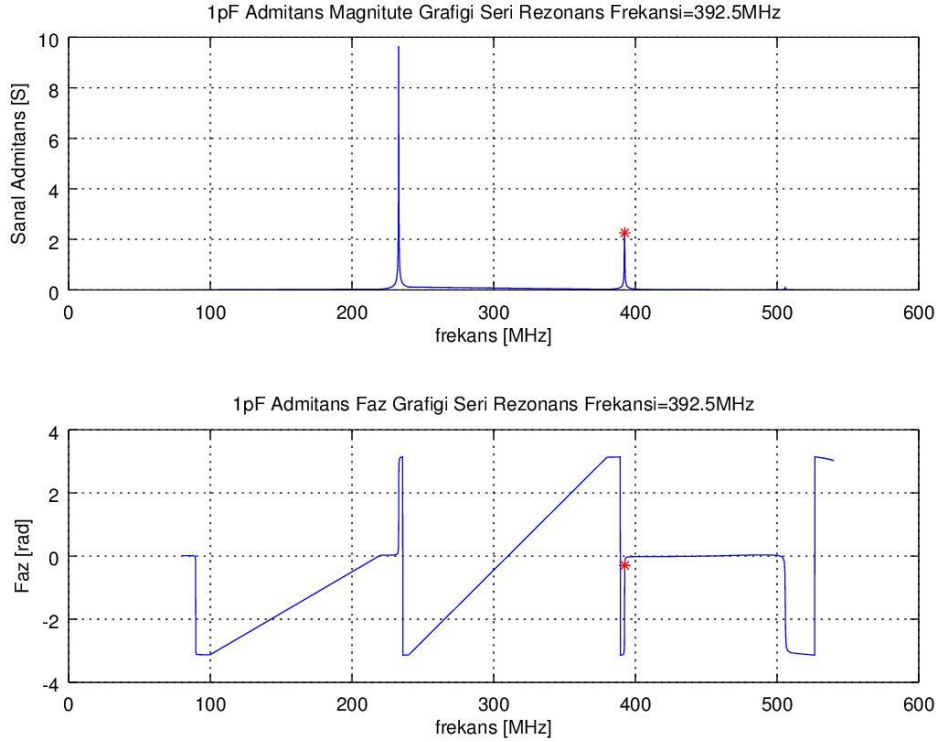
Şekil 5.20. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1 pF empedans ölçümleri



Şekil 5.21. 30 kHz 500 MHz frekans aralığında 1 pF admitans ölçümleri



Şekil 5.22. 1 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Z_{4TP} Faz grafiği



Şekil 5.23. 1 pF kapasitans standardının S parametre yöntemi ile hesaplanan Y_{4TP} Faz grafiği

5.4. Artık Parametrelerin Hesaplanması

Şekil 5.5.'de gösterilen Yonekura ve Wakasugi'nin HP HP16380A 4-terminal çift kapasitans standartları modelinde gösterilen artık parametrelerin değerleri bulunup. (Denklem 5.19)'da yerine konulursa istenilen frekans için dört terminal çift kapasitans standardının değeri bulunmuş olur.

Bu çalışmada HP 16380A model kapasitans standartları için modeldeki artık parametreleri Tablo 5.2.'de verilmiştir. Tablo 5.2.'de gösterilen artık parametrelerin bir kısmı adı geçen çalışmadaki değerler referans alınmıştır. Bu değerlerin çalıştığımız frekanslarda sonuca etkisi az olduğundan hesaplama için çaba gösterilmemiştir. Bazı parametrelerin değeri ise 1 kHz'de ölçüm yapan hassas kapasitans ölçme köprüsü ile belirlenmiştir. Geri kalan parametreler bu çalışmanın sonucu olan yöntemle rezonans frekanslarından hesaplanmıştır.

Tablo 5.2. HP16380A kapasitans setinin artık parametreleri

	1000 pF	100 pF	10 pF	1 pF	Ölçüm yöntemi
L_{00}	0,2 nH	2 nH	11 nH	1.1 nH	Yonekura ve Wakasugi
L_{HG}	9 nH	9 nH	11 nH	18 nH	Yonekura ve Wakasugi
L_{LG}	7 nH	9 nH	8 nH	0 nH	Yonekura ve Wakasugi
C_{HG2}	27,07 pF	24,52 pF	18,65 pF	11,26 pF	1 kHz kapasitans ölçüm köprüsü
C_{LG2}	28,41 pF	25,88 pF	22,58 pF	41,93 pF	1 kHz kapasitans ölçüm köprüsü
$f_{\text{seri rezonans}}$	62,25 MHz	264,25 MHz	230,50 MHz	89,60 MHz	S parametre rezonans yöntemi
$f_{\text{paralel rezonans}}$	62,25 MHz	176,50 MHz	329,25 MHz	392,5 MHz	S parametre rezonans yöntemi
L_{CM}	2,96 nH	2,34 nH	2,97 nH	5,65 nH	S parametre rezonans yöntemi
$L_H = L_L$	3,08 nH	2,51 nH	0,14 nH	-0,63 nH	S parametre rezonans yöntemi

$Y_{4TP} = 0$ olduğu durumda paralel rezonans gerçekleşmiş olur. Bu durumda (Denklem 5.19)'un payını sıfır yapan koşul paralel rezonans koşulu sayılır. (Denklem 5.19)'un payı sıfıra eşitlenip düzenlenirse, (Denklem 5.20) yardımı ile paralel rezonans frekansında L_{CM} artık indüktansı hesaplanır.

$$L_{CM} = \frac{1}{\left(\omega_p^2 \cdot \left(C_{H-p} + C_{L-p} + \frac{C_{H-p} \cdot C_{L-p}}{C_{0-p}} \right) \right)} \quad (5.20)$$

C_{H-P} , C_{L-P} , C_{0-P} değerleri (Denklem 5.14), (Denklem 5.16) ve (Denklem 5.17) kullanılarak rezonans frekansında hesaplanan değerlerdir.

$Z_{4TP} = 0$ olduğu durumda seri rezonans gerçekleşmiş olur. Bu durumda (Denklem 5.19)'un paydasını sıfır yapan koşul seri rezonans koşulu sayılır. (Denklem 5.19)'un paydası sıfıra eşitlenip düzenlenirse, (Denklem 5.21) ve (Denklem 5.22)'de verilen eşitlikler kullanılarak seri rezonans frekansında $L_H = L_L$ artık indüktansı hesaplanır. Burada kapasitans standardının simetrik yapısı nedeni ile $L_H = L_L$ kabul edilmiştir.

$$L_{E-s} = \frac{1 - \omega_s^2 L_{CM} (C_H + C_L)}{(1 - \omega_s^2 L_{CM} (C_H + C_L)) \omega_s^2 C_0 - \omega_s^4 \cdot L_{CM} \cdot C_{H-s} \cdot C_{L-s}} \quad (5.21)$$

$$L_H = L_L = \frac{L_{E-s}}{\left(2 + \frac{C_{H-s} + C_{L-s}}{C_s}\right)} \quad (5.22)$$

5.5. C_{4TP} Kapasitansının Değerinin Hesaplanması

C_{4TP} kapasitans değerini hesaplamak için gerekli olan C_{HG2} , C_{LG2} ve C_{00} değerleri 1 kHz üç terminalli hassas kapasitans karşılaştırma köprüsünde ölçülür. C_{HG2} kapasitansı doğrudan ölçülemez. Bunun için HP16380A kapasitans standardının H ve G ucu arasındaki kapasitans ölçülür. Bu değer $C_{HG1} + C_{HG2}$ 'dir. C_{HG1} değeri ise kapasitans standardının kutusu boşken ölçülen kapasitördür. C_{HG2} kapasitans değeri bu iki ölçümün farkıdır. C_{LG2} değeri de aynı yöntemle ölçülür. C_{00} kapasitans değeri H ve L uçları arasında ölçülen kapasitansdır. L_{CM} , L_H ve L_L indüktansları bulunan rezonans frekanslarından elde edilir. L_{00} , L_{HG} ve L_{LG} indüktanslarının değerleri Yonekuranın çalışmasından alınmıştır. Yonekura bu değerleri belirlerken farklı plakalardan yapılmış özel kapasitörler imal ederek HP16380A kapasitör seti için üretimden kaynaklanan bu değerleri simüle ederek bulmuştur. Elde edilen değerler Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2.'de bulunan değerler (Denklem 5.19)'da yerine koyulduğunda C_{4TP} değeri frekansa bağlı olarak elde edilir. Tablo 5.3., Tablo 5.4., Tablo 5.5. ve Tablo 5.6.'da,

geliştirilen yöntem ile elde edilen sonuçlar, Suzuki ve Callegaro'nun sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.3. 1000 pF için yapılan hesaplamaların diğer yöntemlerle karşılaştırılması

		Suzuki Yöntemi	Callegaro Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi Belirsizlik
1000 pF	$\Delta C/C$ @1 MHz	2.6×10^{-4}	2.8×10^{-4}	$2,54 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-5}$
	$\Delta C/C$ @10MHz	2.6×10^{-2}	2.8×10^{-2}	$2,61 \times 10^{-2}$	$1,40 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @13 MHz			$4,49 \times 10^{-2}$	$2,41 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @20 MHz			$1,13 \times 10^{-1}$	$6,09 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @30 MHz			$2,97 \times 10^{-1}$	$1,60 \times 10^{-2}$

Tablo 5.4. 100 pF için yapılan hesaplamaların diğer yöntemlerle karşılaştırılması

		Suzuki Yöntemi	Callegaro Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi Belirsizlik
100 pF	$\Delta C/C$ @1 MHz	3.0×10^{-5}	3.6×10^{-5}	$3,20 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$
	$\Delta C/C$ @10 MHz	2.7×10^{-3}	3.6×10^{-3}	$3,21 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @13 MHz			$5,43 \times 10^{-3}$	$1,99 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @20 MHz			$1,30 \times 10^{-2}$	$4,73 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @30 MHz			$2,96 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$

Tablo 5.5. 10 pF için yapılan hesaplamaların diğer yöntemlerle karşılaştırılması

		Suzuki Yöntemi	Callegaro Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi Belirsizlik
10 pF	$\Delta C/C$ @1 MHz	1.0×10^{-5}	7×10^{-6}	$1,34 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-5}$
	$\Delta C/C$ @10 MHz	3.4×10^{-4}	6.85×10^{-4}	$1,33 \times 10^{-4}$	$2,78 \times 10^{-4}$
	$\Delta C/C$ @13 MHz			$2,24 \times 10^{-4}$	$4,69 \times 10^{-4}$
	$\Delta C/C$ @20 MHz			$5,25 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @30 MHz			$1,15 \times 10^{-3}$	$2,53 \times 10^{-3}$

Tablo 5.6. 1 pF için yapılan hesaplamaların diğer yöntemlerle karşılaştırılması

		Suzuki Yöntemi	Callegaro Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi	S parametre Rezonans Yöntemi Belirsizlik
1 pF	$\Delta C/C$ @1 MHz	-1.0×10^{-4}	-1.07×10^{-4}	$-1,01 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-5}$
	$\Delta C/C$ @10 MHz	-1.0×10^{-2}	-1.07×10^{-2}	$-1,02 \times 10^{-2}$	$1,47 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @13 MHz			$-1,72 \times 10^{-2}$	$2,51 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @20 MHz			$-4,10 \times 10^{-2}$	$6,16 \times 10^{-3}$
	$\Delta C/C$ @30 MHz			$-9,36 \times 10^{-2}$	$1,50 \times 10^{-2}$

5.6. Belirsizliğin Hesaplanması

Geliştirilen yöntemle elde edilen değerlerin metrolojik açıdan anlamlı olabilmesi için elde edilen değerlerin belirsizlik hesaplarının yapılması gerekmektedir.

Belirsizliği hesaplayabilmek için öncelikle belirsizliği hesaplanacak olan parametrenin matematiksel modelinin oluşturulması gerekir. Bu matematiksel modelde yer alan tüm parametrelerin duyarlılık katsayıları kısmi türevler alınarak bulunur. Duyarlılık katsayıları her bir parametrenin hesaplanmak istenen toplam belirsizliğe olan katkısını belirler. Duyarlılık katsayıları ve her bir parametrenin belirsizliği kullanılarak ana belirsizlik bileşeni hesaplanır. Bu işlem matematiksel olarak hesaplama yapılan L_{CM} , L_H ve L_L için yapıldıktan sonra elde edilen verilerle C_{4TP} için tekrar edilir.

5.6.1. L_{CM} belirsizliğinin hesaplanması

L_{CM} artık indüktansının belirsizliğinin hesaplamak için (Denklem 5.23)'de verilen matematiksel model kullanılır.

$$L_{CM} = \frac{1}{\left(\omega_p^2 \cdot \left(C_{H-p} + C_{L-p} + \frac{C_{H-p} \cdot C_{L-p}}{C_{0-p}} \right) \right)} \quad (5.23)$$

Tablo 5.7’de L_{CM} ’nin hesaplandığı matematiksel modelde yer alan parametreler açıklanmaktadır.

Tablo 5.7. L_{CM} ifadesinde yer alan parametrelerin açıklanması

ω_p	$(2 \times \pi \times f_p)$ açısal paralel rezonans frekansı
f_p	Paralel rezonans frekansı
C_{H-p}	f_p frekansında (Denklem 5.16) ile hesaplanan C_H değeri
C_{L-p}	f_p frekansında (Denklem 5.17) ile hesaplanan C_L değeri
C_{0-p}	f_p frekansında (Denklem 5.14) ile hesaplanan C_0 değeri

Belirsizlik hesabının yapılabilmesi için L_{CM} ifadesinin, ifadeyi oluşturan her bir parametreye göre kısmi türevinin alınarak duyarlılık katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Aşağıda L_{CM} ifadesi için hesaplanan kısmi türev ifadeleri verilmektedir.

$$c_{1_LCM} = \frac{\partial L_{CM}}{\partial f_p} \quad (5.24)$$

$$c_{2_LCM} = \frac{\partial L_{CM}}{\partial C_{HG2}} \quad (5.25)$$

$$c_{3_LCM} = \frac{\partial L_{CM}}{\partial C_{LG2}} \quad (5.26)$$

$$c_{4_LCM} = \frac{\partial L_{CM}}{\partial L_{HG}} \quad (5.27)$$

$$c_{5_LCM} = \frac{\partial L_{CM}}{\partial L_{LG}} \quad (5.28)$$

$$c_{6_LCM} = \frac{\partial L_{CM}}{\partial C_{00}} \quad (5.29)$$

$$c_{7_LCM} = \frac{\partial L_{CM}}{\partial L_{00}} \quad (5.30)$$

Hesaplanan duyarlılık katsayıları (Denklem 5.31)'de yerine konulursa L_{CM} parametresinin belirlenme belirsizliği hesaplanmış olur.

$$\begin{aligned} u_{LCM}^2 = & c_{1_LCM}^2 \cdot u_{f_p}^2 + c_{2_LCM}^2 \cdot u_{C_{HG2}}^2 + c_{3_LCM}^2 \cdot u_{C_{LG2}}^2 + c_{4_LCM}^2 \cdot u_{L_{HG}}^2 \dots \\ & + c_{5_LCM}^2 \cdot u_{L_{LG}}^2 + c_{6_LCM}^2 \cdot u_{C_{00}}^2 + c_{7_LCM}^2 \cdot u_{L_{00}}^2 \end{aligned} \quad (5.31)$$

(Denklem 5.31)'de yer alan belirsizlik ifadeleri, Tablo 5.8.'de açıklanmaktadır.

Tablo 5.8. L_{CM} belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan belirsizlik bileşenleri

u_{f_p}	Vektör Netvörk Analizör ile S parametre ölçümlerinden hesaplanan paralel rezonans belirsizliği
$u_{C_{HG2}}$	1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan C_{HG2} kapasitansının belirsizliği
$u_{C_{LG2}}$	1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan C_{LG2} kapasitansının belirsizliği
$u_{L_{HG}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan L_{HG} artık indüktans belirsizliği
$u_{L_{LG}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan artık indüktans belirsizliği
$u_{C_{00}}$	1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan C_{00} kapasitansının belirsizliği
$u_{L_{00}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan artık indüktans belirsizliği
u_{LCM}	Toplam L_{CM} belirsizliği

Tablo 5.9., Tablo 5.10., Tablo 5.11. ve Tablo 5.12.'de hesaplanan L_{CM} belirsizlikleri verilmektedir. Duyarlılık katsayısı ve belirsizlik hesaplamaları çok sayıda parametreyi içerdiğinden elle hesaplanması çok zordur. Bu nedenle bu hesaplamaların doğru ve hızlı bir şekilde yapılabilmesi için MATLAB veya OCTAVE hesaplama programı ve Symbolic Toolbox modülünün kullanılması gerekmektedir.

Tablo 5.9. 1000 pF kapasitans standardı için L_{CM} belirlenme belirsizliği

Büyükük X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	1000,067 pF	0,025 pF	Normal / A	1	$9,35 \times 10^{-2}$	$2,34 \times 10^{-15}$
L_{OO}	0,2 nH	0,2 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$2,39 \times 10^{-1}$	$2,77 \times 10^{-11}$
C_{HG2}	27,07 pF	0,27 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,63 \times 10^2$	$-2,55 \times 10^{-11}$
C_{LG2}	28,41 pF	0,28 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-9,64 \times 10^1$	$-1,58 \times 10^{-11}$
L_{HG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-3,06 \times 10^{-1}$	$-8,84 \times 10^{-10}$
L_{LG}	7 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,99 \times 10^{-1}$	$-5,75 \times 10^{-10}$
f_p	254,75 MHz	500 kHz	Normal / A	1	$-5,54 \times 10^{-17}$	$-2,77 \times 10^{-11}$
L_{CM}	2,96 nH					1,06 nH

Tablo 5.10. 100 pF kapasitans standardı için L_{CM} belirlenme belirsizliği

Büyükük X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	100,0013pF	0,0025 pF	Normal / A	1	6,82	$1,70 \times 10^{-14}$
L_{OO}	2 nH	2 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$1,88 \times 10^{-1}$	$2,17 \times 10^{-10}$
C_{HG2}	24,52 pF	0,25 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,30 \times 10^2$	$-1,84 \times 10^{-11}$
C_{LG2}	25,88 pF	0,26 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,50 \times 10^2$	$-2,25 \times 10^{-11}$
L_{HG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-2,16 \times 10^{-1}$	$-6,22 \times 10^{-10}$
L_{LG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-2,78 \times 10^{-1}$	$-8,02 \times 10^{-10}$
f_p	264,25 MHz	500 kHz	Normal / A	1	$-4,85 \times 10^{-17}$	$-2,42 \times 10^{-11}$
L_{CM}	2,34 nH					1,04 nH

Tablo 5.11. 10 pF kapasitans standardı için LCM belirlenme belirsizliği

Büyüklik X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik k $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	9,99975 pF	0,25 aF	Normal / A	1	$2,20 \times 10^2$	$5,50 \times 10^{-14}$
L_{OO}	11 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$4,61 \times 10^{-2}$	$1,33 \times 10^{-10}$
C_{HG2}	18,65 pF	0,19 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-2,16 \times 10^2$	$-2,33 \times 10^{-11}$
C_{LG2}	22,58 pF	0,23 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,68 \times 10^2$	$-2,20 \times 10^{-11}$
L_{HG}	11 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,58 \times 10^{-1}$	$-4,55 \times 10^{-10}$
L_{LG}	8 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,80 \times 10^{-1}$	$-5,20 \times 10^{-10}$
f_p	230,50 MHz	500 kHz	Normal / A	1	$-4,89 \times 10^{-17}$	$-2,45 \times 10^{-11}$
L_{CM}	2,97 nH					0,71 nH

Tablo 5.12. 1 pF kapasitans standardı için LCM belirlenme belirsizliği

Büyüklik X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	1,000070 pF	0,025 aF	Normal / A	1	$5,11 \times 10^3$	$1,28 \times 10^{-13}$
L_{OO}	1,1 nH	1,1 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$1,62 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^{-12}$
C_{HG2}	11,26 pF	0,11 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-4,96 \times 10^2$	$-3,23 \times 10^{-11}$
C_{LG2}	41,93 pF	0,42 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,32 \times 10^2$	$-3,19 \times 10^{-11}$
L_{HG}	18 nH	10 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,99 \times 10^{-2}$	$-1,15 \times 10^{-10}$
L_{LG}	0 nH	10 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-7,35 \times 10^{-2}$	$-4,24 \times 10^{-10}$
f_p	89,600MHz	500 kHz	Normal / A	1	$-1,34 \times 10^{-16}$	$-6,71 \times 10^{-11}$
L_{CM}	5,65 nH					0,45 nH

5.6.2. L_H ve L_L belirsizliğinin hesaplanması

L_H ve L_L artık indüktansının belirsizliğini hesaplamak için (Denklem 5.33)'de verilen matematiksel model kullanılır.

$$L_{E-s} = \frac{1 - \omega_s^2 L_{CM} (C_H + C_L)}{(1 - \omega_s^2 L_{CM} (C_H + C_L)) \omega_s^2 C_0 - \omega_s^4 \cdot L_{CM} \cdot C_{H-s} \cdot C_{L-s}} \quad (5.32)$$

$$L_H = L_L = \frac{L_{E-s}}{\left(2 + \frac{C_{H-s} + C_{L-s}}{C_s}\right)} \quad (5.33)$$

Tablo 5.13.'de L_H ve L_L 'nin hesaplandığı matematiksel modelde yer alan parametreler açıklanmaktadır.

Tablo 5.13. L_H ve L_L ifadesinde yer alan parametrelerin açıklanması

f_s	Seri rezonan frekansı
ω_s	: $2 \times \pi \times f_s$ açısal seri rezonans
C_{H-s}	f_s frekansında (Denklem 5.16) ile hesaplanan C_H değeri
C_{L-s}	f_s frekansında (Denklem 5.17) ile hesaplanan C_L değeri
C_{0-s}	f_s frekansında (Denklem 5.14) ile hesaplanan C_0 değeri
L_{CM}	(Denklem 5.23) ile hesaplanan L_{CM} değeri

Belirsizlik hesabının yapılabilmesi için L_H ve L_L ifadelerinin, ifadeleri oluşturan her bir parametreye göre kısmi türevinin alınması gerekmektedir. Aşağıda L_H ve L_L ifadeleri için hesaplanan kısmi türev ifadeleri verilmektedir.

$$c_{1_L} = \frac{\partial L}{\partial f_s} \quad (5.34)$$

$$c_{2_L} = \frac{\partial L}{\partial C_{HG2}} \quad (5.35)$$

$$c_{3_L} = \frac{\partial L}{\partial C_{LG2}} \quad (5.36)$$

$$c_{4_L} = \frac{\partial L}{\partial L_{HG}} \quad (5.37)$$

$$c_{5_L} = \frac{\partial L}{\partial L_{LG}} \quad (5.38)$$

$$c_{6_L} = \frac{\partial L}{\partial C_{00}} \quad (5.39)$$

$$c_{7_L} = \frac{\partial L}{\partial L_{00}} \quad (5.40)$$

$$c_{8_L} = \frac{\partial L}{\partial L_{CM}} \quad (5.41)$$

Hesaplanan duyarlılık katsayıları (Denklem 5.42)'de yerine konulursa L_H ve L_L parametrelerinin belirlenme belirsizliği hesaplanmış olur.

$$\begin{aligned} u(L)^2 = & c_{1_L}^2 \cdot u(f_s)^2 + c_{2_L}^2 \cdot u(C_{HG2})^2 + c_{3_L}^2 \cdot u(C_{LG2})^2 + c_{4_L}^2 \cdot u(L_{HG})^2 \dots \\ & + c_{5_L}^2 \cdot u(L_{LG})^2 + c_{6_L}^2 \cdot u(C_{00})^2 + c_{7_L}^2 \cdot u(L_{00})^2 + c_{8_L}^2 \cdot u(L_{CM})^2 \end{aligned} \quad (5.42)$$

(Denklem 5.42)'de yer alan belirsizlik ifadeleri Tablo 5.14.'de açıklanmaktadır.

Tablo 5.14. L_H ve L_L belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan belirsizlik bileşenleri

u_{f_s}	Vektör Netvörk Analizör ölçümlerinden hesaplanan seri rezonans belirsizliği
$u_{C_{HG2}}$	1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan C_{HG2} kapasitansının belirsizliği
$u_{C_{LG2}}$	1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan C_{LG2} kapasitansının belirsizliği
$u_{L_{HG}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan L_{HG} artık indüktans belirsizliği
$u_{L_{LG}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan L_{LG} artık indüktans belirsizliği
$u_{C_{00}}$	1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan C_{00} kapasitansının belirsizliği
$u_{L_{00}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan L_{00} artık indüktans belirsizliği
$u_{L_{CM}}$	L_{CM} artık indüktansının (Denklem 5.31) ile hesaplanan belirsizliği
$u(L)$	Toplam L_H , L_L belirsizliği

Tablo 5.15., Tablo 5.16., Tablo 5.17. ve Tablo 5.18.'de hesaplanan L_H ve L_L belirsizlikleri verilmektedir.

Tablo 5.15. 1000 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri

Büyüklik X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	1000,067 pF	0,025 pF	Normal / A	1	-3,10	$-7,74 \times 10^{-14}$
L_{OO}	0,2 nH	0,2 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-4,74 \times 10^{-1}$	$-5,47 \times 10^{-11}$
C_{HG2}	27,07 pF	0,27 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	-1,52	$-2,38 \times 10^{-13}$
C_{LG2}	28,41 pF	0,28 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	-1,50	$-2,47 \times 10^{-13}$
L_{HG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,71 \times 10^{-4}$	$-4,93 \times 10^{-13}$
L_{LG}	7 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,86 \times 10^{-4}$	$-5,36 \times 10^{-13}$
L_{CM}	2,96 nH	1,1 nH	Normal / A	1	$3,97 \times 10^{-4}$	$4,20 \times 10^{-13}$
f_s	62,250 MHz	500 kHz	Normal / A	1	$-1,02 \times 10^{-16}$	$-5,11 \times 10^{-11}$
$L_H=L_L$	3,08 nH					0,07 nH

Tablo 5.16. 100 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri

Büyüklik X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	100,0013 pF	0,0025 pF	Normal / A	1	$-2,75 \times 10^1$	$-6,87 \times 10^{-14}$
L_{OO}	2 nH	2 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-3,38 \times 10^{-1}$	$-3,90 \times 10^{-10}$
C_{HG2}	24,52 pF	0,25 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	-8,71	$-1,23 \times 10^{-12}$
C_{LG2}	25,88 pF	0,26 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	-9,44	$-1,41 \times 10^{-12}$
L_{HG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-6,44 \times 10^{-3}$	$-1,86 \times 10^{-11}$
L_{LG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-7,77 \times 10^{-3}$	$-2,24 \times 10^{-11}$
L_{CM}	2,34 nH	1,04 nH	Normal / A	1	$4,60 \times 10^{-2}$	$4,78 \times 10^{-11}$
f_s	176,500	500 kHz	Normal / A	1	$-3,63 \times 10^{-17}$	$-1,82 \times 10^{-11}$
$L_H=L_L$	2,51 nH					0,39 nH

Tablo 5.17. 10 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri

Büyüklik X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	9,99975 pF	0,25 aF	Normal / A	1	$1,87 \times 10^1$	$4,67 \times 10^{-15}$
L_{OO}	11 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$8,00 \times 10^{-3}$	$2,31 \times 10^{-11}$
C_{HG2}	18,65 pF	0,19 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-3,92 \times 10^1$	$-4,23 \times 10^{-12}$
C_{LG2}	22,58 pF	0,23 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,94 \times 10^1$	$-2,52 \times 10^{-12}$
L_{HG}	11 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-5,84 \times 10^{-2}$	$-1,69 \times 10^{-10}$
L_{LG}	8 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-4,22 \times 10^{-2}$	$-1,22 \times 10^{-10}$
L_{CM}	2,97 nH	0,71 nH	Normal / A	1	$1,80 \times 10^{-2}$	$1,27 \times 10^{-11}$
f_S	329,250	500 kHz	Normal / A	1	$-5,97 \times 10^{-18}$	$-2,98 \times 10^{-12}$
$L_H=L_L$	0,14 nH					0,21 nH

Tablo 5.18. 1 pF kapasitans standardı için L_H ve L_L belirlenme belirsizlikleri

Büyüklik X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	1,000070 pF	0,025 aF	Normal / A	1	$-9,0 \times 10^2$	$-2,26 \times 10^{-14}$
L_{OO}	1,1 nH	1,1 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-5,51 \times 10^{-3}$	$-3,50 \times 10^{-12}$
C_{HG2}	11,26 pF	0,11 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-2,50 \times 10^3$	$-1,62 \times 10^{-10}$
C_{LG2}	41,93 pF	0,42 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,07 \times 10^2$	$-2,59 \times 10^{-11}$
L_{HG}	18 nH	10 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	-1,92	$-1,11 \times 10^{-08}$
L_{LG}	0 nH	10 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	-1,14	$-6,61 \times 10^{-9}$
L_{CM}	5,65 nH	0,45 nH	Normal / A	1	$8,94 \times 10^{-2}$	$4,00 \times 10^{-11}$
f_S	392,500	500 kHz	Normal / A	1	$-1,71 \times 10^{-16}$	$-8,53 \times 10^{-11}$
$L_H=L_L$	-0,63 nH					12,9 nH

5.6.3. C_{4TP} belirsizliğinin hesaplanması

C_{4TP} kapasitansının belirsizliğini istenilen frekansta hesaplamak için (Denklem 5.43)'de verilen matematiksel model kullanılır.

$$C_{4TP} = \frac{C_0 \cdot \left(1 - \omega^2 \cdot L_{CM} \cdot \left(C_H + C_L + \frac{C_H \cdot C_L}{C_0} \right) \right)}{\left(1 - \omega^2 \cdot L_{CM} \cdot (C_H + C_L) \right) \cdot \left(1 - \omega^2 L_E C_0 \right) + \omega^4 \cdot L_{CM} \cdot L_E \cdot C_H \cdot C_L} \quad (5.43)$$

Tablo 5.19.'da C_{4TP} 'nin hesaplandığı matematiksel modelde yer alan parametreler açıklanmaktadır.

Tablo 5.19. C_{4TP} ifadesinde yer alan parametrelerin açıklanması

ω	Açısal ölçüm frekansı
C_H	Hesaplama frekansında (Denklem 5.16) ile hesaplanan C_H değeri
C_L	Hesaplama frekansında (Denklem 5.17) ile hesaplanan C_L değeri
C_0	Hesaplama frekansında (Denklem 5.14) ile hesaplanan C_0 değeri
L_E	(Denklem 5.18) ile hesaplanan L_E değeri
L_{CM}	(Denklem 5.23) ile hesaplanan L_{CM} değeri

Belirsizlik hesabının yapılabilmesi için C_{4TP} ifadesinin, ifadeyi oluşturan her bir parametreye göre kısmi türevinin alınarak duyarlılık katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Aşağıda C_{4TP} ifadesi için hesaplanan kısmi türev ifadeleri verilmektedir.

$$c_{1-C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial C_{00}} \quad (5.44)$$

$$c_{2_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial L_{00}} \quad (5.45)$$

$$c_{3_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial L_{CM}} \quad (5.46)$$

$$c_{4_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial C_{HG2}} \quad (5.47)$$

$$c_{5_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial C_{LG2}} \quad (5.48)$$

$$c_{6_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial L_{HG}} \quad (5.49)$$

$$c_{7_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial L_{LG}} \quad (5.50)$$

$$c_{8_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial L_H} \quad (5.51)$$

$$c_{9_C_{4TP}} = \frac{\partial C_{4TP}}{\partial L_L} \quad (5.52)$$

Hesaplanan duyarlılık katsayıları (Denklem 5.53)'de yerine konulursa C_{4TP} parametresinin belirlenme belirsizliği hesaplanmış olur.

$$\begin{aligned} u(C_{4TP})^2 = & \dots \\ & c_{1_C_{4TP}}^2 \cdot u(C_{00})^2 + c_{2_C_{4TP}}^2 \cdot u(L_{00})^2 + c_{3_C_{4TP}}^2 \cdot u(L_{CM})^2 + \dots \\ & c_{4_C_{4TP}}^2 \cdot u(C_{HG2})^2 + c_{5_C_{4TP}}^2 \cdot u(C_{LG2})^2 + c_{6_C_{4TP}}^2 \cdot u(L_{HG})^2 + \dots \\ & c_{7_C_{4TP}}^2 \cdot u(L_{LG})^2 + c_{8_C_{4TP}}^2 \cdot u(L_H)^2 + c_{9_C_{4TP}}^2 \cdot u(L_L)^2 \end{aligned} \quad (5.53)$$

(Denklem 5.53)'de yer alan belirsizlik ifadeleri Tablo 5.20.'de açıklanmaktadır.

Tablo 5.20. C_{4TP} belirsizliğinin hesaplanmasında kullanılan belirsizlik bileşenleri

$u_{C_{00}}$	1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan kapasitans belirsizliği
$u_{L_{00}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan L_{00} artık indüktans belirsizliği
$u_{L_{CM}}$	L_{CM} artık indüktansının (Denklem 5.31) ile hesaplanan belirsizliği
$u_{C_{HG2}}$	C_{HG2} artık kapasitörünün 1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan kapasitans belirsizliği
$u_{C_{LG2}}$	C_{LG2} artık kapasitörünün 1kHz frekansında hassas kapasitans köprüsü ölçümlerinden hesaplanan kapasitans belirsizliği
$u_{L_{HG}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan L_{HG} artık indüktans belirsizliği
$u_{L_{LG}}$	Yonekura'nın makalesinden alınan L_{LG} artık indüktans belirsizliği
u_{L_H}	L_H artık indüktansının (Denklem 5.42) ile hesaplanan belirsizliği.
u_{L_L}	L_L artık indüktansının (Denklem 5.42) ile hesaplanan belirsizliği.
$u(C_{4TP})$	Toplam C_{4TP} belirsizliği

Tablo 5.21. 1000 pF için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği

Büyükük X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	1000,067 pF	0,025 pF	Normal / A	1	1,05	$2,63 \times 10^{-14}$
L_{OO}	0,2 nH	0,2 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$4,16 \times 10^{-3}$	$4,80 \times 10^{-13}$
C_{HG2}	27,07 pF	0,27 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$1,28 \times 10^{-2}$	$2,01 \times 10^{-15}$
C_{LG2}	28,41 pF	0,28 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$1,28 \times 10^{-2}$	$2,11 \times 10^{-15}$
L_{HG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$3,72 \times 10^{-8}$	$1,07 \times 10^{-16}$
L_{LG}	7 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$4,09 \times 10^{-8}$	$1,18 \times 10^{-16}$
L_{CM}	2,96 nH	1,1 nH	Normal / A	1	$-3,20 \times 10^{-6}$	$-3,38 \times 10^{-15}$
L_H	3,08 nH	0,07 nH	Normal / A	1	$4,27 \times 10^{-3}$	$3,20 \times 10^{-13}$
L_L	3,08 nH	0,07 nH	Normal / A	1	$4,28 \times 10^{-3}$	$3,20 \times 10^{-13}$
C_{4TP}	1026,56 pF					1,32 pF

Tablo 5.22. 100 pF için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği

Büyükük X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	100,0013 pF	0,0025 pF	Normal / A	1	1,01	$2,52 \times 10^{-15}$
L_{OO}	2 nH	2 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$3,97 \times 10^{-5}$	$4,59 \times 10^{-14}$
C_{HG2}	24,52 pF	0,25 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$9,98 \times 10^{-4}$	$1,41 \times 10^{-16}$
C_{LG2}	25,88 pF	0,26 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$9,98 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-16}$
L_{HG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$2,37 \times 10^{-9}$	$6,84 \times 10^{-18}$
L_{LG}	9 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$2,64 \times 10^{-9}$	$7,62 \times 10^{-18}$
L_{CM}	2,34 nH	1,04 nH	Normal / A	1	$-2,52 \times 10^{-6}$	$-2,62 \times 10^{-15}$
L_H	2,51 nH	0,39 nH	Normal / A	1	$4,95 \times 10^{-5}$	$1,95 \times 10^{-14}$
L_L	2,51 nH	0,39 nH	Normal / A	1	$5,00 \times 10^{-5}$	$1,97 \times 10^{-14}$
C_{4TP}	100,324 pF					0,11 pF

Tablo 5.23. 10 pF için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği

Büyükük X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	Bölen	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	9,99975 pF	0,25 aF	Normal / A	1	1,00	$2,50 \times 10^{-16}$
L_{OO}	11 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$3,95 \times 10^{-7}$	$1,14 \times 10^{-15}$
C_{HG2}	18,65 pF	0,19 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$5,65 \times 10^{-6}$	$6,08 \times 10^{-19}$
C_{LG2}	22,58 pF	0,23 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$5,65 \times 10^{-6}$	$7,36 \times 10^{-19}$
L_{HG}	11 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$7,76 \times 10^{-12}$	$2,24 \times 10^{-20}$
L_{LG}	8 nH	5 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$1,14 \times 10^{-11}$	$3,28 \times 10^{-20}$
L_{CM}	2,97 nH	0,71 nH	Normal / A	1	$-1,67 \times 10^{-6}$	$-1,18 \times 10^{-15}$
L_H	0,14 nH	0,21 nH	Normal / A	1	$1,13 \times 10^{-6}$	$2,37 \times 10^{-16}$
L_L	0,14 nH	0,21 nH	Normal / A	1	$1,29 \times 10^{-6}$	$2,70 \times 10^{-16}$
C_{4TP}	10,0004 pF					0,003 pF

Tablo 5.24. 1 için 10 MHz frekansında C_{4TP} belirlenme belirsizliği

Büyükük X_i	Değer x_i	Standart belirsizlik $u(x_i)$	Olasılık dağılımı / değerlendirme yöntemi (A,B)	çarpma n	Duyarlılık katsayısı c_i	Belirsizlik katkısı $u_i(L_{CM})$
C_{OO}	1,000070 pF	0,025 aF	Normal / A	1	1,00	$2,50 \times 10^{-17}$
L_{OO}	1,1 nH	1,1 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$3,95 \times 10^{-9}$	$2,51 \times 10^{-18}$
C_{HG2}	11,26 pF	0,11 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-2,46 \times 10^{-6}$	$-1,60 \times 10^{-19}$
C_{LG2}	41,93 pF	0,42 pF	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-2,46 \times 10^{-6}$	$-5,96 \times 10^{-19}$
L_{HG}	18 nH	10 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,23 \times 10^{-12}$	$-7,12 \times 10^{-21}$
L_{LG}	0 nH	10 nH	Dikdörtgen / B	$\sqrt{3}$	$-1,71 \times 10^{-11}$	$-9,86 \times 10^{-20}$
L_{CM}	5,65 nH	0,45 nH	Normal / A	1	$-1,87 \times 10^{-6}$	$-8,36 \times 10^{-16}$
L_H	-0,63 nH	12,9 nH	Normal / A	1	$4,79 \times 10^{-8}$	$6,18 \times 10^{-16}$
L_L	-0,63 nH	12,9 nH	Normal / A	1	$1,68 \times 10^{-7}$	$2,17 \times 10^{-15}$
C_{4TP}	0,99710 pF					0,0048 pF

Tablo 5.22., Tablo 5.23. ve Tablo 5.24.'de yalnızca 10 MHz frekansındaki belirsizlik değerleri, 1000 pF, 100 pF, 10 pF ve 1 pF için verilmiştir.

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

20 Hz - 30 MHz frekans aralığında HP16380A hava dielektrikli dört terminal çift kapasitans standartları için yeni bir ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Böylece TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü yüksek frekans kapasitans ve empedans ölçerlerin uluslararası izlenebilirliği kendi geliştirmiş olduğu yöntemle sağlanmıştır. Hakemli dergilerde yapılan yayınlar ve TÜBİTAK UME'nin uluslararası akreditasyonu sonucu gelen uluslararası denetçiler tarafından yapılan incelemeler sonucunda, uluslararası ölçü ve ayarlar bürosu (BIPM) tarafından yayınlanan ülkelerin ölçüm yeteneklerinin yer aldığı kalibrasyon yetenekleri veri tabanında bu sonuçlar yayınlanarak yöntemin uluslararası geçerliliği sağlanmıştır.



Bureau International des Poids et Mesures

Home Key and supplementary comparisons Calibration and Measurement Capabilities - CMCs

[Home](#) > [CMCs Search](#) > [EM search form](#) > [Country list](#) > [CMC information](#)

CMCs - Result of the search

Physics

- [Acoustics, Ultrasound, Vibration](#)
- **[Electricity and Magnetism](#)**
- [Length](#)
- [Mass and related quantities](#)
- [Photometry and Radiometry](#)
- [Ionizing Radiation](#)
- [Thermometry](#)
- [Time and Frequency](#)

Chemistry

- [Chemistry](#)

Traceability to the SI through the BIPM

- [BIPM calibration and measurement services](#)

Calibration and Measurement Capabilities Electricity and Magnetism

In the CMCs uncertainty statements, the notation $Q[a, b]$ stands for the root-sum-square of the terms between brackets: $Q[a, b] = [a^2 + b^2]^{1/2}$

Result of the search

→ **Your selection** : Electricity and Magnetism, Impedance up to the MHz range, Impedance (up to the MHz range), Capacitance, Capacitance and dissipation factor for low loss capacitors

Turkey, UME (TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü)

[Complete CMCs in Electricity and Magnetism for Turkey \(.PDF file\)](#)

Capacitance: low loss capacitor. Standard capacitor: 4-terminal pair standard capacitor, **1 pF to 1000 pF**
Relative expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in mF/F: **0.05 to 62**
Resonance method
Frequency: 1 kHz to 30 MHz
Approved on 06 January 2015
Internal NMI service identifier: UME/50.1
[Uncertainty table](#)

Şekil 6.1. BIPM veri tabanında sonuçların yayınlanması

Tablo 6.1., Tablo 6.2., Tablo 6.3. ve Tablo 6.4.'de değerleri hesaplanmış olan kapasitans standartları tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 6.1. 1000 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri

Frekans	Değer [pF]	Belirsizlik [pF]	Belirsizlik [%]
1 kHz	1000,067	0,050	0,0050
20 Hz	1000,067	0,050	0,0050
50 Hz	1000,067	0,050	0,0050
100 Hz	1000,067	0,050	0,0050
200 Hz	1000,067	0,050	0,0050
400 Hz	1000,067	0,050	0,0050
5 kHz	1000,067	0,050	0,0050
10 kHz	1000,067	0,050	0,0050
20 kHz	1000,067	0,050	0,0050
40 kHz	1000,068	0,050	0,0050
100 kHz	1000,070	0,050	0,0050
200 kHz	1000,077	0,050	0,0050
500 kHz	1000,132	0,050	0,0050
1 MHz	1000,325	0,052	0,0052
2 MHz	1001,100	0,071	0,007
3 MHz	1002,395	0,124	0,012
4 MHz	1004,213	0,21	0,021
5 MHz	1006,561	0,32	0,032
10 MHz	1026,557	1,32	0,13
13 MHz	1045,669	2,31	0,22
15 MHz	1061,711	3,17	0,30
20 MHz	1115,174	6,22	0,56
30 MHz	1302,587	19,0	1,46

Tablo 6.2. 100 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri

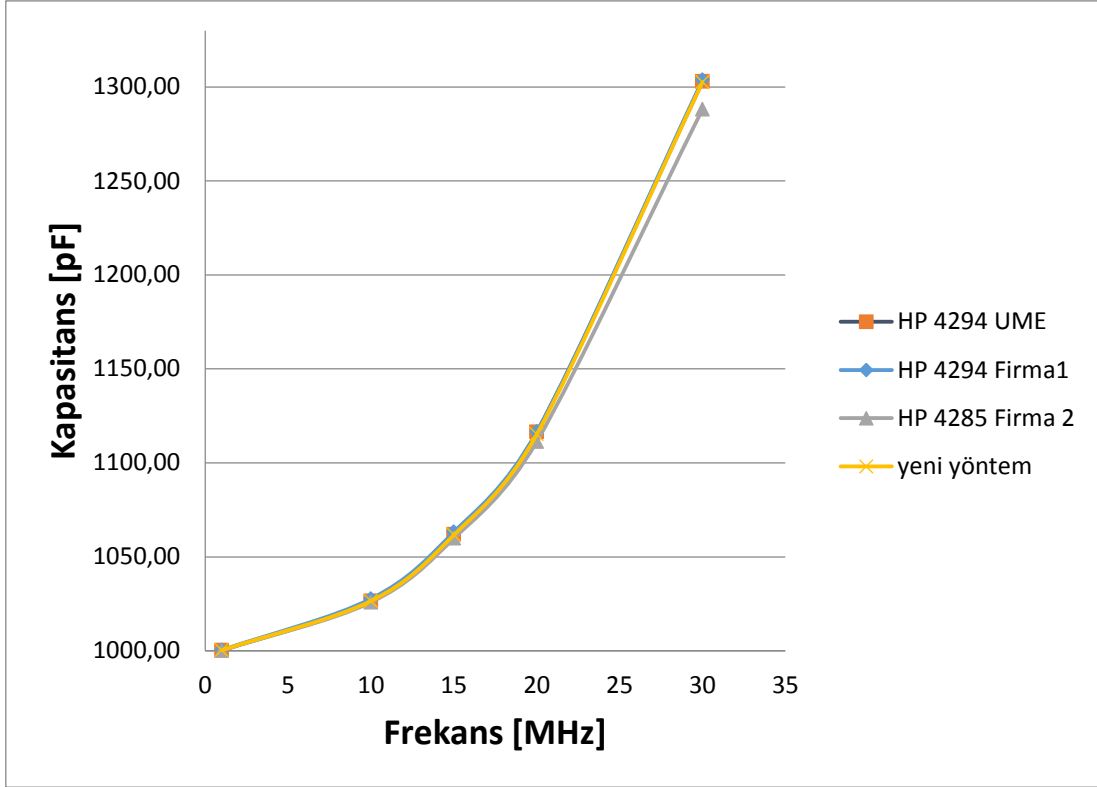
Frekans	Değer [pF]	Belirsizlik [pF]	Belirsizlik [%]
1 kHz	100,0014	0,0050	0,0050
20 Hz	100,0014	0,0050	0,0050
50 Hz	100,0014	0,0050	0,0050
100 Hz	100,0014	0,0050	0,0050
200 Hz	100,0014	0,0050	0,0050
400 Hz	100,0014	0,0050	0,0050
5 kHz	100,0014	0,0050	0,0050
10 kHz	100,0014	0,0050	0,0050
20 kHz	100,0014	0,0050	0,0050
40 kHz	100,0014	0,0050	0,0050
100 kHz	100,0014	0,0050	0,0050
200 kHz	100,0015	0,0050	0,0050
500 kHz	100,0022	0,0050	0,0050
1 MHz	100,0046	0,0051	0,0051
2 MHz	100,0142	0,0066	0,0066
3 MHz	100,0303	0,0108	0,0108
4 MHz	100,0528	0,0178	0,0178
5 MHz	100,0818	0,0272	0,0272
10 MHz	100,3239	0,1075	0,1071
13 MHz	100,5476	0,1823	0,1813
15 MHz	100,7299	0,243	0,242
20 MHz	101,3040	0,437	0,432
30 MHz	102,9810	1,016	0,986

Tablo 6.3. 10 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri

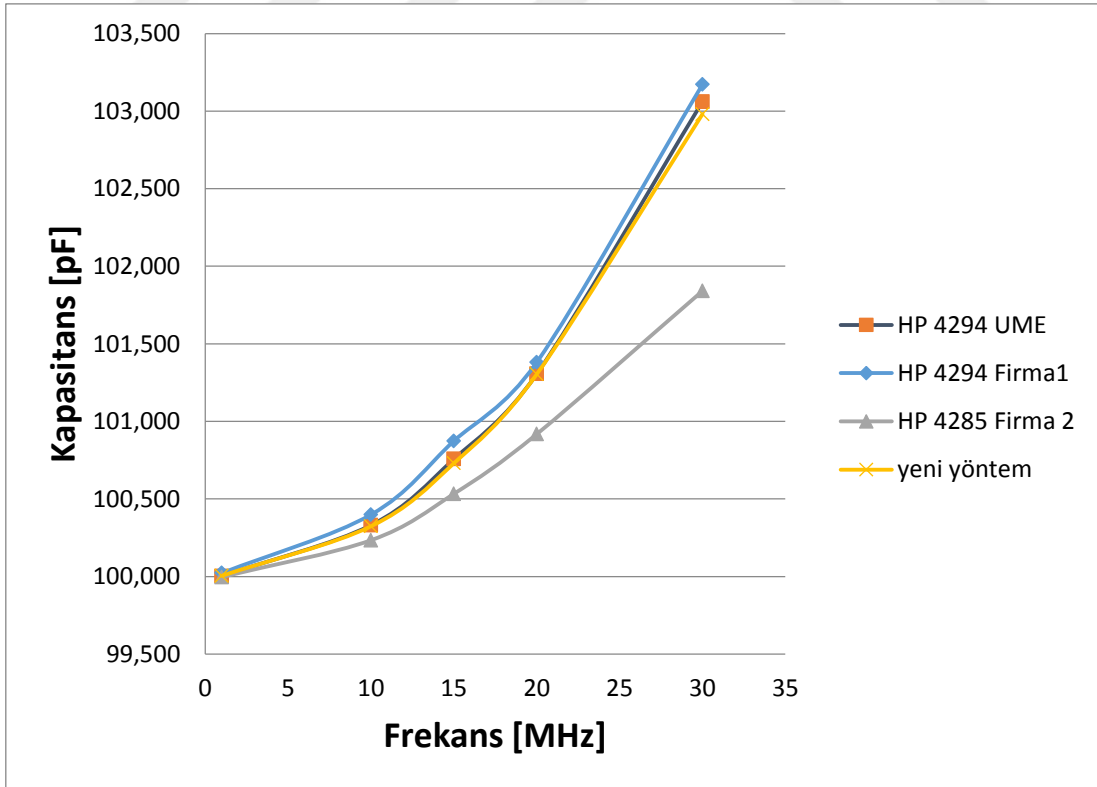
Frekans	Değer [pF]	Belirsizlik [pF]	Belirsizlik [%]
1 kHz	9,999753	0,00050	0,0050
20 Hz	9,999753	0,00050	0,0050
50 Hz	9,999753	0,00050	0,0050
100 Hz	9,999753	0,00050	0,0050
200 Hz	9,999753	0,00050	0,0050
400 Hz	9,999753	0,00050	0,0050
5 kHz	9,999753	0,00050	0,0050
10 kHz	9,999753	0,00050	0,0050
20 kHz	9,999753	0,00050	0,0050
40 kHz	9,999753	0,00050	0,0050
100 kHz	9,999753	0,00050	0,0050
200 kHz	9,999753	0,00050	0,0050
500 kHz	9,999754	0,00050	0,0050
1 MHz	9,999759	0,00050	0,0050
2 MHz	9,999777	0,00052	0,0052
3 MHz	9,9998	0,0006	0,0058
4 MHz	9,9999	0,0007	0,0073
5 MHz	9,9999	0,0010	0,0098
10 MHz	10,000	0,003	0,034
13 MHz	10,001	0,006	0,057
15 MHz	10,001	0,008	0,076
20 MHz	10,002	0,013	0,135
30 MHz	10,005	0,031	0,306

Tablo 6.4. 1 pF için 20Hz 30 MHz aralığında hesaplanan kapasitans değerleri ve belirsizlikleri

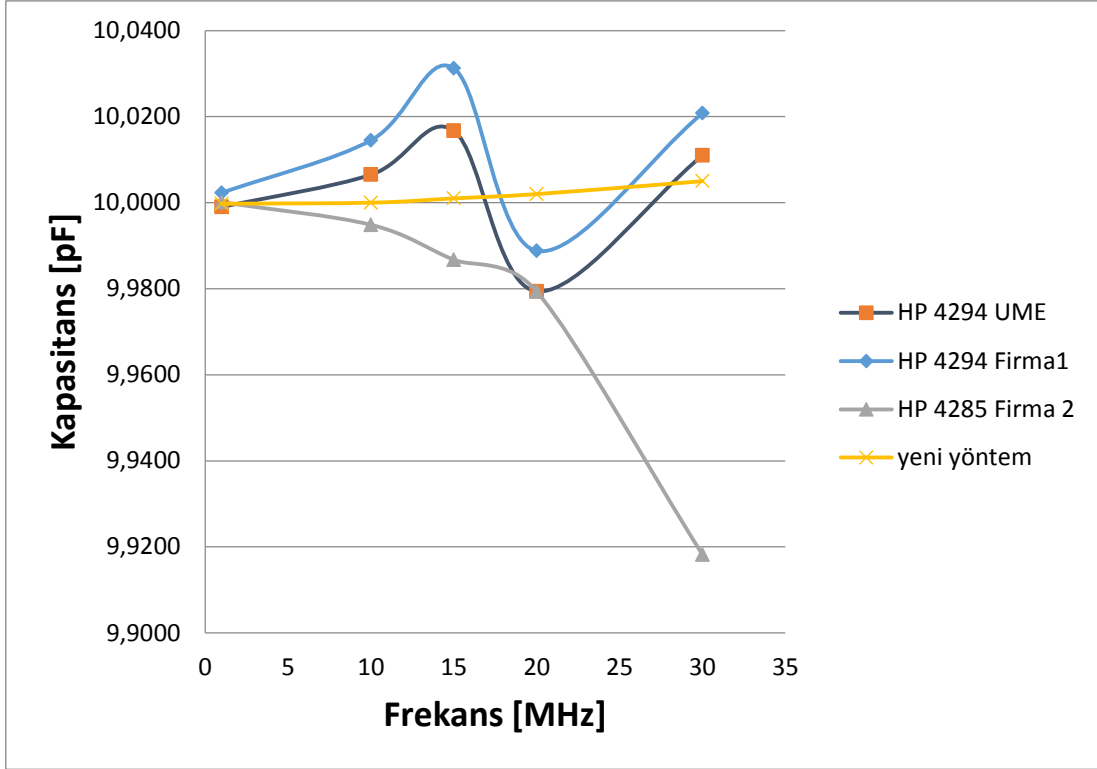
Frekans	Değer [pF]	Belirsizlik [pF]	Belirsizlik [%]
1 kHz	1,000070	5,00E-03	0,00E+00
20 Hz	1,000070	0,000050	0,0050
50 Hz	1,000070	0,000050	0,0050
100 Hz	1,000070	0,000050	0,0050
200 Hz	1,000070	0,000050	0,0050
400 Hz	1,000070	0,000050	0,0050
5 kHz	1,000070	0,000050	0,0050
10 kHz	1,000070	0,000050	0,0050
20 kHz	1,000070	0,000050	0,0050
40 kHz	1,000070	0,000050	0,0050
100 kHz	1,000070	0,000050	0,0050
200 kHz	1,000069	0,000050	0,0050
500 kHz	1,000063	0,000051	0,0051
1 MHz	1,000041	0,000070	0,0070
2 MHz	0,99995	0,00020	0,02003
3 MHz	0,99980	0,00044	0,04390
4 MHz	0,99960	0,00078	0,07767
5 MHz	0,99933	0,00121	0,12114
10 MHz	0,9971	0,0048	0,4818
13 MHz	0,9951	0,0081	0,8106
15 MHz	0,9934	0,0107	1,0752
20 MHz	0,9881	0,0187	1,8894
30 MHz	0,9730	0,0400	4,1065



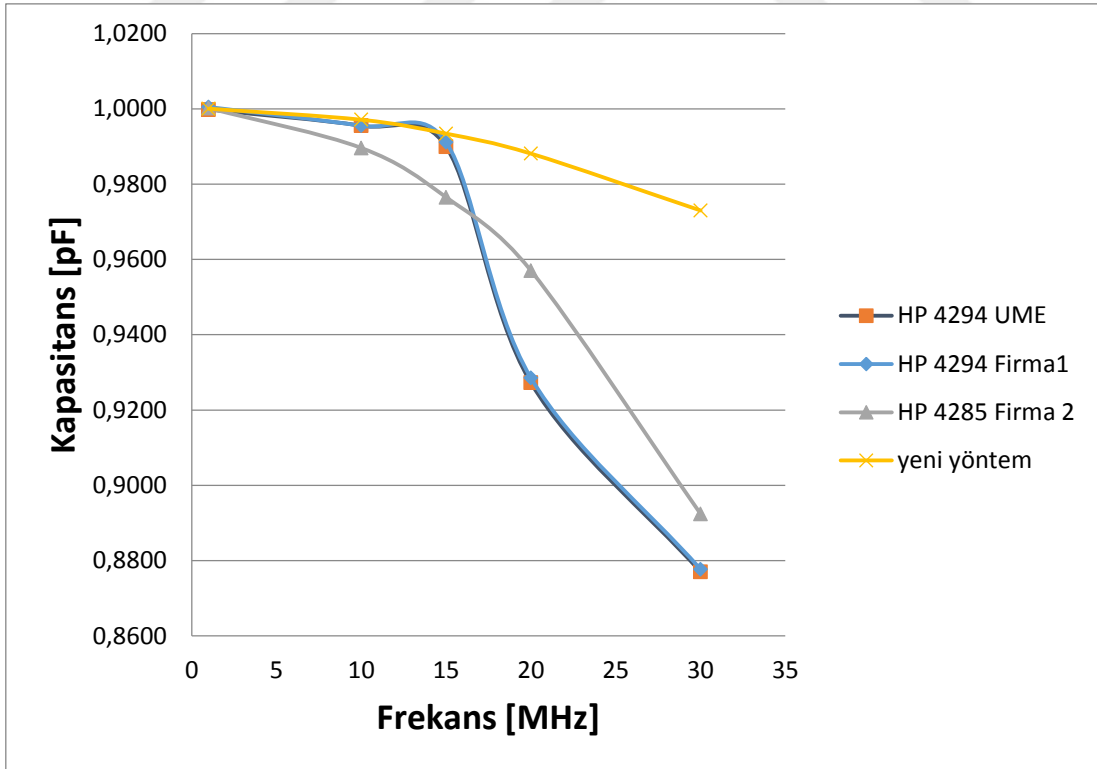
Şekil 6.2. 1000 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması



Şekil 6.3. 100 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması



Şekil 6.4. 10 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması



Şekil 6.5. 1 pF hesaplama sonucunun çeşitli RLC ölçümleri ile karşılaştırılması

Şekil 6.2., Şekil 6.3., Şekil 6.4. ve Şekil 6.5.'de geliştirilen yöntem ile elde edilen sonuçlar, iki adet HP4294 ve bir adet HP4285 RLC metre ile alınan sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.'de 1000 pF ve 100 pF sonuçları 30 MHz frekansına kadar birbiri ile aynı olduğu görülmektedir. Şekil 6.4. ve Şekil 6.5.'de 10 pF ve 1 pF sonuçları 15 MHz frekansına kadar tutarlıdır fakat bu frekansın üzerinde sonuçlar arası tutarsızlık mevcuttur. Ticari olarak satılan kapasitans standartlarının rezonans frekansları 60 MHz'ler mertebesinde olduklarından bu yöntem ile daha yüksek frekanslara ve daha düşük belirsizliklere inmek mümkün değildir. Bu nedenle yeni tip yüksek frekanslarda çalışabilen kapasitans standartlarına ihtiyacı vardır. Yöntemin frekans bağımlılığı yoktur. Bu çalışmada kapasitans standartlarının kayıp faktörleri üzerine çalışma yapılmamıştır bu konu üzerine ayrıca çalışma yapılması yararlı olacaktır. Çeşitli ülkelerde geliştirilen farklı yöntemler vardır, fakat bu yöntemler birbirleri ile karşılaştırılmamıştır bu nedenle bu konuda uluslararası karşılaştırma yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] «Empedans Metrolojisi Eğitim Dokümanı,» TÜBİTAK UME Empedans Laboratuvarı, Gebze Kocaeli, 2012.
- [2] K. v. Klitzing, «The quantized Hall effect,» *Reviews of Modern Physics*, cilt 58, pp. 519-531, 1986.
- [3] B. Jeckelmann ve B. Jeanneret, «The quantum Hall effect as an electrical resistance Standard,» *IOP Reports on Progress in Physics*, cilt 64, no. 12, pp. 1603-16055, 2001.
- [4] A. A. Shakil ve B. P. Kibble, «A Universal Geometry for Calculable Frequency-Response Coefficient of LCR Standards and New 10-MHz Resistance and 1.6-MHz Quadrature-Bridge Systems,» *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, cilt 56, no. 2, pp. 221-225, 2007.
- [5] L. Callegaro, V. D'Elia ve B. Trinchera, «Calibration of Capacitance Standards With a Quadrature Bridge,» %1 içinde *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, Lisbon, Portugal, September 6–11,2009.
- [6] J. R. Juroshek ve G. M. Free, «Measurements of the Characteristic Impedance of Coaxial Air Line Standards,» *IEEE Transaction On Microwave Theory and Techniques*, cilt 42, no. 2, pp. 186-191, 1994.
- [7] R. Cutkosky, «Four-terminal-pair networks as precision admittance and impedance standards,» *IEEE Transactions on Communication and Electronics*, no. 70, pp. 19-22, 1964.
- [8] R. Jones, «Evaluation of Three-Terminal and Four-Terminal Pair Capacitors at High Frequencies,» NBS Technical Note 1024, September 1980.

- [9] T. Yonekura ve T. Wakasugi, «Frequency characteristics of four-terminal-pair air-dielectric capacitors,» %1 içinde *National Conference of Standard Laboratories (NCSL) Workshop and Symp.*, Washington, DC, Aug., Session 7A-2 pp 471–83 1990.
- [10] K. Suzuki, «A new universal calibration method for four-terminal-pair admittance standards,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, cilt 40, no. 2, pp. 420-422, 1991.
- [11] S. Awan, B. P. Kibble, I. Robinson ve S. Giblin, «A new four terminal-pair bridge for traceable impedance measurements at frequencies up to 1 MHz,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, cilt 50, no. 2, pp. 282-285, 2001.
- [12] L. Callegaro ve F. Durbiano, «Four-terminal-pair impedances and scattering parameters,» *IOP Measurement Science and Technology*, cilt 14, pp. 523-529, 2003.
- [13] S. A. Awan, L. Callegaro ve B. P. Kibble, «Resonance frequency of four-terminal-pair air-dielectric capacitance standards and closing the metrological impedance triangle,» *IOP Measurement Science and Technology*, cilt 15, pp. 969-972, 2004.
- [14] G. S. OHM, Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet, T. H. Riemann., 1827.
- [15] O. Heaviside, The Electrician p.212,223, July 1886.
- [16] A. Kennely, «Impedance,» *AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS*, cilt X, pp. 172-232, 1893.
- [17] A. M. L. D. G. THOMPSON, «A New Theorem in Electrostatics and its Application to Calculable Standards of Capacitance,» *Nature*, cilt 177, p. 888, 177 1956.
- [18] J. C. f. G. i. M. (JCGM/WG, "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement," BIPM, Paris, 2008.
- [19] C. F. Dietrich, Uncertainty, calibration and probability : the statistics of scientific and industrial measurement, Bristol : Adam Hilger, 2nd ed. 1991.
- [20] P. D. M, Microwave Engineering, Canada: Wiley, 1998.

EKLER

EK A: Geliştirilen MATLAB kodu

```
close all
```

```
clear all force
```

```
pkg load symbolic
```

```
format long
```

```
clc
```

```
Kapasitans_Degeri='1000pF';
```

```
Belirsizlik_Hesaplama='true';
```

```
if strcmp (Kapasitans_Degeri,'1000pF')
```

```
    C00_LW=1000.0671;    %pF
```

```
    CHG_LW=34.072;      %pF
```

```
    CLG_LW=35.408;      %pF
```

```
    UC00_LW=50;         %ppm
```

```
    UCHG_LW=1;         % %
```

```
    UCLG_LW=1;         % %
```

```
    Uf_paralel=500e3;   % Hz
```

```
Uf_seri=500e3;    % Hz
```

```
endif
```

```
if strcmp (Kapasitans_Degeri,'100pF')
```

```
    C00_LW=100.00139;    %pF
```

```
    CHG_LW=31.524;    %pF
```

```
    CLG_LW=32.876;    %pF
```

```
    UC00_LW=50;    %ppm
```

```
    UCHG_LW=1;    % %
```

```
    UCLG_LW=1;    % %
```

```
    Uf_paralel=500e3;    % Hz
```

```
    Uf_seri=500e3;    % Hz
```

```
endif
```

```
if strcmp (Kapasitans_Degeri,'10pF')
```

```
    C00_LW=9.9997529;    %pF
```

```
    CHG_LW=25.649;    %pF
```

```
    CLG_LW=29.582;    %pF
```

```
    UC00_LW=50;    %ppm
```

```
    UCHG_LW=1;    % %
```

```
    UCLG_LW=1;    % %
```

```
    Uf_paralel=500e3;    % Hz
```

```
    Uf_seri=500e3;    % Hz
```

```
endif
```

```
if strcmp (Kapasitans_Degeri,'1pF')
```

```
C00_LW=1.0000704;
```

```
CHG_LW=18.256;    %pF
```

```
CLG_LW=48.927;    %pF
```

```
UC00_LW=50;      %ppm
```

```
UCHG_LW=1;       % %
```

```
UCLG_LW=1;       % %
```

```
Uf_paralel=500e3; % Hz
```

```
Uf_seri=500e3;   % Hz
```

```
endif
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [S_matris frekans]=read_and_convert_S_file(filename)
```

```
%% Reading
```

```
fid = fopen(filename,'r');
```

```
f = textscan(fid,'%s','Delimiter','\n');
```

```
txt = f{:};
```

```
[satir sutun]=size(txt);
```

```
text_buffer='';
```

```
%% manipulation
```

```
for i=1:satir
```

```
txt(i) = strrep(txt(i), ',', '.');
```

```
text_buffer=strcat(text_buffer,10,txt(i));
```

```

end
fclose(fid);

%%writing
text_buffer = text_buffer{:};
fid = fopen(filename,'w');
fprintf(fid,text_buffer)
fclose(fid);
S_matris_read = importdata(filename);

[satir sutun]=size(S_matris_read);

for i=1:satir
S_matris(i)=0;
for k=1:sutun/2
S_matris(i) = (S_matris_read(i,2*k)*exp(j*S_matris_read(i,2*k+1)*pi/180))+S_matris(i);
end
S_matris(i)=S_matris(i)/((sutun-1)/2);
frekans(i)=S_matris_read(i,1);
end
endfunction

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Dosyalaradan S parametreleri okunarak matrislere atılıyor
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if strcmp (Kapasitans_Degeri,'1000pF')
Dosya_adi='1000pF';
endif

```

```
if strcmp (Kapasitans_Degeri,'100pF')
Dosya_adi='100pF';
endif
```

```
if strcmp (Kapasitans_Degeri,'10pF')
Dosya_adi='10pF';
endif
```

```
if strcmp (Kapasitans_Degeri,'1pF')
Dosya_adi='1pF';
endif
```

```
[S11 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S11.txt'));
[S12 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S12.txt'));
[S13 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S13.txt'));
[S14 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S14.txt'));
```

```
[S21]=S12;
[S22 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S22.txt'));
[S23 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S23.txt'));
[S24 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S24.txt'));
```

```
[S31]=S13;
[S32]=S23;
[S33 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S33.txt'));
[S34 frekans]=read_and_convert_S_file(strcat(Dosya_adi,'_S34.txt'));
```

```
[S41]=S14;
[S42]=S24;
```



```

Z=50*inv(U-S)*(U+S);
Y4TP(i)=Z(3,1)/(Z(2,1)*Z(3,4)-Z(3,1)*Z(2,4));
Z4TP(i)=1/Y4TP(i);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

empedans(i)=imag(Z4TP(i));
admitans(i)=imag(Y4TP(i));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

inceleme1(i)=imag(Z(1,2));
inceleme2(i)=imag(Z(3,4));

end
f_inceleme=frekans;

%figure
%plot(f_inceleme,inceleme1)
%grid on

%figure
%plot(f_inceleme,inceleme2)
%grid on

%burada admitans polar forma çevriliyor
faz=angle(Y4TP);
magnitute=abs(Y4TP);
% seri rezonans admitans'in max noktadı olarak bulunuyor
[M,f_seri_rezonans]=max(magnitute);

```


%% 1 pF degeri için toprak kapasitanslarının etkisi daha büyük olduğundan

% rezonans frekansi yukarı bolgede aranmaktadır

if strcmp (Kapasitans_Degeri,'1pF')

[M,f_seri_rezonans]=max(magnitute(300:end));

f_seri_rezonans=f_seri_rezonans+300;

endif

x_marker_2=frekans(f_seri_rezonans);

y_marker_2=admitans(f_seri_rezonans);

y_marker_Y=M;

y_marker_F=faz(f_seri_rezonans);

x_marker_11=frekans(f_seri_rezonans);

y_marker_11=empedans(f_seri_rezonans);

f_seri_rezonans=frekans(f_seri_rezonans)

%% admitans magnitute ve faz olarak grafiğe aktarılıyor

figure (1)

clf()

subplot(2,1,1)

plot(frekans,magnitute,x_marker_2,y_marker_Y,'*r')

grid on

title([Dosya_adi,' Admitans Magnitute Grafigi Seri Rezonans
Frekansi=',num2str(x_marker_2),'MHz'])

xlabel('frekans [MHz]');

ylabel('Sanal Admitans [S]');

```

subplot(2,1,2)

plot(frekans,faz,x_marker_2,y_marker_F,'*r')

grid on

title([Dosya_adi,' Admitans Faz Grafigi Seri Rezonans
Frekansi=',num2str(x_marker_2),'MHz'])

xlabel('frekans [MHz]');

ylabel('Faz [rad]');

print figure(1) _admitans_faz_grafigi.jpg

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% admitans polar olarak grafiğe aktarılıyor
%figure
%subplot(2,1,1)
%polar(faz,magnitute)
%grid on

% empedans polar forma çevriliyor
faz=angle(Z4TP);
magnitute=abs(Z4TP);

%% Paralel rezonans Empedans matrisinin max noktası olarak bulunuyor
[M,f_paralel_rezonans]=max(magnitute);

x_marker_1=frekans(f_paralel_rezonans);
y_marker_1=empedans(f_paralel_rezonans);

```

```

y_marker_Z=M;
y_marker_F=faz(f_paralel_rezonans);

x_marker_22=frekans(f_paralel_rezonans);
y_marker_22=admitans(f_paralel_rezonans);

f_paralel_rezonans=frekans(f_paralel_rezonans)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Empedans polar formda grafiğe aktarılıyor
%subplot(2,1,2)
%polar(faz,magnitute)
%grid on

% Empedans magnitute ve faz olarak grafiğe aktarılıyor
figure (2)
clf ()

subplot(2,1,1)
plot(frekans,magnitute,x_marker_1,y_marker_Z,'r*')
grid on
title([Dosya_adi,' Empedans Magnitute Grafigi Paralel Rezonans
Frekansi=',num2str(x_marker_1),'MHz'])
xlabel('frekans [MHz]');
ylabel('Sanal Empedans [OHM]');

subplot(2,1,2)
plot(frekans,faz,x_marker_1,y_marker_F,'r*')

```

```

grid on

title(['Dosya_adi,' Empedans Faz Grafigi Paralel Rezonans
Frekansi=',num2str(x_marker_1),'MHz'])

xlabel('frekans [MHz]');

ylabel('Faz [rad]');

print figure(2) _empedans_faz_grafigi.jpg

```

```

figure (3)
clf()

subplot(2,1,1)
plot(frekans,empedans,x_marker_1,y_marker_1,'*r',x_marker_11,y_marker_11,'*r')
grid on
%title(['Empedans Grafigi Rezonans=',num2str(seri_rezonans_frekuensi),'MHz'])
title(['Dosya_adi,' Empedans Grafigi Paralel Rezonans Frekansi=',num2str(x_marker_1),'MHz
',' Seri Rezonans Frekansi=',num2str(x_marker_2),'MHz'])
xlabel('frekans [MHz]');
ylabel('Sanal Empedans [OHM]');

subplot(2,1,2)
plot(frekans,admitans,x_marker_2,y_marker_2,'*r',x_marker_22,y_marker_22,'*r')
grid on
title(['Dosya_adi,' Admitans Grafigi Paralel Rezonans Frekansi=',num2str(x_marker_1),'MHz
',' Seri Rezonans Frekansi=',num2str(x_marker_2),'MHz'])
xlabel('frekans [MHz]');
ylabel('Sanal Admitans [S]');

```

```
print figure(3) _empedans_admitans_grafigi.jpg
```

```
f_paralel_rezonans=x_marker_1;
```

```
f_seri_rezonans=x_marker_2;
```

```
if strcmp (Belirsizlik_Hesaplama,'true')
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%% Bu kısımdan sonrası belirsizlik hesabı ve değerlerin bulunması
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
syms C4TP C0 C0_ C00 C12 L00 CH CHG2 CL CLG2 LH LHG LL LLG L_CM LE w f
```

```
syms u_LCM u_C00 u_L00 u_CHG2 u_CLG2 u_LHG u_LLG u_f_paralel_rezonans
```

```
syms u_LH u_LL C1_LH C2_LH C3_LH C4_LH C5_LH C6_LH C7_LH u_LCM C8_LH
```

```
syms u_f_seri_rezonans A B
```

```
syms u_C4TP
```

```
w=2*pi*f;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%Bu kısım yüksek frekans kapasitans'ın belirsizliğini içermektedir
```

```
clc
```

```
dt=datestr(now,'mmmm dd, yyyy HH:MM:SS.FFF AM')
```

```
paralel_rezonans=f_paralel_rezonans
```

```
seri_rezonans=f_seri_rezonans
```

```

if paralel_rezonans<1000
    paralel_rezonans=paralel_rezonans*1e6;
    seri_rezonans=seri_rezonans*1e6;
endif

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

C0=C00/(1-w^2*L00*C00);
C12=-w^2*L_CM*CH*CL/(1-w^2*L_CM*(CH+CL));

C0=C0+C12;

CH=CHG2/(1-w^2*LHG*CHG2);

CL=CLG2/(1-w^2*LLG*CLG2);
LE=(1+CH/C0)*LH+(1+CL/C0)*LL;

C4TP=C0/(1-w^2*LE*C0);

if strcmp (Belirsizlik_Hesaplama,'true')

C1_C4TP=diff(C4TP,C00);
C2_C4TP=diff(C4TP,L00);
C3_C4TP=diff(C4TP,CHG2);
C4_C4TP=diff(C4TP,CLG2);
C5_C4TP=diff(C4TP,LHG);
C6_C4TP=diff(C4TP,LLG);
C7_C4TP=diff(C4TP,L_CM);
C8_C4TP=diff(C4TP,LH);

```

```
C9_C4TP=diff(C4TP,LL);
```

```
endif
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% LCM'nin belirsizliğinin hesaplanması %%
```

```
LCM_hesap=1/(w^2*(CH+CL+(CH*CL)/CO_));
```

```
if strcmp (Belirsizlik_Hesaplama,'true')
```

```
C1_LCM=diff(LCM_hesap,C00);
```

```
C2_LCM=diff(LCM_hesap,L00);
```

```
C3_LCM=diff(LCM_hesap,CHG2);
```

```
C4_LCM=diff(LCM_hesap,CLG2);
```

```
C5_LCM=diff(LCM_hesap,LHG);
```

```
C6_LCM=diff(LCM_hesap,LLG);
```

```
C7_LCM=diff(LCM_hesap,f);
```

```
endif
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% LCM'nin belirsizliğinin hesaplanması %%
```

```
A=1-w^2*L_CM*(CH+CL);
```

```
B=w^4*L_CM*CH*CL;
```

```
LE_hesap=A/(w^2*CO_*A-B);
```

```
LH=LE_hesap/(2+(CH+CL)/CO_);
```

```
if strcmp (Belirsizlik_Hesaplama,'true')
```

```
C1_LH=diff(LH,C00);
```

```
C2_LH=diff(LH,L00);
```

```
C3_LH=diff(LH,CHG2);
```

```
C4_LH=diff(LH,CLG2);
```

```
C5_LH=diff(LH,LHG);
```

```
C6_LH=diff(LH,LLG);
```

```
C7_LH=diff(LH,L_CM);
```

```
C8_LH=diff(LH,f);
```

```
endif
```

```
f_paralel_rezonans=paralel_rezonans; % 1000 pF Birimi MHz
```

```
f_seri_rezonans=seri_rezonans; % Birimi MHz
```

```
C00=C00_LW*1e-12;
```

```
CHG=CHG_LW*1e-12;
```

```
CLG=CLG_LW*1e-12;
```

```
u_C00=UC00_LW;
```

```
u_CHG2=UCHG_LW;
```

```
u_CLG2=UCLG_LW;
```

```
u_f_paralel_rezonans=Uf_paralel;
```

```
u_f_seri_rezonans=Uf_seri;
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
CHG1=7e-12;
```

```
CLG1=7e-12;
```

```
CHG2=CHG-CHG1;
```

```
CLG2=CLG-CLG1;
```

```
u_C00=u_C00*C00*1e-6/2;
```

```
u_CHG2=(u_CHG2*CHG2*1e-2)/sqrt(3);
```

```
u_CLG2=(u_CLG2*CLG2*1e-2)/sqrt(3);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% 1000 pF için gerekli değerler YONEKURANIN MAKALESİNDEN ELDE EDİLEN DEĞERLER %%
```

```
if( (800e-12<C00) && (C00<1200e-12))
```

```
L00=0.2e-9;
```

```
LHG=9e-9;
```

```
LLG=7e-9;
```

```
u_L00=0.2e-9/sqrt(3);      % (Dikdörtgensel Dağılım)
```

```
u_LHG=5e-9/sqrt(3);      % (Dikdörtgensel Dağılım)
```

```
u_LLГ=5e-9/sqrt(3);      % (Dikdörtgensel Dağılım)
```

```
a='1000 pF'
```

```
end
```


%%% 100 pF için gerekli değerler YONEKURANIN MAKALESİNDEN ELDE EDİLEN DEĞERLER
 %%%%

if((0.8e-12<C00) && (C00<1.2e-12))

L00=1.1e-9;

LHG=18e-9;

LLG=0e-9;

u_L00=1.1e-9/sqrt(3); % (Dikdörtgensel Dağılım)

u_LHG=10e-9/sqrt(3); % (Dikdörtgensel Dağılım)

u_LLG=10e-9/sqrt(3); % (Dikdörtgensel Dağılım)

a='1 pF'

end

%%%

%%paralel rezonans

f=f_paralel_rezonans;

L_CM_deger=function_handle(LCM_hesap);

L_CM_deger=double(L_CM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, f_paralel_rezonans))

if strcmp (Belirsizlik_Hesaplama,'true')

C1_LCM_deger=function_handle(C1_LCM);

C2_LCM_deger=function_handle(C2_LCM);

C3_LCM_deger=function_handle(C3_LCM);

C4_LCM_deger=function_handle(C4_LCM);

C5_LCM_deger=function_handle(C5_LCM);

C6_LCM_deger=function_handle(C6_LCM);

```
C7_LCM_deger=function_handle(C7_LCM);
```

```
    u_LCM = sqrt( double(C1_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans))^2*u_C00^2+...
```

```
        double(C2_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans))^2*u_L00^2+...
```

```
        double(C3_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans))^2*u_CHG2^2+...
```

```
        double(C4_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans))^2*u_CLG2^2+...
```

```
        double(C5_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans))^2*u_LHG^2+...
```

```
        double(C6_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans))^2*u_LLG^2+...
```

```
        double(C7_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans))^2*u_f_paralel_rezonans^2);
```

```
Sonuc_C_LCM(1,1)=double(C1_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans));
```

```
Sonuc_C_LCM(2,1)=double(C2_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans));
```

```
Sonuc_C_LCM(3,1)=double(C3_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans));
```

```
Sonuc_C_LCM(4,1)=double(C4_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans));
```

```
Sonuc_C_LCM(5,1)=double(C5_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans));
```

```
Sonuc_C_LCM(6,1)=double(C6_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans));
```

```
Sonuc_C_LCM(7,1)=double(C7_LCM_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG,
f_paralel_rezonans));
```

```
Sonuc_C_LCM(8,1)=u_LCM;
```

```
endif
```

```
%%seri rezonans
```

```
LH_deger=function_handle(LH);
```

```
LH_deger=double(LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans))
```

```
LL_deger=LH_deger;
```

```
if strcmp (Belirsizlik_Hesaplama,'true')
```

```
C1_LH_deger=function_handle(C1_LH);
```

```
C2_LH_deger=function_handle(C2_LH);
```

```
C3_LH_deger=function_handle(C3_LH);
```

```
C4_LH_deger=function_handle(C4_LH);
```

```
C5_LH_deger=function_handle(C5_LH);
```

```
C6_LH_deger=function_handle(C6_LH);
```

```
C7_LH_deger=function_handle(C7_LH);
```

```
C8_LH_deger=function_handle(C8_LH);
```

```
C1_LH_deger=double(C1_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans));
```

```
C2_LH_deger=double(C2_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans));
```

```
C3_LH_deger=double(C3_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans));
```

```
C4_LH_deger=double(C4_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans));
```

```
C5_LH_deger=double(C5_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans));
```

```
C6_LH_deger=double(C6_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans));
```

```
C7_LH_deger=double(C7_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,  
f_seri_rezonans));
```

```
C8_LH_deger=double(C8_LH_deger(C00, CHG2, CLG2, L00, LHG, LLG, L_CM_deger,
f_seri_rezonans));
```

```
u_LH = sqrt( C1_LH_deger^2*u_C00^2+...
             C2_LH_deger^2*u_L00^2+...
             C3_LH_deger^2*u_CHG2^2+...
             C4_LH_deger^2*u_CLG2^2+...
             C5_LH_deger^2*u_LHG^2+...
             C6_LH_deger^2*u_LL^2+...
             C7_LH_deger^2*u_LCM^2+...
             C8_LH_deger^2*u_f_seri_rezonans^2);
```

```
u_LL=u_LH;
```

```
Sonuc_C_LH(1,1)=C1_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(2,1)=C2_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(3,1)=C3_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(4,1)=C4_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(5,1)=C5_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(6,1)=C6_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(7,1)=C7_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(8,1)=C8_LH_deger;
```

```
Sonuc_C_LH(9,1)=u_LH;
```

```
endif
```

```
frekans=[1e3 20 50 100 200 400 5e3 10e3 20e3 40e3 100e3 200e3 500e3 1e6 2e6 3e6 4e6
5e6 10e6 13e6 15e6 20e6 30e6];
```

```

Sonuc(1,1)=frekans(1,1);
Sonuc(1,2)=C00*1e12;
Sonuc(1,3)=u_C00*2*100/C00;

```

```

C4TP_deger=function_handle(C4TP);

```

```

for k=2:1:length(frekans)

```

```

    f=frekans(1,k);
    Sonuc(k,1)=f;

```

```

    CH_deger=function_handle(CH);
    CH_deger(CHG2, LHG, f);

```

```

    CL_deger=function_handle(CL);
    CL_deger(CLG2, LLG, f);

```

```

    Sonuc(k,2)=C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CHG2, LHG, f),
    CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f)*1e12;

```

```

    if strcmp (Belirsizlik_Hesaplama,'true')

```

```

        C1_C4TP_deger=function_handle(C1_C4TP);
        C2_C4TP_deger=function_handle(C2_C4TP);
        C3_C4TP_deger=function_handle(C3_C4TP);
        C4_C4TP_deger=function_handle(C4_C4TP);

```

C5_C4TP_deger=function_handle(C5_C4TP);

C6_C4TP_deger=function_handle(C6_C4TP);

C7_C4TP_deger=function_handle(C7_C4TP);

C8_C4TP_deger=function_handle(C8_C4TP);

C9_C4TP_deger=function_handle(C9_C4TP);

C1_C4TP_f = double(C1_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C2_C4TP_f = double(C2_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C3_C4TP_f = double(C3_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C4_C4TP_f = double(C4_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C5_C4TP_f = double(C5_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C6_C4TP_f = double(C6_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C7_C4TP_f = double(C7_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C8_C4TP_f = double(C8_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

C9_C4TP_f = double(C9_C4TP_deger(C00, CH_deger(CHG2, LHG, f), CHG2, CL_deger(CLG2, LLG, f), CLG2, L00, LH_deger, LHG, LL_deger, LLG, L_CM_deger, f));

Sonuc(k,3) = 2*sqrt(C1_C4TP_f^2*u_C00^2+...

C2_C4TP_f^2*u_L00^2+...

C3_C4TP_f^2*u_CHG2^2+...


```

C4_C4TP_f^2*u_CLG^2+...
C5_C4TP_f^2*u_LHG^2+...
C6_C4TP_f^2*u_LL^2+...
C7_C4TP_f^2*u_LCM^2+...
C8_C4TP_f^2*u_LH^2+...
C9_C4TP_f^2*u_LL^2);

```

```

if k==19

```

```

    Sonuc_C_C4TP(1,1)=C1_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(2,1)=C2_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(3,1)=C3_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(4,1)=C4_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(5,1)=C5_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(6,1)=C6_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(7,1)=C7_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(8,1)=C8_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(9,1)=C9_C4TP_f;
    Sonuc_C_C4TP(10,1)=Sonuc(k,3);
    Sonuc_C_C4TP(11,1)=Sonuc(k,2)
endif

```

```

endif

```

```

Sonuc(k,4) =Sonuc(k,3) *100*1e12 /Sonuc(k,2);

```

```

end

```

```

dt=datestr(now,'mmmm dd, yyyy HH:MM:SS.FFF AM')

```

```

zaman_etiketi=datestr(now)
zaman_etiketi=strrep(zaman_etiketi, '-', '_')
zaman_etiketi=strrep(zaman_etiketi, ':', '_')

Sonuc;

Dosya_adi=strcat('Sonuc_',Dosya_adi);
Dosya_adi=strcat(Dosya_adi, '_');
Dosya_adi=strcat(Dosya_adi,zaman_etiketi);
yazma_dosya_adi=strcat(Dosya_adi, '.txt');

fileID = fopen(yazma_dosya_adi, 'w');
fprintf(fileID, '%s\r\n', dt);

fprintf(fileID, 'f_seri_rezonans %e\r\n', f_seri_rezonans);
fprintf(fileID, 'f_paralel_rezonans %e\r\n', f_paralel_rezonans);

fprintf(fileID, 'LCM %e\r\n', L_CM_deger);
fprintf(fileID, 'C1 LCM %e\t u_C00 %e\r\n', Sonuc_C_LCM(1,1), u_C00);
fprintf(fileID, 'C2 LCM %e\t u_L00 %e\r\n', Sonuc_C_LCM(2,1), u_L00);
fprintf(fileID, 'C3 LCM %e\t u_CHG2 %e\r\n', Sonuc_C_LCM(3,1), u_CHG2);
fprintf(fileID, 'C4 LCM %e\t u_CLG2 %e\r\n', Sonuc_C_LCM(4,1), u_CLG2);
fprintf(fileID, 'C5 LCM %e\t u_LHG %e\r\n', Sonuc_C_LCM(5,1), u_LHG);
fprintf(fileID, 'C6 LCM %e\t u_LLГ %e\r\n', Sonuc_C_LCM(6,1), u_LLГ);
fprintf(fileID, 'C7 LCM %e\t u_f_p %e\r\n', Sonuc_C_LCM(7,1), u_f_paralel_rezonans);
fprintf(fileID, 'Belirsizlik LCM %e\r\n', Sonuc_C_LCM(8,1));

fprintf(fileID, 'LH %e\r\n', LH_deger);

```

```

fprintf(fileID,'C1 LH %e\t u_C00 %e\r\n',Sonuc_C_LH(1,1),u_C00);
fprintf(fileID,'C2 LH %e\t u_L00 %e\r\n',Sonuc_C_LH(2,1),u_L00);
fprintf(fileID,'C3 LH %e\t u_CHG2 %e\r\n',Sonuc_C_LH(3,1),u_CHG2);
fprintf(fileID,'C4 LH %e\t u_CLG2 %e\r\n',Sonuc_C_LH(4,1),u_CLG2);
fprintf(fileID,'C5 LH %e\t u_LHG %e\r\n',Sonuc_C_LH(5,1),u_LHG);
fprintf(fileID,'C6 LH %e\t u_LLG %e\r\n',Sonuc_C_LH(6,1),u_LLG);
fprintf(fileID,'C7 LH %e\t u_LCM %e\r\n',Sonuc_C_LH(7,1),u_LCM);
fprintf(fileID,'C8 LH %e\t u_f_s %e\r\n',Sonuc_C_LH(8,1),u_f_seri_rezonans);
fprintf(fileID,'u LH %e\r\n',Sonuc_C_LH(9,1));

fprintf(fileID,'C4TP @ 10 MHz %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(11,1));
fprintf(fileID,'C1 C4TP @ 10 MHz %e\t u_C00 %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(1,1),u_C00);
fprintf(fileID,'C2 C4TP @ 10 MHz %e\t u_L00 %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(2,1),u_L00);
fprintf(fileID,'C3 C4TP @ 10 MHz %e\t u_CHG2 %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(3,1),u_CHG2);
fprintf(fileID,'C4 C4TP @ 10 MHz %e\t u_CLG2 %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(4,1),u_CLG2);
fprintf(fileID,'C5 C4TP @ 10 MHz %e\t u_LHG %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(5,1),u_LHG);
fprintf(fileID,'C6 C4TP @ 10 MHz %e\t u_LLG %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(6,1),u_LLG);
fprintf(fileID,'C7 C4TP @ 10 MHz %e\t u_LCM %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(7,1),u_LCM);
fprintf(fileID,'C8 C4TP @ 10 MHz %e\t u_LH %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(8,1),u_LH);
fprintf(fileID,'C9 C4TP @ 10 MHz %e\t u_LL %e\r\n',Sonuc_C_C4TP(9,1),u_LL);
fprintf(fileID,'u C4TP @ 10 MHz %e\r\n', Sonuc_C_C4TP(10,1));

fprintf(fileID,'%6s %12s %18s %20s\r\n','Frekans','Kapasitans Degeri','Belirsizlik
[F]','Belirsizlik [%]');
for k=1:1:length(frekans)
fprintf(fileID,'%e\t',Sonuc(k,:));
fprintf(fileID,'\r\n');
end
fclose(fileID);
endif

```

ÖZGEÇMİŞ

Turgay Özkan, 01.06.1976'da Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kocaeli Derince'de tamamladı. 1992 yılında Kocaeli Derince Lisesi, Matematik Bölümü'nden mezun oldu. 1993 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nü 1997 yılında bitirdi. 1998 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme A.B.D.'na girdi ve 2001 yılında mezun oldu. 1997 yılında TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde araştırmacı olarak işe başladı. Halen aynı kurumda başuzman araştırmacı olarak çalışmaktadır