
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ELEKTROMANYETİK GİRİŞİMLERE KARŞI SÜZGEÇ TASARIMI

Kürşat KUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

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

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

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

Kürşat KUŞ
14/07/2023

ELEKTROMANYETİK GİRİŞİMLERE KARŞI SÜZGEÇ TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Kürşat KUŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Elektromanyetik girişimler, elektronik devrelerin kararlı bir şekilde çalışmalarına karşı bozucu etkiler oluşturan elektromanyetik dalgalardır. Fiziksel olarak birbirine bağlı olmayan elektronik yapılar bile, gerekli koruma devreleri bulunmadığı takdirde birbirleri için bozucu etkiler oluşturabilirler. Bahsi geçen bu koruma devreleri, bu bozucu etkileri engelleyerek birden fazla elektronik devrenin bir arada çalışmasını sağlayabilirler. Bu tez çalışmasında referans olarak DA (Doğru Akım) kıyıcı devreleri kullanılmıştır. DA kıyıcılar, DA altında çalışan yapılarda kullanılan, ayarlanan gerilim değerinde o yapıyı sabit bir şekilde besleyebilen ve yüksek hızlı anahtarlamalı topolojileri barındıran devrelerdir. Kıyıcılar, uygulanan gerilimi sabit tuttukları gibi yükseltici, alçaltıcı ve hem alçaltıcı hem de yükseltici olarak çalışabilen güç birimleridir. DA kıyıcı devrelerinin kararlı bir şekilde çalışmalarını sürdürebilmeleri için elektromanyetik süzgeç devreleri ve koruma devreleri tasarlanmıştır. Tasarlanan bu süzgeç ve koruma devrelerinin, DA kıyıcıları, aviyonik standartlara da uygun olacak şekilde, dış ortamdan ve bütünleşmiş halde çalıştıkları elektronik yapılardan gelen elektromanyetik girişimlere ve elektriksel bozucu etkilere karşı koruması hedeflenmiştir. Bu koruma devreleri aynı zamanda diğer yapıları yani birlikte çalıştıkları elektronik cihazları ve dış ortamı kıyıcıların oluşturduğu elektromanyetik parazitlere ve bozucu etkilere karşı da korur. Ayrıca bu koruma devresi tasarımı, aviyonik platformlardaki uzun bağlantı hatlarının ve çeşitli devre kesicilerinin neden olabileceği anlık gerilim yükselmelerine ve havada oluşabilecek yıldırımlara karşı da koruma sağlamaktadır. Bu süzgeç devresi, MIL-STD-461 CE-102 ve CS-114 gibi aviyonik standartlara uygun olacak şekilde hem ortak modda hem de fark modunda süzme yapmaktadır. Koruma devreleri ise MIL-STD-704E, DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 ve MIL-STD-202 Test Method 302 “Insulation Resistance” gibi aviyonik standartlara uygun olacak şekilde korumalar sağlamaktadır. Tasarlanan süzgeç devrelerinin, DA kıyıcı ile birlikte belirlenen bu aviyonik standartlara göre testleri yapılmıştır. Tasarlanan süzgeç devrelerinin, aviyonik standartların gerekliliklerini sağladığı gösterilmiştir.

Bilim Kodu	:	90503
Anahtar Kelimeler	:	DA kıyıcı, EMG Süzgeç, Ortak Mod, Fark Mod, MIL-STD-461, MIL-STD-202, DO-160, MIL-STD-704E, Aviyonik, DA
Sayfa Adedi	:	105
Danışman	:	Prof. Dr. Erkan AFACAN

FILTER DESIGN AGAINST ELECTROMAGNETIC INTERFERENCES

(M. Sc. Thesis)

Kürşat KUŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

Electromagnetic interferences are electromagnetic waves that create disruptive effects against the stable operation of electronic circuits. Even electronic structures that are not physically connected to each other can create disruptive effects for one another if the necessary protection circuits are not present. These protection circuits can prevent these disruptive effects and enable many electronic circuits to work together. In this thesis, DC (Direct Current) chopper circuits are used as a reference. DC choppers are circuits that are used in structures operating under DC, which can feed that structures at the adjusted voltage value, and contain high-speed switched topologies. Choppers are power units that keep the applied voltage constant and can work as a step-up, a step-down, and a step-up-down also. To maintain DC chopper circuits to operate stably, electromagnetic filter circuits and protection circuits have been designed. It is aimed that these designed filter circuits and protection circuits defend DC choppers against electromagnetic interference and electrical disturbance effects from the external environment and electronic structures in which they work in an integrated manner, in accordance with avionic standards. These protection circuits also defend other structures that are the electronic devices they work with, and the external environment against electromagnetic interference and disruptive effects caused by the choppers. In addition, this protection circuit design protects against instantaneous voltage spikes that may occur due to long connection lines and various circuit breakers of avionic platforms and lightning that may occur in the air. This filter circuit performs both common mode and differential mode filtering in accordance with avionic standards such as MIL-STD-461 CE-102 and CS-114. Protection circuits provide protections in accordance with avionic standards such as MIL-STD-704E, DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 and MIL-STD-202 Test Method 302 “Insulation Resistance”. The designed filter circuits have been tested according to the determined avionic standards together with the DC chopper. It has been shown that the designed filter circuits meet the requirements of avionics standards.

Science Code	:	90503
Key Words	:	DC chopper, EMI Filter, Common Mode, Differential Mode, MIL-STD-461, MIL-STD-202, DO-160, MIL-STD-704E, Avionics, DA
Page Number	:	105
Supervisor	:	Prof. Dr. Erkan AFACAN

TEŞEKKÜR

Tüm yüksek lisans eğitim ve tez dönemimde bana hiçbir konuda desteğini esirgemeyen saygı değer danışman hocam; Prof. Dr. Erkan AFACAN'a, tez çalışmamda laboratuvar alt yapısı imkânı sağlayan ve diğer tüm destekleri için Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. ailesine teşekkürlerimi sunarım. Son olarak hayatımın her sürecinde yanımda olan, başta çok kıymetli annem ve babam olmak üzere tüm aileme ve bana desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşime sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…….. iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. DOĞRU AKIM KIYICILAR 3

3. ELEKTROMANYETİK SÜZGEÇ TASARIMI 5

3.1. Elektromanyetik Girişim..... 5

3.2. Elektromanyetik Gürültü 6

3.2.1. Fark mod gürültü 6

3.2.2. Ortak mod gürültü..... 7

3.3. Elektromanyetik Uyumluluk..... 8

3.4. Elektromanyetik Süzgeç Devresi..... 8

3.5. Pasif Süzgeç Devresi Malzemeleri 9

3.5.1. Kapasitör 9

3.5.2. İndüktör 16

3.5.3. Ortak mod indüktör..... 19

3.5.4. Ferrit çekirdek..... 22

3.6. Pasif Süzgeç Devresi Topolojileri 24

3.7. Elektromanyetik Uyumluluk İçin Aviyonik Standartlar 27

3.7.1. MIL-STD-461F CE-102 standardı 30

3.7.2. MIL-STD-461F CS-114 standardı..... 30

3.8. Aviyonik Standartlara Uygun Süzgeç Devresi Tasarımı Kriterleri..... 31

Sayfa

4. KORUMA DEVRESİ TASARIMI 41

4.1. Değişken Gerilim - Akım Koruma Devresi 41

4.1.1. Pasif koruma devresi 41

4.1.2. Aktif koruma devresi 46

4.2.Yalıtkanlık Koruma Devresi 47

4.3. Koruma Devreleri İçin Kullanılan Aviyonik Standartlar 47

4.3.1. DO-160 section 22 waveform-4 level-3 48

4.3.2. MIL-STD-704E aircraft electric power characterstics 49

4.3.3. MIL-STD-202 test method 302 52

4.4. Aviyonik Standartlara Uygun Gerilim-Akım Koruma Devresi Tasarımı Kriterleri 52

4.4.1. Pasif koruma devresi tasarım kriterleri 52

4.4.2. Aktif koruma devresi tasarım kriterleri 55

4.5. Aviyonik Standartlara Uygun Yalıtkanlık Koruma Devresi Tasarımı Kriterleri 58

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI 61

5.1. Elektromanyetik Süzgeç Devresi Benzetim Çalışmaları 61

5.2. Pasif Koruma Devresi Benzetim Çalışmaları 67

5.3. Aktif Koruma Devresi Benzetim Çalışmaları 67

5.3.1. Aşırı gerilim koruması 68

5.3.2. Düşük gerilim koruması 69

5.3.3. Aşırı akım koruması 70

5.3.4. Tutma kapasitörü şarj-desarj akımları 70

6. ÖLÇÜM SONUÇLARI 73

6.1. Elektromanyetik Süzgeç Devresi Ölçüm Çalışmaları 73

6.1.1. Bode-100 ile yapılan testlerin ölçüm sonuçları 73

6.1.2. MIL-STD-461F test düzeneği ile testlerin ölçüm sonuçları 78

Sayfa

6.2. Pasif Koruma Devresi Ölçüm Çalışmaları..... 83
6.3. Aktif Koruma Devresi Ölçüm Çalışmaları 86
6.4. Yalıtkanlık Koruma Devresi Ölçüm Çalışmaları..... 99
7. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 101
KAYNAKLAR..... 103
ÖZGEÇMİŞ..... 105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. MIL-STD-461 Test Adımları Temel Sınıflandırması 28

Çizelge 3.2. Süzgeç Devresi Empedans Değerleri 39

Çizelge 4.1. Pasif Koruma Devresi Komponentlerinin Karşılaştırılması 42

Çizelge 4.2. DO-160 Section 22 Waveform-4 Standardı Gerilim-Akım Seviyeleri 48

Çizelge 4.3. MIL-STD-704E Standardı Test Adımları 49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Fark Mod Gürültü Akış Şeması 6
Şekil 3.2. Ortak Mod Gürültü Akış Şeması 7
Şekil 3.3. Kapasitör Filtre Akış Şeması 10
Şekil 3.4. Kapasitör Eşdeğer Devresi 10
Şekil 3.5. ESL Frekans Grafiği 11
Şekil 3.6. Kapasitör Kaçak Akım Akış Şeması 12
Şekil 3.7. Kapasitör DA Gerilim Eğilim Katsayısı Eğrisi 14
Şekil 3.8. Kapasitör Sıcaklık Katsayısı Değişim Eğrisi 14
Şekil 3.9. İndüktör Filtre Akış Şeması 16
Şekil 3.10. İndüktör Eşdeğer Devresi 17
Şekil 3.11. Q Faktörünün Etkisi 18
Şekil 3.12. EPC Frekans Grafiği 19
Şekil 3.13. Ortak Mod Gürültünün Etkisi 20
Şekil 3.14. Fark Mod Gürültünün Etkisi 20
Şekil 3.15. Ortak Mod İndüktör Eşdeğer Devresi 20
Şekil 3.16. Ortak Mod İndüktör Empedans Değişim Eğrisi 21
Şekil 3.17. Ferrite Çekirdek Eşdeğer Devresi 22
Şekil 3.18. Ferrite Çekirdek Frekans Empedans Eğrisi 23
Şekil 3.19. Ferrite Çekirdek DA Sapma Karakteristiği Eğrisi 24
Şekil 3.20. Pi Filtre Devre Şeması 26
Şekil 3.21. T Filtresi Devre Şeması 26
Şekil 3.22. MIL-STD-461Test Düzeneği 29
Şekil 3.23. CE-102 Test Eğrisi 30

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.24. CS-114 Test Düzeneği 31
Şekil 3.25. CS-114 Test Eğirisi 31
Şekil 3.26. Süzgeç Blok Şeması 32
Şekil 3.27. Süzgeç Sönümleme Tipleri 33
Şekil 3.28. Yük Dağılımı 34
Şekil 3.29. Ayırma Kapasitöründen Önce Empedans Kontrolü Devresi 36
Şekil 3.30. Ayırma Kapasitöründen Önce Empedans Kontrolü Grafiği 36
Şekil 3.31. Ayırma Kapasitöründen Sonra Empedans Kontrolü Devresi 37
Şekil 3.32. Ayırma Kapasitöründen Sonra Empedans Kontrolü Grafiği 37
Şekil 3.33. Eklenen Empedans Etkisi 38
Şekil 4.1. Koruma Devresi Blok Şeması 41
Şekil 4.2. TVS Diyot Sınırlama Akış Şeması 43
Şekil 4.3. TVS Diyot Tip-1 Tepe Akımı Eğrisi 44
Şekil 4.4. TVS Diyot Tip-2 Tepe Akımı Eğrisi 44
Şekil 4.5. GDT Çalışma Gerilim Alanları 46
Şekil 4.6. Aktif Koruma Devresi Blok Şeması 47
Şekil 4.7. DO-160 Section 22 Waveform-4 Test Eğrisi 48
Şekil 4.8. MIL-STD-704E Test Düzeneği 51
Şekil 4.9. Pasif Koruma Devresi Blok Şema 53
Şekil 4.10. TVS Test Dayanma Gücü Eğrisi 54
Şekil 4.11. MOSFET Güvenli Çalışma Bölgesi Eğrisi 57
Şekil 4.12. Yalıtkanlık Koruma Devresi Blok Şeması 58
Şekil 5.1. CS Yönünde Fark Mod Filtreleme Benzetim Şeması 61
Şekil 5.2. CS Yönünde Ortak Mod Filtreleme Benzetim Şeması 62

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.3. CS Yönünde Fark Mod Benzetim Eğrisi 62
Şekil 5.4. Pozitif Besleme Girişi için CS Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi 63
Şekil 5.5. Negatif Besleme Girişi için CS Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi 63
Şekil 5.6. CE Yönünde Fark Mod Filtreleme Benzetim Şeması 64
Şekil 5.7. CE Yönünde Ortak Mod Filtreleme Benzetim Şeması 64
Şekil 5.8. CE Yönünde Fark Mod Benzetim Eğrisi 65
Şekil 5.9. Pozitif Besleme Girişi için CE Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi 66
Şekil 5.10. Negatif Besleme Girişi için CE Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi 66
Şekil 5.11. Pasif Koruma Devresine Benzetim Eğrisi 67
Şekil 5.12. Aktif Koruma Devresi Şeması 68
Şekil 5.13. Aşırı Gerilim Koruma Eğrisi 69
Şekil 5.14. Düşük Gerilim Koruma Eğrisi 69
Şekil 5.15. Aşırı Akım Koruma Eğrisi 70
Şekil 5.16. Şarj Devresi Akım Sınırlama Eğrisi 71
Şekil 5.17. Şarj Devresi Deşarj Akımı Eğrisi 71
Şekil 6.1. CE Fark Mod Bode 100 Ölçüm Eğrisi 73
Şekil 6.2. CS Fark Mod Bode 100 Ölçüm Eğrisi 74
Şekil 6.3. CE Ortak Mod Artı Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi 74
Şekil 6.4. CE Ortak Mod Eksi Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi 75
Şekil 6.5. CS Ortak Mod Artı Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi 75
Şekil 6.6. CS Ortak Mod Eksi Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi 76
Şekil 6.7. DA-DA Kıycının Yaydığı Gürültünün FFT Analizi 76
Şekil 6.8. DA-DA Kıycının Yaydığı Gürültülerin Filtrelenmesinin FFT Analizi 77
Şekil 6.9. DA-DA Kıyıcı ve Filtre Devresi FFT Analizi Ölçüm Düzeneği 77

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.10. CE-102 Testi Ölçüm Düzeneği 78

Şekil 6.11. CE-102 Testi Ortam Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi 79

Şekil 6.12. Kıyıcı Artı Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi 79

Şekil 6.13. Süzgeç Devresi ile Birlikte Kıyıcı Artı Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi 80

Şekil 6.14. Kıyıcı Eksi Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi 81

Şekil 6.15. Süzgeç Devresi ile Birlikte Kıyıcı Eksi Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi 81

Şekil 6.16. CS-114 Testi Ölçüm Düzeneği..... 82

Şekil 6.17. CS-114 Testi Uygulanan Frekans Güç Test Eğrisi 82

Şekil 6.18. CS-114 Testi Kıyıcı Çıkış Gerilimi..... 83

Şekil 6.19. DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 Testi Ölçüm Düzeneği..... 84

Şekil 6.20. DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 Kalibrasyon Gerilim Eğrisi 84

Şekil 6.21. DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 Kalibrasyon Akım Eğrisi..... 85

Şekil 6.22. Pasif Koruma Devresi Ölçüm Sonucu Eğrisi 85

Şekil 6.23. Yük Ölçümleri Testi Ölçüm Eğrisi 86

Şekil 6.24. Gerilim için Kararlı Hal Limitleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 87

Şekil 6.25. Normal Yüksek Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi 88

Şekil 6.26. Normal Düşük Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 89

Şekil 6.27. Normal Kombine Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 90

Şekil 6.28. Tekrarlı Geçişler Testi Ölçüm Eğrisi 91

Şekil 6.29. Güç Kesintisi Testi Ölçüm Eğrisi..... 91

Şekil 6.30. Gerilim için Anormal Kararlı Durum Limitleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 92

Şekil 6.31. Anormal Yüksek Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi 93

Şekil 6.32. Anormal Düşük Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 93

Şekil 6.33. Anormal Kombine Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 94

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.34. Gerilim için Acil Durum Limitleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 95

Şekil 6.35. Başlangıç Gerilimi Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi..... 96

Şekil 6.36. Güç Kaybı Testi Ölçüm Eğrisi Giriş 97

Şekil 6.37. Aşırı Gerilim Koruma Testi Ölçüm Eğrisi 98

Şekil 6.38. Aşırı Akım Koruma Testi Ölçüm Eğrisi 98

Şekil 6.39. Düşük Gerilim Koruma Testi Ölçüm Eğrisi..... 99

Şekil 6.40. MIL-STD-202 Artı Besleme Hattı Ölçüm Sonucu 99

Şekil 6.41. MIL-STD-202 Eksi Besleme Hattı Ölçüm Sonucu..... 100

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
µs	Mikrosaniye
A	Amper
C	Kapasitör
L	Bobin
R	Direnç
D	Diyot
dB	Desibel
dBm	Desibel miliwatt
f	Frekans
F	Farad
H	Henry
G	Kazanç
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz
Hz	Hertz
I	Akım
V	Gerilim
W	Güç
m	Metre
mA	Miliamper
ms	Milisaniye
MW	Megawatt
nF	Nanofarad
uF	Mikrofarad
mF	Milifarad
us	Mikrosaniye
t	Zaman

Simgeler	Açıklamalar
RDS	Drain-source direnci
Ω	Ohm
s	Saniye

Kısaltmalar	Açıklamalar
AA	Alternatif akım
AC	Alternating current
DA	Doğru akım
DC	Direct current
dk	Dakika
EM	Elektromanyetik
EMC	Electromagnetic compatibility
EMD	Elektromanyetik dalga
EMG	Elektromanyetik girişim
EMI	Electromagnetic interference
EMU	Elektromanyetik uyumluluk
LISN	Line Impedance Stabilization Networks
MOSFET	Metal oksit yarı iletken alan etkili transistor
RF	Radyo frekans

1. GİRİŞ

Elektromanyetik girişim (EMG; Electromagnetic Interference (EMI)), bir elektrik hattında veya devrede dış kaynakların neden olduğu istenmeyen girişimdir. Aynı zamanda radyo frekansı girişimi olarak da bilinir. EMG elektronik devrenin kötü çalışmasına, arızalanmasına veya tamamen durmasına neden olabilir. EMG, doğal veya insan yapımı kaynaklardan ortaya çıkabilir. Özel süzgeç devrelerinin kullanılması ve ekranlama gibi yöntemler EMG'nin etkisini azaltabilir. EMG'nin etkisini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak için kullanılan yöntemlerin genel adı elektromanyetik uyumluluktur (EMU; Electromagnetic Compatibility (EMC)).

EMU, cihazların ve sistemlerin kendi elektromanyetik ortamlarında fonksiyonlarını kaybetmeden ve hatasız çalışabilmeleri olarak tanımlanmaktadır. Bu tez çalışmasında, EMG'lere karşı elektromanyetik uyumluluğun sağlanması amacıyla özel bir elektromanyetik süzgeç devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu elektromanyetik süzgeç devresi, DA (Doğru Akım) kıyıcılar için elektromanyetik uyumluluk sağlamaktadır. DA kıyıcılar için elektromanyetik süzgeçlerin kullanılmasının sebebi, DA kıyıcıların dış ortamdan gelen veya diğer elektronik cihazların yaydığı bozucu elektromanyetik dalgalara karşı çok hassas olmasıdır. Ayrıca DA kıyıcılar çalışırken de dış ortama, diğer cihazlar için bozucu etki oluşturabilecek elektromanyetik dalgalar yaymaktadır. Tasarlanan bu süzgeç devresi hem DA kıyıcıları dış ortamdaki cihazlardan EMG'lere karşı korumaktadır, hem de dış ortamdaki cihazları DA kıyıcılardan kaynaklanan EMG'lere karşı korumaktadır.

Genel olarak DA kıyıcılar: bir doğru akımı yine bir doğru akıma dönüştüren yapılardır. Sabit bir DA gerilim kaynağından değişken bir DA gerilim elde etmek için de kullanılan elektronik yapılardır. Kıyıcılar; tramvaylarda, akülü araçlarda, çok sayıda DA motorun kontrolünde vb. uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca değişken bir DA gerilim kaynağından sabit bir DA gerilim elde etmek için de kullanılan elektronik yapılardır [1].

DA kıyıcılar genel olarak endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalar nispeten daha az riskli yapılar barındırdığı için DA kıyıcı içeren devreleri tasarlarken daha az standardın dikkate alınması yeterli olacaktır. Bu nedenle EMG'e karşı daha basit veya literatürde halihazırda bulunan geleneksel süzgeç devrelerinin kullanılması

yeterli olacaktır. Ancak askeri ve aviyonik tasarımlarda hem çalışma şartları daha ağır hem de tasarım standartları daha zorlayıcı olduğu için standart süzgeç devrelerinin kullanımı çoğu zaman yetersiz kalmaktadır.

Bu nedenle bu tez çalışmasında, tasarlanan süzgeç devresi, belirli aviyonik standartlara da uygunluk sağlayacak şekilde DA kıyıcıları elektromanyetik bozucu etkilere karşı korumaktadır. Bu aviyonik standart MIL-STD-461F standardıdır.

Aviyonik uygulamalarda, DA kıyıcılar elektromanyetik bozucu etkilerden olumsuz şekilde etkilendiği gibi beslenme gerilimlerindeki ani gerilim dalgalanmaları, aviyonik platformlardaki bağlantı yollarının endüktif etkileri, yıldırım düşmesi ve bağlı oldukları yüklerdeki ani akım değişimleri dolayısıyla da arızalanabilir. Tez kapsamında, bu olumsuz koşullara karşı da kıyıcıları korumak için koruma devreleri tasarlanmıştır.

Bu koruma devresi yine belirli aviyonik standartlara da uygunluk sağlayacak şekilde DA kıyıcıları bahsi geçen bu bozucu etkilere karşı korumaktadır. Bu aviyonik standartlar şunlardır; “MIL-STD-704E” ve “DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3”, “MIL-STD-202 Test Method 302 Insulation Resistance”.

İkinci bölümde doğru akım kıyıcıların özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde elektromanyetik süzgeç tasarımı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, koruma devresi tasarımı verilmiştir. Beşinci bölümde, bahsi geçen standartlara uygun olacak şekilde tasarlanan süzgeç ve koruma devresi tasarımlarının benzetimi yapılmıştır. Altıncı bölümde, ölçüm sonuçları verilmiştir. Son ve yedinci bölümde, bulunan sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. DOĞRU AKIM KIYICILAR

Birçok endüstriyel, askeri aviyonik uygulamalarında DA (Doğru Akım) gerilim kaynağı gerekli olduğundan, günümüzde DA'dan DA kıyıcıya (dönüştürücüye) çok ihtiyaç duyulmaktadır. Elektronik uygulamalarda değişken bir DA kaynağı kullanılırsa, bu uygulamaların performansı artacaktır. Aynı zamanda elektronik devrelerin kontrol edilebilirliğini geliştirmeye yardımcı olacaktır. Bu tür uygulamalara örnek olarak güç kaynakları, elektrikli araçlar vb. verilebilir. Bir kıyıcı yardımıyla sabit bir DA gerilimi kontrol edebilir ve değiştirebiliriz.

Kıyıcı, sabit DA gerilimini/gücünü değişken DA gerilimine veya gücüne dönüştüren elektronik cihazdır. En basit çalışma prensibi, çıkışta değişken veya kesikli gerilim elde etmek için yükü yüksek oranda kaynağa bağlayan ve bağlantısını kesen, yüksek hızlı anahtarlama elemanlarından oluşmaktadır. Bahsi geçen bu anahtarlamaların frekansı arttıkça kıyıcının verimi ve boyutu azalmaktadır. Ancak artan bu frekans, kıyıcının kendisi ve birlikte çalıştığı diğer elektronik devreler için yaydığı elektromanyetik gürültüler ile EMG oluşturabilir [1].

Bu bozucu etkinin ortadan kaldırılabilmesi için gerekli süzgeç devreleri oluşturulmalıdır. DA kıyıcılar sadece EMG ile bozulmamaktadır, kıyıcıyı besleyen gerilim kaynağı ve kıyıcının beslediği yükte oluşabilecek sürekli veya geçici, gerilim ve akım değişimleri de kıyıcı için bozucu etkiler oluşturabilir. Bu bozucu etkiler ortadan kaldırılabilmesi için gerekli koruma devreleri oluşturulmalıdır.

3. ELEKTROMANYETİK SÜZGEÇ TASARIMI

Bu bölümde elektromanyetik girişimden, elektromanyetik gürültülerden ve elektromanyetik süzgeç devresinden bahsedilmiştir.

3.1. Elektromanyetik Girişim

Elektromanyetik girişim (EMG, EMI), harici bir kaynağın neden olduğu, elektrik yolunda veya elektrik devresinde istenmeyen gürültü veya girişimdir. Aynı zamanda radyo frekansı girişimi olarak da adlandırılır. EMG, elektronik devrenin kötü performans göstermesine, arızalanmasına veya tamamen bozulmasına neden olabilir.

Elektromanyetik girişimin genel olarak iki ana kaynağı veya nedeni vardır. Yıldırım ve diğer doğa olayları elektromanyetik girişime neden olabilir. Diğer yandan günlük hayatta televizyon ve radyo gibi elektronik cihazlar da elektromanyetik girişime neden olabilir. Tüm elektronik cihazlar elektromanyetik girişime neden olabilirler. Daha büyük cihazların zararlı parazitler yayma olasılığı daha yüksektir. Genel olarak daha küçük cihazlarda ise bu durum nispeten daha güçsüz parazitler ile elektromanyetik girişim oluşturabilir.

Buradaki tek kıstas cihazların büyüklüğü de değildir. Çalışma frekansı ve çalışma güçleri de elektromanyetik girişim için önemlidir. Birbirleri için bozucu etki oluşturabilecek frekans aralığında çalışan cihazların, bu frekanslarda yaydığı elektromanyetik dalgalar (EMD) birbirleri için bozucu etkiler oluşturabilir. Bu bozucu etki, cihazın yaydığı elektromanyetik dalganın gücü ne kadar büyük ise o kadar büyük olacaktır.

Bir arada çalışan elektronik cihazlar için bozucu etki oluşturacak elektromanyetik girişimler, elektronik cihazlar arasında iki farklı yol ile aktarılabilir. Bu yollardan ilki; iletkenlik yoluyla yapılan yani elektriksel olarak iletken hatlar ile birbirine bağlı olan cihazların, bu yollar aracılığıyla elektromanyetik gürültüleri birbirlerine aktarmasıdır. Diğer yol ise şu şekildedir: yayınım yoluyla yapılan yani birbirlerine hiçbir şekilde elektriksel bağlantısı olmayan iki cihazdan biri tarafından yayılan elektromanyetik alan, diğer bir cihaza ve o cihazın elektriksel bağlantı hatlarına indüklenerek, o cihaz için elektromanyetik gürültü oluşturabilir [2].

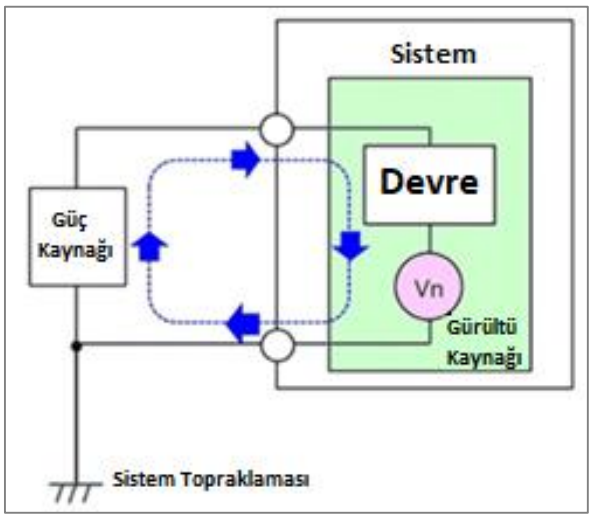
İki adet DA kıyıcının olduğu bir tasarım ele alındığında, bu iki kıyıcı belirli bir frekansta anahtarlama yapacaklardır. Bu anahtarlama frekanslarında oluşan elektromanyetik dalgalar, gerekli önlemler alınmadığı takdirde iki kıyıcının istikrarlı çalışmaları üzerinde bozucu etkiler oluşturulabilir.

3.2. Elektromanyetik Gürültü

Elektromanyetik gürültü yani elektronik cihazlarda veya bileşenlerde gürültü, elektronik cihazların kararlı çalışmalarını olumsuz etkileyen elektromanyetik dalgalardır. Daha önce bahsedildiği gibi elektromanyetik girişimler iletkenlik ve yayınım yoluyla aktarılmaktadır. İletkenlik yoluyla aktarılan elektromanyetik girişimlere iki tip gürültüye sebep olur. Bunlardan ilki; fark mod gürültü olarak adlandırılır, diğeri ise ortak mod gürültü olarak adlandırılır.

3.2.1. Fark mod gürültü

Fark mod gürültü, kapalı bir elektronik devre döngüsünde hatların bir veya ikisinde görünen bir bozucu elektrik sinyaldir. Bu gürültü, devrenin akım döngüsüne girebilir ve sinyali bozabilir. Fark mod gürültü, akım döngüsündeki birbirine referanslı iki sinyalden yalnızca biri bir gürültü kaynağıyla karşılaştığında ortaya çıkar ve gürültü daha sonra döngü içinde dolaşır. Bu fark mod gürültüsü genelde, devrenin kablo tesisatı ile yakınında bağlantısı olan devrelerde, güç kaynağında veya yükteki bileşenlerde bozucu etki oluştuğunda ortaya çıkar.

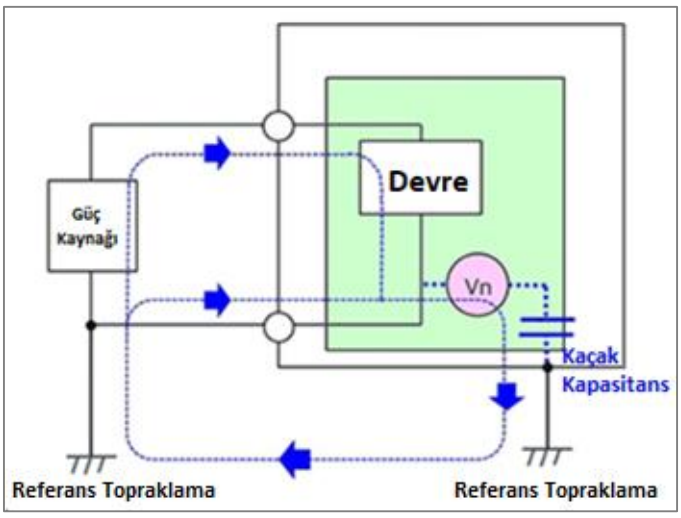


Şekil 3.1. Fark Mod Gürültü Akış Şeması

Şekil 3.1'de fark mod gürültünün bir devre üzerinde genel olarak nasıl bir akış oluşturduğu gösterilmiştir. Bu görseldeki akış şemasında, fark mod gürültüde, gürültü kaynağı DA kıyıcı hatları boyunca meydana gelir. Gürültü akımı DA kıyıcı akımıyla aynı yönde akar. Bu hat boyunca akan gürültülü akım DA kıyıcının dönüş hattından kıyıcıya tekrar dönerek döngüsünü tamamlar. Bu görseldeki DA kıyıcının giden akımı ve dönen akımındaki gürültülü akımlar zıt yönlü olduğu için fark mod gürültü denilmektedir [3].

3.2.2. Ortak mod gürültü

Ortak mod gürültü, kapalı bir elektronik devre döngüsünde birbirine referanslı hatların ikisinde birden görünen bir bozucu elektrik sinyaldir. Bu gürültü fark mod gürültüde olduğu gibi devrenin akım döngüsüne girebilir ve sinyalleri bozabilir. Ortak mod gürültü, akım döngüsündeki, birbirine referanslı iki sinyalden ikisi de aynı gürültü kaynağıyla karşılaştığında ortaya çıkar ve gürültü daha sonra döngü içinde dolaşır. Bu gürültü de fark mod gürültüde olduğu gibi genelde, devrenin kablo tesisatı ile yakınında bağlantısı olan devrelerde, güç kaynağında veya yükteki bileşenlerde gürültü oluştuğunda meydana gelir.



Şekil 3.2. Ortak Mod Gürültü Akış Şeması

Şekil 3.2'de ortak mod gürültünün bir devre üzerinde genel olarak nasıl bir akış oluşturduğu gösterilmiştir. Bu görseldeki akış şemasında, ortak mod gürültü DA kıyıcı hatları boyunca meydana gelir. Gürültü akımı, DA kıyıcı akımıyla aynı yönde akar. Bu hat boyunca akan gürültülü akım, kaçak kapasitanslar üzerinden referans topraklama noktasına geçer, ardından DA kıyıcının topraklama noktasına tekrar dönerek döngüsünü tamamlar. Bu görseldeki DA

kıyıcının giden akımı ve dönen akımındaki gürültülü akımlar aynı yönlü olduğu için ortak mod gürültü denilmektedir [3].

3.3. Elektromanyetik Uyumluluk

Elektromanyetik uyumluluk (EMU, EMC), farklı elektronik cihazların ve bileşenlerin, elektromanyetik dalgalar yayan diğer cihazların etkisi altında bile doğru bir şekilde çalışabilmesidir. EMU, elektromanyetik dalgaları (EMD) ve bu dalgalarla birlikte zararlı elektromanyetik parazitler yayan her bir elektronik donanım parçasının bunu belirli bir seviyede sınırlaması gerektiği ve her bir cihazın, çalışması amaçlanan ortamdaki elektromanyetik parazitlere karşı yeterli korunmaya sahip olması gerektiği anlamına gelir [4].

3.4. Elektromanyetik Süzgeç Devresi

Elektromanyetik süzgeç tasarımları, hassas elektronik donanımların, elektromanyetik gürültülerden etkilenip zarar görmesini önler. Hemen hemen tüm elektronik cihazlar bir elektromanyetik süzgeç içerir. Süzgeçler baskı devre kartına gömülebilir veya ayrı bağımsız bir cihaz olarak kullanılabilir. Süzgeç devreleri tasarlandığı amaca uygun olarak askeri/savunma, güvenli iletişim, endüstriyel, tıp elektroniği ve enerji alanlarında kullanılan elektronik bileşenler içerir.

Elektromanyetik süzgeç tasarımları, hava taşıtları, insansız araçlar, güç kaynakları ve otomasyon devreleri vb. için hem iletkenlik hem de yayınım yoluyla ortaya çıkan EMG'i azaltmaya yönelik çalışarak, enerji verimliliği ve güç yönetimi sağlar. Bu alanlarda kullanılan birçok EMG süzgeç devresi mevcuttur. EMG süzgeç devreleri en genel olarak aktif süzgeç ve pasif süzgeç devreleri olmak üzere ikiye ayrılır [4].

Aktif Süzgeçler; Harici bir güç kaynağına ihtiyaç duyarlar. Aktif EMG süzgeçleri, girişlerindeki gerilimi algılayıp ters yönde bir akım oluşturarak çalışır. Bu ters yöndeki akım, bozulmaya neden olan EMG akımını etkili bir şekilde ortadan kaldırır. Bu teknik de, aktif elektronik elemanlar kullanılır ve istenmeyen frekansları engellemek için dâhili bir devre

kullanılır. En çok bilinen birkaç aktif süzgeç topolojisi şunlardır; Butterworth Alçak Geçiren Filtresi, Sallen-Key Alçak Geçiren Filtresi, Chebyshev Alçak Geçiren Filtresi vb. [5].

Pasif Süzgeçler; İstenmeyen gürültülü enerjiyi soğururlar. Pasif süzgeçler, bulunduğu devrelerin güç tüketimlerini azaltırlar ve yalnızca pasif bileşenlerden oluşurlar: kapasitörler, dirençler, transformatörler ve indüktörler gibi. Bu bileşenler, tek bir frekansta veya bir frekans bandında elektriksel rezonans üretmek için kullanılırlar. Pasif süzgeçler, elektronik sistemlerin gürültülü akımlarını bastırır ve gerilim bozulmalarını azaltırlar [6].

3.5. Pasif Süzgeç Devresi Malzemeleri

3.5.1. Kapasitör

Kapasitörler, dirence benzer pasif bileşenlerdir. Kapasitörlerde enerji elektrikalan olarak depolanır. Seramik kapasitörler, kâğıt kapasitörler vb. gibi farklı kapasitör türleri vardır. Bir kapasitör, kabaca birbirine doğrudan bağlı olmayan iki paralel iletken plakadan oluşur. Kapasitörün bu iki plakası, dielektrik adı verilen iletken olmayan bir malzeme ile ayrılır. Plakalardan biri pozitif yüklenir, diğeri ise negatif yüklenir. Kapasitans (*C*), kapasitörün etkisidir. Kapasitans, *Q* yani depolanan elektrik yükünün, *V* yani depolanan gerilime oranı olarak tanımlanır ve Eş 3.1'deki gibi ifade edilir:

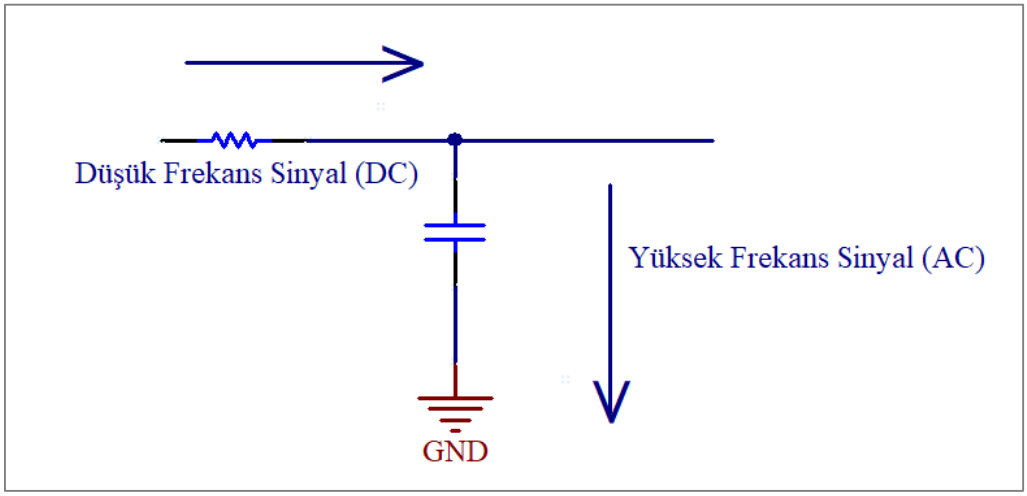
$$C = \frac{Q}{V} \tag{3.1}$$

Kapasitör, elektrik enerjisini depolamak için kullanılan bir elemandır. Bir kapasitörün kapasitansı (*C*), kapasitörün elde edebileceği şarj miktarını belirler. Kapasitör tarafından alternatif akıma (AA) karşı oluşan direncin değerine kapasitif reaktans (*Xc*) denir. Kapasitif reaktansın birimi Ohm'dur. Kapasitif reaktansın formülü Eş 3.2'de olduğu gibidir. Formülde *F* değeri kapasitörün direnç gösterdiği AA işaretin frekansını temsil etmektedir.

$$X_c = \frac{1}{2*\pi*F*C} \tag{3.2}$$

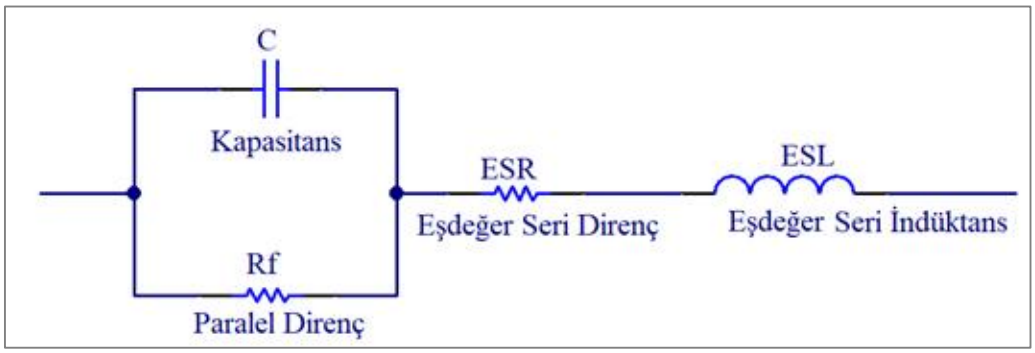
Eş 3.2 den yola çıkılarak, AA işaretin frekansı arttıkça kapasitörün AA işarete göstereceği empedansı azalır. Kapasitörün kapasitansı arttıkça yine AA işarete göstereceği empedansı azalacaktır [7].

AA işaretin frekansına göre kapasitörün empedansının arttığı gibi ideal sıfır Hertz frekansı olan DA (Doğru Akım) işarete karşı da idealde sonsuz empedans gösterecektir. Kondansatörlerin bu özelliğinden faydalanarak, Şekil 3.3'de gösterildiği gibi DA'ı bloke ederken AA'ı geçiren filtre devreleri tasarlanmıştır [7].



Şekil 3.3. Kapasitör Filtre Akış Şeması

Şekil 3.4'de bir kapasitörün eşdeğer devresi gösterilmiştir. Kapasitörün sadece saf kapasitif değeri ve etkisi yoktur. Bir kapasitör, sahip olduğu saf kapasitansa (*C*) ek, Eşdeğer seri direnç (ESR) değeri, eşdeğer seri indüktans (ESL) değeri ve paralel direnç (RF) değeri gibi değerleri de içerisinde barındırmaktadır. Kapasitör seçilirken bu değerler ve en yüksek çalışma voltajı gibi değerler göz önünde bulundurulmalıdır.

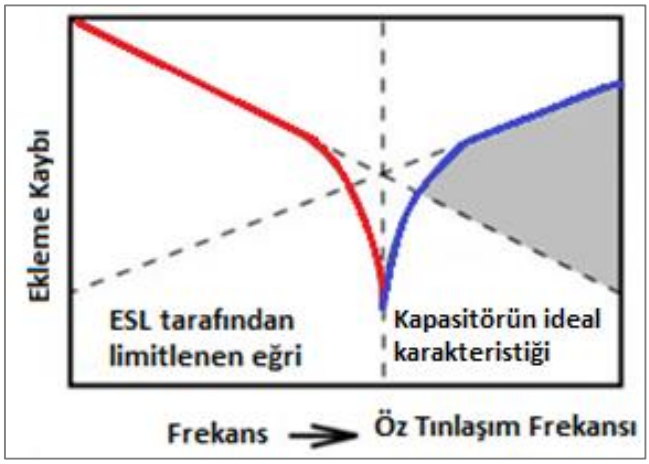


Şekil 3.4. Kapasitör Eşdeğer Devresi

Eşdeğer Seri Direnç (ESR): Bir kapasitörün eşdeğer seri direncidir. Kapasitörün kapasitansı ile seri olarak görünen iç dirençtir. Hemen hemen tüm kapasitörlerde ESR, kapasitörün yapısına, dielektrik malzemelerine, kalitesine ve güvenilirliğine bağlı olarak

değişmektedir. Eşdeğer seri direnç (ESR) değerleri birkaç miliohm ile birkaç ohm arasında değişir ve güç kayıplarına, düşük verimliliğe ve güç kaynaklarının ve regülatör devrelerinin kararsızlığına neden olur. ESR'den kaynaklanan kayıplar, bir kapasitörün hızlı bir şekilde şarj etme veya deşarj etme yeteneğini engelleyecektir. Elektronik devrelerin girişlerindeki kapasitörlerin artan ESR değerleri, kapasitör boyunca yüksek frekanslı gürültüyü artırarak filtreleme etkinliğini azaltır. Çıkıştaki kapasitörlerin artan ESR değerleri, kontrol döngüsünün kararlılığını etkileyerek daha fazla gürültüye neden olur [7].

Eşdeğer Seri İndüktans (ESL): ESR gibi, ESL de kapasitörler için çok önemli bir faktördür. Gerçek durumda kapasitörler ideal değillerdir. Rastgele endüktansları vardır. ESL değeri kapasitör üzerindeki akım döngüsüne bağlıdır, döngü ne kadar uzun olursa ESL değeri o kadar büyük olacaktır. Kapasitörün sonlandırma pinleri arasındaki mesafeler ne kadar artarsa ESL değeri o kadar artacaktır.

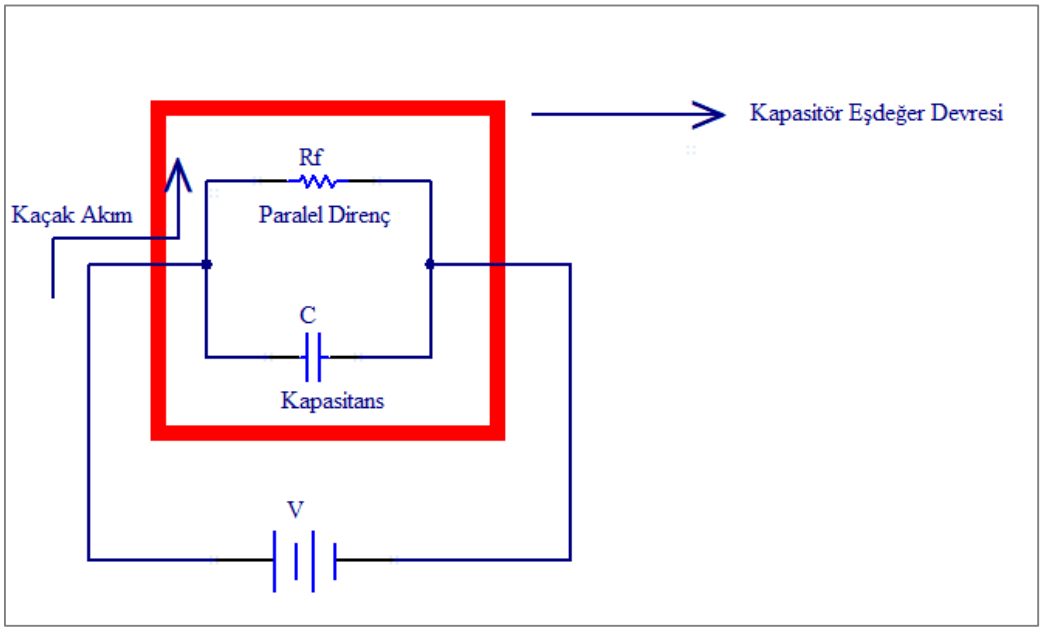


Şekil 3.5. ESL Frekans Grafiği

İdeal bir kapasitörde frekans arttıkça Eş 3.2'den yola çıkılarak empedans değeri azalacaktır. Şekil 3.5'de de bu azalış eğrisi kırmızı renk ile gösterilmiştir. Ancak kapasitörün ESL'sinden dolayı frekans değeri arttıkça da Eş 3.2'den yola çıkılarak empedans değeri artacaktır. Şekil 3.5'de de bu artış mavi renk ile gösterilmiştir. Bu iki eğrinin kesiştiği noktaya kapasitörün da öz rezonans frekansı denmektedir. Bu frekans değerinin daha altındaki frekanslarda kapasitör, kapasitif etki gösterecektir. Ancak daha üstündeki frekanslarda ise ESL'den dolayı endüktif etki göstermeye başlayıp frekansla artan bir empedans eğrisi çizecektir, bu da kapasitörün çalışmasını bozmaktadır. Bu nedenledir ki ESL değeri ne kadar küçük ise bu

bozucu etkinin frekans bandı o kadar daralıp, kapasitörün normal çalışma frekans bandı da artacaktır [7].

Paralel Direnç (RF): Kapasitör dielektrik direncine, paralel direnç denir. İdeal bir kapasitördeki dielektrik, mükemmel bir yalıtkandır (yani sonsuz dirence sahiptir) ve terminallerine gerilim uygulandığında içinden sıfır akım akar. Gerçekte ise bir kapasitördeki dielektrik, büyük bir dirence sahiptir ama sonlu bir dirence sahiptir, bu nedenle çok küçük bir kaçak akım akar.



Şekil 3.6. Kapasitör Kaçak Akım Akış Şeması

Şekil 3.6'da, RF direncine paralel ideal bir kapasitanstan oluşan gerçek bir kapasitörün eşdeğer devresini göstermektedir. Paralel direncin tipik değerleri, yaklaşık 1 MΩ ile 100.000 MΩ arasında değişebilir [7].

En Yüksek Çalışma Voltajı: Bir süzgeç devresi tasarımında, kapasitör seçilirken dikkat edilmesi gereken en önemli faktörlerden biridir. Tasarlanan devrede bulunacak kapasitöre uygulanacak en yüksek gerilimden daha büyük değerde bir çalışma gerilimine sahip olan bir kapasitör seçilmelidir. Aksi durumda, kapasitörün çalışma gerilim değerinden daha yüksek değerde bir gerilime maruz kalırsa kapasitör, kalıcı bir şekilde arızalanabilir ve/veya kısa devre olabilir. Süzgeç tasarlanırken kapasitör seçiminde bahsi geçen bu parametreler önemli olduğu kadar seçilen kapasitörün tipi ve yapısı da çok önemlidir.

Kapasitörler yapılarına göre; sabit, değişken ve ayarlanabilir olmak üzere 3'e ayrılır. Kutuplanmalarına göre ise kutuplu ve kutupsuz olmak üzere 2 tipleri bulunmaktadır. Kutuplu kapasitörler genelde yüksek kapasitif yoğunluk elde edilmek istendiğinde kullanılır ve tek yönlü olarak enerjilendirilebilir. Kutupsuz kapasitörler ise her iki yönde de enerjilendirilebildiği için alternatif akımlı (AA) devrelerde kullanılabilir. Yüksek frekanslı uygulamalar için de uygundur ve kaçak akımları oldukça düşüktür [7].

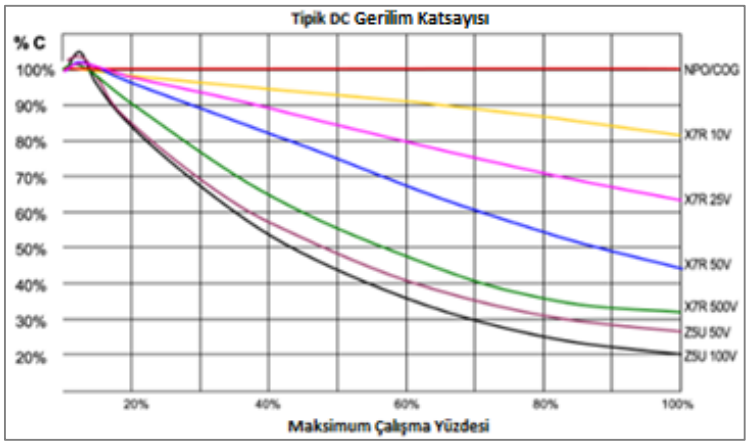
Kapasitör tiplerine göre; Seramik kapasitör, Elektrolitik kapasitör, Film kapasitör, Süper kapasitör, Cam kapasitör, Mika kapasitör ve "Feed-through" kapasitör olmak üzere 7'ye ayrılır [7].

Seramik Kapasitör: Seramik kapasitör, elektronik devrelerde en yaygın olarak kullanılan kapasitördür. Küçük fiziksel boyutu ve büyük şarj depolama kapasitesi nedeniyle seramik kapasitör kullanılır. Seramik kapasitör, adını dielektrik malzeme olarak seramiğin kullanılmasından dolayı alır.

Seramik kapasitörler, yüksek frekanslı devrelerde kullanılır. Kutupsuz bir kapasitördür. Seramik kapasitörler tipik olarak 1 pF ila 100 μF değerlerinde ve 10 Volt ila 5000 Volt DA çalışma gerilimlerinde üretilir.

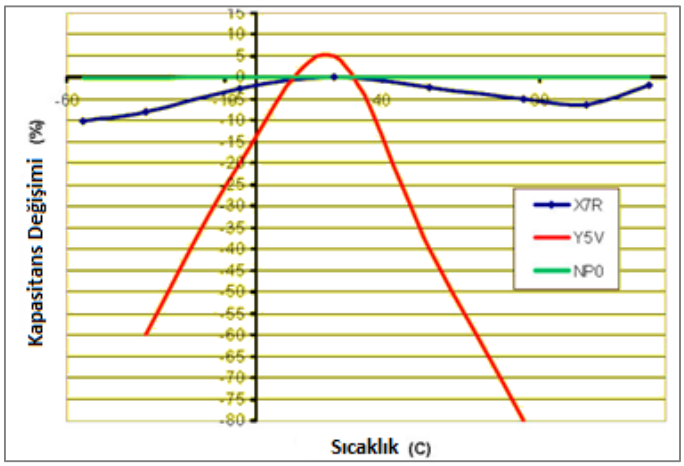
Öz rezonans frekansları oldukça yüksektir. ESR ve ESL değeri oldukça düşüktür. Bu avantajlarından dolayı süzgeç devrelerinde kullanımları yaygındır. Seramik kapasitörün en büyük dezavantajları ise DA gerilim eğilim katsayısı karakteristiği ve sıcaklık katsayısı karakteristiğidir.

DA gerilim eğilim katsayısı, seramik kapasitörün çalışma geriliminin maksimum çalışma gerilimine olan farkının kapasitörün kapasitansını değiştirmesidir. Şekil 3.7'de de gösterildiği gibi kapasitörün çalışma gerilimi, maksimum çalışma gerilmine ne kadar yaklaşırsa, kapasitörün kapasitans değeri kapasitörün dielektrik tiplerine bağlı olarak belirli bir yüzde ile azalmaktadır.



Şekil 3.7. Kapasitör DA Gerilim Eğilim Katsayısı Eğrisi [7]

Seramik kapasitörlerin dielektrik tiplerine bağlı olarak çalışma sıcaklık katsayıları nispeten yüksektir. Bu nedenle sıcaklıkları arttıkça kapasitans değişimi de yüksek olacaktır. Şekil 3.8'de bu değişim gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Kapasitör Sıcaklık Katsayısı Değişim Eğrisi [7]

Elektrolitik Kapasitör: Bir elektrolitik kapasitör, diğer kapasitör türlerinden daha büyük kapasitans değeri elde etmek için elektrolit kullanan bir kapasitör türüdür. Hemen hemen tüm elektrolitik kapasitörler kutupludur. Elektrolitik kapasitörlerin avantajı büyük kapasitans değerlerine sahip olmasıdır, fakat bu avantaj birkaç dezavantajı da beraberinde getirir. Bu dezavantajlar kaçak akımların fazla olması, tolerans değerlerinin fazla olması, eşdeğer seri direncin yüksek olması ve sınırlı bir kullanım ömrünün olmasıdır [7].

Film Kapasitör: Tipik film kapasitörleri, 1 nF dan 30 µF'a kadar değişen kapasitanslara sahiptir. 50 V'a kadar düşük, 2 kV'un üzerine kadar gerilim değerlerinde olabilirler. Yüksek

titreşimli uygulamalarda, yüksek sıcaklığa sahip ortamlarda ve yüksek güçlü uygulamalarda kullanılabilirler. Film kapasitörler, uzun bir hizmet ömrü sağlarken düşük kayıp ve yüksek verimlilik sağlar. Bu kapasitör ayrıca çok düşük bir ESR ve ESL değeri avantajına sahiptir. Çeşitli yüksek frekans AA uygulamalarında da kullanılabilir [7].

Süper Kapasitör: Süper kapasitörler, çok büyük miktarlarda elektrik yükünü depolamak için kullanılan kapasitörlerdir. Çift katmanlı kapasitörler veya ultra kapasitörler olarak da bilinirler. Geleneksel bir dielektrik kullanmak yerine, süper kapasitörler elektrik enerjisini depolamak için iki mekanizma kullanırlar: çift katmanlı kapasitans ve elektrokimyasal depolama yapıları. Süper kapasitörler normal kapasitörlerin işleyişini sıradan bir pilin işleyişiyle birleştirdiği gibi bir yapıdadır. Bu teknoloji kullanılarak elde edilen kapasitanslar 12000 F kadar yüksek olabilir. Süper kapasitörler kutupsal cihazlardır, yani tıpkı elektrolitik kapasitörler gibi devreye doğru şekilde bağlanmaları gerekir. Bu kapasitörlerin elektriksel özellikleri, özellikle hızlı şarj ve deşarj süreleridir [7].

Cam Kapasitör: RF devreleri için nihai yüksek frekanslı performansın gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Cam dielektrik kapasitörler, diğer birçok kapasitör biçimiyle karşılaştırıldığında maliyetleri yüksek olmasına rağmen çok yüksek performans seviyeleri sağlar. Tipik olarak bir cam kapasitör nispeten düşük bir kapasitans değerine sahiptir. Cam kapasitörlerin değerleri, 1 pF ile 1000 pF arasında değişebilir. Bu nedenle, bu kapasitörler esas olarak radyo frekansı devre tasarımında kullanılır [7].

Mika Kapasitör: Mika kapasitörler, nispeten küçük değerlere sahip, kararlı ve güvenilir kapasitörler gerektirdiğinde kullanılır. Yüksek frekanslarda kullanılmalarını sağlayan düşük kayıplı olmaları ve değerlerinin zamanla çok fazla değişmemesidir [7].

“Feed-Through” Kapasitör: Feed-through kapasitörler, süzgeç devrelerinin performans gereksinimlerini karşılamak için benzersiz bir şekilde tasarlanmış özel bir kapasitör türüdür. Tipik bir feed-through kapasitörü, topraklanmış bir muhafazanın merkezinden geçen bir elektrottan oluşur. Süzgeçleme uygulamalarının yanı sıra, feed-through kapasitörü elektronik devrelerde aktarım bileşenleri olarak yaygın olarak kullanılır. Feed-through kapasitörleri, EMG bastırma devreleri, güç dönüştürücüler ve güç kaynakları dâhil olmak üzere çok çeşitli devrelerde kullanılır.

3.5.2. İndüktör

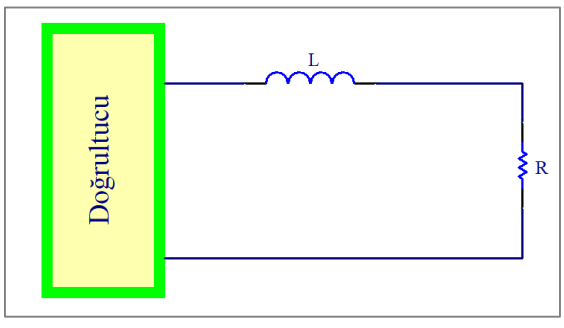
İletkenler ve dirençler gibi indüktörler de elektronik cihazlarda belirli işlevleri yerine getirmek için kullanılan basit bileşenlerdir. Normalde indüktörler, elektronik devrelerde bulunan bobin benzeri yapılardır. Bobin, merkezi çekirdeğin etrafına dolanan yalıtılmış bir teldir. İndüktörler çoğunlukla enerjiyi bir elektromanyetik alanda geçici olarak depolayarak ve ardından tekrar devreye vererek gerilim ve akım yükselmelerini azaltmak veya kontrol etmek için kullanılır.

İndüktör, endüktif etkilerinden dolayı üzerinde oluşan, değişken sinyallere karşı direnç göstermektedir. İndüktans (L), bobin üzerinde indüklenen manyetik alanın bir sonucudur. Eş 3.3'e göre indüktörün üzerinden geçen ve frekansı F olan her sinyale karşı frekansla doğru orantılı olarak empedans göstermektedir. Eş 3.3'de F frekansı, L indüktörün indüktansını ve X_L de indüktörün total empedansını göstermektedir.

$$X_L = 2 * \pi * F * L \tag{3.3}$$

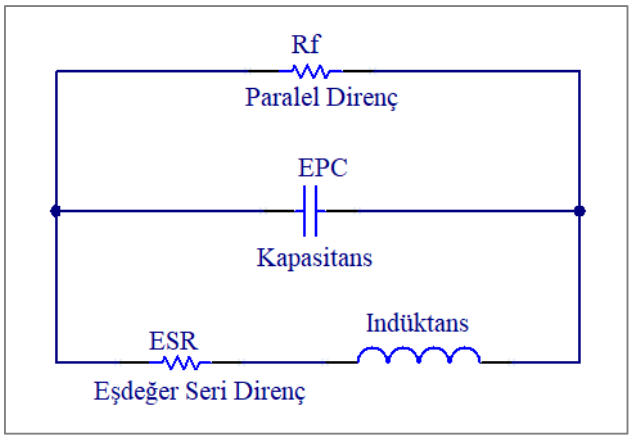
Süzgeç devrelerinde indüktörlerin kullanılmasının temel sebebi de indüktörlerin değişken sinyallere karşı empedans göstermesidir. Eş 3.3'den yola çıkılarak, AA işaretin frekansı arttıkça indüktörlerin AA işarete göstereceği empedansı artar.

İndüktörlerin indüktansı arttıkça yine AA işarete göstereceği empedansı artacaktır. AA işaretin frekansına göre indüktörün empedansının arttığı gibi ideal sıfır Hertz frekansı olan DA (Doğru Akım) işarete karşı da idealde sıfır Ohm empedans gösterecektir. İndüktörleri bu özelliğinden faydalanarak, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi AA'a karşı empedans gösteren ve DA'ı geçiren süzgeç devreleri tasarlanmıştır.



Şekil 3.9 İndüktör Filtre Akış Şeması

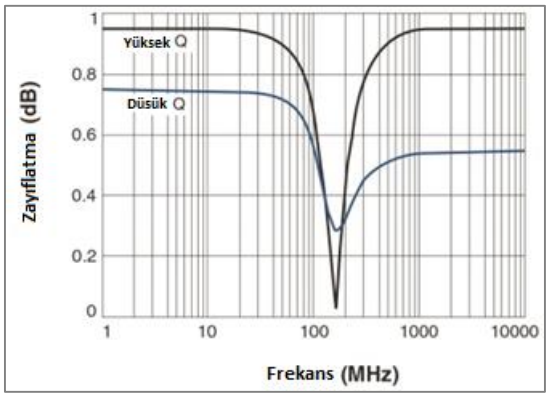
Şekil 3.10'da bir indüktörün eşdeğer devresi gösterilmiştir. İndüktörün sadece saf endüktif değeri ve etkisi yoktur. Bir indüktör, sahip olduğu saf indüktansa (L) ek, eşdeğer seri direnç (ESR) değeri, eşeğer paralel kapasitans (EPC) değeri ve paralel direnç (RF) değeri gibi değerleri de içerisinde barındırmaktadır. İndüktör seçilirken bu değerler ve en yüksek çalışma akımı gibi değerler göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 3.10. İndüktör Eşdeğer Devresi

Eşdeğer Seri Direnç (ESR): Bir indüktörde, birden fazla faktörden kaynaklı eşdeğer seri direnç etkisi oluşmaktadır. Bu ESR, indüktörün saf indüktanslıktan uzaklaşmasına ve indüktörde kayıplar oluşmasına sebep olur. Bir indüktörün saf indüktanslık değeri kalite faktörü (Q) olarak bilinir. Yani indüktörde ne kadar seri direnç etkisi var ise indüktör üzerinden akan akımla orantılı olarak kalite faktörü de o kadar düşüktür veya kayıpları da o kadar fazladır.

Şekil 3.11'de gösterildiği gibi Q ne kadar yüksekse indüktör gürültülü sinyallere karşı o kadar etkili çalışır ancak dezavantaj olarak ise etkili çalıştığı bant genişliği azalır, daha dar bir frekans bandında etkili filtreleme yapar. Süzgeç optimizasyonu yapılırken Q faktörü değeri süzgeç devresine göre ayarlanmalıdır. Kalite faktörünün (Q) denklemi Eş 3.4 ve Eş 3.5'de gösterilmektedir [8].



Şekil 3.11. Q Faktörünün Etkisi

$$Q = \frac{X_L}{R_{ESR}} \tag{3.4}$$

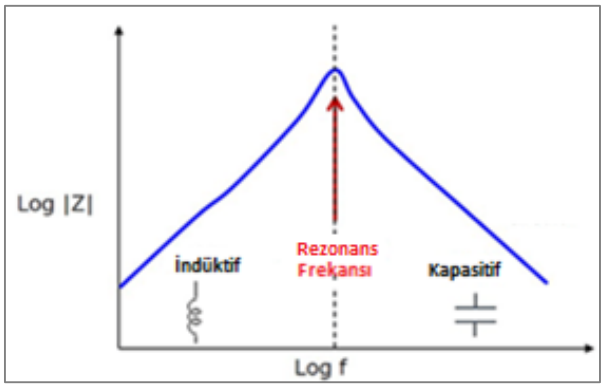
$$X_L = 2 * \pi * F * L \tag{3.5}$$

Eşdeğer Paralel Kapasitans (EPC): İdeal bir indüktörde empedans, artan frekansla doğrusal olarak yükselmektedir, ancak pratikte, Şekil 3.10'daki eşdeğer devresinde gösterildiği gibi, indüktöre paralel olarak parazitik bir kapasitans olan eşdeğer paralel kapasitör (EPC) mevcuttur ve bu nedenle kapasitörlerde olduğu gibi bir öz rezonans frekansı olgusu oluşmaktadır. Dolayısıyla, öz rezonans frekansına kadar olan frekanslarda, indüktör endüktif karakteristiğini sürdürür, ancak rezonans frekansının ötesinde eşdeğer paralel kapasitans etkisi baskın hale gelir ve kapasitif bir özellik sergilemeye başlar. Yani rezonans frekansının üzerindeki frekans bölgesinde indüktör artık görev yapmamaya başlar.

Öz rezonans frekası (*F*), indüktörün indüktansı (*L*) ve eşdeğer paralel kapasitansı (CEPC) ile arasındaki ilişkiyi gösteren formül Eş 3.6 'da verilmektedir.

$$F = \frac{1}{2*\pi*\sqrt{L*C_{EPC}}} \tag{3.6}$$

Şekil 3.12'de bu öz rezonans frekansı noktası ve eşdeğer paralel kapasitör etkisini gösteren bir grafik bulunmaktadır.



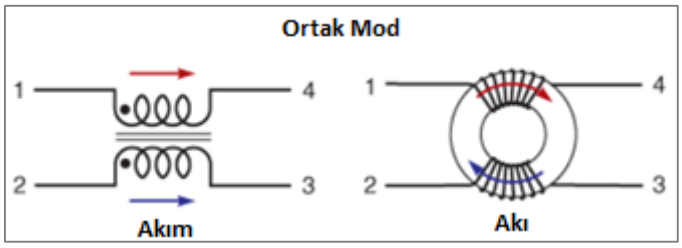
Şekil 3.12. EPC Frekans Grafiği [8]

Paralel Direnç (RF): İndüktörün çekirdek materyalinin kayıpları nedeni ile ortaya çıkar. Kalite faktörünü (*Q*) düşüren etmenlerdendir.

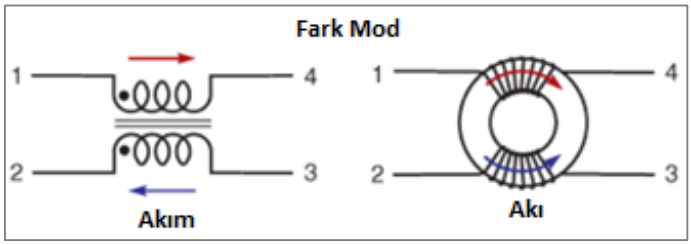
3.5.3. Ortak mod indüktör

Ortak mod indüktörü (Common Mode Choke; CMC), istenen DA veya düşük frekanslı sinyalin geçmesine izin verirken iki veya daha fazla veri veya güç hattında ortak olan yüksek frekanslı gürültüyü engelleyen bir süzgeçtir. Ortak mod (Common Mode; CM) gürültü akımı tipik olarak; istenmeyen radyo sinyalleri, korumasız elektronik bileşenler, invertörler ve motorlar gibi kaynaklardan yayılır. Süzülmeden bırakıldığında, bu gürültüler, elektronik ve elektrik devrelerinde elektromanyetik girişim (EMG) sorunları ortaya çıkarır. Fark modda, gürültülü akım bir hatta kaynaktan yüke bir yönde hareket eder ve devreyi tamamlayan dönüş hattında da ters yönde hareket eder.

Ortak modda, gürültü akımı her iki hat üzerinde aynı yönde hareket eder. Böylece manyetik akılar, Şekil 3.13'de gösterilen toroid çekirdeğindeki kırmızı ve mavi oklarla gösterildiği gibi gürültüyü engellemek için aynı yönde oluşurlar, oluşan bu manyetik alanlar aynı yönde olduğu için birleşir ve bileşik bir manyetik alan oluştururlar. Bu bileşik manyetik alan ortak modda bulunan yüksek frekanslı gürültü sinyallerine karşı yüksek bir empedans oluşturur. Şekil 3.14'de fark modda, yine kırmızı ve mavi ile gösterilen akımlar zıt yönlerde hareket eder ve iki sinyalde de oluşan manyetik alanlar birbirlerine karşıt yönde oluştukları için birbirlerini sıfırlarlar ve fark modda var olan frekanslı sinyallere karşı herhangi bir empedans oluşturmazlar.

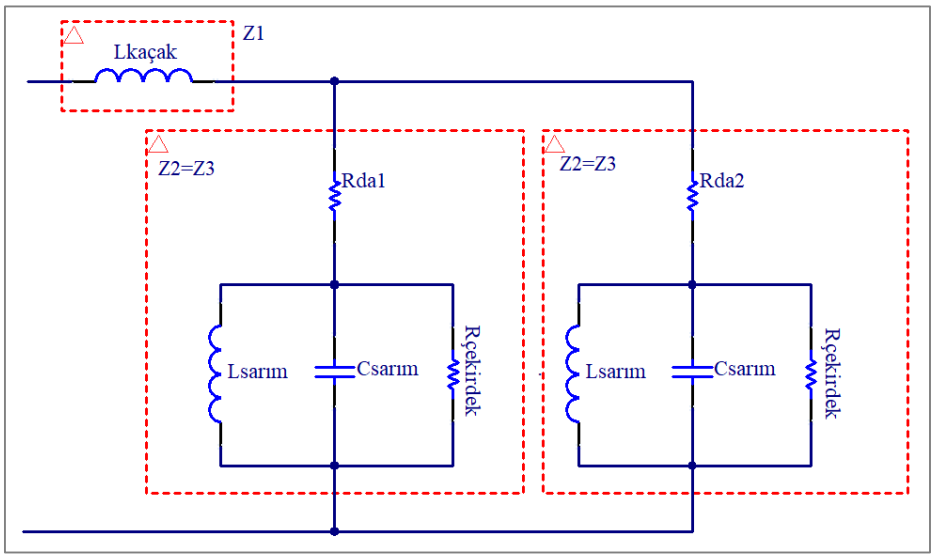


Şekil 3.13. Ortak Mod Gürültünün Etkisi



Şekil 3.14. Fark Mod Gürültünün Etkisi

Şekil 3.15'de CMC'nin eşdeğer devresi gösterilmektedir. $L_{kaçak}$ değeri CMC üzerinde istenmeyen kaçak endüktans değerini temsil etmektedir. $C_{sarım}$ değeri sarımlar arası oluşan kapasitansı temsil etmektedir. R_{da} değeri sarımların DA eşdeğer direncini göstermektedir. $L_{sarım}$ değeri ise sarımların indüktans değerini temsil etmektedir. $R_{çekirdek}$ değeri ise sarımların yapıldığı çekirdeğin kayıplarını temsil etmektedir.



Şekil 3.15. Ortak Mod İndüktör Eşdeğer Devresi

$$Z_1 = Z_{kaçak} = j * w * L_{kaçak} \tag{3.7}$$

$$Z_2 = R_{da} + R_{çekirdek} // Z_{L_Sarım} // Z_{C_Sarım} \tag{3.8}$$

$$Z_3 = Z_2 = R_{da} + \frac{R_{çekirdek}}{1+j*R_{çekirdek}*(w*C_{sarım} - \frac{1}{1*w*L_{sarım}})} \quad (3.9)$$

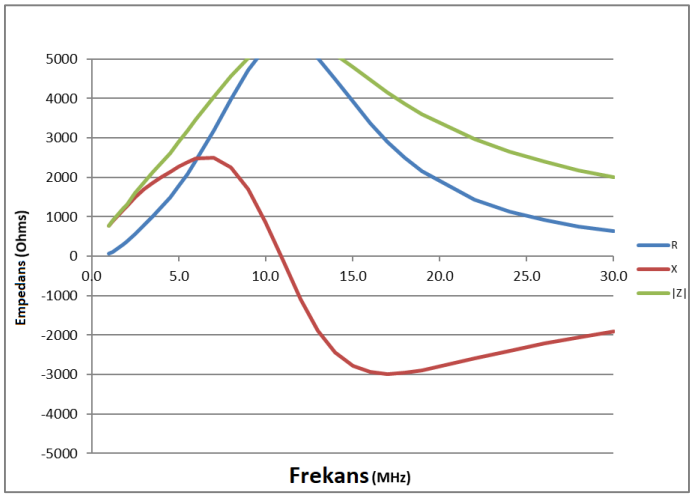
$$Z_{23} = Z_2 // Z_3 = \frac{Z_2}{2} \quad (3.10)$$

$$Z_{123} = Z_1 + Z_{23}$$

$$Z_1 + Z_{23} = j*w*L_{kaçak} + \frac{R_{da}}{2} + \frac{R_{çekirdek}}{2+2*j*R_{çekirdek}*(w*C_{sarım} - \frac{1}{1*w*L_{sarım}})} \quad (3.11)$$

$$|Z_{123}| = w*L_{kaçak} + \frac{R_{da}}{2} + \frac{R_{çekirdek}}{\sqrt{2^2+(2*j*R_{çekirdek}*(w*C_{sarım} - \frac{1}{1*w*L_{sarım}}))^2}} \quad (3.12)$$

Şekil 3.15'deki eşdeğer devre üç ayrı empedansa ayrılmıştır. Z1 empedansı ortak mod indüktörün kaçak indüktansından oluşan empedansı temsil etmektedir ve Eş 3.7'de formülü gösterilmektedir. Z2 ise sarımlardan birinin; $C_{sarım}$, R_{da} ve $L_{sarım}$ değerlerinden oluşan empedans değerini temsil etmektedir ve Eş 3.8'de formülü gösterilmektedir. Z3 değeri ise diğer sarımın empedans değerini temsil etmektedir ve Eş 3.9'de formülü gösterilmektedir. Eş 3.10'da sarımların empedanslarının eş değer empedansını gösteren eşitlik bulunmaktadır. Eş 3.11'de ise ortak mod indüktörün toplam empedansını temsil eden eşitlik bulunmaktadır. Eş 3.12'de ortak mod indüktörün frekansa bağlı olarak değişen empedasını gösteren eşitliği bulunmaktadır. Bu eşitliği referans alarak çeşitli frekanslarda empedans hesabı yapıldığında, frekansa bağlı empedans değişim eğirisi Şekil 3.16'da gösterilmektedir [9].

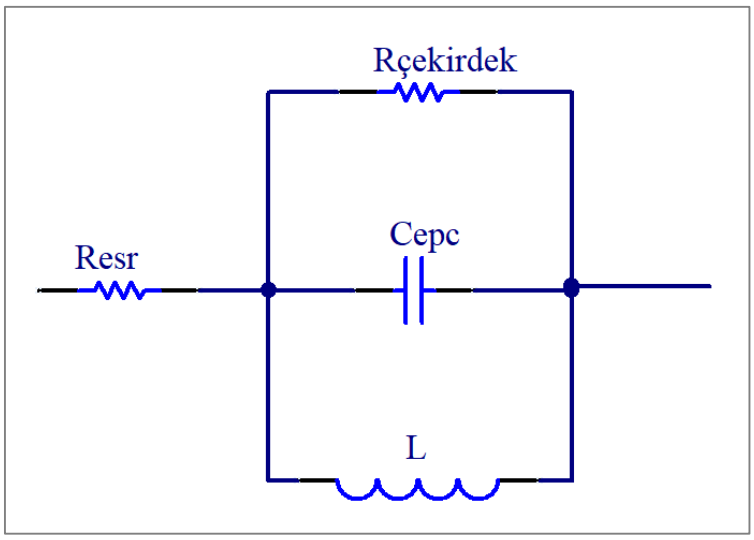


Şekil 3.16. Ortak Mod İndüktör Empedans Değişim Eğrisi [9]

3.5.4. Ferrite çekirdek

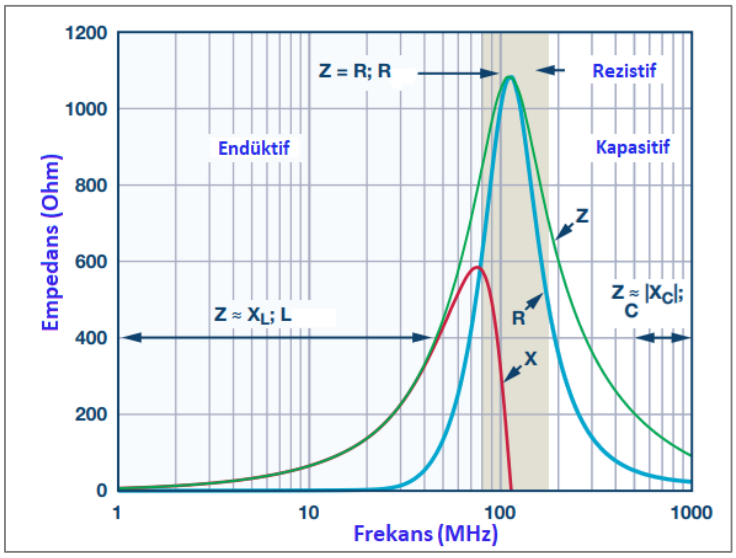
Yüksek frekanslı gürültüleri süzmek ve yüksek frekans izolasyonunu sağlamak için etkili yöntemlerden biri, ferrit çekirdeklerin kullanılmasıdır. Bir ferrit çekirdek, geniş bir frekans aralığında yüksek frekanslı gürültüleri süzen pasif bir elemandır. Amaçlanan frekans aralığının üzerinde saf direnç etkisi göstermeye başlar ve gürültü enerjisini ısı şeklinde dağıtarak süzme işlemi yapmaya devam eder. Direnç etkisi gösterdiği bölgenin üstündeki frekanslarda ise tıpkı bir indüktör gibi EPC etkisinden dolayı frekansla azalan bir empedans etkisi göstermeye başlar. Ferrit çekirdek, süzülmesi istenen hatta seri olarak bağlanır ve genellikle, ferrite 'in her iki tarafında da toprağa kapasitörlerle birleştirilir.

Bu, düşük geçişli bir süzgeç ağı oluşturarak yüksek frekanslı gürültüleri daha da azaltır. Şekil 3.17'de ferrite çekirdeğin eşdeğer devresi gösterilmektedir. Sahip olduğu saf indüktansa (L) ek olarak, eşdeğer seri direnç (R_{ESR}) değeri, eşdeğer paralel kapasitans (C_{EPC}) değeri ve sarımların yapıldığı ferrit in kayıplarını temsil eden $R_{çekirdek}$ değerini barındırmaktadır.



Şekil 3.17. Ferrite Çekirdek Eşdeğer Devresi

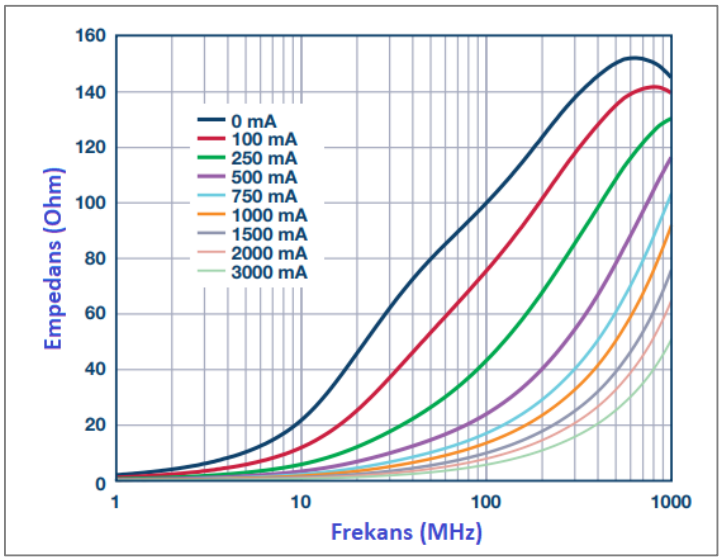
Şekil 3.18'de ferrite çekirdeğin frekansa bağlı olarak empedans değişimini gösteren eğri gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Ferrite Çekirdek Frekans Empedans Eğrisi [10]

Ferrite çekirdeklerin empedans değişimine göre üç bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgelerden ilki indüktans etkisi gösterdiği bölgedir bu bölgede frekans arttıkça empedans artmaktadır. Daha yüksek frekansları barındıran ikinci bölge ise saf rezistif etki gösterdiği bölgedir, burada frekansa bağlı olarak empedans neredeyse değişmez. Son ve üçüncü bölge de ferrite kapasitif etki göstermeye başlar frekans arttıkça empedansı azalır. Filtreleme yaparken filtrelenmek istenen frekans aralığının ferrite çekirdeğin üçüncü bölgesinde olmamasına dikkat edilmelidir.

Ferrite çekirdekler rezistif olarak çalıştıkları ikinci bölgeden dolayı indüktörlere göre daha geniş frekans aralığında süzme yapabilirler. Ferrite çekirdeklerin en büyük dezavantajları ise DA Sapma karakteristikleridir. Ferrite çekirdekler maksimum çalışma akımlarına ne kadar yakın akım değerleri ile yüklenirlerse o kadar indüktans değerleri düşer ve süzme empedansları zayıflamaya başlar. Şekil 3.19'da farklı akım değerlerinde yüklenen ferrite çekirdeğin frekansa bağlı olarak empedans değişimi gösterilmektedir. Ne kadar çok akımla yüklenirse empedansı da o kadar zayıflamaktadır [10].



Şekil 3.19. Ferrite Çekirdek DA Sapma Karakteristiği Eğrisi [10]

3.6. Pasif Süzgeç Devresi Topolojileri

Elektronikte kullanılan birçok farklı filtre türü vardır. Bu filtre türleri, alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durduran süzgeç devreleridir. Pasif süzgeçler, dirençler, kapasitörler ve indüktörler gibi pasif bileşenlerden oluşur. Süzgeçler, geri kalanını bloke ederken veya "zayıflatırken" içinden geçmesine izin verdikleri sinyallerin frekans aralığına göre adlandırılır. En sık kullanılan süzgeç tasarımları şunlardır:

Yüksek geçiren süzgeç: Yüksek geçiren süzgeç yalnızca kesme frekansı (F_c) noktası ve daha yüksek frekanslı sinyallerin geçmesine izin verirken, kesme frekansından daha düşük olanları bloke eder.

Bant geçiren süzgeç: Bant geçiren süzgeç, frekans bandının her iki tarafındaki hem düşük hem de yüksek frekansları bloke ederken, iki nokta arasındaki belirli bir frekans bandı aralığındaki sinyallerin geçmesine izin verir.

Bant durduran süzgeç: Bant durduran süzgeç, bant geçiren süzgecin tersidir ve bloke edici frekans bandının her iki tarafındaki hem alt hem de yüksek frekanslı sinyallerin geçmesine izin verir.

Alçak geçiren süzgeç: Alçak geçiren süzgeç yalnızca 0Hz'den kesme frekansına (F_c) kadar düşük frekanslı sinyallerin geçmesine izin verirken, daha yüksek frekanslı olanları engeller.

Bu tasarımda DA kıyıcıların girişinde ve çıkışında olabildiğince düşük frekanslı sinyaller olması gerektiği, hatta idealde tamamen DA bir sinyal olması gerektiği için tasarlanan süzgeç devresinde alçak geçiren süzgeç kullanılmaktadır. Genel itibari ile aşağıda belirtildiği gibi üç temel pasif alçak geçiren süzgeç topolojisi bulunmaktadır.

RC (L tipi) alçak geçiren süzgeç: Alçak geçiren süzgeç tipinin en temel türü RC süzgeç veya şekli nedeniyle L tipi süzgeç olarak adlandırılır, direnç elemanı sinyal hattına seri bir şekilde ve kapasitör ise sinyal hattı ile şasi arasına yerleştirilir. Bu devre iki elemandan oluşur. Bir RC alçak geçiren süzgeç, kesme frekansı (F_c), kapasitif reaktansın (X_c) dirence (R) eşit olduğu rezonansta gerçekleşir. Eş. 3.13'de RC filtrenin kesme frekansı gösterilmektedir.

$$X_c = \frac{1}{2*\pi*F_c*C} \text{ , } X_c = R \tag{3.13}$$

$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C}$$

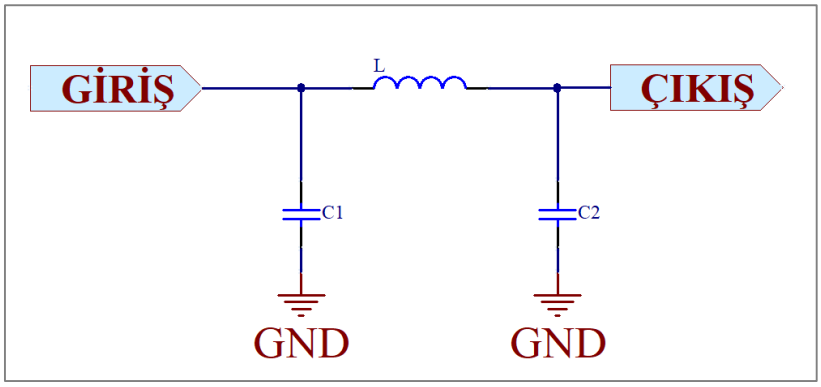
RC tipi pasif süzgecin yanı sıra birkaç farklı temel süzgeç konfigürasyonu da bulunmaktadır. Bu çok elemanlı süzgeçler, ilgili frekans aralığının çok büyük olduğu ve bir bileşenli bir süzgecin başarılı bir şekilde tamamen zayıflatmasının imkânsız olduğu veya sinyalin genliğinin çok yüksek olduğu durumlarda kullanışlıdır.

İkinci bir süzgeç bileşeninin eklenmesi, süzgecin bastırma gücünü 40dB/dekad'a çıkaracaktır. Bu tür süzgeçlere çift kutuplu, iki aşamalı, iki elemanlı veya ikinci dereceden süzgeçler gibi çeşitli adlar verilir. Üç reaktif bileşenli süzgeçler, 60dB/dekad sağlayacaktır. Dört reaktif bileşenli süzgeçler 80dB/dekad zayıflama sağlayacaktır.

Pi (π) alçak geçiren süzgeç: Pi süzgeç, geleneksel iki elemanlı pasif süzgeçler dışında başlıca üç elemandan oluşan bir pasif süzgeç türüdür.

Alçak geçiren süzgeç uygulaması için çoğunlukla pi süzgeç kullanılır. Bir pi süzgecin ana bileşeni, onu bir LC süzgeci yapan kapasitör ve indüktördür. Alçak geçiren süzgeç uygulamasında, kapasitör, alçak geçiren konfigürasyonda, giriş tarafında kaldığı için pi süzgeci kapasitör giriş süzgeci olarak da adlandırılır. LC süzgecinden farklı olarak indüktörün iki tarafında da kapasitör bulunduğu için gürültüler girişten çıkışa ve çıkıştan

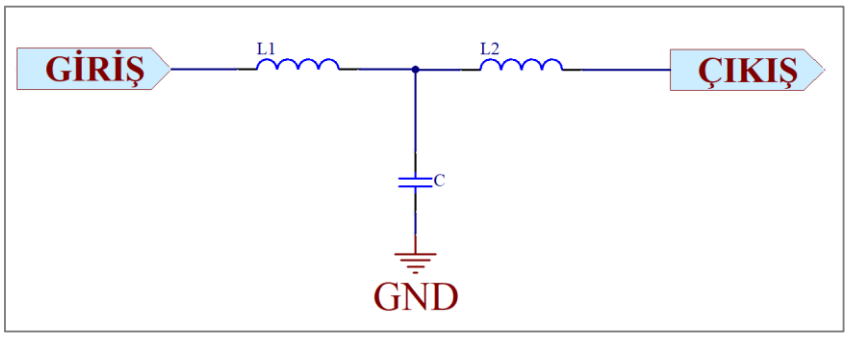
girişe olmak üzere iki yönde de LC süzgeç ile süzülmektedir. Şekil 3.20'de pi süzgecin devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Pi Süzgeci Devre Şeması

$$F_c = \frac{1}{2*\pi*\sqrt{L*C}}, C1 = C2 = C \tag{3.14}$$

T alçak geçiren süzgeç: T alçak geçiren süzgeç, T harfine benzer. Süzülecek hatta seri bir indüktör ve sinyal ile şasi hattı arasına kapasitör takılı olan bir süzgeç tipidir. Temel olarak pi süzgecinde olduğu gibi bir LC süzgeç devresidir. Pi süzgeci gibi iki yönlü süzme işlemi yapılmaktadır. Şekil 3.21'de T süzgecinin devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.21. T Süzgeci Devre Şeması

$$F_c = \frac{1}{2*\pi*\sqrt{L*C}}, L1 = L2 = L \tag{3.15}$$

Pi süzgeci kapasitör bağlantılarından dolayı yüksek frekanslarda düşük empedans göstererek süzme işlemi yapar. T filtresi ise indüktörlerinden dolayı yüksek empedans göstererek süzme işlemi yapar. Pi veya T süzgeç devrelerinin hangisinin kullanılacağı, içinde yer aldıkları devrenin empedans karakteristiğine göre belirlenebilir [6].

3.7. Elektromanyetik Uyumluluk İçin Aviyonik Standartlar

Elektronik cihazların elektromanyetik uyumluluğunu sağlayabilmek için birçok askeri ve aviyonik standart bulunmaktadır. Bu çalışmada MIL-STD-461F standardı referans alınmıştır.

MIL-STD-461F: MIL-STD-461, tüm aktif askeri elektroniklere uygulanır. MIL-STD-461, askeri taşıtlar, gemiler, uçaklar ve sabit tesisler gibi bir dizi geniş askeri platform yelpazesine sahiptir. Elektromanyetik uyumluluğu amaçlayan gereksinimlere sahip bir standarttır. Birçok ülke tarafından kullanılmaktadır. Amerikan asıllı bir standarttır, tam adı ise "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment"dır. Standardın sonundaki F ibaresi ise son revizyonunu belirtmektedir. Bu son revizyon 2007 yılında yayımlanmıştır.

Bu test standardı temel olarak dört ana elektromanyetik gürültü yayınım şeklini kapsamaktadır. Bu aşamalar aşağıdaki gibidir.

Işıma yoluyla yayınım (RE-Radiated Emission): Bu test aşamasında test edilen cihazın ışıma yoluyla ortama ne kadar gürültü yaydığı bir anten aracılığı ile test edilir. Bu test aşaması RE-101, RE-102 ve RE-103 olmak üzere farklı frekans bantlarında üç alt test adımı ile yapılmaktadır. Bu alt test adımlarının frekans bantları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Işıma yoluyla alınganlık (RS-Radiated Susceptibility): Bu test aşamasında test edilen cihaza ışıma yoluyla belirli bir frekans ve genlikte gürültüler uygulanır ve test edilen cihazın bu gürültülere karşı fonksiyon kaybı yaşamadan çalışmasına devam etmesi beklenilmektedir.

Bu test aşaması RS-101, RS-103 ve RS-105 olmak üzere farklı frekans bantlarında üç alt test adımı ile yapılmaktadır. Bu alt test adımlarının frekans bantları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

İletkenlik yoluyla yayınım (CE-Conducted Emission): Bu test aşamasında test edilen cihazın iletkenlik yoluyla güç ve sinyal hatları üzerinden ortama ne kadar gürültü yaydığı test edilir. Bu test aşaması CE-101, CE-102 ve CE-106 olmak üzere farklı frekans bantlarında üç alt test adımı ile yapılmaktadır. Bu alt test adımlarının frekans bantları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

İletkenlik yoluyla alınganlık (CS- Conducted Susceptibility): Bu test aşamasında test edilen cihaza iletkenlik yoluyla güç ve sinyal hatları üzerinden belirli bir frekans ve genlikte gürültüler uygulanır ve test edilen cihazın bu gürültülere karşı fonksiyon kaybı yaşamadan çalışmasına devam etmesi beklenir.

Bu test aşaması CS-101, CS-103, CS-104, CS-105, CS-106, CS-109, CS-114, CS-115 ve CS-116 olmak üzere farklı frekans bantlarında dokuz alt test adımı ile yapılmaktadır. Bu alt test adımlarının frekans bantları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

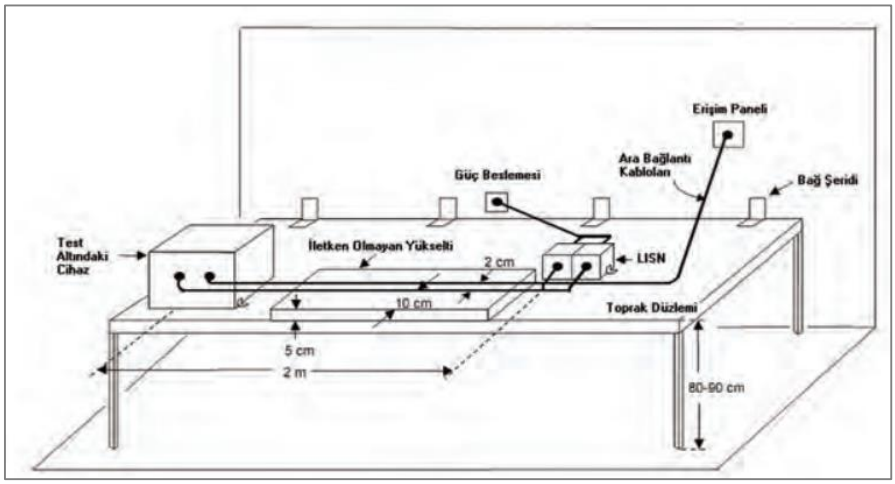
Çizelge 3.1. MIL-STD-461 Test Adımları Temel Sınıflandırması [11]

Test Kodu	Tanımı
CE101	İletkenlik Yoluyla Yayınım, Güç Hatları, 30 Hz - 10 kHz
CE102	İletkenlik Yoluyla Yayınım, Güç Hatları, 10 kHz - 10 MHz
CE106	İletkenlik Yoluyla Yayınım, Anten Terminali, 10 kHz - 40 GHz
CS101	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Güç Hatları, 30 Hz to 150 kHz
CS103	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Anten Girişi, İntermodulasyon, 15 kHz - 10 GHz
CS104	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Anten Girişi, İstenmeyen İşaretlerin Bastırılması, 30 Hz - 20 GHz
CS105	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Anten Girişi, Çapraz Modülasyon, 30 Hz - 20 GHz
CS106	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Geçişler, Güç Hatları
CS109	İletkenlik Yoluyla Alınganlık,Yapı Akımı, 60 Hz - 100 kHz
CS114	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Kablo Enjeksiyonu, 10 kHz - 200 MHz
CS115	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Kablo Enjeksiyonu, Darbe Modülasyonu
CS116	İletkenlik Yoluyla Alınganlık, Bastırılmış Sinüzoid Geçişler, Kablolar ve Güç Hatları, 10 kHz - 100 MHz
RE101	lşıma Yoluyla Yayınım, Manyetik Alan, 30 Hz - 100 kHz

Çizelge 3.1. (devam) MIL-STD-461 Test Adımları Temel Sınıflandırması [11]

RE102	lşıma Yoluyla Yayınım, Elektrik Alan, 10 kHz - 18 GHz
RE103	lşıma Yoluyla Yayınım, Anten Harmonik Çıkışları, 10 kHz - 40 GHz
RS101	lşıma Yoluyla Alınganlık, Manyetik Alan, 30 Hz - 100 kHz
RS103	lşıma Yoluyla Alınganlık, Elektrik Alan, 2 MHz - 40 GHz
RS105	lşıma Yoluyla Alınganlık, Geçici Elektromanyetik Alan

Genel Test düzeneği Şekil 3.22'de gösterildiği gibidir.

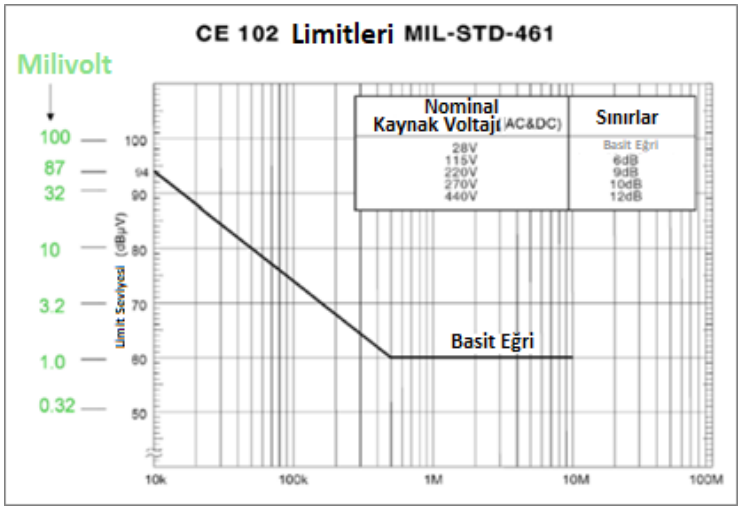


Şekil 3.22. MIL-STD-461 Test Düzeneği [11]

Test düzeneği, test laboratuvarı dışında bulunan test ve ölçüm cihazları ile test edilecek cihazı besleyen güç kaynağına bağlantı, odanın ekranlanmasını bozmayacak şekilde erişim panelleri üzerinden sağlanmaktadır. Cihazın güç kaynağı beslemesi LISN (Line Impedance Stabilization Network; Hat Empedansını Dengeleme Devresi) adlı bir cihaz üzerinden yapılmaktadır. LISN, test altındaki cihazın güç hatlarında güç kaynağı hattının empedansı ne olursa olsun standart bir ortak empedansın olmasını sağlamaktadır. Ayrıca test altındaki cihazla güç kaynağı arasında elektromanyetik süzgeç görevi görmektedir. Güç kaynağından gelen istenmeyen elektromanyetik gürültülerin test altındaki cihaza ulaşmasını engellemektedir. Test altındaki cihazın güç hattı üzerindeki elektromanyetik gürültülerin güç kaynağına ulaşmasını engelleyerek, güç kaynağının test edilecek cihazı test için bozucu veya yanıltıcı bir etki oluşturmadan beslemesini sağlamaktadır [11].

3.7.1. MIL-STD-461F CE-102 standardı

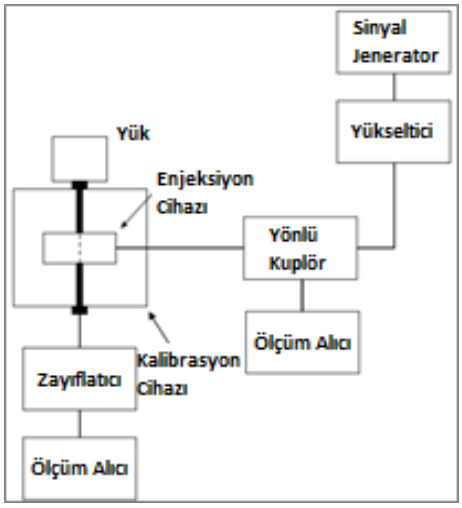
CE-102 test standardının amacı, 10 kHz - 10 MHz frekans bandında test edilen cihazın güç hatlarına iletkenlik yolu ile indüklenebilecek fark ve ortak mod gürültülerin ölçülmesidir. CE-102 testi, test edilen cihazın güç hatlarının hem artı güç hattına hem de eksi güç hattına uygulanmaktadır. CE-102 testinin eğrisi Şekil 3.23'de gösterildiği gibidir. Test edilen cihazdan ölçülen sinyallerin seviyeleri, ilgili frekans bandında, görseldeki "Basit Eğri" olarak adlandırılmış eğrinin altında kaldığı sürece, cihaz testi geçmiş olacaktır [11].



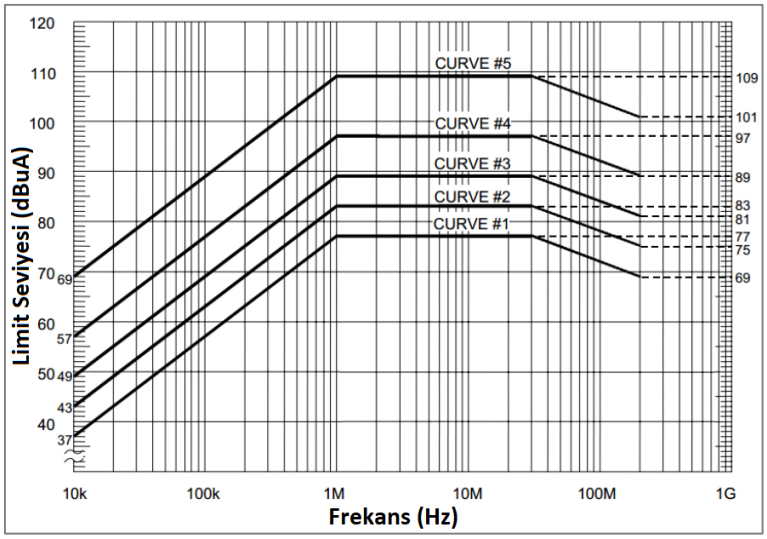
Şekil 3.23. CE-102 Test Eğrisi [11]

3.7.2. MIL-STD-461F CS-114 standardı

CS-114 test standardının amacı, 10 kHz - 200 MHz frekans bandında test edilen cihazın güç hatlarına enjeksiyon cihazı ile belirli seviyelerde (Şekil 3.24'de gösterildiği gibi) fark ve ortak mod gürültüleri uygulanmasıdır. CS-114 testi, test edilen cihazın güç hatlarının hem artı güç hattına hem de eksi güç hattına uygulanmaktadır. CS-114 "Curve#5" testinin eğrisi Şekil 3.25'de gösterildiği gibidir. Bu frekans bandında ve gücünde cihaza uygulanan gürültülere rağmen cihazda bir fonksiyonel kayıp ve arıza olmaması durumunda cihaz testi geçmiş olmaktadır.



Şekil 3.24. CS-114 Test Düzeneği [11]



Şekil 3.25. CS-114 Test Eğirisi [11]

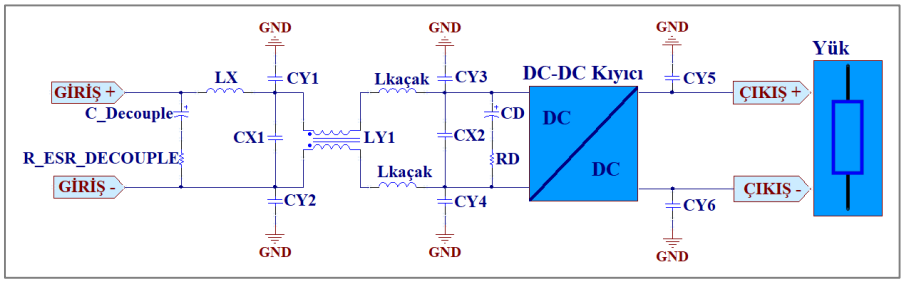
3.8. Aviyonik Standartlara Uygun Süzgeç Devresi Tasarımı Kriterleri

DA-DA kıyıcıların anahtarlama eylemleri, süzülmesi gereken iki tür gürültü akımına neden olur: ortak mod ve fark mod.

Ortak mod gürültü, DA-DA kıyıcının içinde bulunan yüksek gerilim ve frekanslı anahtarlamalardan kaynaklanır. Bu gürültü, kıyıcının pozitif ve negatif giriş terminalleri üzerinde hareket eder ve sistemin toprak referansı üzerinden tamamlanır. Kıyıcıların anahtarlama eylemi ayrıca fark mod gürültü de üretir, ancak bu gürültünün etkisi kıyıcının giriş terminalleri arasındaki sirkülasyonla sınırlıdır.

Tasarlanan bu süzgeç devresi, hem ortak mod hem de fark mod gürültü akımlarını etkili bir şekilde süzmek için kullanılır. Bu tasarım, ortak mod indüktör, kapasitor ve ayrık mod indüktör gibi birkaç ayrı bileşen içermektedir. Ortak modlu süzgeç bloğu Şekil 3.26'daki C_{Y1}, C_{Y2}, C_{Y3}, C_{Y4}, C_{Y5}, C_{Y6}, L_{Y1} ve $L_{kaçak}$ gibi elemanları kapsayan devredir. Ortak mod süzme işlemi genellikle, hem pozitif hem de negatif giriş terminallerinden akan ortak mod gürültü akımları için ortak mod indüktör (L_{Y1}) ile yüksek empedanslı bir seri yol oluşturur.

Bu yüksek empedanslı seri yolun ardından genlikleri tamamen bastırılamayan veya halen bozuculuğunu devam ettiren ortak mod gürültüler, sistem toprağına (elektronik sistemin şasesi veya daha karmaşık yapılarda farklı elektronik devrelerin topraklarının tek bir noktada birleştiği toprak noktası) paralel yol oluşturan kapasitörler (C_{Y1}, C_{Y2}, C_{Y3}, C_{Y4}) ile neredeyse tamamen bastırılır. Ayrıca DA-DA kıyıcının çıkışına da yine ortak mod gürültüyü azaltması için 2 adet *Y*- kapasitörü (C_{Y5}, C_{Y6}) eklenir.



Şekil 3.26. Süzgeç Blok Şeması

Fark mod süzme, benzer işlevleri yerine getirmek için *X*-kapasitörleri (C_{X1} ve C_{X2}) ve seri indüktör (L_X) içerir. İndüktör, dönüştürücüden gelen fark modlu gürültü için yüksek empedanslı bir seri yol oluştururken, *X*-kapasitörleri gürültü akımı için fark mod hatlar arasında düşük empedanslı bir paralel yol oluşmasını sağlar.

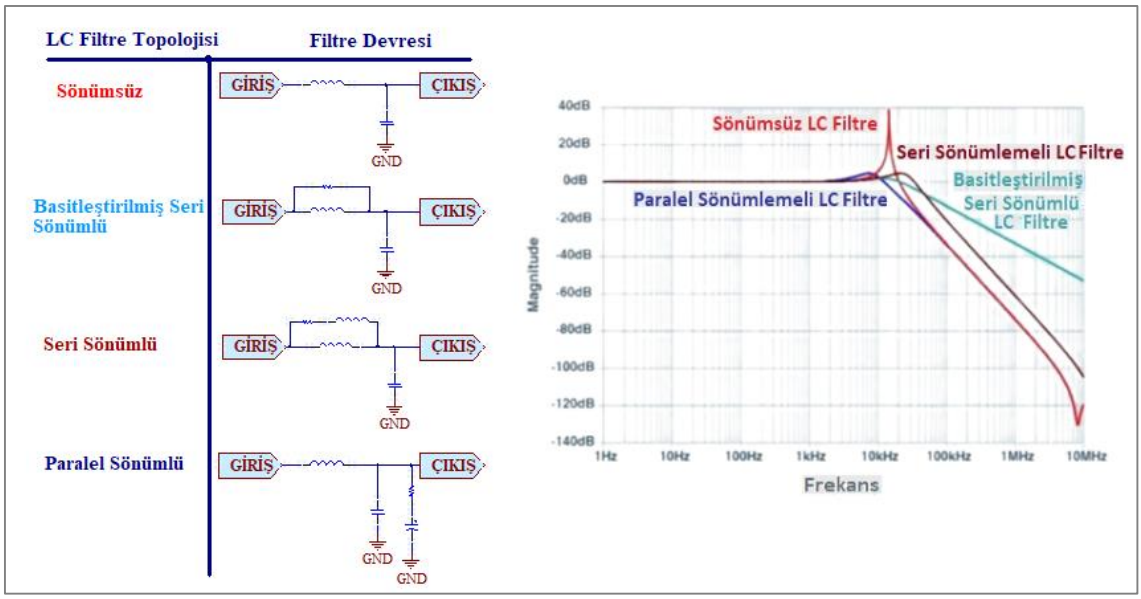
Sinyal devrelerine, güç devresi parazitleri ulaşmamalıdır. Eğer bağlantı hatası gerçekleşirse DA-DA kıyıcı tarafından yayılan yüksek frekanslı gürültü, düşük güçlü kontrol sinyallerini etkileyebilir ve dolayısıyla düzensiz çalışmaya neden olabilir.

Güç akımının, sinyal topraklarından akmasını önlemek için sinyal topraklamasının ve güç topraklamasının yalnızca tek bir noktada ortaklanması gerekmektedir. Süzgeç topolojilerinin en basit tiplerinden biri, bir indüktör ve kapasitörle oluşturulan bir LC süzgecidir. Şekil-3.27'de kesme frekansının üzerinde 40 dB'de ikinci dereceden bir düşüş ile sönümlenmemiş

bir LC süzgeç tepkisi bulunmaktadır. Sönümlenmemiş LC süzgeçleri, köşe frekansındaki karakteristik rezonansları nedeniyle genellikle uygun çözümler değildir.

En basit süzgeçlerden biri olan LC süzgeç topolojisinde olduğu gibi bütün süzgeç tasarımlarında da uygun sönümleme yapılmaz ise rezonans etrafındaki frekans aralığında gürültüyü bastırılamayıp hatta yükseltilecektir. Bu bozulmayı düzeltecek birkaç sönümleme stratejisi vardır. Bunlardan ilki, indüktöre paralel bir direnç eklemektir. Bu devre Şekil-3.27'deki basitleştirilmiş seri sönümlü süzgeç devresidir.

Bu yapının köşe frekansındaki sönümlemesi çok daha iyidir. Ancak bu süzgecin frekans tepkisine bir sıfır eklenmesi nedeniyle, yüksek frekanslarda süzgecin zayıflatmasında azalma meydana gelecektir.



Şekil 3.27. Süzgeç Sönümleme Tipleri

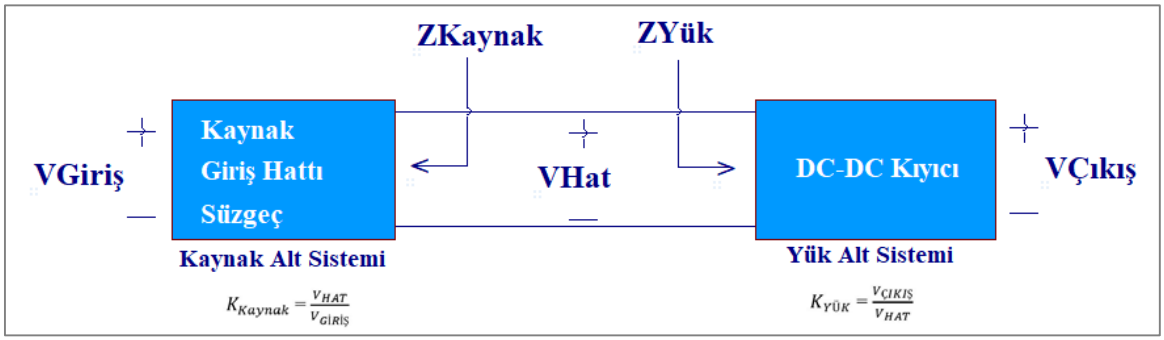
İkinci olarak, daha iyi bir yaklaşım ise Şekil-3.27'deki seri sönümlemeli olarak isimlendirilen, bir sönümleme direnci ve bir indüktör eklenen ve rezonans frekansı çevresinde sönümleme de yapabilen devredir. Ancak bu yaklaşım köşe frekansını biraz kaydırır. Üçüncü bir alternatif ise Şekil-3.27'deki paralel sönümlemeli devredir.

Bu süzgeç, köşe frekansı etrafındaki sönümlemeyi önemli ölçüde iyileştiren paralel bir R-C sönümleme bloğundan oluşmaktadır. Sönümleme frekansında herhangi bir oynama söz

konusu değildir. Bu yaklaşımlar arasında en iyi çözüm üçüncü ve son yaklaşım olan paralel sönümlemeli süzgeç devresidir.

Dolayısıyla süzgeç tasarımında, süzgecin köşe frekansında, gürültüleri uygun bir şekilde bastırabilmesi ve köşe frekansının üstündeki frekanslarda da bozulma olmaksızın uyumlu bir şekilde gürültüleri bastırmaya devam edebilmesi için süzgeç tasarımına parallel sönümlemeli bir devre eklenmiştir.

Bir DA-DA kıyıcı sisteminin genel uyumluluğunu analiz etmek için, önce sistemi kaynak ve yük olmak üzere iki alt sisteme ayırmak gerekmektedir. Şekil-3.28'de olduğu gibi, "Yük" alt sistemi DA-DA kıyıcının giriş empedansından oluşmaktadır. "Kaynak" alt sistemi ise giriş hattı empedansı, giriş süzgeci empedansı ve kaynak çıkış empedansından oluşmaktadır. Genel yük dağılımı Şekil-3.28'de gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Yük Dağılımı

Kaynak ve yük alt sistemlerinin, kendi başlarına doğal olarak uyumlu olduğu kabul edilebilir. Ancak ikisi birbirine bağlı olduğunda, salınımlar üretecek şekilde etkileşime girebilirler ve bu da sistemin uyumsuz çalışmasına yol açabilir. Sonlu bir çıkış empedansına (Z_{kaynak}) sahip olan kaynak alt sistemi, kendi sonlu giriş empedansına ($Z_{yük}$) sahip olan yük alt sistemine güç sağlar. Bu empedansların oranı, yük alt sisteminin giriş empedansının, kaynak alt sistemin çıkış empedansına olan oranını belirten, "Middlebrook" uyumluluk kriteri ile belirlenir. "Middlebrook" uyumluluk kriteri sistem uyumluluğunu analiz etmenin anahtarıdır.

Yük empedansı yani DA-DA kıyıcı giriş empedansını "Middlebrook" uymluluk kriterine uygun olacak şekilde Eş 3.16'ya göre hesaplanabilir.

$$\frac{V_{\text{çıkış}}}{V_{giriş}} = \frac{K_{kaynak} * K_{\text{yük}} * Z_{\text{yük}}}{K_{kaynak} + Z_{\text{yük}}} \tag{3.16}$$

Bu ilişkiye dayanarak, sistemin uyumlu olması için kaynak empedansının (Z_{kaynak}), yük empedansından ($Z_{yük}$) daha az olmasının gerektiği bir T_{MLG} (Minor Loop Gain) oranı sağlanmalıdır. Bu oran Eş 3.17'de gösterildiği gibidir.

$$T_{MLG} = \left|\frac{Z_{kaynak}}{Z_{\text{yük}}}\right| \ll 1 \tag{3.17}$$

T_{MLG} oranı Eş 3.16'ya uygulandığında aşağıdaki kaynak ve yük empedans oranının belirlenebileceği Eş 3.18'i elde ederiz.

$$\frac{V_{\text{çıkış}}}{V_{giriş}} = \frac{K_{kaynak} * K_{\text{yük}}}{1 + T_{MLG}} \tag{3.18}$$

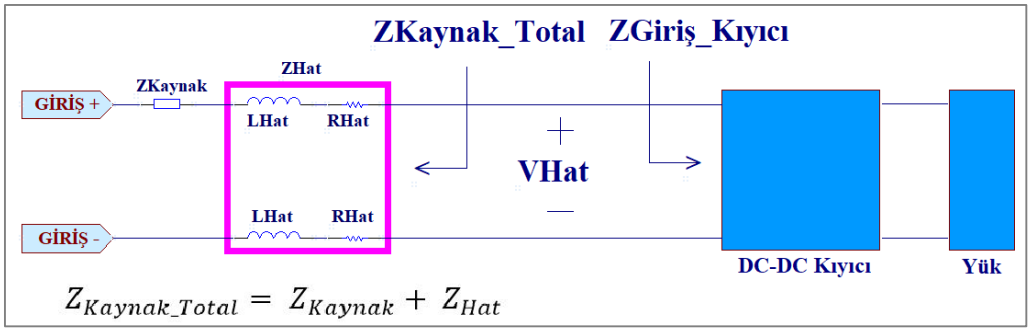
Bu oran korunmazsa, muhtemelen ciddi uyumsuzluk sergilenerek uygun olmayan şekilde sönümsüz ve düzensiz bir çalışma durumu oluşacaktır. Uyumsuz sistem, kaynak ve kıyıcı arasında negatif dirençli bir osilatör oluşturabilir. Bu uyumsuzluğun önüne geçmek için kaynak ve kıyıcının giriş empedansı yukarıda belirtilen formüllere uygun olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu empedans oranını sağlamanın en iyi yöntemlerinden biri de ayırma kapasitörü yöntemidir.

Salınımların sistemin dengesini bozmamasını sağlamak için kaynak empedansının yük empedansından ayrılması gerekir. DA-DA kıyıcının giriş tarafına yerleştirilmiş bir ayırma kapasitörü bunu gerçekleştirmenin etkili bir yoludur. Bunu açıkça görmek için, Şekil 3.26'da gösterilen genel sistem tasarımı, Thevenin eşdeğer yöntemi ile basitleştirilmiş ve bir kaynak empedansı ve ayrı bir empedans bloğu olarak Şekil 3.29'da gösterilen hale indirgenmiştir.

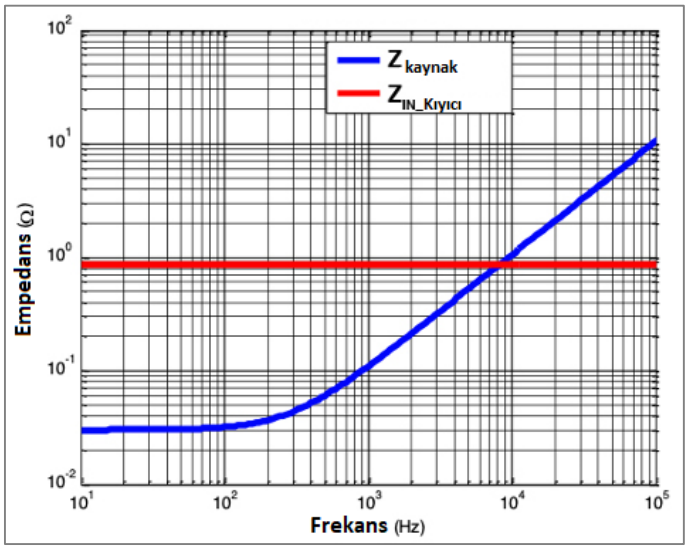
Ek olarak, kıyıcıya giden kabloların endüktansını ve direncini içeren dağıtım hattı empedansı da hesaba katılmaktadır. İki empedansı net bir şekilde ayırt etmek için sistem, kıyıcı ile kaynak arasından bölünmelidir, karşılaştırılacak empedanslar, kaynağa bakan çıkış empedansı ve kıyıcıya giden giriş empedansıdır. Basitlik için, kıyıcının giriş empedansının yalnızca dirençten oluştuğu ve bu nedenle tüm frekanslar için sabit olduğu, kaynak empedansının ise düşük frekanslarda direnç ve yüksek frekanslarda endüktans özelliğine sahip olduğu varsayılmalıdır.

Endüktif kaynak alt sisteminin artan çıkış empedansı nedeniyle bu uyumluluk analizinin en kritik olduğu nokta, yüksek frekanslı çalışmaya geçiş noktasıdır. Toplam kaynak empedansındaki (Z_{Kaynak_Total}) endüktif etkiden dolayı, düşük frekanslarda Şekil 3.30'da gösterildiği gibi, kıyıcının giriş empedansı ($Z_{Giriş_Kıyıcı}$) toplam kaynak empedansından daha yüksek olacağı için sistem uyumlu bir şekilde çalışmaya devam eder.

Ancak yüksek frekanslarda kaynak empedansı endüktif etkiden dolayı Şekil 3.30'da gösterildiği gibi sürekli artan bir empedans değeri göstereceği için "Middlebrook" uyumluluk kriterine göre eğrilerin kesiştiği noktadan itibaren hatalı yük dağılımı meydana gelir ve sistem uyumsuz çalışmaya başlar. Şekil 3.29'daki V_{Hat} bölgesinde istenmeyen osilasyonlar oluşup, bozulmalar meydana gelir.



Şekil 3.29. Ayırma Kapasitöründen Önce Empedans Kontrolü Devresi

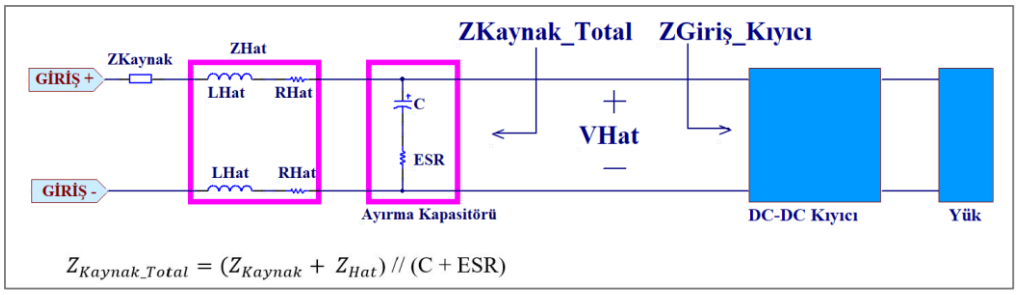


Şekil 3.30. Ayırma Kapasitöründen Önce Empedans Kontrolü Grafiği

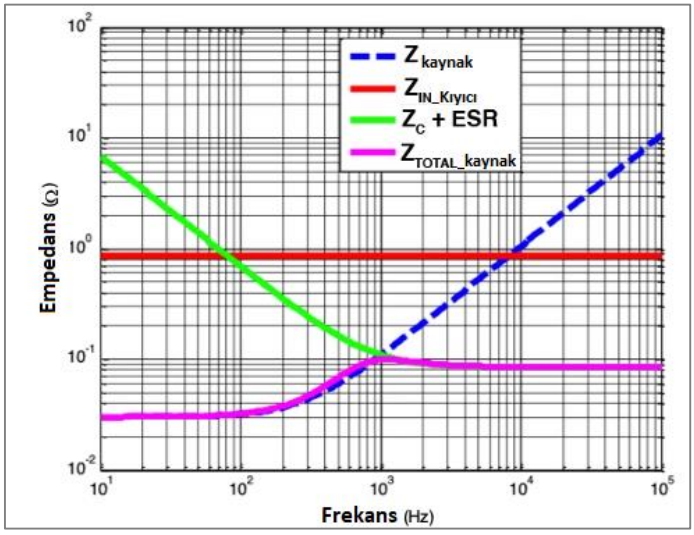
Yüksek frekansta uyumluluğu korumak için ve kıyıcının karşılaştığı kaynak empedansını değiştirmek için ek bir empedans öğesi sağlanmalıdır. Bu empedans öğesi, Şekil 3.31'de

görüldüğü gibi bir sönümleme ağının bir parçasını oluşturan ayırma kapasitörü ve onun eşdeğer seri direncinden (ESR) oluşan yapı ile sağlanmaktadır.

Şekil 3.32'de kaynak toplam çıkış empedansı (Z_{Kaynak_Total}) ile kıyıcının giriş empedansı ($Z_{Giriş_Kıyıcı}$) arasına şönt olarak yerleştirilen kapasitif empedans (Şekil 3.33'deki yeşil iz), frekans arttıkça empedansı azalacağı için, kaynağın toplam empedansına da azaltıcı etki göstermeye başlar ve düşük frekanstan yüksek frekansa kadar düşük eşdeğer çıkış empedansı yaratır. Böylelikle bütün frekans bandında "Middlebrook" uyumluluk kriterine göre uygun bir yük dağılımı gerçekleşmiş olup, sistemde herhangi bir bozulma meydana gelmez.



Şekil 3.31. Ayırma Kapasitöründen Sonra Empedans Kontrolü Devresi



Şekil 3.32. Ayırma Kapasitöründen Sonra Empedans Kontrolü Grafiği

Kıyıcı sistemine bir giriş süzgecinin eklenmesi, kıyıcıya bağlı kaynak çıkış empedansını, uyumsuz bir sistem oluşturacak şekilde değiştirebilir. Bu uyumsuz süzgeç bileşenleri, "Middlebook" uyumluluk kriterini ihlal eden ve uyumsuz sistem çalışmasına ve salınımlara yol açan etkileşimler üretebilir. Uyumsuz bir sistemde, yük adımları aynı zamanda giriş

geriliminde istenmeyen geçici yükselme olaylarıyla sonuçlanan bozulmalara da neden olabilir.

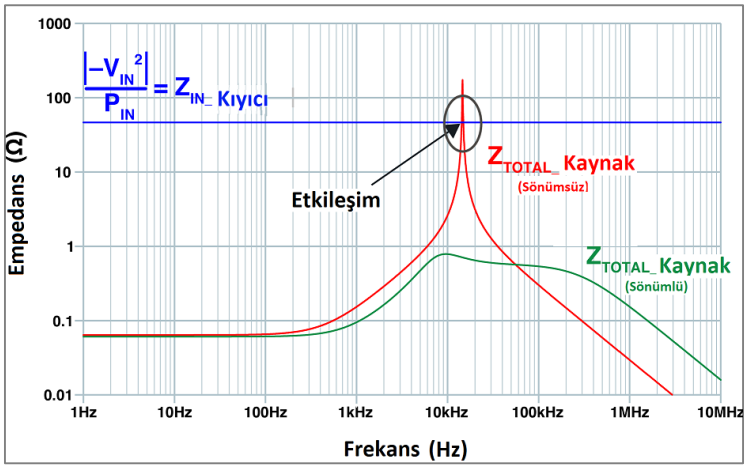
Düzenlenmiş kıyıcı giriş empedansının, kıyıcının çalışacağı minimum giriş gerilimi ($V_{Giriş}$ = 9 V) ve maksimum giriş ($P_{Giriş}$ = 117 W) gücüyle tanımlanması gerekmektedir. Kıyıcı giriş empedansının ($Z_{Giriş_Kıyıcı}$ = *0,69 Ohm*) hesaplandığı eşitlik Eş 3.19'da olduğu gibidir. Bu, ayırma kapasitörünün etkisinin incelendiği kısımda da olduğu gibi kıyıcının giriş empedansının minimum ne kadar olması gerektiği hakkında bir yaklaşım sağlar.

$$Z_{Giriş_Kıyıcı} = \frac{VGiriş^2}{PGiriş} \tag{3.19}$$

Bununla birlikte, uygun sönümleme ile kıyıcının giriş empedansının ve kaynağın çıkış empedansının, "Middlebrook" uyumluluk kriterini karşılayarak uygun şekilde ayrılmasını sağlamak, kıyıcının girişindeki olası rezonans tepe büyüklüğünü azaltmaktadır. Şekil 3.34'de görüldüğü gibi kırmızı renkli eğri uyumsuz çalışma durumunda, süzgecin rezonans frekansındaki empedansta ani bir yükselme olduğu göstermektedir.

Eğer uygun empedans karakteristiği sağlanırsa sistem uyumlu çalışma durumunda olacak ve yeşil renkli grafik ile gösterildiği gibi herhangi bir empedans bozulması meydana gelmeyecektir.

Süzgecin uygun şekilde sönümlenmesiyle, bu sistem iyi bir genel performans sağlar, istenmeyen salınımları ve uyumsuzluğu önler.



Şekil 3.33. Eklenen Empedans Etkisi

Sistemin uyumsuzluğunu engellemek adına eklenen ayırma kapasitörün değerini hesaplamak için süzgeç devresi pi süzgeci olarak modellenmiştir. Eş 3.20'da süzgecin köşe frekansının hesaplandığı eşitlik gösterilmektedir. *Fc* (10 kHz) değeri süzgeç devresinin rezonans frekansını temsil etmektedir. *L* (30 µH) değeri devredeki eşdeğer endüktif değeri *C* (47µF) değeri ise devredeki eşdeğer kapasitif değerleri temsil etmektedir.

$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \tag{3.20}$$

Çizelge 3.2 de süzgeç devresinin çeşitli frekans değerleri için toplan empedans değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Süzgeç Devresi Empedans Değerleri

Frekans Değeri (kHz)	Empedans Değeri (Ohm)
5	0,93
10	0,47
100	0,29
1000	0,03

Süzgeç devresi çıkış empedansı, kıyıcı giriş empedans değerinin altına düşürülmelidir. Süzgeç devresi çıkış empedansının düşürüleceği değer, kıyıcı giriş empedansı değeri ve süzgeç devresi çıkış empedans tablosundaki değerler göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık 0,55 Ohm'luk değer seçilebilir.

Bu değer tablodaki en büyük değer (0,93 Ohm) ile birlikte kullanıldığında toplam empedansın kıyıcı giriş empedansının altında kalabilecek bir eşdeğer empedans değeri oluşturacak şekilde seçilmelidir.

Bu 0,55 Ohm luk değer ve maksimum empedansa karşılık gelen 5 kHz frekans değeri, Eş 3.2 de kullanıldığında ayırma kapasitörü değeri yaklaşık olarak 55 µF olarak hesaplanır.

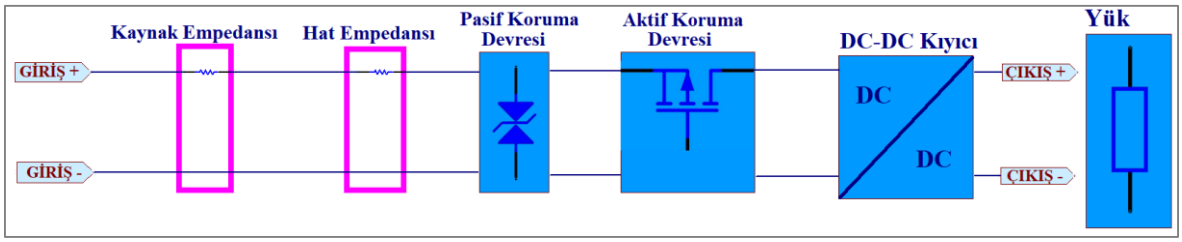
4. KORUMA DEVRESİ TASARIMI

Süzgeç tasarımı koruma devresi, değişken gerilim - akım koruma devresi ve yalıtkanlık koruması devresi olmak üzere ikiye ayrılır.

4.1. Değişken Gerilim - Akım Koruma Devresi

Kıyıcılar, güç kaynağı veya diğer etmenlerden kaynaklanabilecek ani gerilim ve akım yükseliş ve düşüşlerine karşılık veremeyip arızalanabilir. Bu olumsuz etkilerin önüne geçmek için kıyıcılardan önce, onları olası bu bozucu etkilere karşı koruyacak pasif ve aktif koruma devresi tasarımları gerekmektedir. Bu tez çalışmasında kıyıcıları koruyan özel bir koruma devresi tasarımı da gerçekleştirilmiştir.

Bu özel koruma devresi pasif ve aktif komponentleri içermelerine göre pasif koruma devresi ve aktif koruma devresi olacak şekilde ikiye ayrılırlar. Koruma devresi genel blok şeması Şekil 4.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.1. Koruma Devresi Blok Şeması

4.1.1. Pasif koruma devresi

Elektrostatik deşarj (electrostatic discharge; ESD) veya yıldırım etkisi gibi çok kısa sürede ancak çok yüksek gerilim ve akım değerleri ile gerçekleşen bozucu etkileri bastırarak kıyıcının bozulmasını engellemek için tasarlanmıştır. Bu pasif koruma devresi tasarımı, bu amaçla kullanılan çeşitli pasif komponentleri içermektedir.

Bu pasif komponentler Çizelge 4.1'de karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan tasarım ise TVS (transient voltage suppressor) diyot ve GDT (gas discharge tube) gibi pasif komponentleri içermektedir [12].

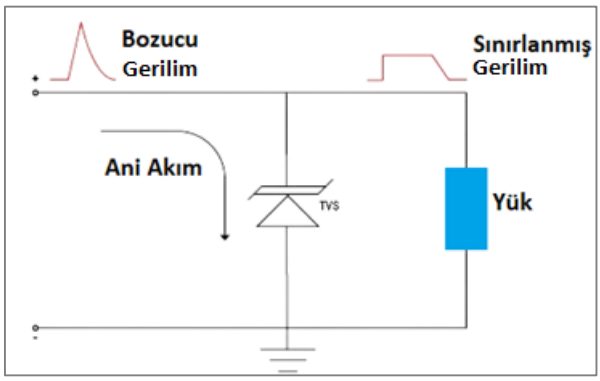
Çizelge 4.1. Pasif Koruma Devresi Komponentlerinin Karşılaştırılması

Aşırı Gerilim Koruma Cihazı Tipi	Avantajlar	Dezavantajları
Gas Discharge Tube (GDT)	En yüksek güç dağılım yoğunluğu ve çok düşük kapasitans	Uzun açma süresi, ışığa duyarlı davranış, geniş kaplama alanı ve zayıf gerilim regülasyonu
Metal Oxide Varistor (MOV)	Yüksek güç dağılım yoğunluğu	Zayıf gerilim regülasyonu, sınırlı ömür beklentisi, katastrofik arıza mekanizması ve zayıf termal dağılma
Thyristor	Yüksek güç geri tepme davranışı nedeniyle dağılma yoğunluğu	Kilitlenme arızası olasılığı
Transient Voltage Suppression Diyot (TVS)	Yeterli güç dağılımı yoğunluğu, uzun ömür ve iyi gerilim regülasyonu	Ekonomik olmayan yüksek (>250A) akım dağılımı
Süzgeç	En ucuz çözüm	Çok düşük güç dağıtma yoğunluğu

TVS diyot: TVS (transient voltage suppressor) diyotları, yarı iletkenler gibi hassas bileşenleri ve buna benzer devre elemanlarını korumak için kullanılan bileşenlerdir. TVS diyot, devrenin giriş gerilimlerinin ani ve devrenin geri kalanına bozucu etki oluşturacak şekilde yükselmesinin belirli bir miktarda azaltılması için tasarlanmıştır. TVS diyotları, devrelerde; aşırı gerilime ve arkların etkilerine, EHG'ye (elektriksel hızlı geçişler), ESD'ye (elektrostatik deşarj), endüktif yük anahtarlamasına ve hatta yıldırım çarpmalarına karşı koruma sağlamak için kullanılır.

Ani yükselmeler ve aşırı gerilim olayları, dahili veya harici çeşitli faktörlerden kaynaklanabilir. Bazıları tekrarlayıcı olmakla birlikte, bazıları da yalnızca bir kez gerçekleştiğinden ve bozucu etkinin süresi ve yoğunluğu büyük ölçüde değişebileceğinden, geçici olayları tahmin etmek zor olabilir. Sonuç olarak, TVS diyotları, devreyi geçici akım riskinden korumak için kullanmanız gereken temel cihazlardan biridir. Ani geçici gerilim bastırıcılar tipik olarak devreye paralel olarak yerleştirilir. Devreyi korumak için akımı ve gerilimi süzerler ve herhangi bir zamanda bir bağlantı noktasından geçebilecek gerilim ve akım miktarını bastırmak için kullanılabilirler. Bu, ani yükselmelerin meydana gelmesi durumunda oldukça yararlıdırlar. Sınırlama özelliklerinden dolayı gerilimi belirli bir seviyeye sınırlarlar ve fazlalığı devreden toprağa yönlendirirler.

Şekil 4.2'de bir TVS'nin geçici akımı ve gerilimi toprağa nasıl yönlendirdiği gösterilmektedir. Korunan yük üzerindeki gerilim, TVS'nin koruma gerilim seviyesi ile sınırlandırılmaktadır.



Şekil 4.2. TVS Diyot Sınırlama Akış Şeması

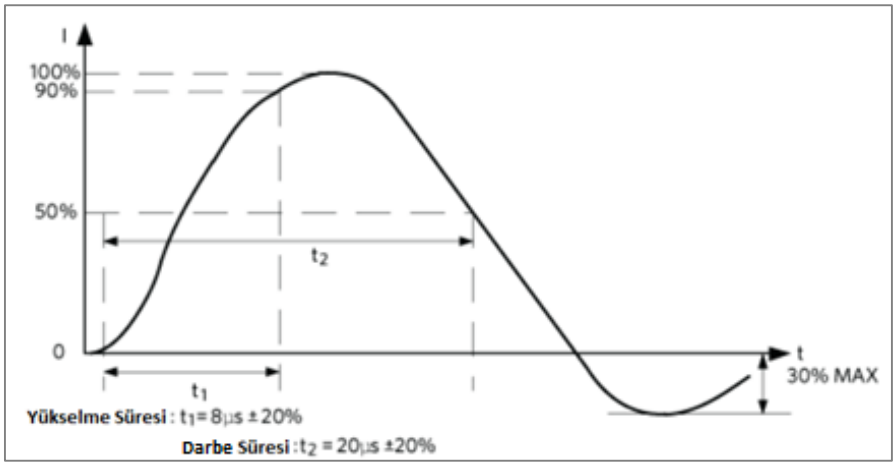
Bir TVS diyotunun nasıl seçileceği, çeşitli temel faktörlere bağlıdır. TVS diyotu seçilirken tepe darbe akımı, maksimum sınırlama gerilimi ve kırılma gerilimi gibi değerlere dikkat edilmelidir.

Kırılma gerilimi: Kırılma gerilimi olarak da bilinen bu gerilim değeri, TVS diyotunun belirli bir miktarda akımı iletmeye başladığı gerilim eşiğidir. Bu değerden itibaren TVS diyot üzerine düşen gerilim sınırlanmaya başlanır. Bu gerilimin altındaki değerlerde, TVS diyot gerilim sınırlaması yapamaz. Gösterimi genelde V_{BR} şeklindedir. V_{BR} gerilimi, tasarım yapılırken koruduğu kıyıcının veya herhangi bir başka bir devre yapısının mutlak maksimum çalışma gerilim değerinin altında bir değere sahip olmalıdır.

Maksimum sınırlama gerilimi: Geçici aşırı gerilim, TVS diyot tarafından korunan devre boyunca görülen maksimum gerilim seviyesi olan ve V_{CL} olarak tanımlanan gerilim seviyesine sınırlanır. Bu gerilim seviyesi her zaman belirli bir tepe darbe akımı değeri ile tanımlıdır.

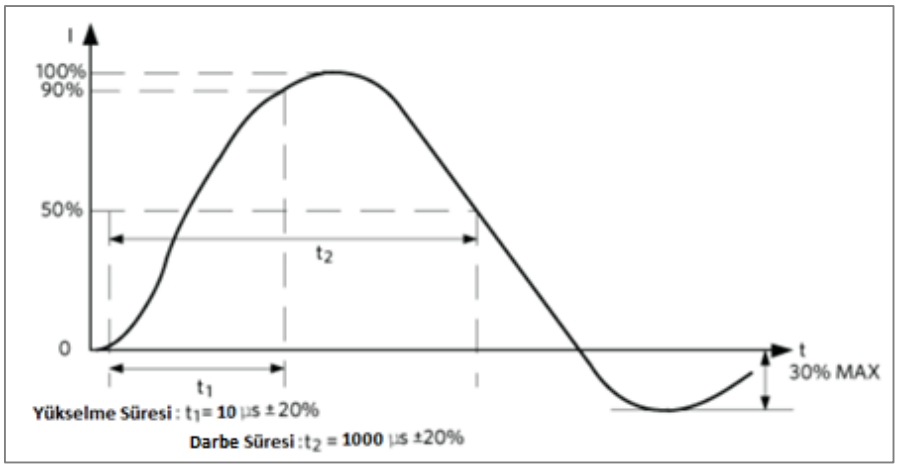
Tepe darbe akımı: Bu akım değeri, TVS diyodunun hasar görmeden dayanabileceği maksimum geçici akımdır. Tepe darbe akımı, iki farklı süreye göre değişmektedir ve uygulama tipine göre bu süreler referans alınabilir. İlk süre tipi, 8/20 µs olarak derecelendirilen ani geçici akım dalga biçimine dayalı olarak tanımlanır. Şekil 4.3'de

gösterildiği gibidir. 8 µs (t_1), akımın tepe değerinin %90'na yükselme süresidir. 20 µs (t_2) ise akımın tepe değerinin %50'sine düşene kadar geçen darbe süresini temsil eder.



Şekil 4.3. TVS Diyot Tip-1 Tepe Akımı Eğrisi

İkinci süre tipi ise, 10/1000 µs olarak derecelendirilen ani geçici akım dalga biçimine dayalı olarak tanımlanır. Şekil 4.4'de gösterildiği gibi 10 µs (t_1), akımın tepe değerinin %90'na yükselme süresidir. 1000 µs (t_2) ise akımın tepe değerinin %50'sine düşene kadar geçen darbe süresini temsil eder.



Şekil 4.4. TVS Diyot Tip-2 Tepe Akımı Eğrisi

Endüstriyel uygulamalarda genellikle 8/20 µs tepe akımı süresine göre TVS'ler belirlenmektedir. Askeri ve aviyonik uygulamalarda ise belirlenen standartlardan dolayı 10/1000 µs tepe akımı süresine göre TVS'ler belirlenmektedir.

GDT: Bir gaz deşarj tüpü veya GDT, tek başına bir koruma bileşeni olarak kullanılabilir veya çok kademeli bir koruma devresi oluşturmak için diğer bileşenlerle bir araya getirilebilir. GDT'ler, çok düşük kapasitansları nedeniyle tipik olarak iletişim uygulamalarının, veri hattı ve DA gerilim uygulamalarının korunmasında kullanılır. Bununla birlikte, AA güç hattında kaçak akım olmamasından ve kırılma meydana geldiğinde açık devreden yarı kısa devreye çok hızlı değişen anahtarlama elemanı olmasından dolayı tercih edilir.

GDT, arıza meydana geldiğinde çok hızlı bir şekilde değişen ve açık devreden yarı kısa devreye dönüşen iletkenlik özelliklere sahip bir koruma elemanı olarak kabul edilebilir. Yaklaşık 20 V'luk ark gerilimine sahip örnek bir GDT'nin tamamen iletken duruma geçmeden önce dört çalışma aşaması vardır. Bu aşamalar sırasıyla aşağıdaki gibidir;

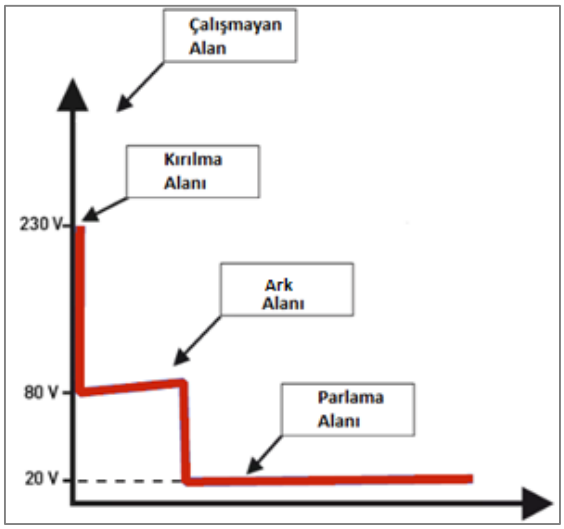
Çalışmayan alan: GDT'nin pratik olarak sonsuz dirence sahip olduğu çalışma alanıdır.

Kırılma alanı: GDT'nin üzerine indüklenen gerilimin yükselme süresine bağlı olarak, iletime geçmeye başladığı gerilim değeridir.

Parlama alanı: GDT üzerinde yüksek gerilim oluşma anında iletkenlik aniden artar. GDT, akımı kendi üzerinden akıtarak gerilimi düşürmeye çalışır. Terminaller arasındaki parlama gerilimi örnek GDT için 80-100 V aralığındadır.

Ark alanı: GDT'nin üzerinden akıttığı akım arttıkça, GDT üzerindeki gerilim parlama geriliminden ark gerilimine (20V) düşer. Gaz deşarj tüpünün en etkili olduğu alan burasıdır, çünkü akım deşarjı terminaller boyunca ark gerilimi artmadan birkaç bin ampere ulaşabilir.

Sönme: Gaz deşarj tüpünün başlangıçtaki yalıtım özelliğine döndüğü gerilim değeridir. GDT'nin çalışma gerilim alanları Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. GDT Çalışma Gerilim Alanları

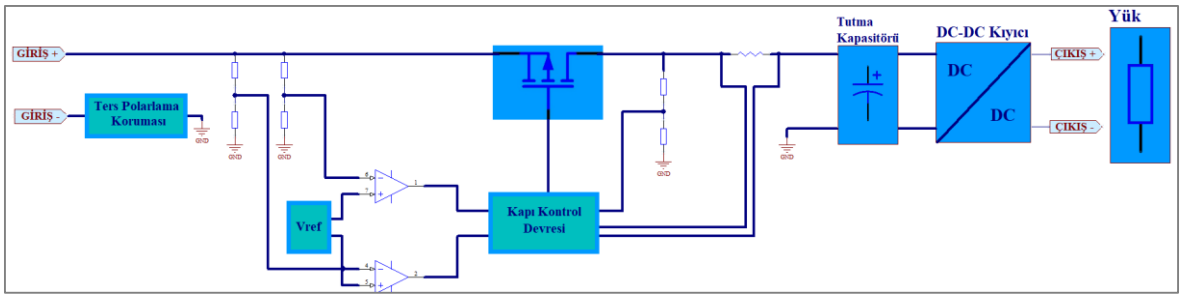
4.1.2. Aktif koruma devresi

Tasarlanan aktif koruma devresi, ESD ve yıldırım gibi kısa süreli ve çok yüksek potansiyelli gerilim yükselmelerinin aksine, daha uzun süreli ve nispeten daha düşük potansiyelli gerilim yükselmelerine karşı koruma sağlaması amacıyla kullanılır. Yüksek gerilim korumasının yanı sıra tasarlanan devre düşük gerilim korumasına da sahiptir. Kaynak geriliminin çok düşmesi durumda, korunmak istenen kıyıcı düşük gerilim durumunda fazla akım çekme eğilimi gösterecektir. Bu akım, kaynak ve sistem arasındaki kablo ve bağlantı hatlarına zarar verebilir. Ayrıca ters besleme gerilimi ile enerjilendirilen devrenin arızalanmasını engellemek için aktif koruma devresi ters kutuplama korumasına da sahiptir.

Kıyıcıların referans alınan çalışma gerilim aralığında ve maksimum yük durumu altında, kaynaktan çekeceği maksimum akım belirlidir. Kıyıcı bu maksimum akımın üzerinde bir akım çekmeye çalışıyor ise yük veya kıyıcıda kısa devre veya buna benzer bir hata durumu söz konusu olabilir. Bu hata durumu sürekli devam eder ise kaynağa, bağlantı hatlarına, kıyıcıya ve yüklere zarar verebilir. Bu sebeplerden dolayı tasarlanan aktif koruma devresi bu hataların önüne geçebilmek için aşırı akım korumasına da sahiptir.

Tasarlanan bu aktif koruma devresinde, MIL-STD-704E standardı gereği, kaynak tarafından kıyıcılara kısa süreli ve kıyıcının çalışma gerilim aralığının üstünde olan bir besleme gerilim gelebilir. Koruma devresi bu kısa süre boyunca yüksek gerilim korumasına girmeden bu besleme gerilimini kıyıcının güvenli bir şekilde çalışabileceği gerilim aralığında bir değere

limitleyerek kıyıcıyı besleyebilmektedir. Bu limitleme işlemi aktif koruma devresinde bulunan, hatta seri olarak yerleştirilmiş MOSFET bloğu ile yapılır. Bu MOSFET bloğunun devamında bulunan örnekleme devresinden alınan hat gerilimi okuması kapı kontrol devresine aktarılır. Kapı kontrol devresi, gerilim artışını algıladığında MOSFET üzerindeki empedansı artırarak kıyıcıya giden akımı sınırlar ve gerilim yükselmesini limitlemiş olur. Ayrıca ani güç kesilmeleri, enerji kayıpları ve MIL-STD-704E standardı gereği çok düşük besleme gerilimlerinde kıyıcının fonksiyon kayıpları yaşamaması için kaynaktan beslemeyi keserek dahili kısa süreli uygun gerilimli bir besleme kaynağı oluşturmak adına tutma kapasitörü tasarımı bulunmaktadır. Aktif koruma devresinin blok şeması Şekil 4.6'daki gibidir.



Şekil 4.6. Aktif Koruma Devresi Blok Şeması

4.2. Yalıtkanlık Koruma Devresi

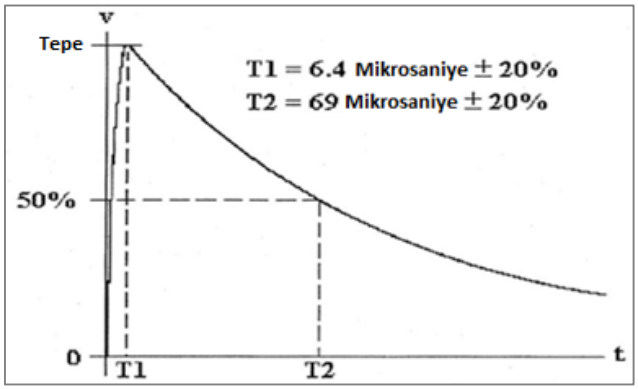
Yalıtım direnci; tellerin, kabloların ve elektrikli devrelerin ohm cinsinden direncidir. Elektrik çarpmalarına karşı korunmak ve kazara elektrik boşalmalarından kaynaklanan elektronik devre hasarını önlemek için önemlidir. Tasarlanan yalıtkanlık koruma devresi tasarlanan süzgeç devresinde oluşacak olası gerilim birikimlerini bir hataya sebebiyet vermeden boşaltmaya yarar.

4.3. Koruma Devreleri İçin Kullanılan Aviyonik Standartlar

Elektronik cihazların değişken gerilim-akım korumalarını sağlayabilmek için birçok askeri ve aviyonik standartlar bulunmaktadır. Bu çalışmada "DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3", "MIL-STD-704E aircraft electric power characterstıcs" ve "MIL-STD-202 Test Method 302" standartları referans alınmıştır.

4.3.1. DO-160 section 22 waveform-4 level-3

Bu test standardı, yıldırım ve uzun bağlantı hatlarından kaynaklanacak gerilim etkilerini temsil etmesi amaçlanan bir dizi test ve geçici gerilim yükselmeleri ile cihazın dayanma kabiliyetini doğrulamak için sağlanmıştır. Şekil 4.7'de test standardının uyguladığı ani gerilim yükselmesini temsil eden bir grafik bulunmaktadır. Şekil 4.7'deki T1 süresi, tepe değerinin %90'na yükselme süresidir. T2 süresi ise gerilimin tepe değerinin %50'sine düşene kadar geçen darbe süresini temsil eder.



Şekil 4.7. DO-160 Section 22 Waveform-4 Test Eğrisi

Çizelge 4.2'de bu test standardının çeşitli gerilim ve akım değerleri için seviyeleri bulunmaktadır. Bu seviyeler aviyonik sistemlerde, tasarlanan devrenin veya ekipmanın sistem içinde sahip olduğu kritiklik derecesine göre belirlenir. Kıyıcılar güç devreleri olduğu için aviyonik sistemlerde kritiklik derecesi genelde 300 V/60 A dır. Yani standarda göre test sırasında uygulacak maksimum gerilim 300 V'tur ve en fazla 60 A verilecektir. Tasarlanan pasif koruma devresinde bu gerilim ve akım seviyesine göre koruma sağlayabilecek devre elemanları kullanılması gerekmektedir [13].

Çizelge 4.2. DO-160 Section 22 Waveform-4 Standardı Gerilim-Akım Seviyeleri

Waveform-4 Testi		
Seviye	Gerilim	Akım
1	50	10
2	125	25
3	300	60
4	750	150
5	1600	320

4.3.2. MIL-STD-704E aircraft electric power characterstics

MIL-STD-704, bir elektrik sisteminde kullanılan ve güç yapılarını barındıran elektronik devre veya ekipmanın güç terminallerinde sağlanması gereken gereksinimleri belirten askeri bir standarttır. Bir uçak elektrik sistemi içerisinde bulunan güç yapıları çok yüksek kritiklik seviyesinde oldukları için sistem içerisinde oluşacak çeşitli kararsız ve hatalı çalışma durumlarında da fonksiyon kaybı olmadan çalışmalarını sürdürebilmelidirler. Bu nedenle bu standart referans alınmaktadır. Bu tez çalışmasında da DA-DA kıyıcı kullanıldığı için MIL-STD-704E standardına uygunluk sağlanmıştır.

Bu standart kendi içerisinde farklı gerilim seviyelerinde çalışan AA veya DA güç devreleri için testler barındırmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında DA-DA kıyıcı barındıran bir tasarım kullanıldığı için sadece DA yapılarını kapsayan testlerin referans alınması yeterli olacaktır. DA yapılar için gerekli olan test adımları Çizelge 4.3'de belirtildiği gibidir [14].

Çizelge 4.3. MIL-STD-704E Standardı Test Adımları [14]

Normal, Uçak Elektrik İşlemi	
LDC101	Yük Ölçümleri
LDC102	Gerilim için Kararlı Hal Limitleri
LDC103	Gerilim Bozulma Spektrumu
LDC104	Toplam Dalgalanma
LDC105	Normal Gerilim Geçişleri (Aşırı Gerilim/Düşük Gerilim/Kombine Gerilim)
Transfer, Uçak Elektrik İşlemi	
LDC201	Güç Kesintisi
Anormal, Uçak Elektrik İşlemi	
LDC301	Gerilim için Anormal Kararlı Durum Limitleri
LDC302	Anormal Gerilim Geçişleri (Aşırı Gerilim/Düşük Gerilim/Kombine Gerilim)
Acil Durum, Uçak Elektrik İşlemi	
LDC401	Gerilim için Acil Durum Limitleri
Başlatma, Uçak Elektrik İşlemi	
LDC501	Başlangıç Gerilimi Geçişleri
Güç Kesintisi, Uçak Elektrik İşlemi	
LDC601	Güç Kaybı
LDC602	Polarite Tersine Çevirme

Çizelge 4.2'de belirtilen test adımlarının genel kapsamları sırası ile aşağıdaki gibidir.

Yük ölçümleri: Bu test prosedürü, test edilen devrenin yük limitlerini, akım limitlerini ve akım bozulma limitlerini test etmek amacıyla uygulanır.

Gerilim için kararlı hal limitleri: Bu test prosedürü, test edilen devrenin kararlı çalışma gerilim aralığında nominal (28 V) çalışma geriliminden daha düşük (22 V) ve yüksek (29 V) gerilimlerde kararlı bir şekilde çalışıp çalışmadığını test etmek amacıyla uygulanır.

Gerilim bozulma spektrumu: Bu test prosedürü, test edilen devrenin kararlı çalışma gerilim aralığında giriş gerilimine belirli frekanslarda (10 Hz den 10 kHz kadar) ve belirli genliklerde (maksimum 1 Vrms) gürültüler eklenerek test edilen cihazın kararlı bir şekilde çalışıp çalışmadığını test etmek amacıyla uygulanır.

Toplam dalgalanma: Bu test prosedürü, test edilen devrenin kararlı çalışma gerilim aralığında giriş gerilimi belirli dalgalanmalar ile uygulanarak test edilen cihazın kararlı bir şekilde çalışıp çalışmadığını test etmek amacıyla uygulanır.

Normal gerilim geçişleri: Bu test prosedürü, test edilen devrenin girişine belirli düşük (18 V) ve yüksek (50 V) gerilimlerde belirli süreyle (12 ms) ani değişimler uygulayarak çalışmasının normal bir şekilde sürdürebildiğini test etmek amacıyla uygulanır.

Güç kesintisi: Bu test prosedürü, test edilen devrenin girişindeki gerilime ani kesintiler uygulayarak bu kesintilerden sonra, test edilen cihazın normal bir şekilde çalışmasını sürdürebildiğini test etmek amacıyla uygulanır.

Gerilim için anormal kararlı durum limitleri: Bu test prosedürü, test edilen devrenin kararlı çalışma gerilim aralığında nominal (28 V) çalışma geriliminden çok daha düşük (20 V) ve yüksek (31.5V) gerilim altında çalışıp çalışmadığını test etmek amacıyla uygulanır.

Anormal gerilim geçişleri: Bu test prosedürü, test edilen devrenin girişine belirli düşük (22 V) ve yüksek (50 V) gerilimlerde belirli süreyle (50 ms) ani değişimler uygulayarak çalışmasını normal bir şekilde sürdürebildiğini test etmek amacıyla uygulanır.

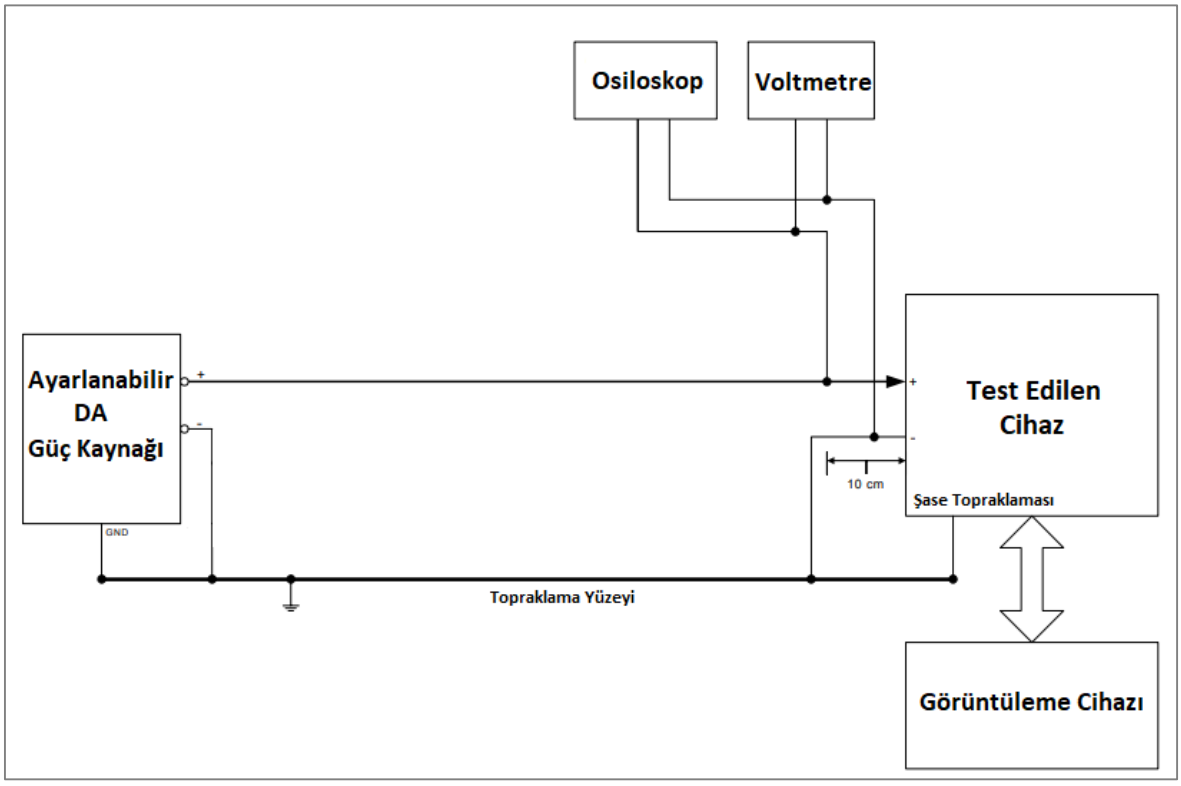
Gerilim için acil durum limitleri: Bu test prosedürü, test edilen devrenin kararlı çalışma gerilim aralığında acil en düşük (18 V) ve acil en yüksek (29 V) gerilimlerde kararlı bir şekilde çalışıp çalışmadığını test etmek amacıyla uygulanır.

Başlangıç gerilimi geçişleri: Bu test prosedürü düşük gerilim limiti olan 12 V ile yüksek gerilim limiti olan 29 V aralığında sürekli artan bir besleme gerilimi ile devrenin kararlı bir şekilde çalışıp çalışmadığını test etmek amacıyla uygulanır.

Güç kesintisi: Bu test prosedürü, test edilen devrenin girişindeki gerilime belirli süreli (100 ms, 500 ms, 3 s ve 7 s) kesintiler ile uygulayarak bu kesintilerden sonra, test edilen cihazın normal bir şekilde çalışmasını sürdürebildiğini test etmek amacıyla uygulanır.

Polarite tersine çevirme: Bu test prosedürü, test edilen devrenin girişindeki gerilim ters kutuplanmalı olacak şekilde uygulanarak yapılır. Bu test esnasında test edilen devrenin akım çekmemesi beklenir.

MIL-STD-704E testinin DA akım devreler için kullanılan test düzeneği Şekil 4.8'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.8. MIL-STD-704E Test Düzeneği [14]

4.3.3. MIL-STD-202 test method 302

Bu test, bir devrenin veya devre parçasının yalıtkan elemanlarının ve bu elemanların içinden veya yüzeyinden akabilecek kaçak akımları üretme eğiliminde olan direnci ölçmek içindir. Düşük yalıtım dirençleri, büyük kaçak akımlarına izin vererek, geri besleme döngüleri oluşturup izole edilmesi amaçlanan devrelerin çalışmasını bozabilir. Bu nedenle aviyonik tasarımlarda bu testin gereği olarak, çeşitli gerilimlerde (100 V, 500 V ve 1000 V) minimum 50 MegaOhm yalıtkanlık direnci olmalıdır.

Bu tez çalışmasında tasarlanan devre ise 100 V'luk teste göre tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devre de 100 V'luk gerilim uygulanıp 50 MegaOhm'luk direnç ölçülmesi amaçlanmaktadır [15].

4.4. Aviyonik Standartlara Uygun Gerilim-Akım Koruma Devresi Tasarımı Kriterleri

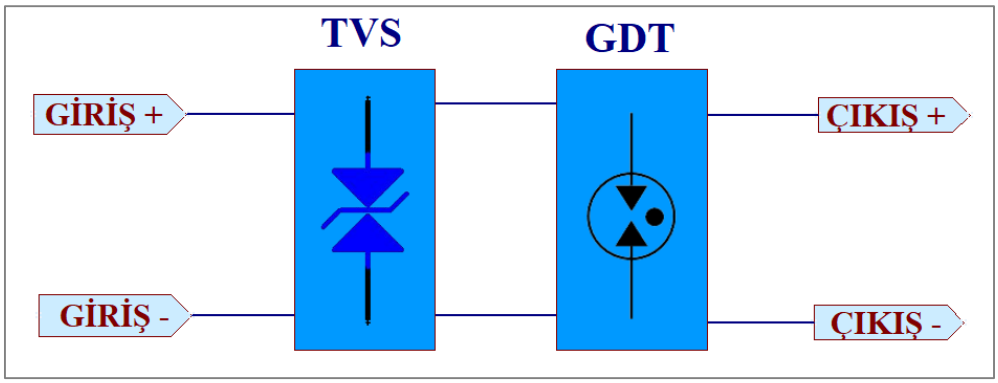
Bu tez çalışmasında tasarlanan Gerilim-Akım Koruma devresi, "DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3", MIL-STD-704E ve "MIL-STD-202 Test Method 302" gibi standartları sağlamaktadır. Bu standartların nasıl sağlandığıyla ilgili tasarımsal detaylar aşağıdaki "Pasif Koruma Devresi Tasarım Kriterleri" ve "Aktif Koruma Devresi Tasarım Kriterleri" başlıklarında belirtildiği gibidir.

4.4.1. Pasif koruma devresi tasarım kriterleri

"DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3" standardı tasarlanan pasif koruma devresi ile sağlanmaktadır. Tasarlanan bu devrede "Pasif Koruma Devresi" başlığı altında bahsedildiği gibi GDT ve TVS gibi iki adet koruma elemanı bulunmaktadır. Tasarlanan devrede ikili koruma elemanı kullanılarak yedekli koruma yapısı amaçlanmıştır. Eğer kullanılan iki koruma elemanından biri görevini düzgün bir şekilde yerine getiremez ise diğer koruma elemanı devrenin geri kalanını bu bozucu etkilere karşı koruyacaktır. Böylelikle hata ve arıza oluşma riski çok daha azaltılmış olacaktır.

Oluşan bozucu geçici gerilim veya akım yükselmesinin (ESD ve yıldırım vb.) hızına bağlı olarak, tasarlanan devrede öncelikli koruma elemanı değişmektedir. Nispeten daha yavaş olan bozucu etkilere karşı öncelikli koruma elemanı GDT'dir. Daha hızlı yükselme hızına sahip olan bozucu etkilere karşı ise öncelikli koruma elemanı TVS'dir.

Bahsedilen bu koruma devresinin blok şeması Şekil 4.9'da belirtildiği gibidir.



Şekil 4.9. Pasif Koruma Devresi Blok Şema

"DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3" standardında uygulanan bozucu etki hızlı bir yükselmeye sahip olduğu için ilk korumayı TVS yapacaktır. TVS'in işini yapamaması gibi bir durumda veya nispeten daha yavaş meydana gelen hatalarda ise GDT koruma sağlayacaktır.

"DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3" standardında maksimum 300 V'luk bir geçici gerilim uygulanacaktır ve bu gerilim anında kaynaktan 60 A'e kadar çekilebilecektir. Yani test düzeneğinin empedansı (Z_{test}) 5 Ohm'dur. Bu yüksek gerilim, bu tasarımda kulanılan kıyıcı ve diğer kontrol devreleri için hayli yüksek bir bozucu gerilimdir. Bu bozucu gerilim TVS ve/veya GDT ile kıyıcı ve tasarımda kullanılan diğer devreler için belirlenen gerilim aralığına kırpılmalıdır. Aktif koruma devresinde bulunan MOSFET'li yapının maksimum dayanma gerilimi 100 V olduğu için pasif koruma devresinin kırpması gereken gerilim 100 V'un altında olmalıdır. Bu tasarım için kırpılması yeterli olacak en uygun gerilim değeri yaklaşık 72 V olarak alınmıştır.

Sonuç olarak, test esnasında TVS üzerine 300 V (V_{test}) uygulanacak ve TVS bu değeri 72 V'a ($V_{kırpma}$) kırpacaktır. Bu kırpma işlemi esnasında hat empedansı 5 Ohm'dur. Test boyunca TVS üzerinden akacak akım (I_{test}) Eş 4.1'de ve oluşacak güç (P_{test}) Eş 4.2'de olduğu gibidir.

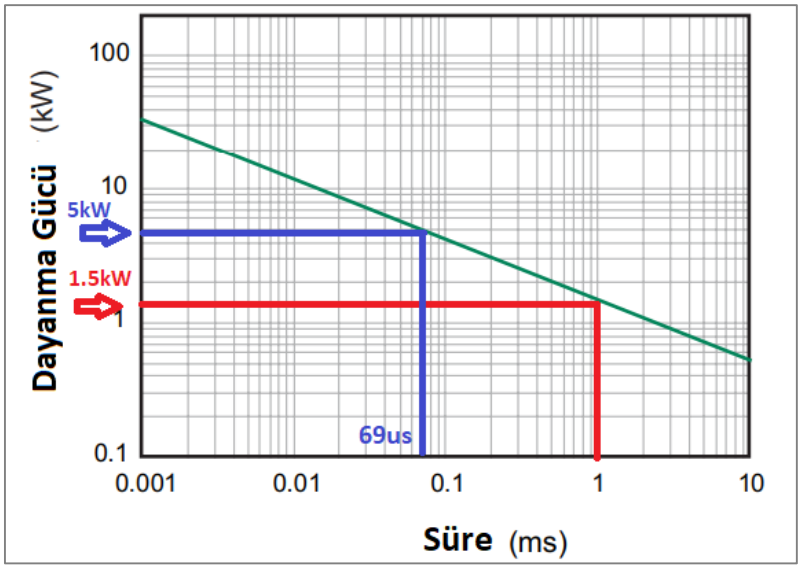
$$I_{test} = \frac{(V_{test} - V_{kırpma})}{Z_{test}} = 45{,}6A \tag{4.1}$$

$$P_{test} = (V_{kırpma}) * I_{test} = 3.2kW \tag{4.2}$$

TVS'in dayanma gücünün, bu güç değerinin üzerinde olması gerekmektedir. Aksi durumda TVS sürekli kısa devre moduna geçip kalıcı olarak arızalanacaktır. TVS'in dayanma gücü ise kırpma gerilimi ve kırpma akımıyla orantılıdır. Eş 4.3'de TVS'in dayanma gücü belirtilmektedir.

$$P_{dayanma} = V_{kırpma} * I_{kırpma} \quad (4.3)$$

Tüm TVS veri sayfaları, 10/1000 µs süreli dalga biçimi şeklinde dayanma gücü belirtir. TVS'in veri sayfasında verilen 10/1000 µs dalga biçimindeki dayanma güç değeri Şekil 4.7'de belirtilen test süresine (69 µs) çevrilip test gücü ile karşılaştırılmalıdır. Tasarlanan koruma devresinde "5.0SMDJ45CA" parça numaralı TVS kullanılmıştır. Bu malzemenin 10/1000 µs süresindeki dayanma gücü kırmızı renk ile gösterildiği gibi 1.5 kW'dır, ancak test süresine (69 µs) göre dayanma gücü Şekil 4.10'da mavi renk ile gösterildiği gibidir.



Şekil 4.10. TVS Test Dayanma Gücü Eğrisi

Bu TVS'in test süresi boyunca dayanma gücü yaklaşık 5 kW'dır ve test gücü olan 3.2 kW'dan daha yüksek olduğu için bu standart için yeterli olacaktır.

GDT elemanı ise TVS'in kırpma gerilimine yakın bir değerde parlama gerilimine sahip olacak şekilde seçilmiştir. Böylelikle TVS'de oluşacak hatalı çalışma veya arıza durumunda, GDT elemanı devrenin geri kalanını koruyabilecektir. Bu nedenle "2051-09" parça numaralı GDT'nin tasarımda kullanılmasına karar verilmiştir.

4.4.2. Aktif koruma devresi tasarım kriterleri

MIL-STD-704E standardı, aktif koruma devresi ile sağlanmaktadır. Aktif koruma devresi tasarımsal olarak kıyıcıyı besleyen kaynak gerilimini kontrol etmek için ikili MOSFET içeren kontrol mekanizmasına sahiptir. Bu MOSFET'lerden ilki kıyıcıya giden besleme geriliminin kesilmesi istendiği zaman veya herhangi bir hata durumunda yine bu gerilimi kontrol etmek için kullanılır. Diğer MOSFET ise oluşabilecek ters gerilimlerden, sistemin geri kalanını ve kaynağı korumak için kullanılır. Bu iki kontrol MOSFET'i, tasarımda oldukça önem arz etmektedir.

Tasarımda kullanılan kıyıcının giriş besleme gerilimi 9 V ile 40 V aralığındadır. MIL-STD-704E testinde ise 50 V'luk gerilim yükselmeleri uygulanmaktadır. Bu 50 V'luk gerilimler kıyıcının arızalanmasına sebep olabilir. Ancak aktif koruma devresi 50 V'a kadar yükselen bu gerilimleri maksimum 36V'a sabitleyerek kıyıcıyı koruyacaktır.

Normal çalışma durumunda kıyıcı kaynaktan yaklaşık 4A (kıyıcının giriş gerilimi en düşük değerde iken) değerinde akım çekmektedir. Kıyıcıda veya yükte oluşacak bir arıza veya kısa devre durumunda, kıyıcı çok daha yüksek değerlerde akım çekmeye çalışacaktır. Bu da kaynağın ve sistemin geri kalanında arızalanmalara sebep olabilir. Bu durumun önüne geçmek için aktif koruma devresi, kaynaktan çekilen akım belirli bir değerin üzerine çıktığı zaman kıyıcının besleme gerilimini kesecektir.

Bu koruma özelliklerini barındıran aktif koruma devresinin ikili MOSFET bloğunda, "SQM120P10-10m1L" parça numaralı MOSFET'ler kullanılmaktadır.

Bu MOSFET'ler seçilirken aşağıdaki kriterlere dikkat edilmiştir;

Tasarlanan devrenin normal çalışma koşullarında, MOSFET üzerinden 4A'lik akım geçecektir ve bu akım değerinde MOSFET'ler üzerinde çok fazla gerilim düşümü olmaması gerekmektedir. Eğer gerilim düşümü çok olursa, Eş 4.5'de de gösterilen MOSFET üzerinde harcanan güç ($P_{düşüm}$), üzerinden geçen akım (I_{kaynak}) ve üzerindeki gerilim düşümü ($V_{düşüm}$) ile aynı oranda artacağı için MOSFET çok fazla ısınıp, çalışma sıcaklığı aralığının dışına çıkarak arızalanabilir. Eş 4.4'de gösterildiği gibi MOSFET üzerindeki gerilim düşümü ise MOSFET 'in iletim direnci (R_{iletim}) ve üzerinden geçen akım ile doğru orantılıdır.

Oluşabilecek en kötü çalışma durumu göz önünde bulundurularak sistemin en yüksek çalışma sıcaklığı olan yaklaşık 70 °C'deki MOSFET'in iletim direnci (13 mΩ) ile hesaplamalar yapılmıştır. Eş 4.6'da MOSFET'in üzerindeki gerilim düşümü gösterilmektedir. Eş 4.7'de ise MOSFET üzerinde harcanan güç değeri gösterilmektedir.

$$V_{düşüm} = I_{kaynak} * R_{iletim} \quad (4.4)$$

$$P_{düşüm} = V_{düşüm} * I_{kaynak} \quad (4.5)$$

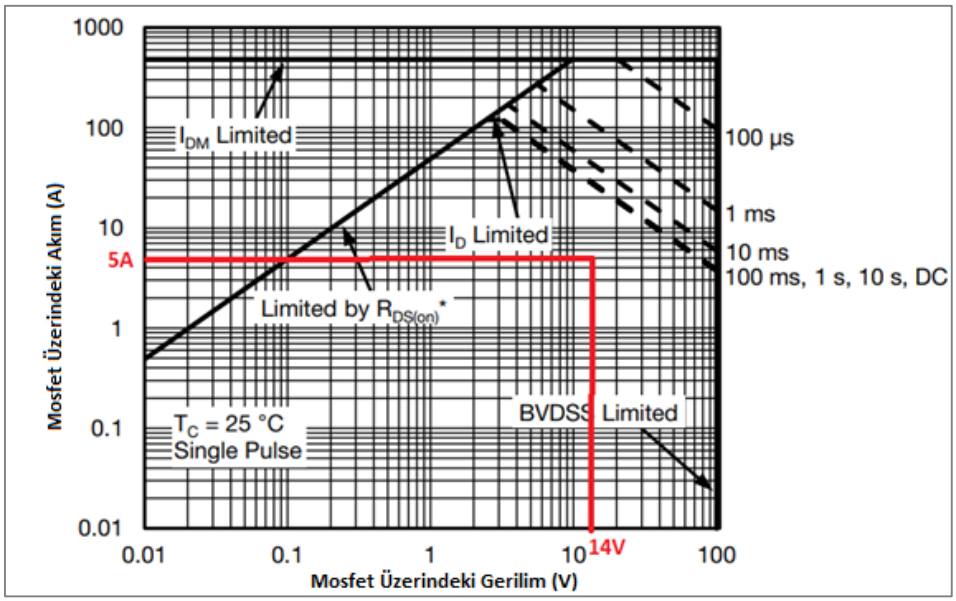
$$V_{düşüm} = 4A * 13m\Omega = 52\text{mV} \quad (4.6)$$

$$P_{düşüm} = 52\text{mV} * 5A = 260\text{mW} \quad (4.7)$$

250mW'lık bu değer MOSFET'in termal karakteristikleri göz önünde bulundurulduğunda MOSFET'de yaklaşık olarak 15 °C'lık bir sıcaklık artışına sebep olacaktır ve böylelikle MOSFET üzerindeki toplam sıcaklık 85 °C'ye ulaşacaktır. Bu da MOSFET'in -55 °C ~ 175 °C olan çalışma sıcaklık aralığının içindedir.

Daha önce bahsedildiği gibi MIL-STD-704E testinde tasarlanan devreye 50 V'luk gerilim yükselmeleri uygulanmakta ve bu gerilim yükselmelerini aktif koruma devresi 36 V'a sabitlemektedir. Bu sabitleme işlemi yine ikili MOSFET bloğunda bulunan MOSFET'ler ile yapılmaktadır.

Test esnasında bu 50 V'luk gerilim yükselmeleri en fazla 50 ms sürmektedir. Bu süre zarfında MOSFET üzerindeki gerilim farkı, 50 V'dan 36 V'a düşüş sağlayacağı için yaklaşık 14 V olacaktır ve MOSFET'ler üzerinden yaklaşık 4 A geçmektedir. Şekil 4.11'de MOSFET'in güvenli çalışma bölgesi gösterilmektedir. Kırmızı renk ile işaretlenen eğriye göre, MOSFET 14 V'luk kıpma işlemi yaparken 50 ms boyunca üzerinden 4A geçirebilecektir ancak güvenliği artırmak adına 25 % tolerans eklenip 5 A geçtiği düşünülerek MOSFET seçimi yapılmıştır.



Şekil 4.11. MOSFET Güvenli Çalışma Bölgesi Eğrisi

Ayrıca aktif koruma devresi daha önce bahsedildiği gibi tutma kapasitörü tasarımı barındırmaktadır. Bu tutma kapasitörü devresi ani güç kesintisi, enerji kaybı ve MIL-STD-704E standartları gibi normal çalışma durumunun dışındaki bozucu durumları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Kapasitör değeri hesaplanırken bu bozucu durumlar arasında en zor koşul referans alınmıştır. Bu en zor koşul MIL-STD-704E standardı "Güç Kaybı" testidir. Bu testte 28 V'luk (V_{normal}) besleme gerilimi, 100 ms, 500 ms, 3 s ve 7 s'lik görev çevrimleri ile 0 V'a düşmektedir. Bu çalışmada tasarlanan koruma devresi, bu test için maksimum 100 ms'lik standardı sağlamayı hedeflemektedir. Bu nedenle 100 ms'lik bir görev çevrimi boyunca tutma kapasitörünün kıyıcıyı istenilen gerilim, akım ve güç değerlerinde beslemesi gerekmektedir.

Tutma kapsitörünün bu 100 ms'lik (T_{tutma}) süre boyunca düşebileceği en düşük gerilim değeri kıyıcının minimum çalışma gerilimi olan 9 V'tur ($V_{düşük}$). Kapasitörden çekilecek akım değerinin en zor koşul olması için kıyıcının 9 V'da çektiği akım değeri referans alınmıştır. Bu değer de yaklaşık olarak 13 A'dir ($I_{deşarj}$). Bu akım ve gerilim değerleri ile kapasitörün sağlaması gereken güç değeri yaklaşık 117 W'tır (P_{tutma}).

Eş 4.8'de tutma kapasitörü için kapasitans (C_{tutma}) hesaplama eşitliği gösterilmektedir.

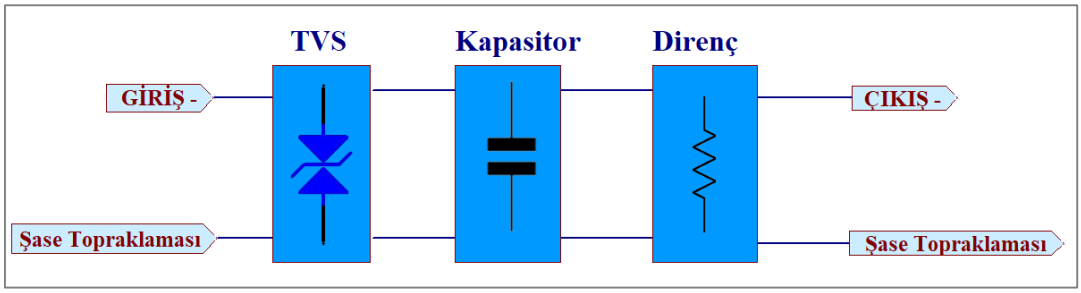
$$C_{tutma} = \frac{2 * P_{tutma} * T_{tutma} * 10^6}{V_{normal}{}^2 - V_{düşük}{}^2} \quad (uF) \tag{4.8}$$

Belirlenen değerler Eş 4.8'de yerine konulduğunda yaklaşık 30 mF'lık bir kapasitans değeri bulunmuştur. Aktif koruma devresi giriş gerilim yükselmelerini 36 V'a limitleyeceği için kapasitörün en yüksek çalışma geriliminin minimum 36 V olması gerekmektedir. Koruma devresine, tolerans değeri göz önünde bulundurularak 30 mF 50 V'luk bir kapasitör eklenmiştir.

Aktif koruma devresinin aşırı akım korumasını aşmamak için tutma kapasitörünün şarj akımı bir akım sınırlama devresi ile maksimum 10 A olarak limitlenmektedir. Ancak deşarj olurken bu limitleme devresi çeşitli gerilim düşümlerine sebep olmamak için akım sınırlaması yapmamaktadır.

4.5. Aviyonik Standartlara Uygun Yalıtkanlık Koruma Devresi Tasarımı Kriterleri

Test edilen devrenin veya sistemin, referans alınan "MIL-STD-202 Test Method 302" standardı gereği, negatif güç girişi yani akım geri dönüş hattı ile şase topraklaması arasında en az 50 MegaOhm bir yalıtkanlık olmalıdır. Bu yalıtkanlık 100V'luk test seviyesinde olmalıdır, bu nedenle tasarlanan devrenin negatif besleme hattı ile şase topraklaması arasına minimum 50 MegaOhm eşdeğer empedans sağlayacak bir devre eklenmiştir. Şekil 4.12'de yalıtkanlık koruma devresi blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Yalıtkanlık Koruma Devresi Blok Şeması

Tasarlanan pasif koruma devresinde kullanılan TVS ve GDT'ler, üzerinden akım akıtarak pozitif besleme giriş hattı üzerindeki oluşan ani gerilim yükselmelerini bastırır. Bu akımlar negatif giriş besleme hattına akmakta ve ardından yine başka bir TVS ile şase topraklamasına akarak devreyi tamamlamaktadır. Bu akışı tamamlamak için daha önce belirtilen pasif koruma devresinde kullanılan TVS ve GDT'ye ek olarak yalıtkanlık koruma devresine de TVS diyot eklenmektedir. MIL-STD-202 Test Method 302 testi sırasında hat'a 100V uygulanmaktadır. Test esnasında TVS'in iletime geçmemesi için hat empedansı 50

MegaOhm’un altına düşmemelidir. Bu nedenle TVS’in kırılma gerilimi minimum 100V olacak şekilde seçilmiştir.

Elektromanyetik süzgeç devresinde giriş besleme hatları arasında kullanılan kapasitörler ile gürültülü akımlar, giriş negatif besleme hattına aktarılır ve daha sonra bu gürültülü akımlar yalıtkanlık koruma devresinde bulunan kapasitörler ile şase topraklamasına aktarılarak devre tamamlanmış olur. MIL-STD-202 Test Method 302 testi sırasında hatta 100V uygulandığında kapasitörlerin zarar görmemesi için kapasitörün en yüksek çalışma gerilimi minimum 100V olacak şekilde seçilmiştir.

Bunlara ek hattaki empedansı 50 MegaOhm’a sabitlemek ve eklenen kapasitörlerin şarjlı kalmalarını engellemek için 50 MegaOhm’luk direnç eklenmiştir.

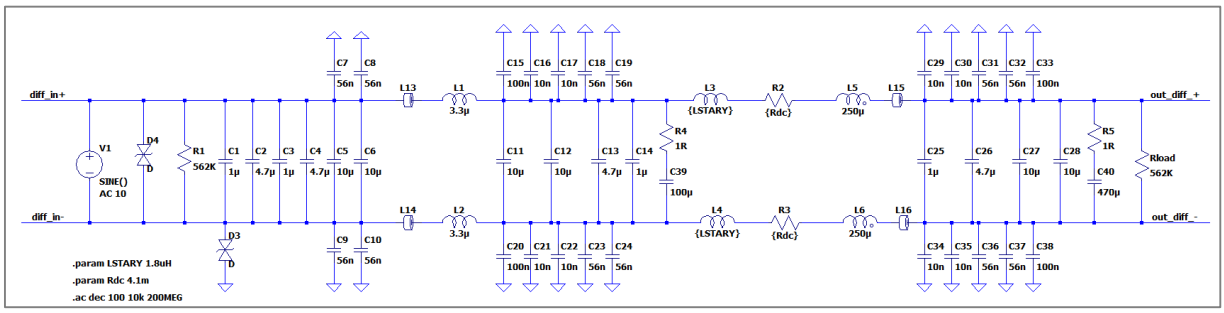
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

5.1. Elektromanyetik Süzgeç Devresi Benzetim Çalışmaları

Süzgeç devresi hem ortak mod hem de fark modda filtreleme yapabilmektedir. Bu filtremeler CE-102 ve CS-114 standartlarını sağlayacak şekilde iki yönlü gerçekleşmektedir. CE-102 standardının testi 10 kHz ile 10 MHz frekans bandında yapılmakta, CS-114'ünki ise 10 kHz ile 200 MHz frekans bandında yapılmaktadır.

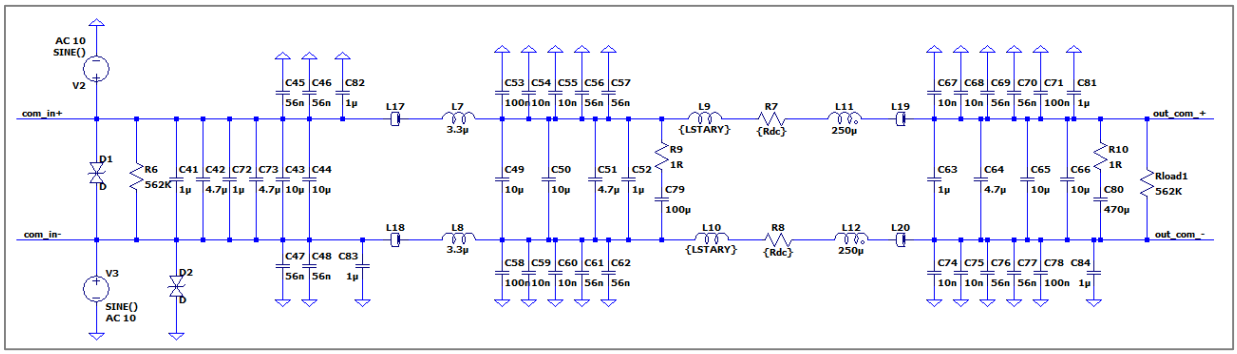
Süzgeç devresi iki yönlü olacak şekilde, bu iki test standardını sağlayarak 10 kHz ile 200 MHz frekans bandında filtreleme yapabilmektedir. Tasarlanan süzgeç devresinin benzetim çalışmaları ile bu frekans bandında yeterli filtreleme gücüne sahip olduğu test edilmiştir. Bu benzetim çalışmaları "LTSpice" programı ile yapılmıştır. CS ve CE yönünde yapılan fark mod ve ortak mod gürültü benzetim çalışmaları ayrı ayrı test edilmiştir.

Şekil 5.1'de CS yönünde fark mod filtreleme için kullanılan benzetim devre şeması bulunmaktadır.



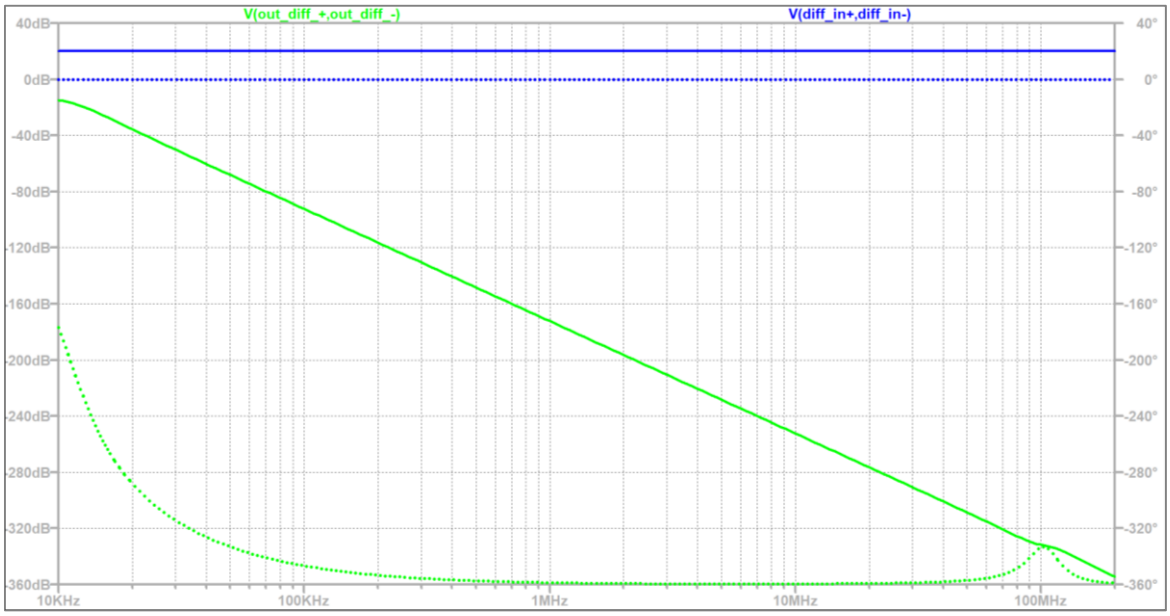
Şekil 5.1. CS Yönünde Fark Mod Filtreleme Benzetim Şeması

Şekil 5.2'de ise CS yönünde ortak mod filtreleme için kullanılan benzetim devre şeması bulunmaktadır.



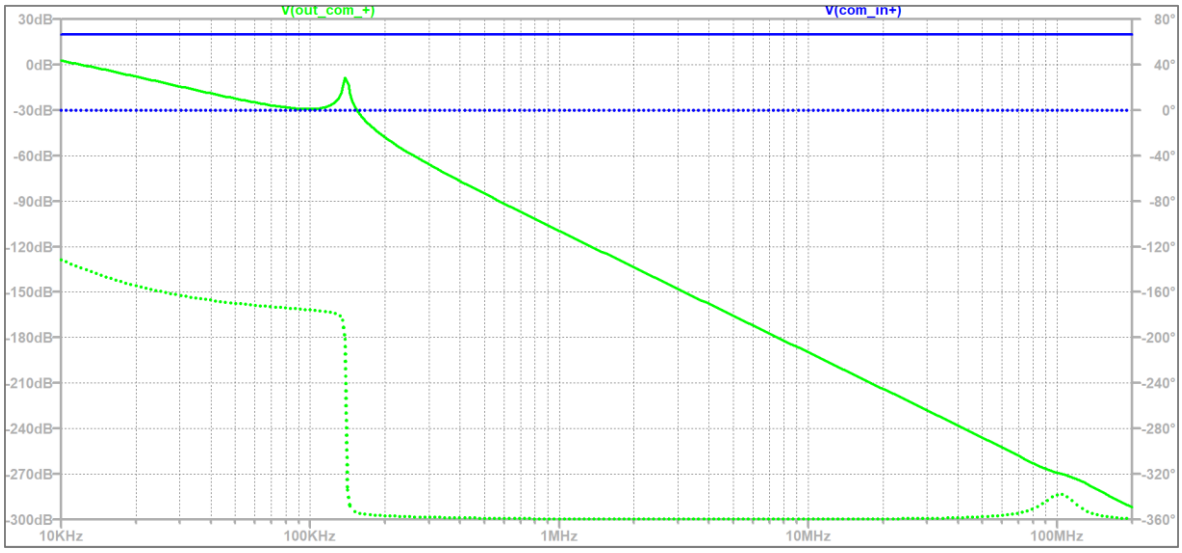
Şekil 5.2. CS Yönünde Ortak Mod Filtreleme Benzetim Şeması

Şekil 5.3'de CS yönünde fark mod gürültü için bastırma gücü grafiği gösterilmektedir.



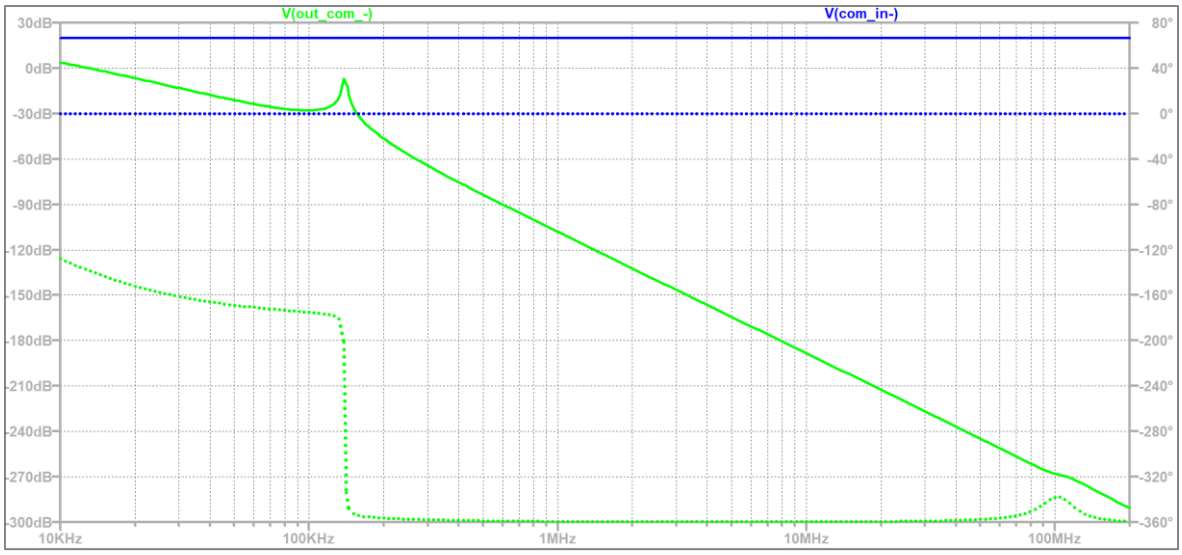
Şekil 5.3. CS Yönünde Fark Mod Benzetim Eğrisi

Şekil 5.3'de mavi renkli eğri giriş fark mod gürültüsünün frekans bandındaki güç değerlerini göstermektedir. Bu değer her frekans değerinde eşit ve 20 dB'dir. 20dB'lik bu değer, test standardında uygulanan gürültü değerlerinin üzerinde bir güçte bozucu etkiye sahiptir. Bu 20 dB'lik giriş gürültüsü değeri, süzgeç devresinin bastırması ile birlikte çıkışta -20 dB'den başlayıp -350 dB'ye kadar düşmektedir. Bu düşük seviyeli gürültülerin Şekil 5.3'de yeşil renk ile gösterilen eğride göründüğü gibi CS-114 standardı için bozucu etkisi yok denecek kadar azdır.



Şekil 5.4. Pozitif Besleme Girişi için CS Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi

Şekil 5.4'de mavi renkli eğri pozitif giriş hattı için fark mod gürültüsünün frekans bandındaki güç değerlerini göstermektedir. Bu değer her frekans değerinde eşit ve 20 dB'dir. Bu 20 dB'lik giriş gürültüsü değeri süzgeç devresinin bastırması ile birlikte devrenin çıkışında 0 dB'den başlayıp -280 dB'ye kadar düşmektedir. Bu düşük seviyeli gürültüler Şekil 5.4'de yeşil renk ile gösterilen eğride göründüğü gibi CS-114 standardı için bozucu etkisi yok denecek kadar azdır.

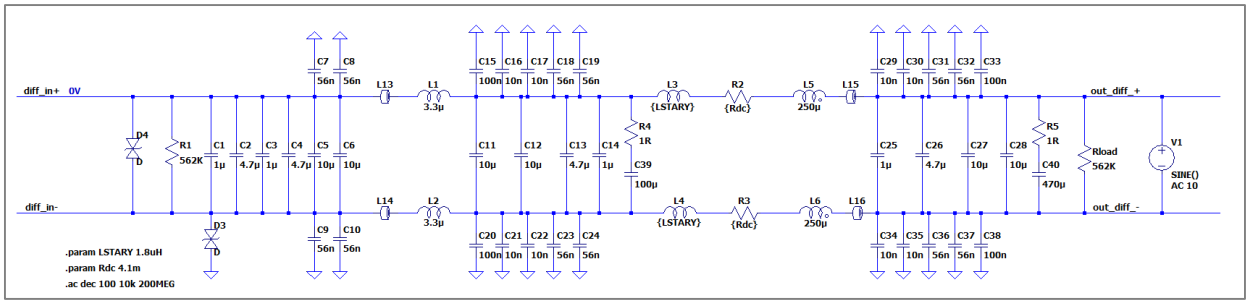


Şekil 5.5. Negatif Besleme Girişi için CS Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi

Şekil 5.4'de mavi renkli eğri negatif giriş hattı için fark mod gürültüsünün frekans bandındaki güç değerlerini göstermektedir. Bu değer her frekans değerinde eşit ve 20 dB'dir. Bu 20 dB'lik giriş gürültüsü değeri süzgeç devresinin bastırması ile birlikte çıkışta 0 dB'den

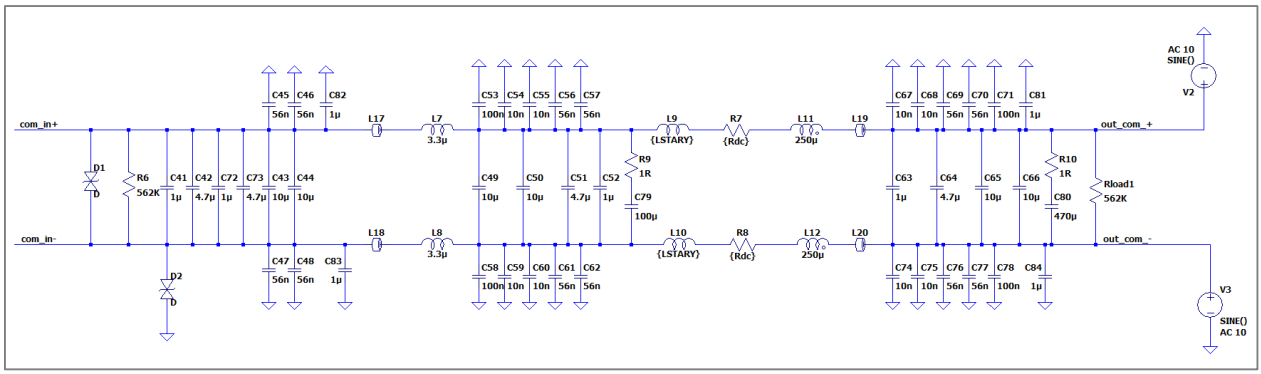
başlayıp -280 dB'ye kadar düşmektedir. Bu düşük seviyeli gürültüler Şekil 5.5'de yeşil renk ile gösterilen eğride göründüğü gibi CS-114 standardı için bozucu etkisi yok denecek kadar azdır.

Şekil 5.6'da CE yönünde Fark mod filtreleme için kullanılan benzetim devre şeması bulunmaktadır.



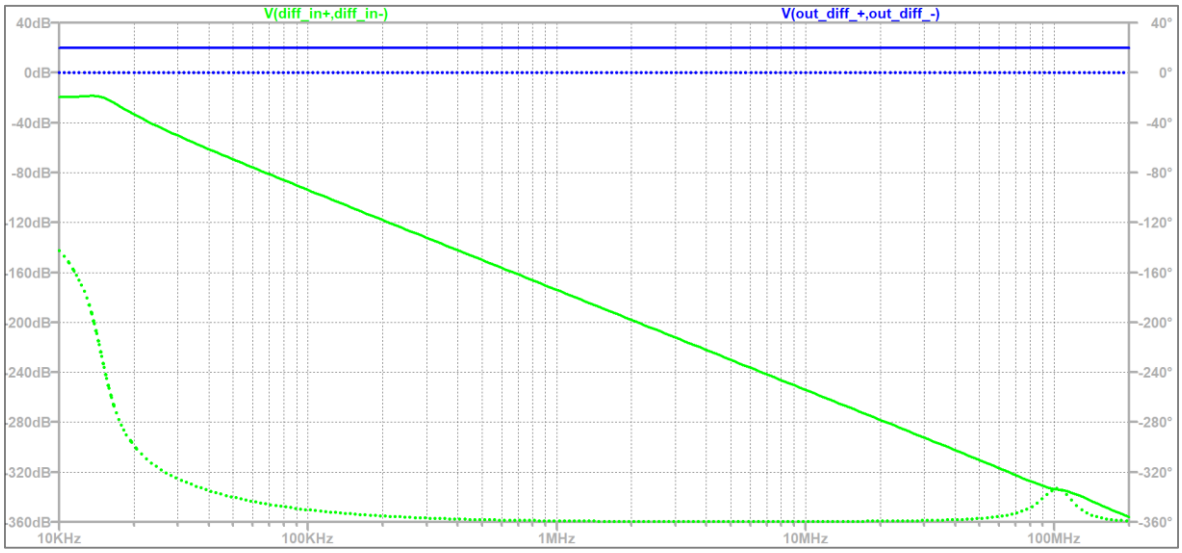
Şekil 5.6. CE Yönünde Fark Mod Filtreleme Benzetim Şeması

Şekil 5.7'de ise CE yönünde Ortak mod filtreleme için kullanılan benzetim devre şeması bulunmaktadır.



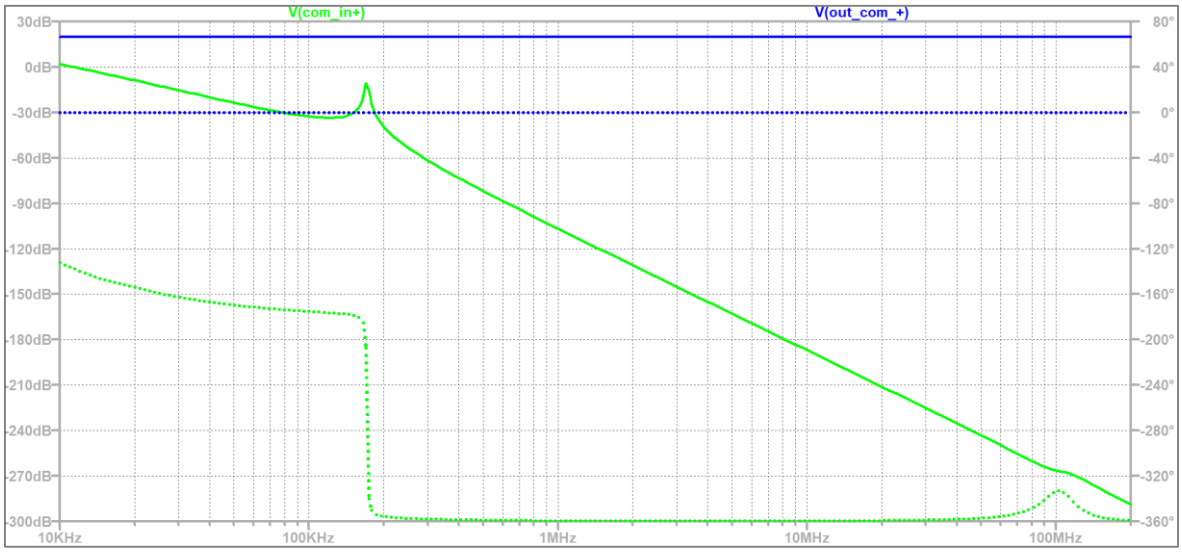
Şekil 5.7. CE Yönünde Ortak Mod Filtreleme Benzetim Şeması

Şekil 5.8'de CE yönünde fark mod gürültü için bastırma gücü grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.8'de gösterilen eğride, mavi renkli eğri kıyıcı tarafından oluşabilecek fark mod gürültüsünün tüm frekans bandındaki güç değerlerini göstermektedir. Bu değer her frekans değerinde eşit ve 20 dB'dir. 20dB'lik değer kıyıcı tarafından yayılacak gürültü değerlerin üzerinde bir güçte bozucu etkiye sahiptir. Bu 20 dB'lik giriş gürültüsü değeri süzgeç devresinin bastırması ile birlikte girişte -20 dB'den başlayıp -360'dB ye kadar düşmektedir. Bu düşük seviyeli gürültüler Şekil 5.8'de yeşil renk ile göstiren eğride göründüğü gibi CE-102 standardı için bozucu etkisi yok denecek kadar azdır.



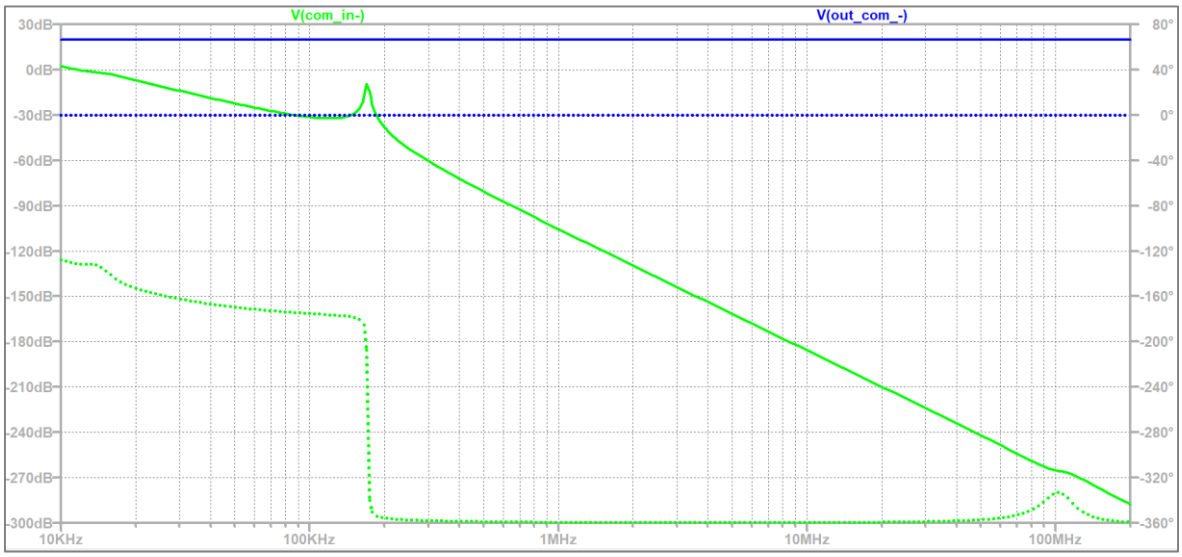
Şekil 5.8. CE Yönünde Fark Mod Benzetim Eğrisi

Şekil 5.9'da CE yönünde ortak mod gürültü için bastırma gücü grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.8'de gösterilen mavi eğri, pozitif besleme hattındaki, kıyıcı tarafından oluşabilecek ortak mod gürültüsünün tüm frekans bandındaki güç değerlerini göstermektedir. Bu değer her frekans değerinde eşit ve 20 dB'dir. 20dB'lik değer kıyıcı tarafından yayılacak gürültü değerlerinin üzerinde bir güçte bozucu etkiye sahiptir. Bu 20 dB'lik giriş gürültüsü değeri süzgeç devresinin bastırması ile birlikte süzgeç girişte 0 dB'den başlayıp -280 dB'ye kadar düşmektedir. Bu düşük seviyeli gürültüler Şekil 5.9'da yeşil renk ile gösterilen eğride göründüğü gibi CE-102 standardı için bozucu etkisi yok denecek kadar azdır.



Şekil 5.9. Pozitif Besleme Girişi için CE Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi

Şekil 5.10'da CE yönünde ortak mod gürültü için bastırma gücü grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.8'de gösterilen mavi eğri, negatif besleme hattında kıyıcı tarafından oluşabilecek ortak mod gürültüsünün frekans bandındaki güç değerlerini göstermektedir. Bu değer her frekans değerinde eşit ve 20 dB'dir. 20dB'lik değer kıyıcı tarafından yayılacak gürültü değerlerinin üzerinde bir güçte bozucu etkiye sahiptir. Bu 20 dB'lik giriş gürültüsü değeri süzgeç devresinin bastırması ile birlikte girişte 0 dB'den başlayıp -280 dB'ye düşmektedir. Bu düşük seviyeli gürültüler Şekil 5.10'da yeşil renk ile göstiren eğride göründüğü gibi CE-102 standardı için bozucu etkisi yok denecek kadar azdır.

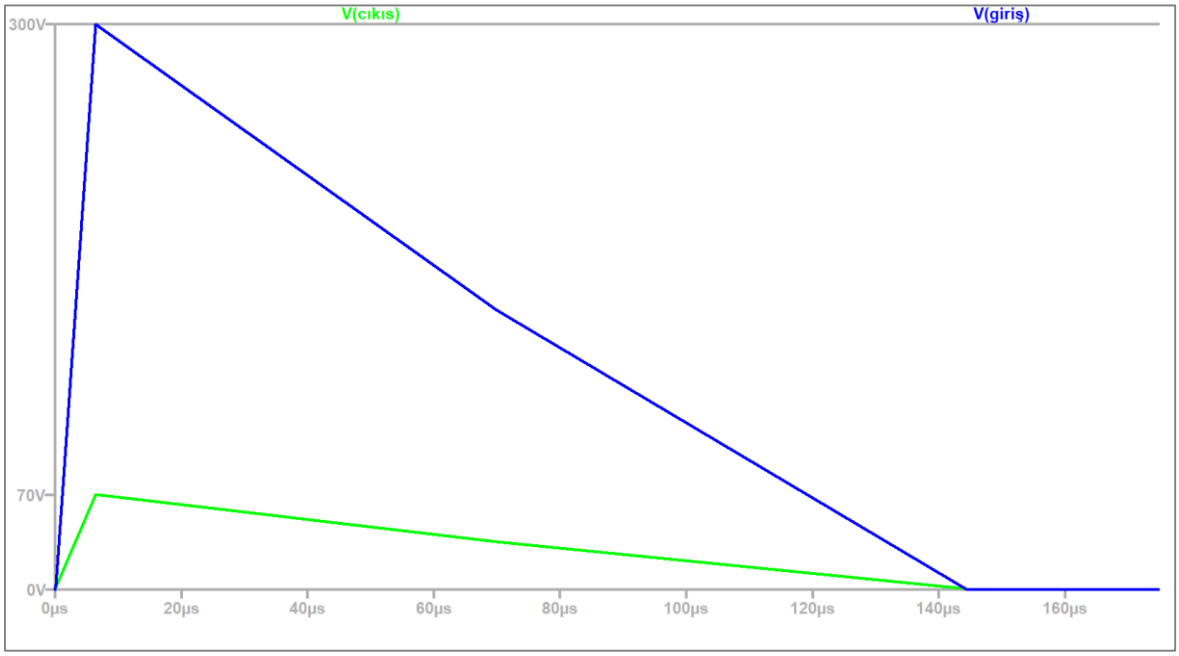


Şekil 5.10. Negatif Besleme Girişi için CE Yönünde Ortak Mod Benzetim Eğrisi

5.2. Pasif Koruma Devresi Benzetim Çalışmaları

Pasif koruma devresi daha önce bahsedildiği gibi ani gerilim yükselmelerine karşı koruma sağlamaktadır. Koruma işlemi DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 standardına uygun şekilde yapılmaktadır. Bu test standardında, test edilen güç girişlerine 300 V/60 A'lik bir bozucu etki uygulanmaktadır. Bu test, pasif koruma devresine benzetim yolu ile de uygulanmıştır. Bu uygulama yine "LTSpice" programı ile yapılmıştır. Kıyıcının besleme hatlarına uygulanan bozucu etki ve bu bozucu etkiyi pasif koruma devrenin bastırması Şekil 5.11'de gösterilmektedir.

Mavi renkli eğri, kıyıcının girişine uygulanan bozucu etkiyi göstermektedir. Yeşil renkli eğri ise pasif koruma devresinin bastırdığı gerilim değerini göstermektedir.



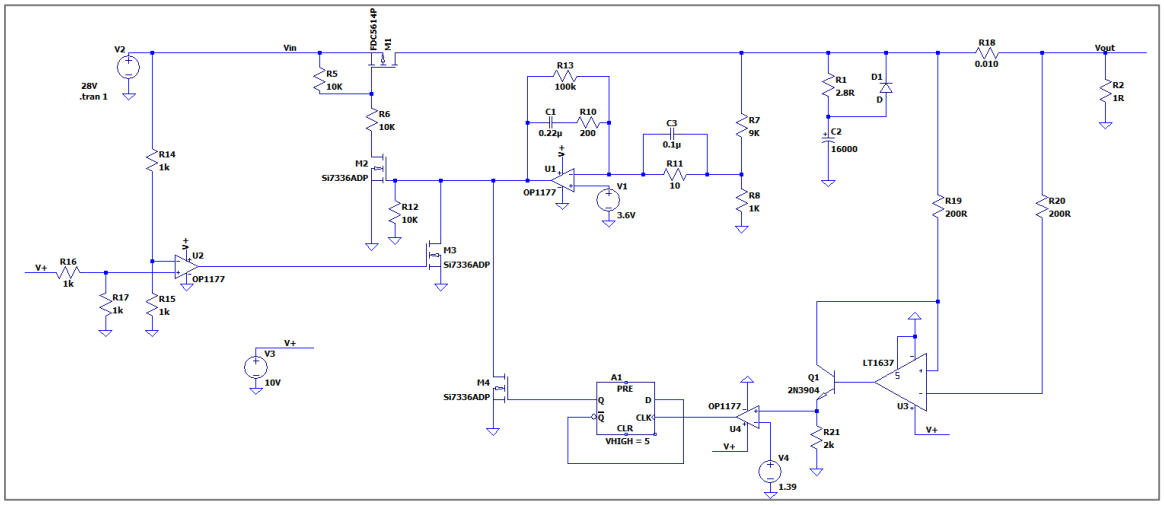
Şekil 5.11. Pasif Koruma Devresine Benzetim Eğrisi

Şekil 5.11'de gösterildiği gibi 300 V'a yükselen giriş ani gerilim bozucu etkisi, pasif koruma devresi tarafından 72 V'a düşürülmektedir.

5.3. Aktif Koruma Devresi Benzetim Çalışmaları

Aktif koruma devresi, MIL-STD-704E standardını sağladığı gibi aşırı gerilim koruması, düşük gerilim koruması, aşırı akım koruması ve ters kutuplama koruması gibi özellikleri de

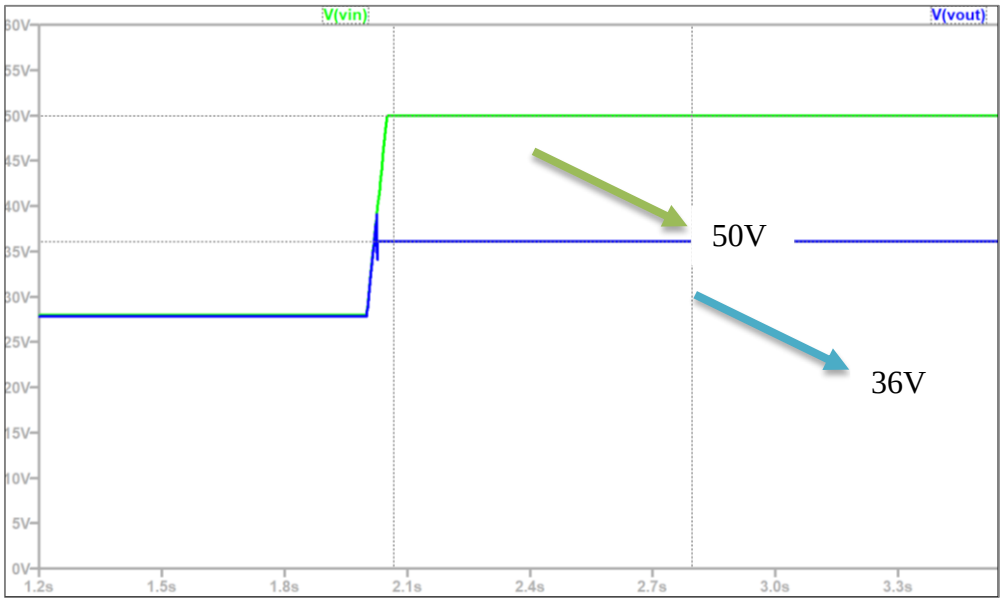
sağlamaktadır. Bu koruma devresinin şeması Şekil 5.12'de gösterildiği gibidir. Bu koruma özellikleri için benzetim çalışmaları aşağıda sırası ile verildiği gibidir.



Şekil 5.12. Aktif Koruma Devresi Şeması

5.3.1. Aşırı gerilim koruması

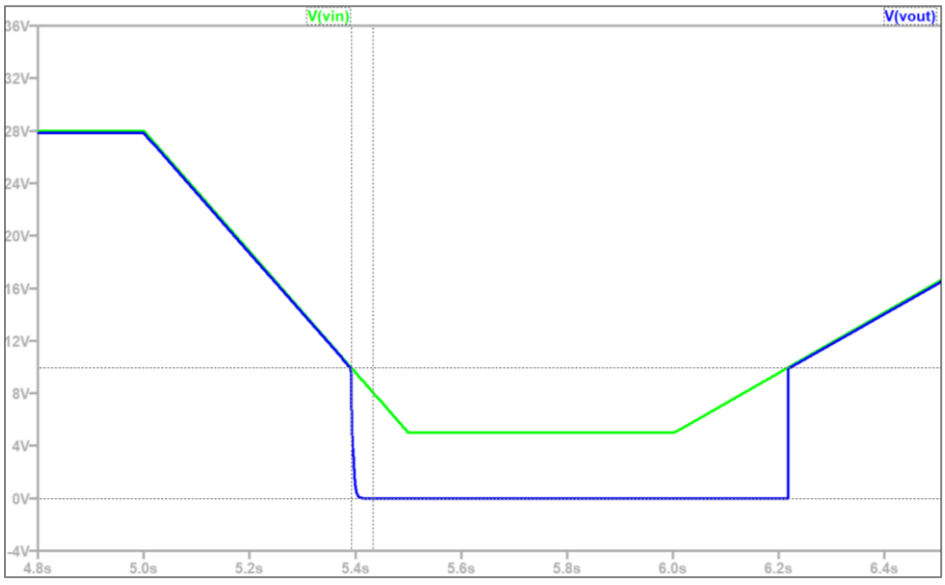
Giriş gerilimi belirlenen limitleme gerilimini aştıktan sonra koruma devresi giriş gerilimini belirlenen gerilim değerine sabitlemektedir. Şekil 5.13'de giriş ve çıkış gerilimlerinin seviyelerinin gösterildiği eğriler bulunmaktadır. Yeşil ile gösterilen eğri giriş gerilimini, mavi ile gösterilen eğri ise çıkış gerilimini temsil etmektedir. Normal çalışma durumunda 28 V'da olan giriş gerilimi, çok kısa bir sürede 50 V seviyesine kadar artmaktadır. Aktif koruma devresi bu 50 V'luk giriş gerilimini 36 V'a sabitlemektedir.



Şekil 5.13. Aşırı Gerilim Koruma Eğrisi

5.3.2. Düşük gerilim koruması

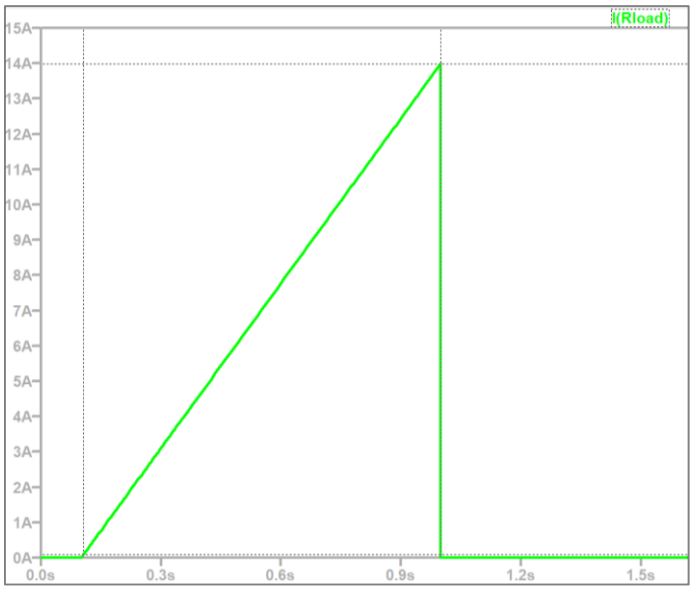
Giriş gerilimi belirlenen limitleme geriliminin altına düştükten sonra koruma devresi besleme gerilimini kesecektir. Şekil 5.14'te giriş ve çıkış gerilimlerinin seviyelerinin gösterildiği eğriler bulunmaktadır. Yeşil ile gösterilen eğri giriş gerilimini, mavi ile gösterilen eğri ise çıkış gerilimini temsil etmektedir. Normal çalışma durumunda 28 V'da olan giriş gerilimi, çok kısa bir sürede 5 V seviyesine kadar düşmektedir. Aktif koruma devresi, giriş gerilimi 10 V'un altına düştüğü anda besleme gerilimini kesecektir.



Şekil 5.14. Düşük Gerilim Koruma Eğrisi

5.3.3. Aşırı akım koruması

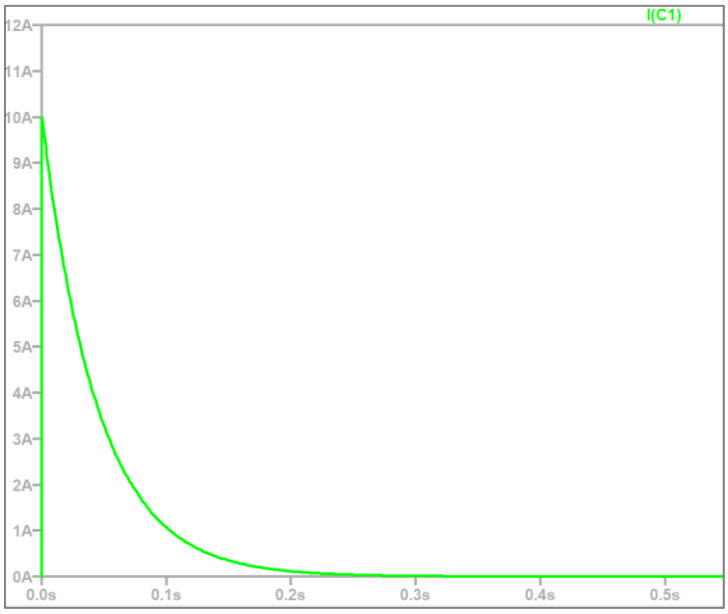
Kıyıcı veya diğer yükler, belirlenen akım limitinin üzerinde akım çekerse aktif koruma devresi, çekilen akımı kesmektedir. Şekil 5.15'te girişten çekilen akımın seviyesinin gösterildiği eğri bulunmaktadır. Normal çalışma durumunda 4 A olan giriş akımı çok kısa bir sürede 20 A seviyesine kadar çıkmaya çalışmaktadır. Aktif koruma devresi, giriş akımını 14 A'e çıktığı anda giriş gerilimini keserek, çekilen akımı durdurmaktadır.



Şekil 5.15. Aşırı Akım Koruma Eğrisi

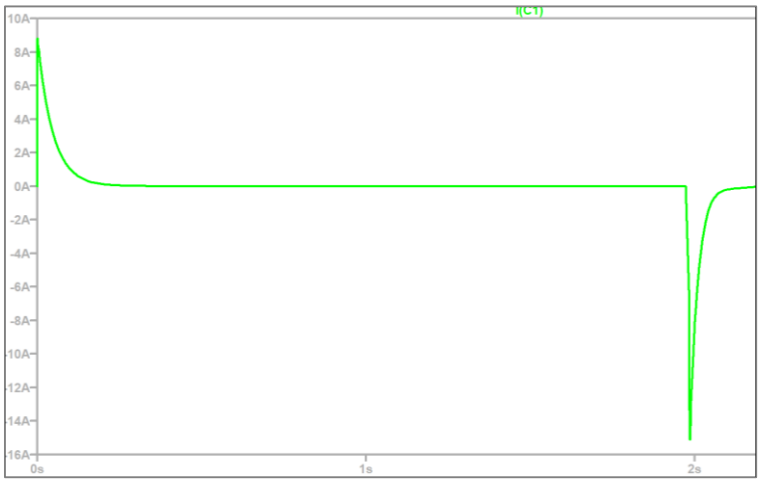
5.3.4. Tutma kapasitörü şarj-deşarj akımları

Aktif koruma devresinde bulunan tutma kapasitörü devresi, sınırlı akım şarj etme devresi üzerinden maksimum 10 A'lik akım değeri ile şarj edilmektedir. Şekil 5.16'da sınırlı akım şarj devresinin maksimum 10 A ile şarj etme eğrisi bulunmaktadır.



Şekil 5.16. Şarj Devresi Akım Sınırlama Eğrisi

Sınırlı akım şarj devresi, şarj akımını sınırladığı halde, gerilim düşümü olmaması adına deşarj akımını sınırlamamaktadır. Deşarj akımını belirten eğri Şekil 5.17'de gösterildiği gibidir. 16 A değerinde bir deşarj akımı oluşmaktadır.



Şekil 5.17. Şarj Devresi Deşarj Akımı Eğrisi

6. ÖLÇÜM SONUÇLARI

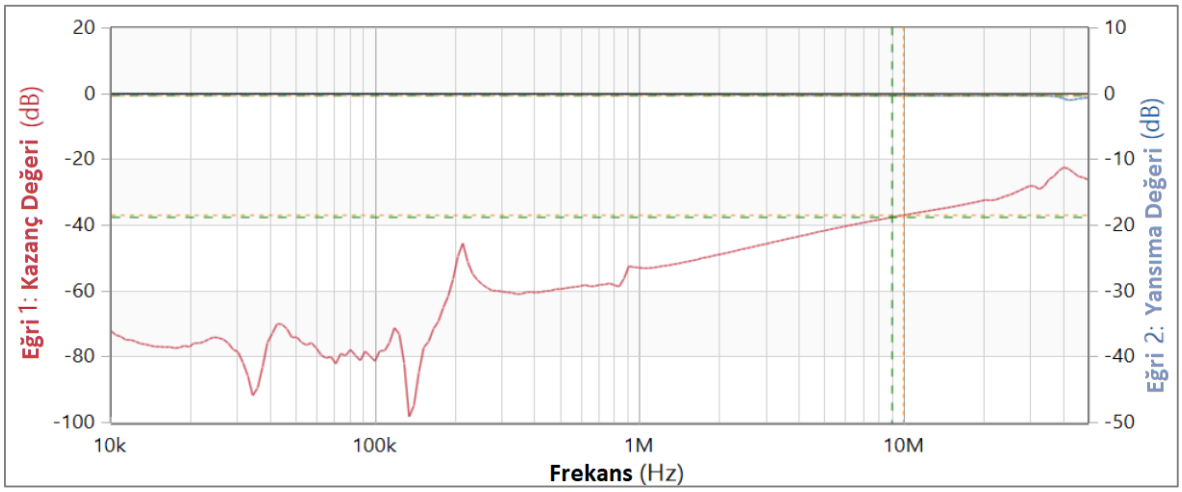
6.1. Elektromanyetik Süzgeç Devresi Ölçüm Çalışmaları

Elektromanyetik süzgeç devresi için ölçüm çalışmaları hem "Bode-100 network analyzer" ile hem de MIL-STD-461F test düzenekleri ile yapılmıştır. Bu test çalışmaları için ölçüm sonuçları aşağıdaki başlıklarda belirtildiği gibidir.

6.1.1. Bode-100 ile yapılan testlerin ölçüm sonuçları

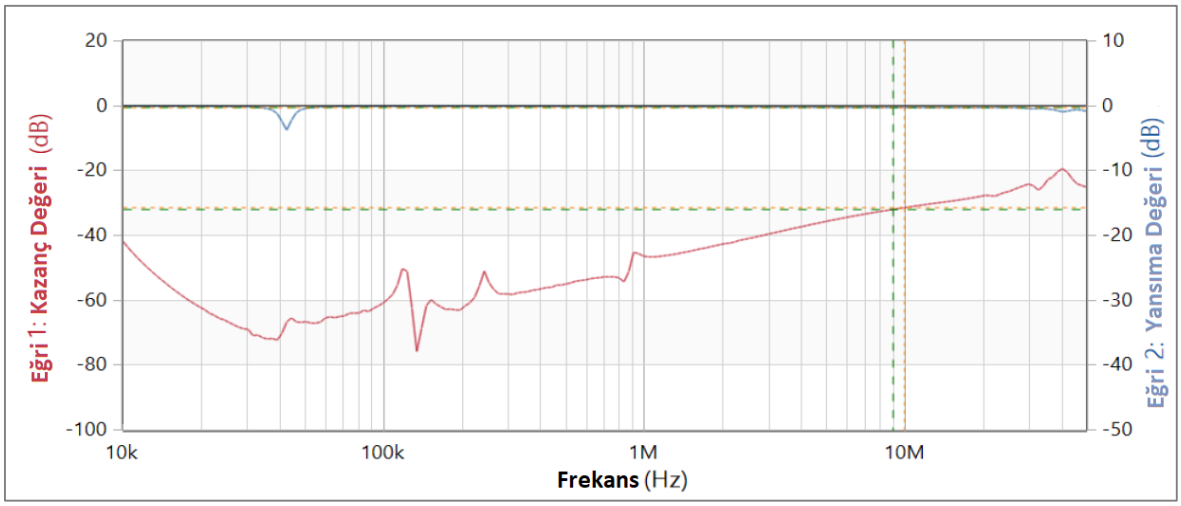
Süzgeç devresi için hem ortak mod hem de fark modda filtreleme kazancı ve yansıma oranları için "Bode-100 network analyzer" cihazı ile ölçüm çalışması yapılmıştır. Bu ölçüm çalışmalarından yola çıkılarak benzetim çalışmalarının doğruluğu test edilmiştir.

Süzgeç devresinin CE ve CS yönlerinde gerekli kazanç ve yansıma değerlerine sahip olup olmadığını test edebilmek için iki yönde de ölçüm sonuçları alınmıştır. Şekil 6.1'de CE yönü için fark modda süzgeç devresinin kazanç ve yansıma eğrileri bulunmaktadır. Kırmızı renk ile gösterilen eğri kazanç değerini göstermektedir. Siyah ile gösterilen eğri ise yansıma değerini göstermektedir.



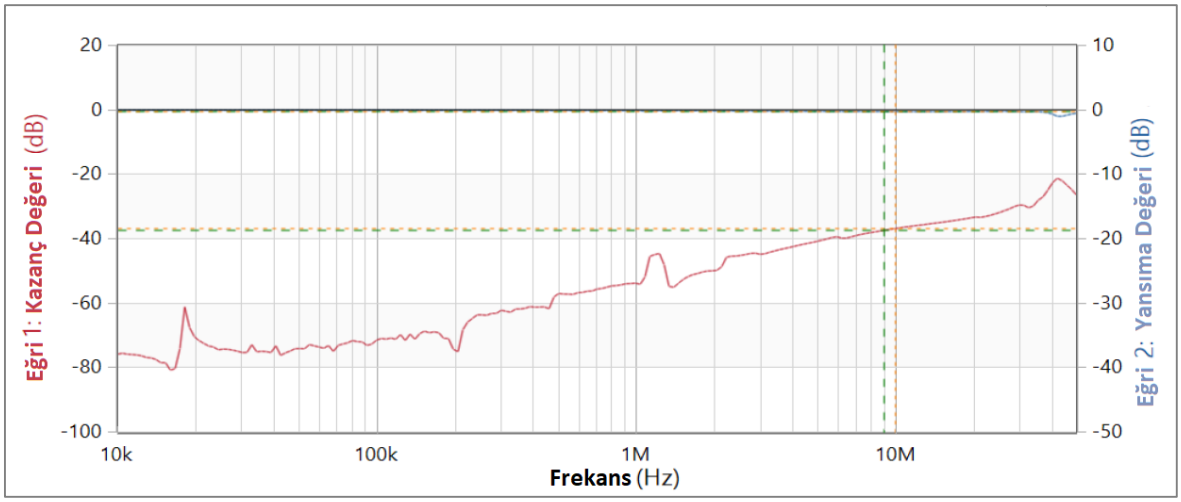
Şekil 6.1. CE Fark Mod Bode 100 Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.2'de CS yönü için fark modda süzgeç devresinin kazanç ve yansıma eğrileri bulunmaktadır.



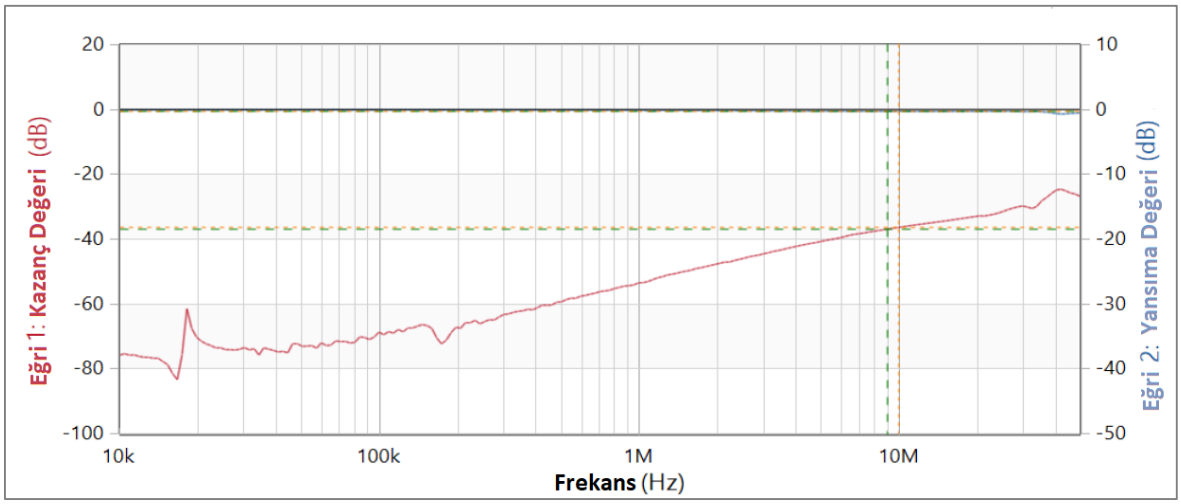
Şekil 6.2. CS Fark Mod Bode 100 Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.3'de CE yönünde artı besleme hattı için ortak modda süzgeç devresinin kazanç ve yansıma eğrileri bulunmaktadır.



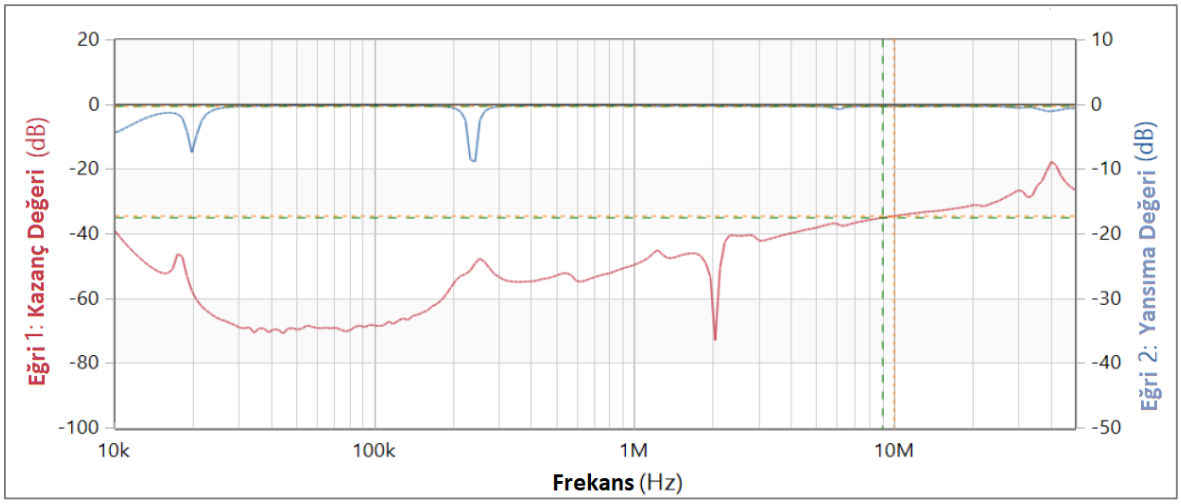
Şekil 6.3. CE Ortak Mod Artı Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.4'de CE yönünde eksi besleme hattı için ortak modda süzgeç devresinin kazanç ve yansıma eğrileri bulunmaktadır.



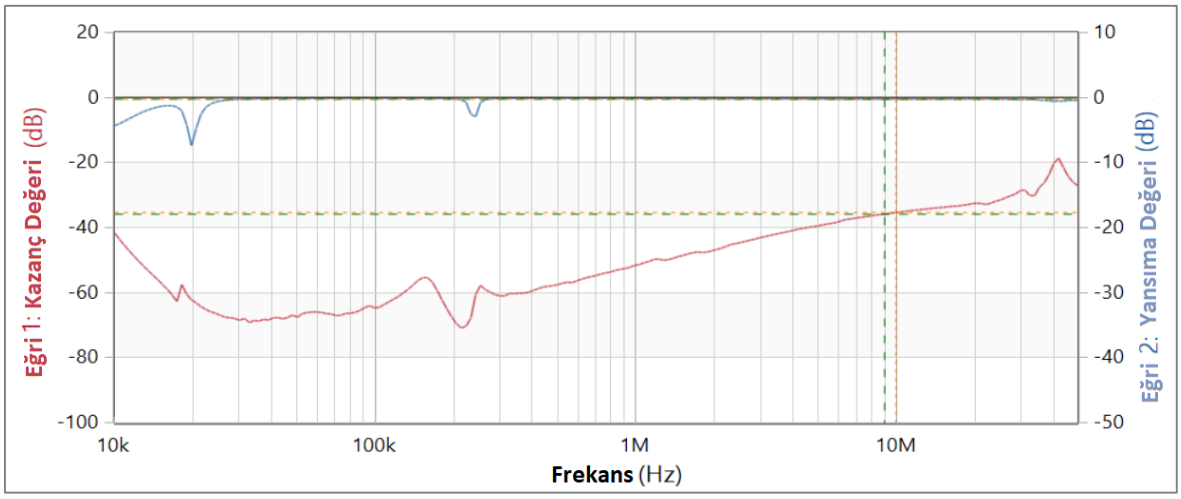
Şekil 6.4. CE Ortak Mod Eksi Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.5'de CS yönünde artı besleme hattı için ortak modda süzgeç devresinin kazanç ve yansıma eğrileri bulunmaktadır.



Şekil 6.5. CS Ortak Mod Artı Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi

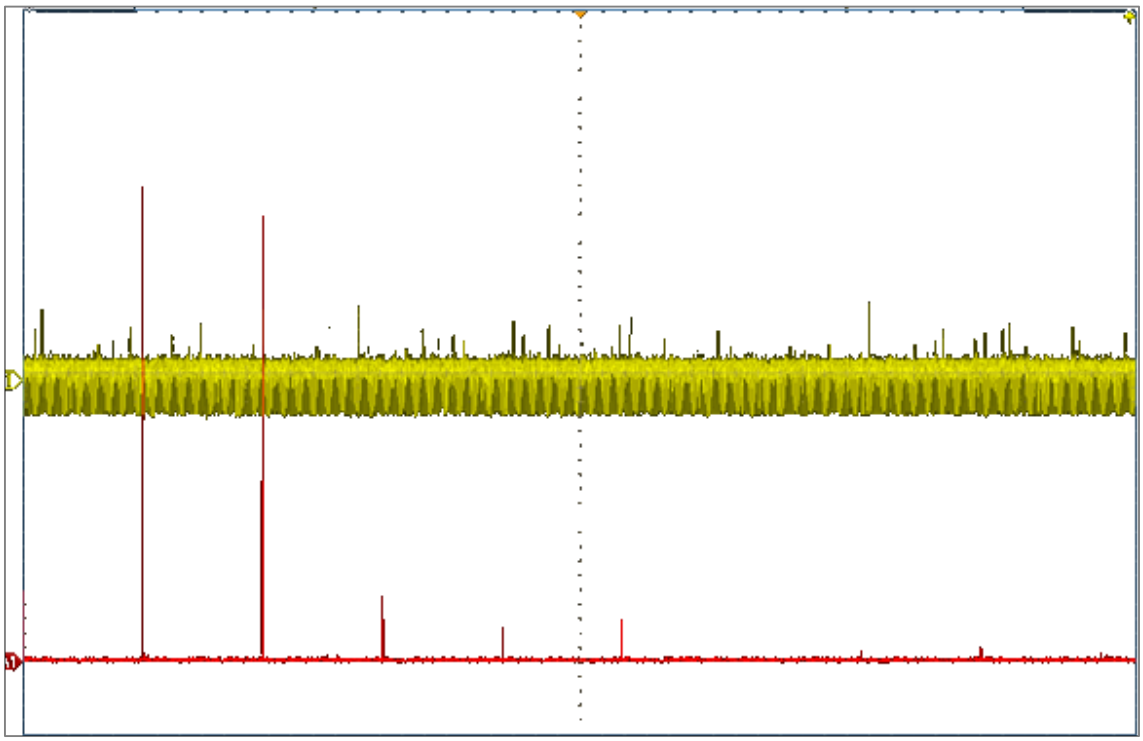
Şekil 6.6'da CS yönünde eksi besleme hattı için ortak modda süzgeç devresinin kazanç ve yansıma eğrileri bulunmaktadır.



Şekil 6.6. CS Ortak Mod Eksi Besleme Hattı Bode 100 Ölçüm Eğrisi

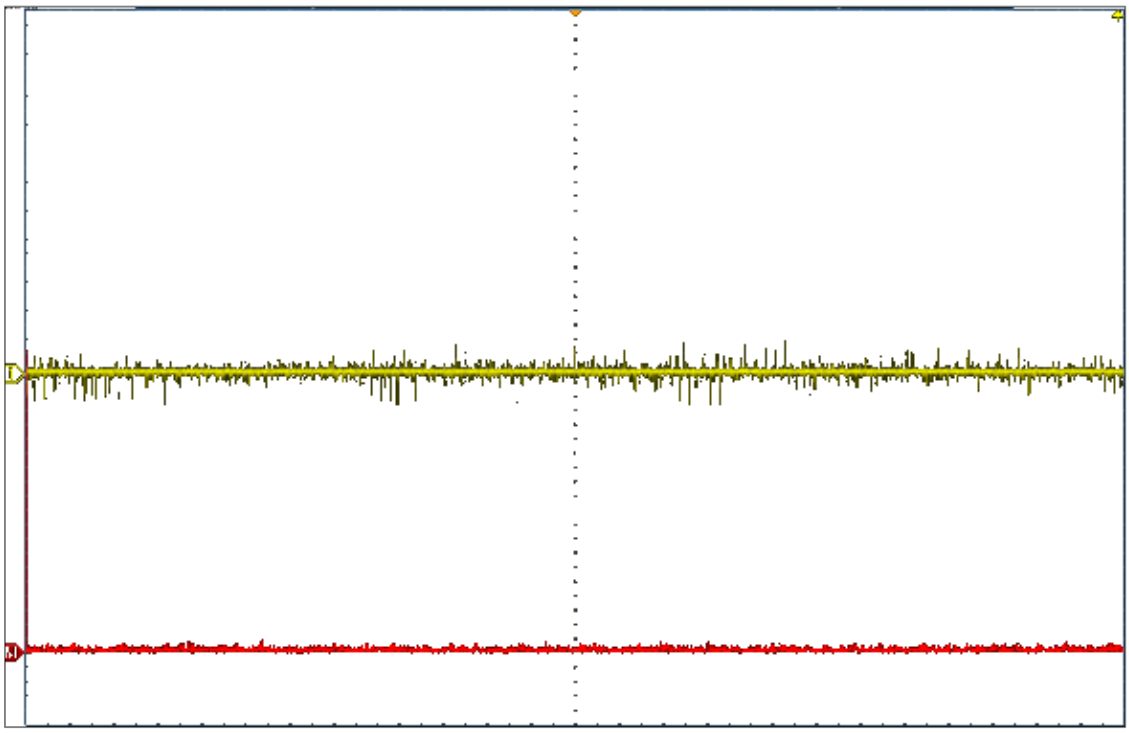
Süzgeç ve koruma devreleri kullanılmadan enerjilendirilen kıyıcı devresinin yaydığı elektromanyetik gürültülerin FFT (fast fourier transform; hızlı fourier dönüşümü) eğrisi

kırmızı renk ile Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Sarı renkli eğri ise osiloskop AA modda iken kıyıcı giriş geriliminin salınımlarını göstermektedir.



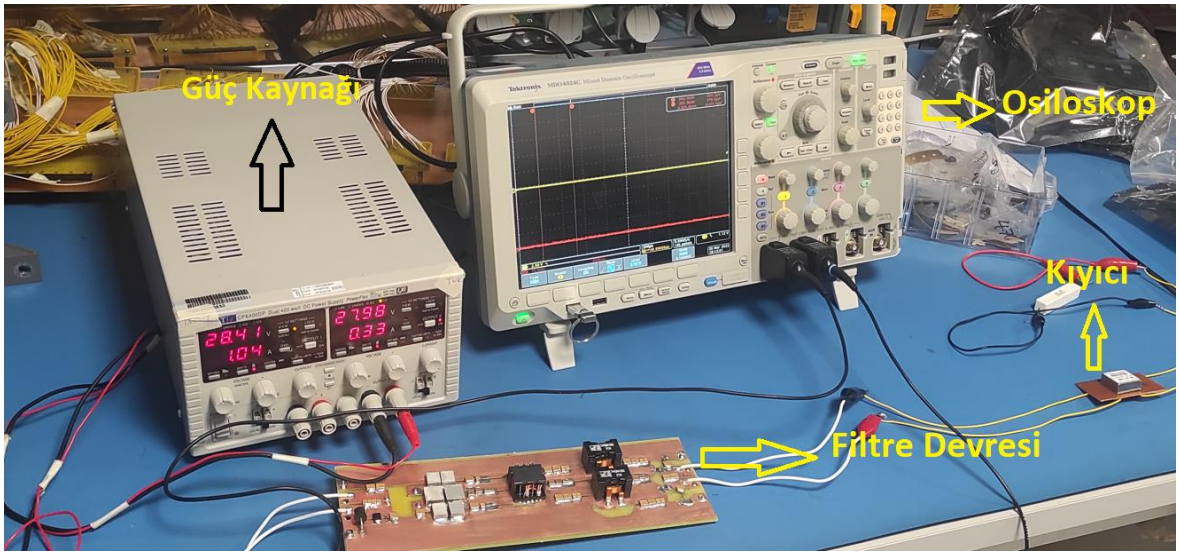
Şekil 6.7. DA-DA Kıyıcının Yaydığı Gürültünün FFT Analizi

Bu FFT analizi incelendiğinde kıyıcının belirli frekanslarda ve belirli harmoniklerde gürültü yaydığı görülmektedir. Şekil 6.8'de ise süzgeç devresi eklendiğinde bu harmoniklerin süzüldüğünü gösteren FFT eğrisi bulunmaktadır.



Şekil 6.8. DA-DA Kıyıcının Yaydığı Gürültülerin Filtrelenmesinin FFT Analizi

Kıyıcı ve süzgeç devresinin birlikte çalıştırılıp FFT analizinin yapıldığı ölçüm düzeneği ise Şekil 6.9'da gösterildiği gibidir.

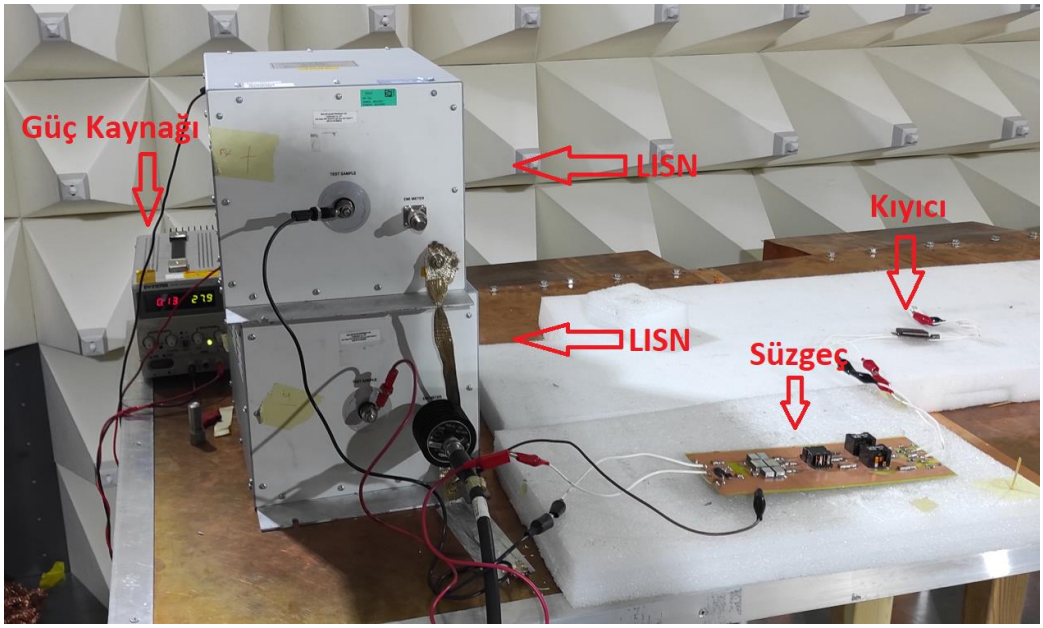


Şekil 6.9. DA-DA Kıyıcı ve Filtre Devresi FFT Analizi Ölçüm Düzeneği

6.1.2. MIL-STD-461F test düzeneği ile testlerin ölçüm sonuçları

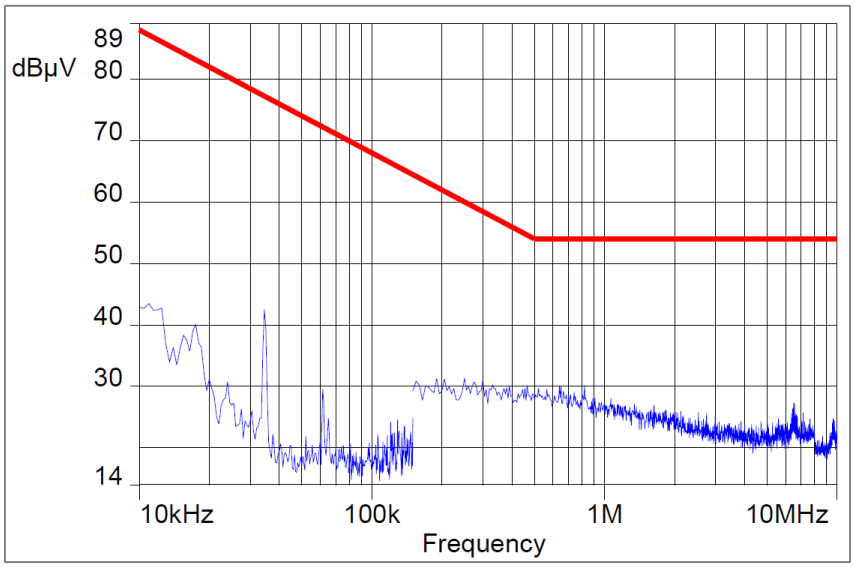
Süzgeç devresinin hem ortak mod hem de fark modda MIL-STD-461F standardı gereği belirlenen frekans bandında istenilen kazanç değerlerine sahip olup olmadığı ölçüm çalışması ile elde edilmektedir. Bu ölçüm sonuçlarından yola çıkılarak benzetim çalışmalarının doğruluğu test edilmiştir. Bu test sonuçları benzetim çalışmalarında yapıldığı gibi 10 kHz'den 200 MHz'e kadar olan frekans bandında elde edilmiştir.

Şekil 6.10'da CE-102 testinin yapıldığı düzenek gösterilmektedir. Test düzeneğinde hattı sabit bir empedansta tutmaya yaran LISN'lar (line impedance stabilization network; hat empedansını dengeleme devresi) bulunmaktadır. Ayrıca tüm sistemi besleyen bir güç kaynağı, istenilen empedans aralığında ölçümler yapan test cihazı, testin yapıldığı süzgeç devresi ve devamında kıyıcı bulunmaktadır.



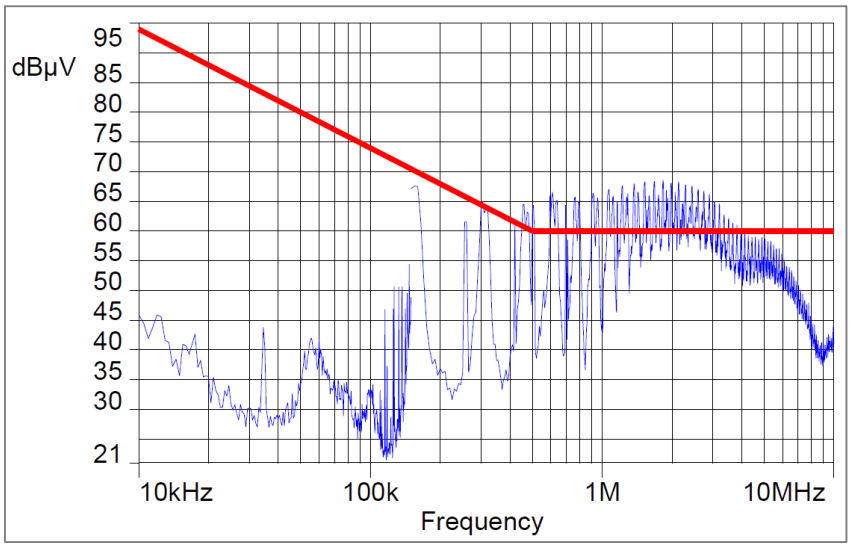
Şekil 6.10. CE-102 Testi Ölçüm Düzeneği

Test yapılmadan önce ortam gürültüsünün ölçülmesi gerekmektedir. Ortamda bozucu etki oluşturan gürültülerin olup olmadığını tespit etmek adına. Şekil 6.11'de ortam gürültüsünün ölçüldüğü bir test sonucu eğrisi bulunmaktadır. Kırmızı renk ile gösterilen eğri, CE-102 testi gereği belirli aralıklar ile izin verilen maksimum kazançların gösterildiği eğridir. Mavi renkli eğri ise ortamın gürültü kazançlarının gösterildiği eğridir. Görüldüğü gibi ortam gürültüsü beklenilen maksimum kazanç eğrisinin çok altında olduğu için göz ardı edilebilmektedir. Yani ortam şartları test yapılabilecek koşullara sahiptir.



Şekil 6.11. CE-102 Testi Ortam Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi

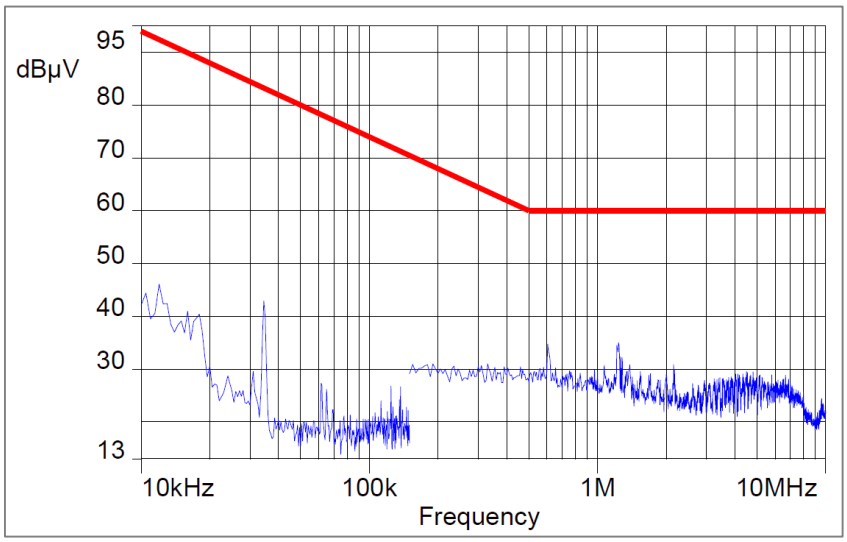
Ortam gürültüsü ölçümü yapıldıktan sonra, Şekil 6.12'de test edilen kıyıcının artı besleme hattında süzgeç devresi olmadan ne kadar gürültü yayıldığının gösterildiği ölçüm sonucu eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 6.12. Kıyıcı Artı Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi

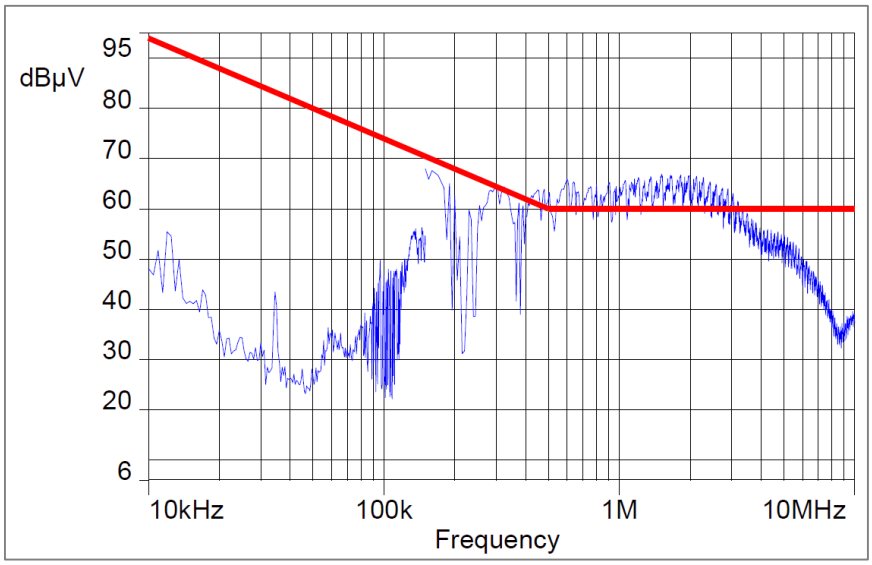
Mavi renkli eğride göründüğü gibi kıyıcının artı besleme hattından yayılan gürültü, CE-102 standartları gereği kırmızı renkli eğride verilen maksimum kazanç eğrisinin üzerine çıkmaktadır. Dolayısıyla bu standarda uygun tasarım yapabilmek adına bu frekans değerlerinde gerekli bastırma değerlerine sahip süzgeç devresi gerekmektedir.

Şekil 6.13'de ise tasarlanan süzgeç devresi ile birlikte artı besleme hattında yayılan gürültülerin kazanç değerleri gösterilmektedir. Bu iki test sonucu karşılaştırıldığında süzgeç devresi yokken ve varkenki durumlarda yayılan gürültüler yaklaşık 40-50 dBµV seviyesinde bir kazanç farkı oluşturmaktadır.



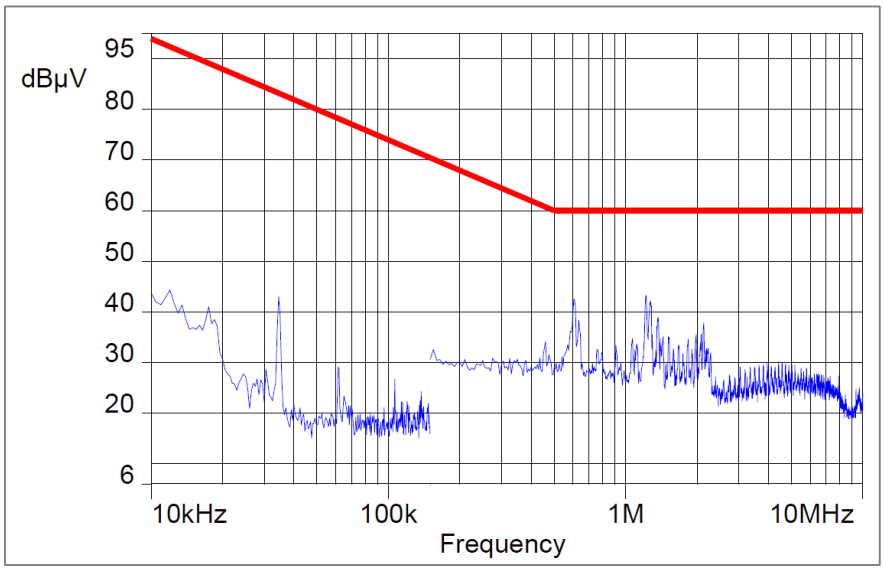
Şekil 6.13. Süzgeç Devresi ile Birlikte Kıyıcı Artı Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi

Şekil 6.14'de, test edilen kıyıcının eksi besleme hattında süzgeç devresi olmadan ne kadar gürültü yayıldığının gösterildiği ölçüm sonucu eğrisi verilmektedir.



Şekil 6.14. Kıyıcı Eksi Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi

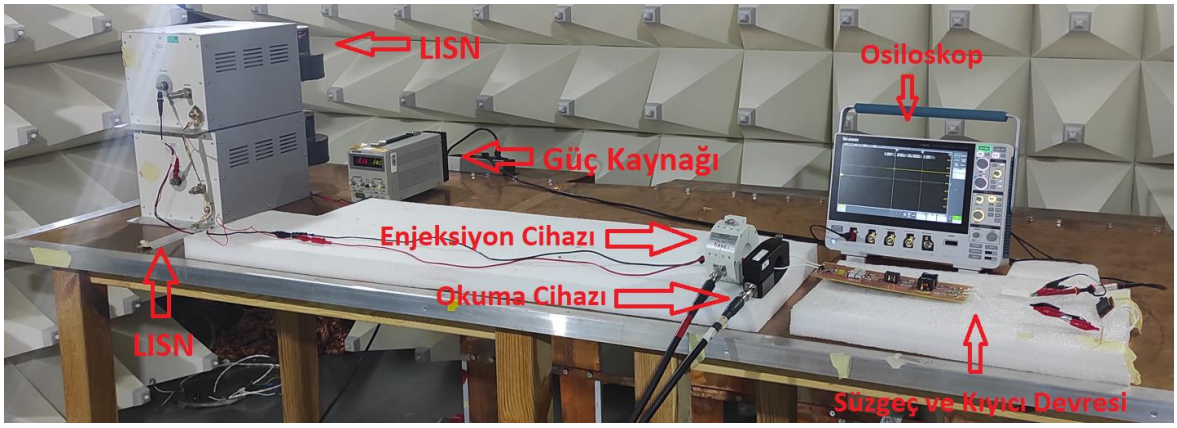
Şekil 6.15'de tasarlanan süzgeç devresi ile birlikte eksi besleme hattında yayılan gürültülerin kazanç değerleri gösterilmektedir. Bu iki test sonucu karşılaştırıldığında süzgeç devresi yokken ve varkenki durumlarda yayılan gürültüler artı besleme hattında olduğu gibi yaklaşık 40-50 dBµV seviyesinde bir kazanç farkı oluşturmaktadır.



Şekil 6.15. Süzgeç Devresi ile Birlikte Kıyıcı Eksi Hattı Gürültüsü Ölçüm Testi Eğrisi

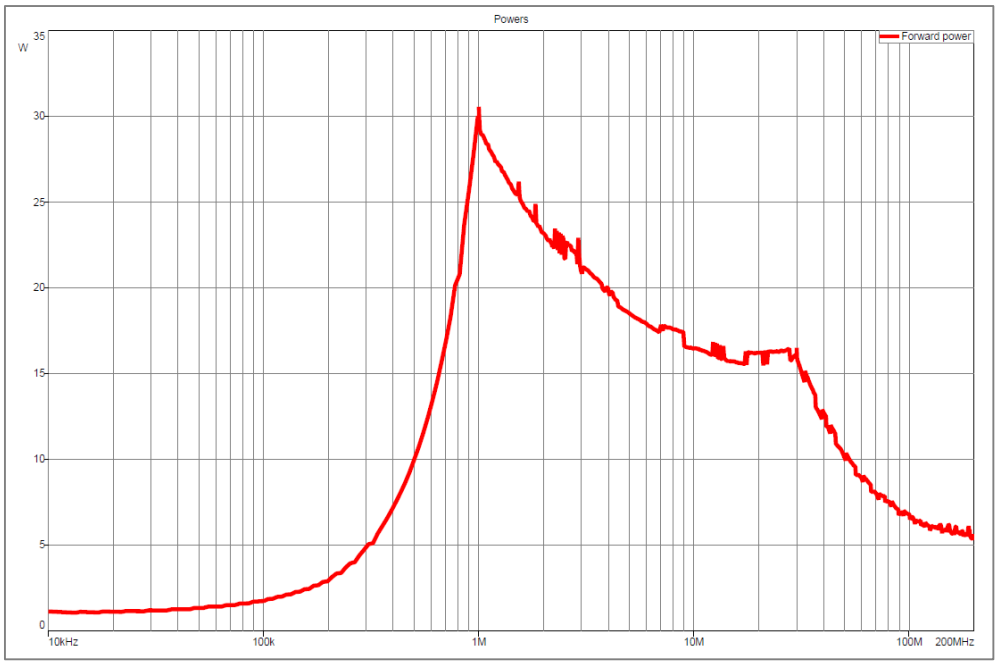
Şekil 6.16'da CS-114 testinin yapıldığı düzenek gösterilmektedir. Test düzeneğinde hattı sabit bir empedansta tutmaya yaran LISN'lar bulunmaktadır. Tüm sistemi besleyen bir güç kaynağı, istenilen empedans aralığında ölçümler yapan test cihazı, testin yapıldığı süzgeç devresi ve devamında kıyıcı bulunmaktadır. Ayrıca test yapılacak besleme hatttına

elektromanyetik gürültüyü uygulayacak enjeksiyon cihazı ve uygulanan gürültülerin besleme hatttına indüklendiğini doğrulamaya yarayan okuma cihazı bulunmaktadır.



Şekil 6.16. CS-114 Testi Ölçüm Düzeneği

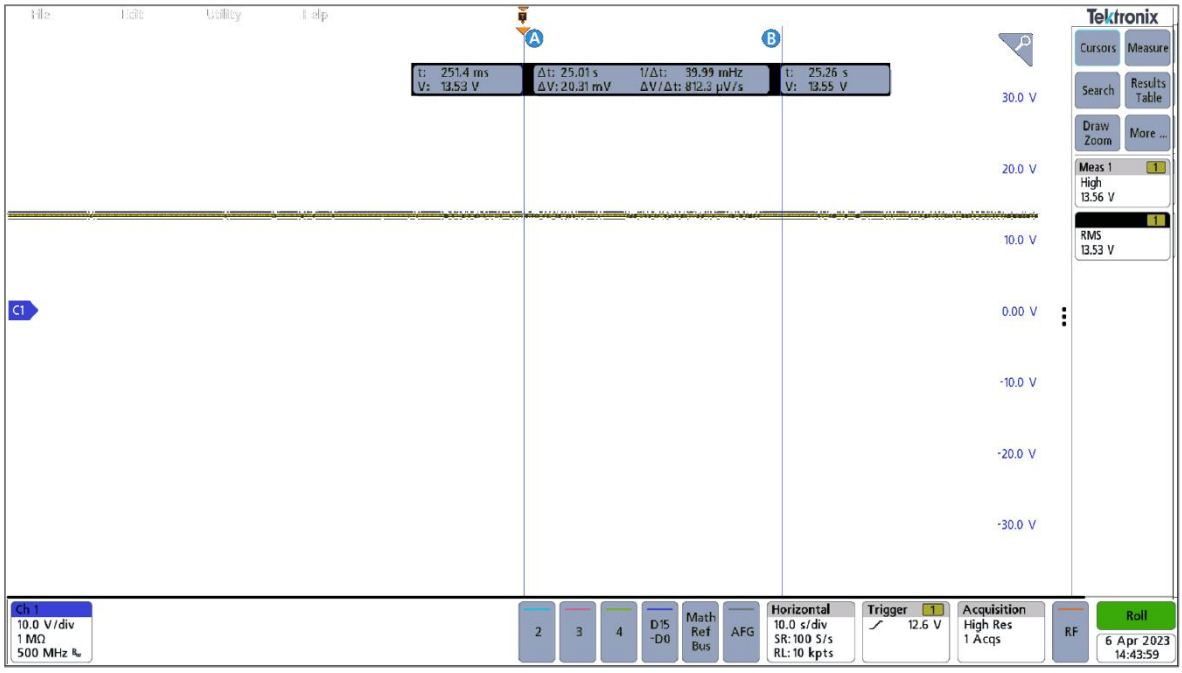
Şekil 6.17'de CS yönünde artı ve eksi besleme hattına ayrı ayrı uygulanan frekans-güç eğrisi bulunmaktadır.



Şekil 6.17. CS-114 Testi Uygulanan Frekans Güç Test Eğrisi

CS-114 testinde uygulanan çeşitli güçlerdeki elektromanyetik bozucu etkilere karşı test edilen devrenin herhangi bir fonksiyon kaybı yaşamadan çalışmaya devam edebilmesi gerekmektedir. Şekil 6.18'de CS-114 testi boyunca kıyıcının çıkış gerilimi ölçüm eğrisi

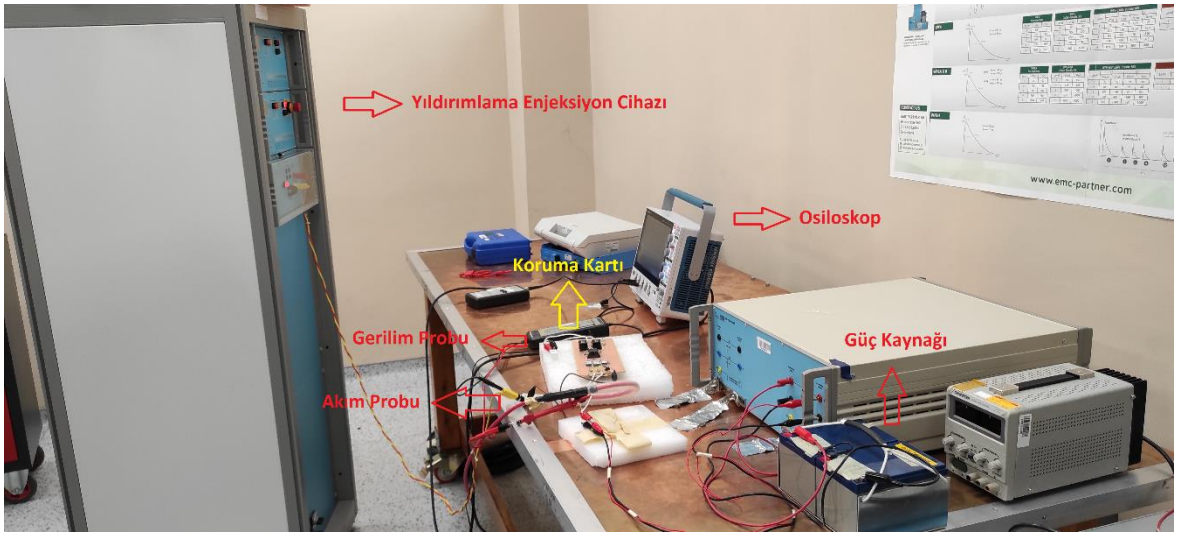
gösterilmektedir. Test boyunca kıyıcı devresi fonksiyon kaybı yaşamadan çıkış gerilimini sağlayabilmiştir.



Şekil 6.18. CS-114 Testi Kıyıcı Çıkış Gerilimi

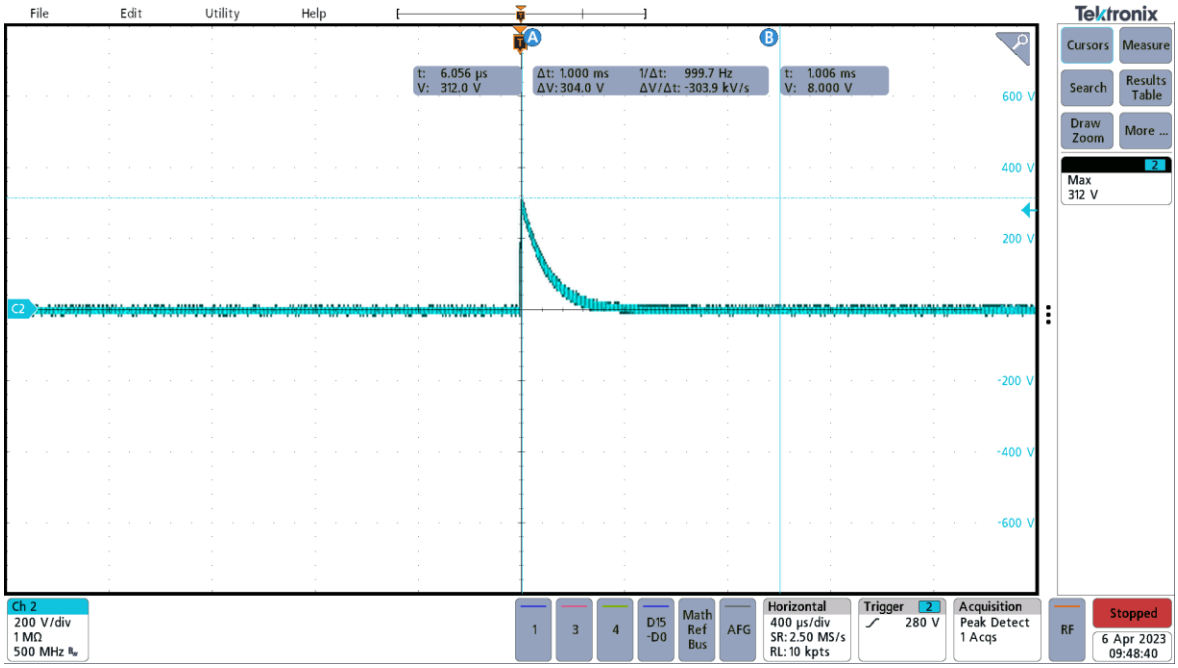
6.2. Pasif Koruma Devresi Ölçüm Çalışmaları

DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 standardında ani yüksek gerilim uygulayabilen özel bir test cihazı ile ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Şekil 6.19'da test düzeneği gösterilmektedir. Test düzeneğinde standardın gerektirdiği gerilim ve akımı sağlayan enjeksiyon cihazı, osiloskop, akım probu ve sabit gerilim sağlayan güç kaynağı bulunmaktadır.

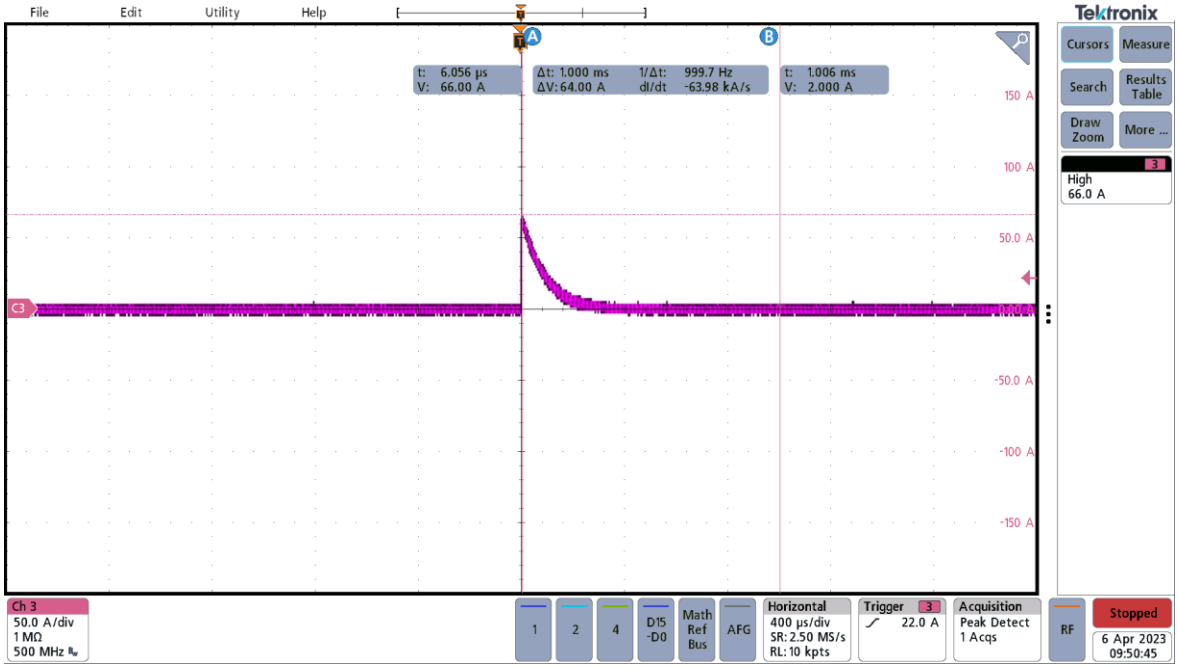


Şekil 6.19. DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 Testi Ölçüm Düzeneği

Test standardının gereği olan 300V/60A'lik ani bozucu gerilimin kalibrasyonun yapıldığı test sonuçları, gerilim için Şekil 6.20'de akım için ise Şekil 6.21'de gösterilmektedir.

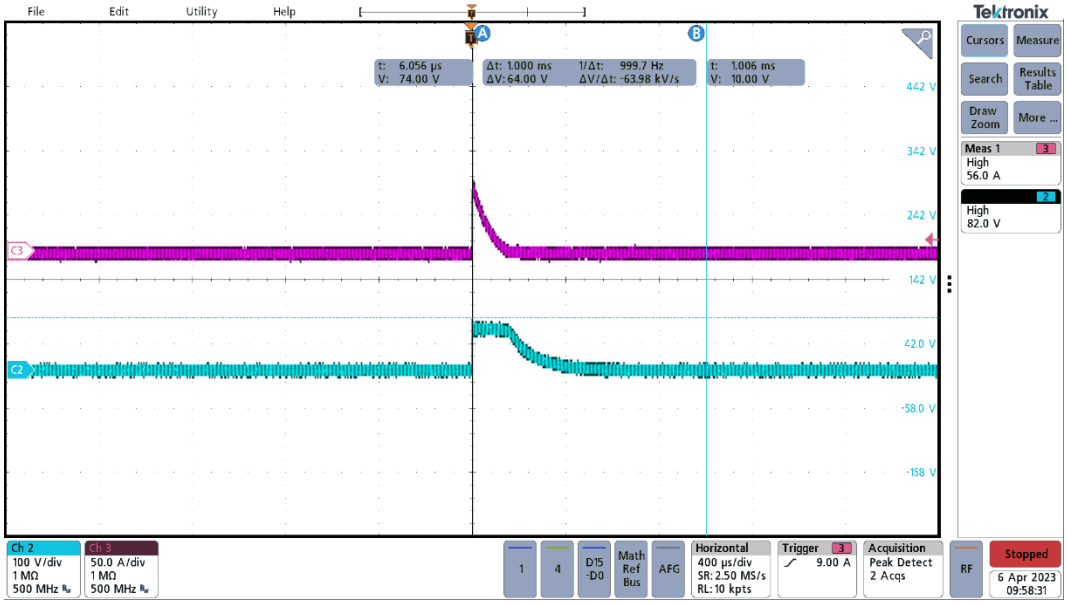


Şekil 6.20. DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 Kalibrasyon Gerilim Eğrisi



Şekil 6.21. DO-160 Section 22 Waveform-4 Level-3 Kalibrasyon Akım Eğrisi

İdealde 72 V'a limitlemesi beklenen pasif koruma devresinin gerilim ölçüm sonucu Şekil 6.22'de gösterilmektedir. Mavi renk ile gösterilen eğride, ölçüm toleransları ve devre elemanları toleransları ile birlikte, pasif koruma devresi maksimum 82V'luk bir gerilime limitlemiştir. Bu gerilim değeri pasif koruma devresinin devamındaki aktif koruma devresinde bulunan MOSFET'li yapının maksimum dayanma gerilimi olan 100 V'un altında olduğu için sorun teşkil etmeyecektir. Mor renkli eğride ise koruma devresi üzerinde akan akım gösterilmektedir ve akım değeri maksimum 56 A'dir.



Şekil 6.22. Pasif Koruma Devresi Ölçüm Sonucu Eğrisi

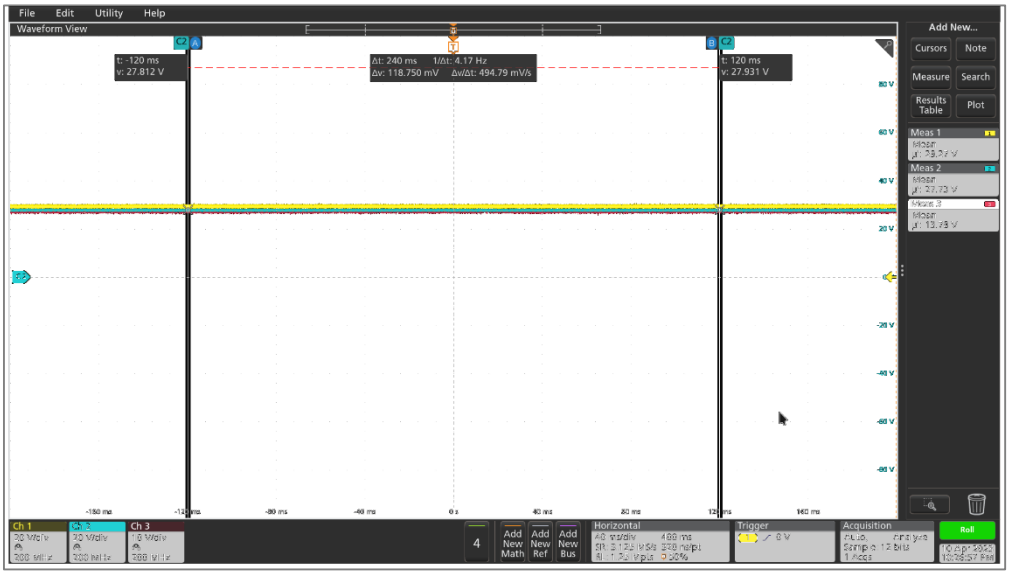
6.3. Aktif Koruma Devresi Ölçüm Çalışmaları

Aktif koruma devresi MIL-STD-704E standartını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan bu devre ayrıca aşırı akım koruması da sağlamaktadır. Tasarlanan aktif koruma devresinin MIL-STD-704E testi ve aşırı akım koruması için yapılan ölçüm sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

Şekil 6.23'de "yük ölçümleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi olarak sabit 28V'luk bir gerilim verilerek test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir.

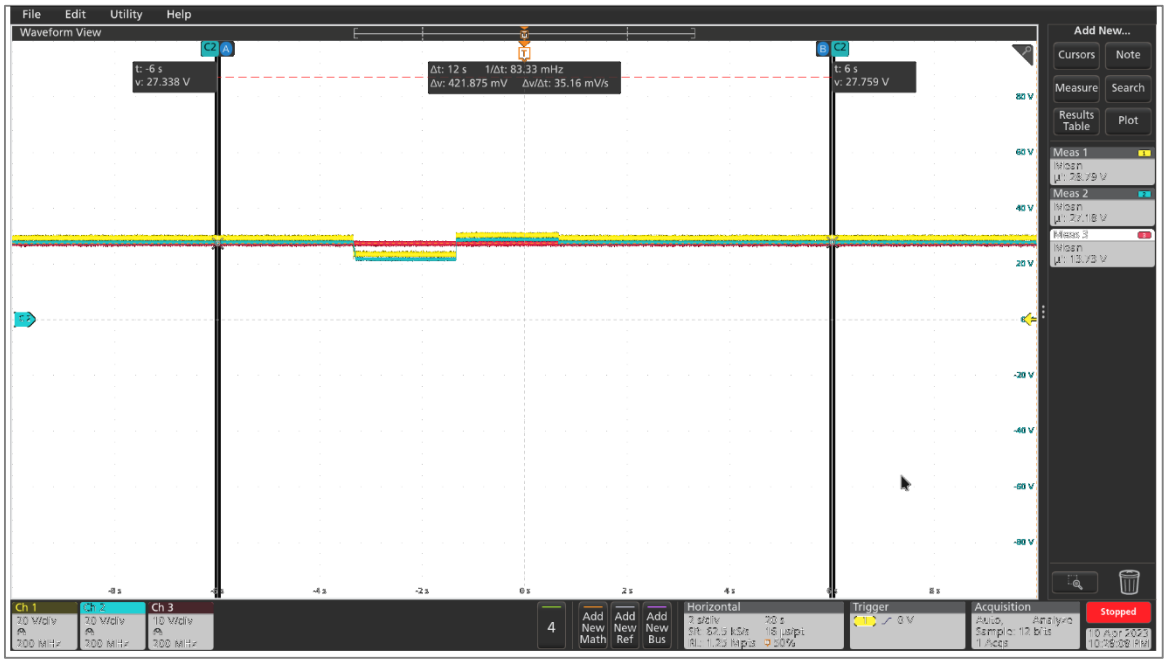
Bu test ve diğer testlerin ölçüm sonuçlarında, sarı renk ile gösterilen eğri koruma devresinin giriş gerilimini göstermektedir. Mavi renk ile gösterilen eğri koruma devresinin çıkış gerilimini göstermektedir. Kırmızı renkli eğri ise kıyıcının çıkış gerilimini göstermektedir.

Ölçüm sonucuna göre çıkış geriliminin sabit olduğu görülmektedir.



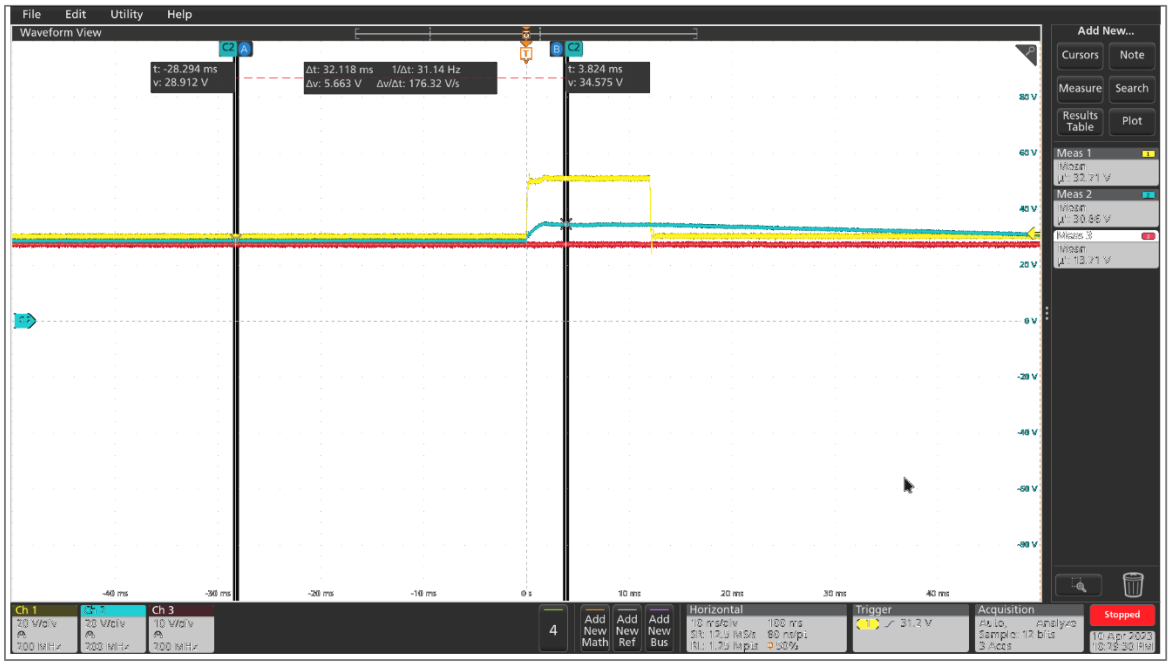
Şekil 6.23. Yük Ölçümleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.24'de "gerilim için kararlı hal limitleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimine ayrı ayrı 22 V ve 29 V'luk gerilimler verilerek test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Ölçüm sonucuna göre çıkış geriliminin sabit olduğu görülmektedir.



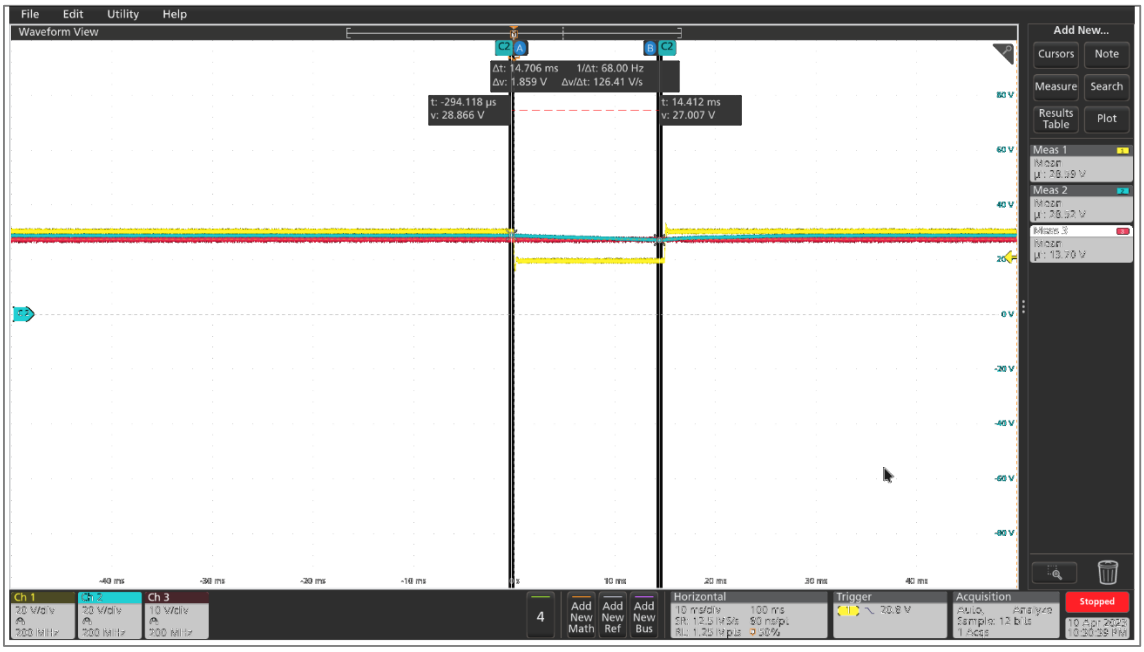
Şekil 6.24. Gerilim için Kararlı Hal Limitleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.25 de “normal yüksek gerilim geçişleri” testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 12.5 ms’lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28V’dan 50V’a yükselmektedir. Bu gerilim yükselmeleri boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi koruma devresi bu 50V’luk yükselmeleri 36V’a sınırlamaktadır.



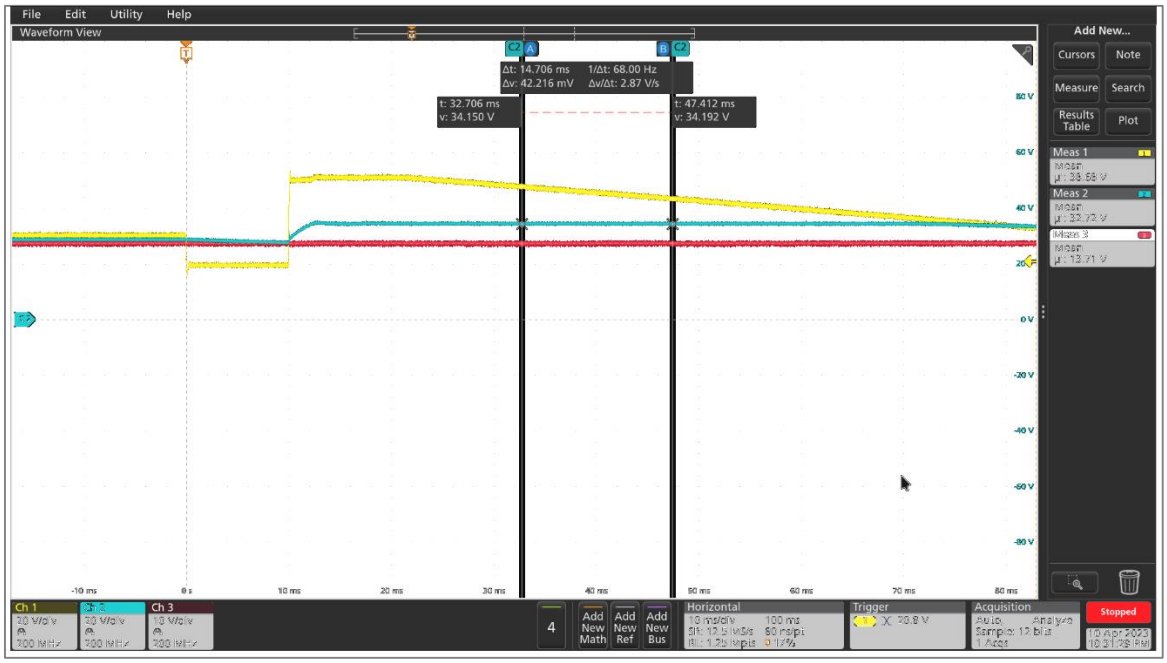
Şekil 6.25. Normal Yüksek Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.26'da "normal düşük gerilim geçişleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 15 ms'lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28 V'dan 18 V'a düşmektedir. Bu gerilim düşmeleri boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi koruma devresi bu kısa süreli 18 V'a düşüşleri tutma kapasitörü yardımıyla kıyıcıya yansıtmamaktadır.



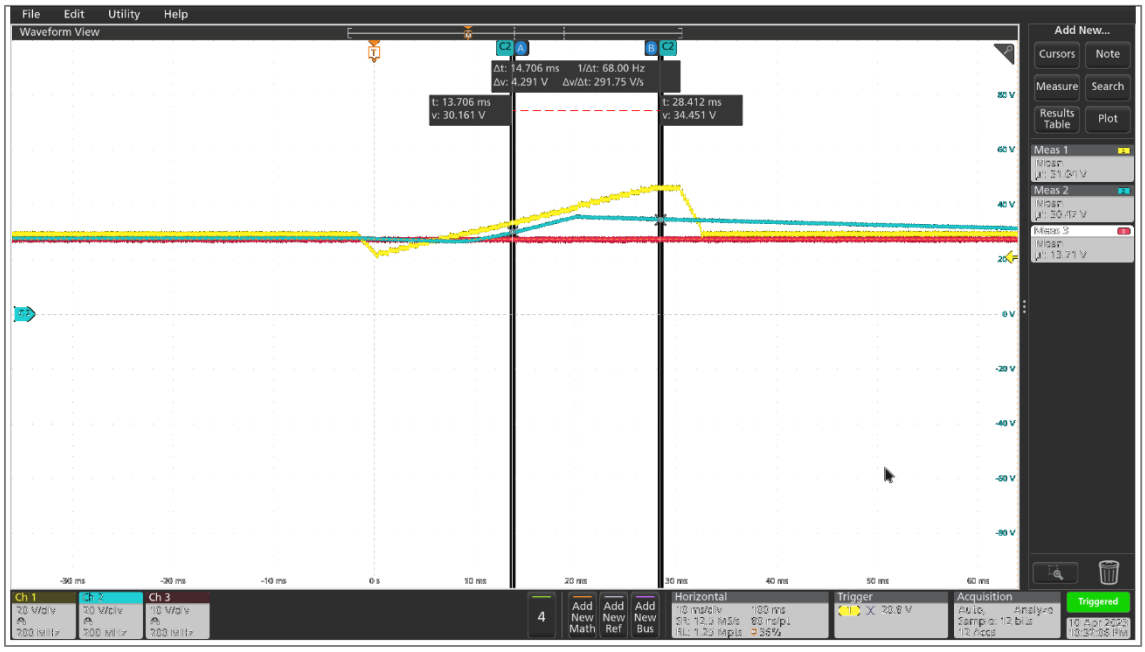
Şekil 6.26. Normal Düşük Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.27'de "normal kombine geçişleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 10 ms'lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28 V'dan 18 V'a düşmekte ve hemen ardından yine maksimum 12.5 ms'lik bir görev çevrimi süresince 50 V'a yükselmektedir. Bu gerilim düşüş ve yükselmeleri boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Koruma devresi bu kısa süreli 18V'a düşüşleri tutma kapasitörü yardımıyla kıyıcıya yansıtmamaktadır. Ardından oluşan 50 V'luk yükselmeleri de 36V'a sınırlamaktadır.



Şekil 6.27. Normal Kombine Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.28'de "tekrarlı geçişler" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, 28 V'da iken 2.5 ms gibi kısa bir sürede 18 V'a düşmekte ardından toplam 30 ms'lik süreyle doğrusal olarak 45 V'a yükselmektedir ve yine 2.5 ms'lik bir süre ile 28 V'a düşmektedir. Bu test eğrisi saniyede iki defa uygulanmaktadır. Bu gerilim düşüş ve yükselmeleri boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Koruma devresi bu kısa süreli 18V'a düşüşleri tutma kapasitörü yardımıyla kıyıcıya yansıtmamaktadır. Ardından oluşan 45 V'luk yükselmeleri de 36 V'a sınırlamaktadır.



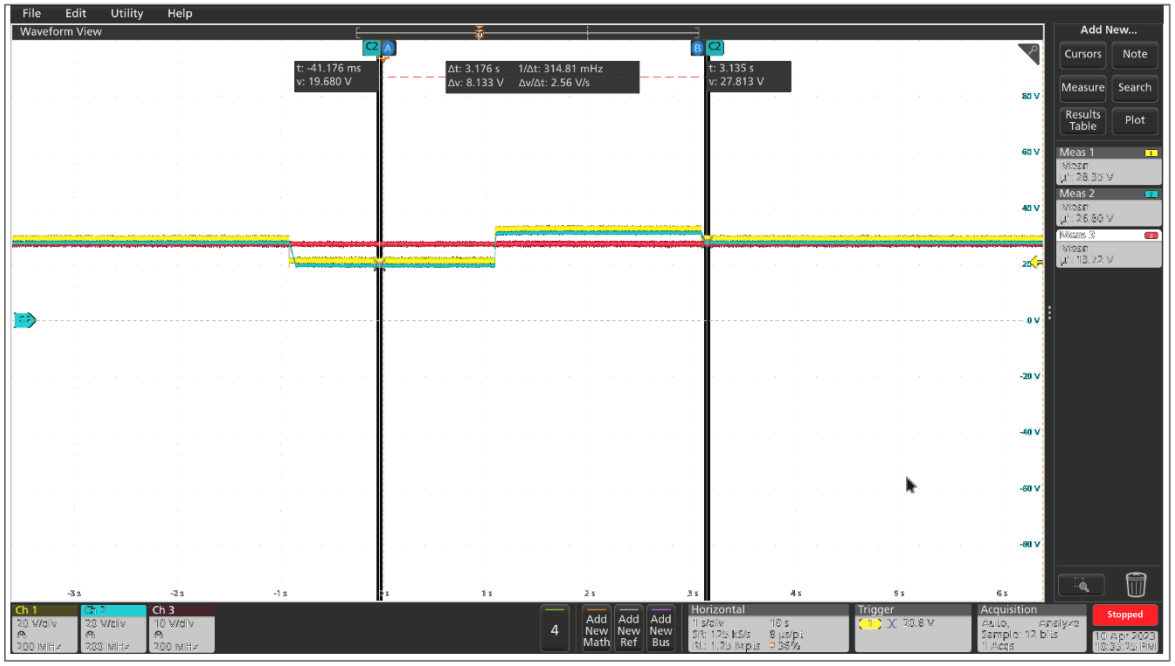
Şekil 6.28. Tekrarlı Geçişler Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.29'da "güç kesintisi" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, normal 22 V'da iken 2.5 ms gibi kısa bir sürede 0V'a düşmekte ardından toplam 50 ms'lik süre boyunca 0V'da kalmaktadır. Yine 2.5 ms'lik bir süre ile 22 V'a yükselmektedir. Bu gerilim düşüş ve yükselmeleri boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Koruma devresi bu kısa süreli 0V'a düşüşleri tutma kapasitörü yardımıyla kıyıcıya yansıtmamaktadır ve herhangi bir güç kesintisi meydana gelmemektedir.



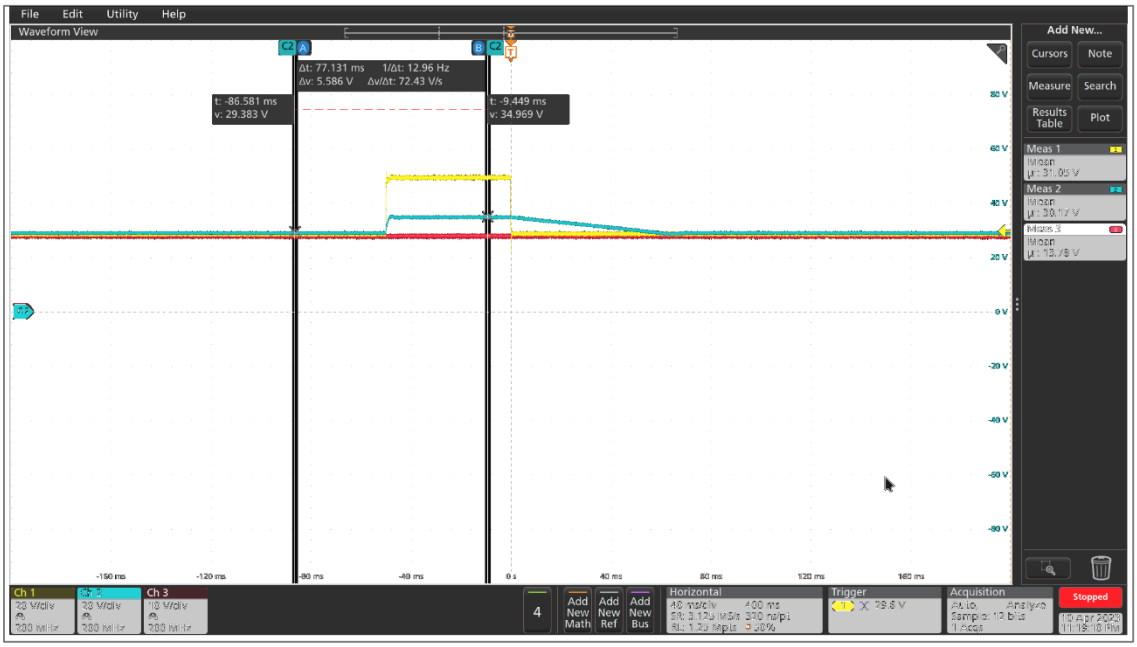
Şekil 6.29. Güç Kesintisi Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.30'da "gerilim için anormal kararlı durum limitleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimine ayrı ayrı 20 V ve 31.5 V'luk gerilimler verilerek test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Ölçüm sonucuna göre çıkış geriliminin sabit olduğu görülmektedir.



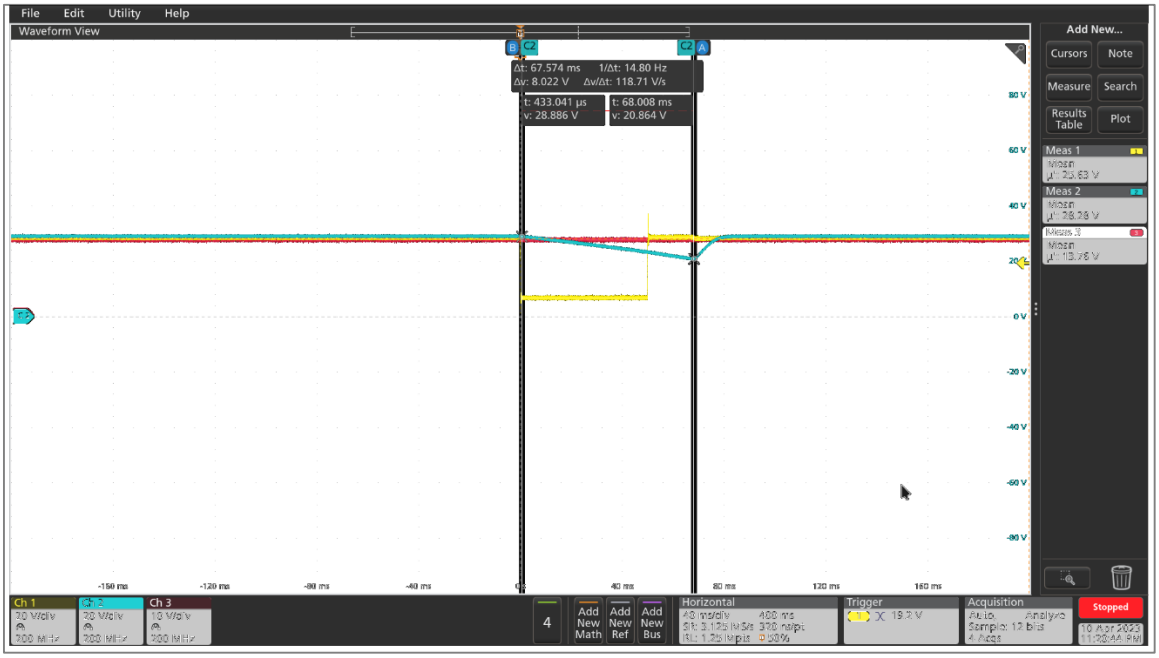
Şekil 6.30. Gerilim için Anormal Kararlı Durum Limitleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.31'de "anormal yüksek gerilim geçişleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 50 ms'lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28 V'dan 50 V'a yükselmektedir. Bu gerilim yükselmeleri süresince test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Koruma devresi bu 50 V'luk yükselmeleri 36 V'a sınırlamaktadır.



Şekil 6.31. Anormal Yüksek Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.32'de "anormal düşük gerilim geçişleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 50 ms'lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28 V'dan 7V'a düşmektedir. Bu gerilim düşmeleri süresince test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Koruma devresi bu kısa süreli 7V'a düşüşleri tutma kapasitörü yardımıyla kıyıcıya yansıtmamaktadır.



Şekil 6.32. Anormal Düşük Gerilim Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.33'de "anormal kombine geçişleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 10 ms'lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28 V'dan 7 V'a düşmekte ve hemen ardından yine maksimum 50 ms'lik bir görev çevrimi süresince 50 V'a yükselmektedir. Bu gerilim düşüş ve yükselmeleri boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Koruma devresi bu kısa süreli 7V'a düşüşleri tutma kapasitörü yardımıyla kıyıcıya yansıtmamaktadır. Ardından oluşan 50 V'luk yükselmeleri de 36V'a sınırlamaktadır.



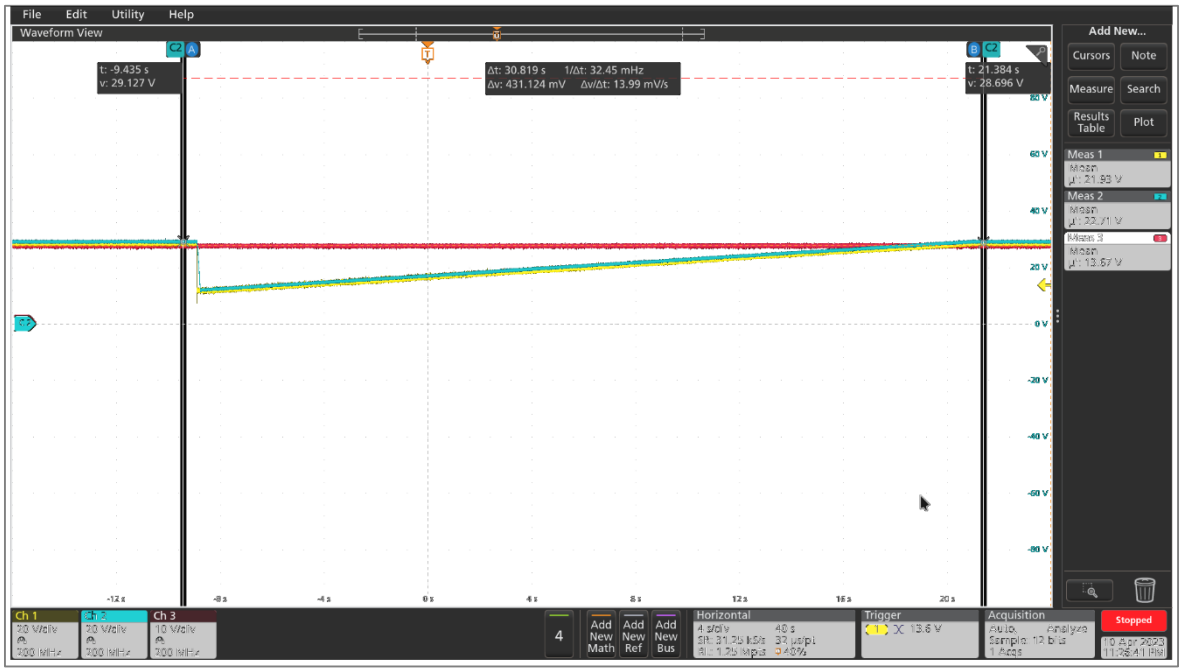
Şekil 6.33. Anormal Kombine Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.34'de "gerilim için acil durum limitleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 1 s'lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28 V'dan 18 V'a düşmekte ve hemen ardından yine maksimum 50 ms'lik bir görev çevrimi süresince 50V'a yükselmektedir. Bu gerilim düşüş ve yükselmeleri süresince test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Koruma devresi oluşan 50 V'luk yükselmeleri de 36V'a sınırlamaktadır.



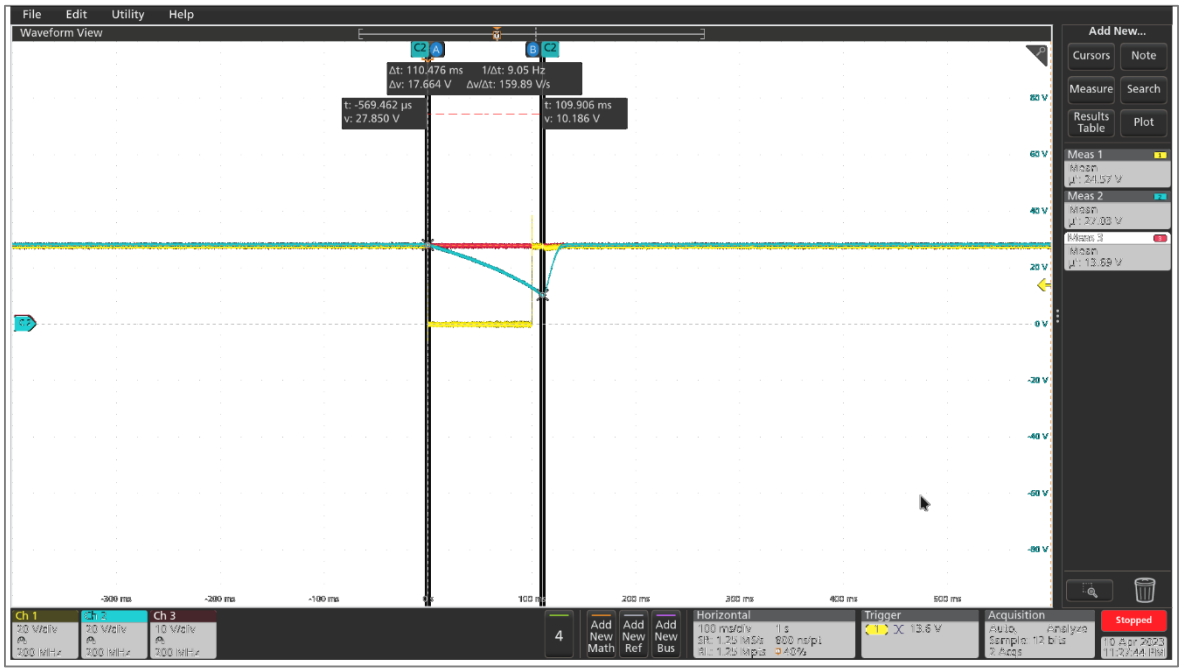
Şekil 6.34. Gerilim için Acil Durum Limitleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.35'de "başlangıç gerilimi geçişleri" testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, maksimum 2 s'lik bir görev çevrimi süresince belirli aralıklarla 28V'dan 12V'a düşmektedir. Bu gerilim düşüşü boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Tutma kapasitörü kıyıcı gerilimini belirli bir süre sabit tutmaktadır. Ölçüm sonucuna göre çıkış geriliminin sabit olduğu görülmektedir.



Şekil 6.35. Başlangıç Gerilimi Geçişleri Testi Ölçüm Eğrisi

Şekil 6.36 de “güç kaybı” testinin sonucu gösterilmektedir. Bu testte besleme gerilimi, ayrı ayrı 100 ms, 500 ms, 3 s ve 7 s’lik görev çevrimleri süresince belirli aralıklarla 28 V’dan 0V’a düşmektedir. Bu gerilim düşüşü boyunca test edilen cihazın normal bir şekilde çalışması beklenmektedir. Tutma kapasitörü kıyıcı gerilimini 100 ms ve 500 ms’lik düşüşlerde bir süre sabit tutmaktadır. Ölçüm sonucuna göre çıkış geriliminin sabit olduğu görülmektedir.

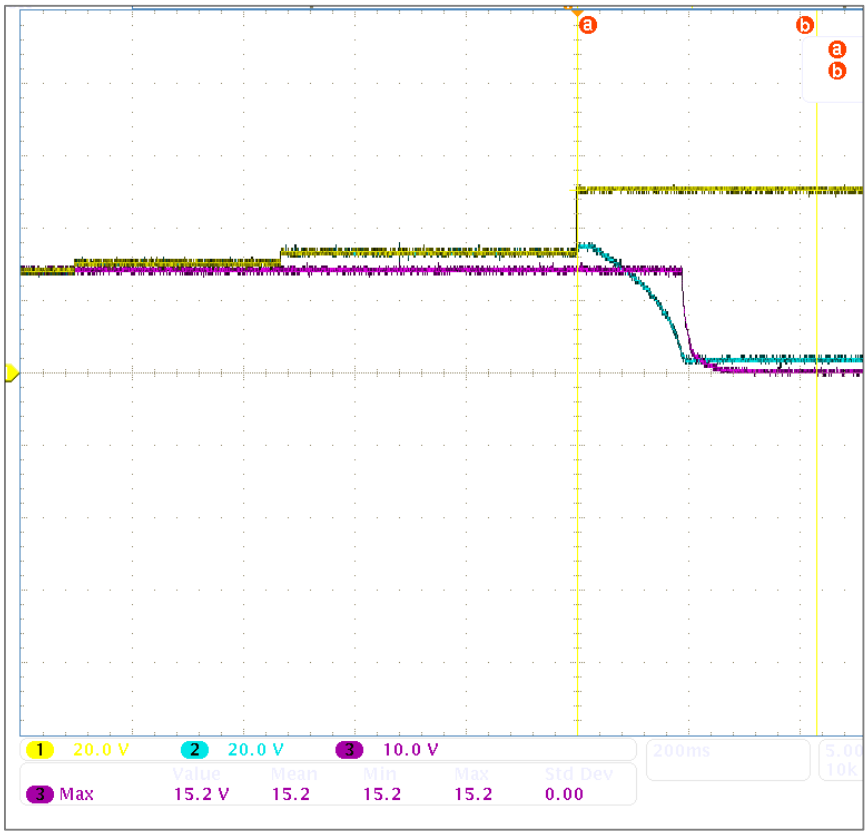


Şekil 6.36. Güç Kaybı Testi Ölçüm Eğrisi

Giriş besleme gerilimi ters kutuplu şekilde verildiği zaman test edilen devrenin hiç akım çekmeyip, ters kutuplama koruma devresinin doğru bir şekilde çalıştığı test edilmiştir.

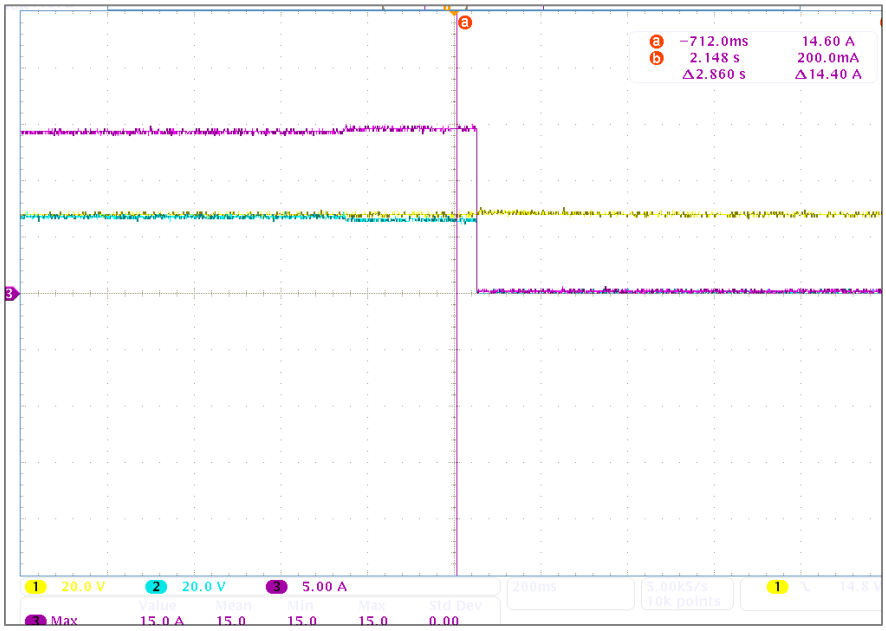
Koruma devresinin MIL-STD-704E standardı gereklikleri haricinde sağladığı aşırı gerilim, aşırı akım ve düşük gerilim korumaları da bulunmaktadır. Bu koruma özelliklerine ilişkin test görselleri aşağıda belirtildiği gibidir.

Giriş besleme gerilimi 50 V'un üzerine çıkarsa, aktif koruma devresi aşırı gerilim korumasına girerek kaynak ile kıyıcıyı birbirinden ayıracaktır. Şekil 6.37'de aşırı gerilim korumasına ait test görseli bulunmaktadır.



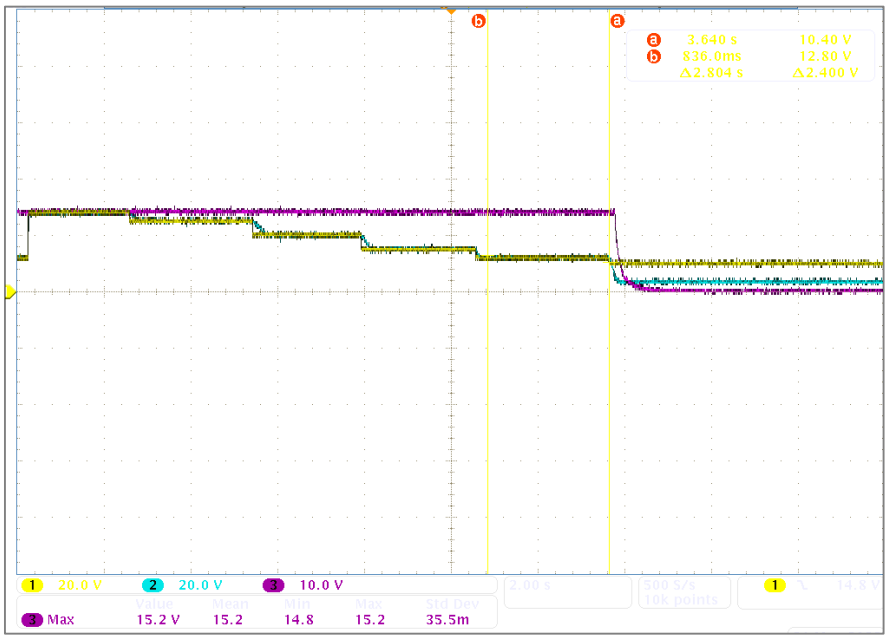
Şekil 6.37. Aşırı Gerilim Koruma Testi Ölçüm Eğrisi

Hata veya kısa devre durumunda giriş beslemesinden 14 A ve üzerinde bir değerde akım çekildiği zaman, aktif koruma devresi aşırı akım korumasına girecek ve kaynak ile kıyıcıyı birbirinden ayıracaktır. Şekil 6.38'de aşırı akım korumasına ait test görseli bulunmaktadır.



Şekil 6.38. Aşırı Akım Koruma Testi Ölçüm Eğrisi

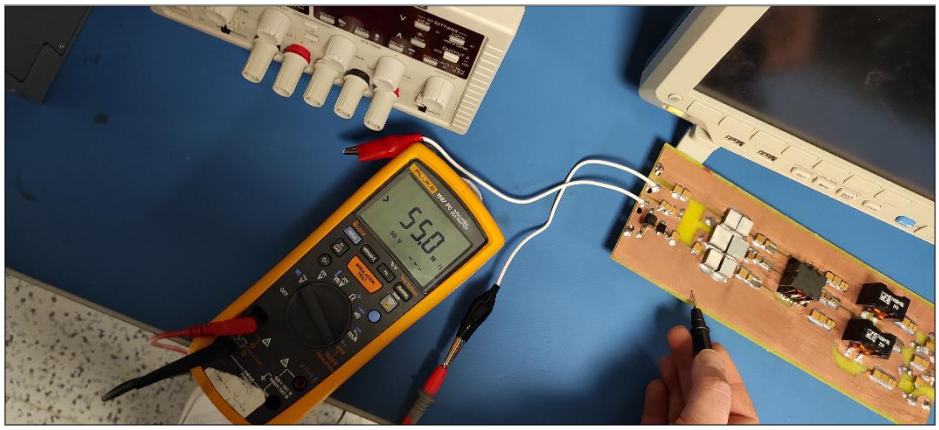
Giriş besleme gerilimi 10V'un altına inerse, aktif koruma devresi düşük gerilim korumasına girerek kaynak ile kıyıcıyı birbirinden ayıracaktır. Şekil 6.39'da düşük gerilim korumasına ait test görseli bulunmaktadır.



Şekil 6.39. Düşük Gerilim Koruma Testi Ölçüm Eğrisi

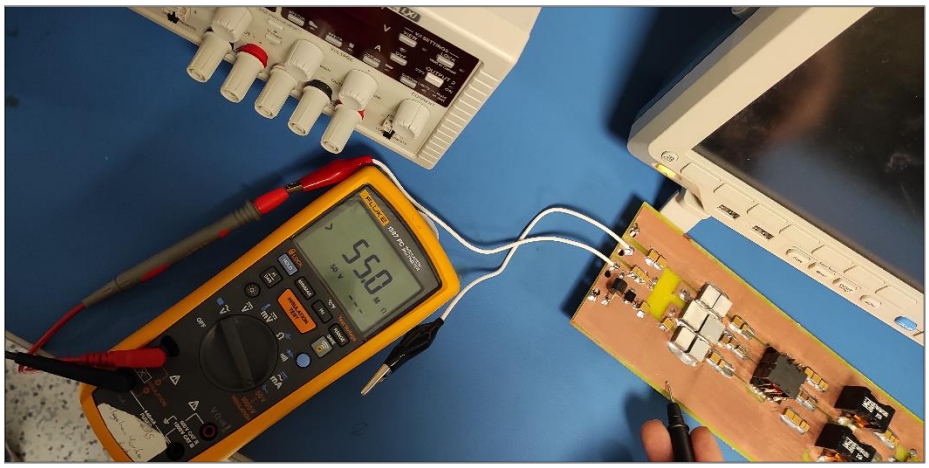
6.4. Yalıtkanlık Koruma Devresi Ölçüm Çalışmaları

MIL-STD-202 Test Method 302 standardı gereği her bir giriş bağlantısı ile sistem topraklaması arasına 100 V uygulanıp 50 MegaOhm'luk empedans beklenmektedir. Tasarlanan yalıtkanlık koruma devresinde artı ve eksi güç girişleri olmak üzere iki adet giriş bağlantısı bulunmaktadır. Şekil 6.40'da artı güç hattı için ölçüm sonucu gösterilmektedir.



Şekil 6.40. MIL-STD-202 Artı Besleme Hattı Ölçüm Sonucu

Şekil 6.41’de ise eksi güç hattı için ölçüm sonucu gösterilmektedir.



Şekil 6.41. MIL-STD-202 Eksi Besleme Hattı Ölçüm Sonucu

Şekil 6.40 ve Şekil 6.41’de gösterildiği gibi artı ve eksi besleme hatları için, uygulanan 100 V test gerilimi için minimum 50 MegaOhm’luk ölçüm sonucu gerekmektedir. Test sonuçlarına bakıldığında 55 MegaOhm ile bunun sağlanıldığı gösterilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, “MIL-STD-461F CE102”, “MIL-STD-461F CS114”, “DO-160 Section-22 Waveform 4 Level 3” ve “MIL-STD-202 Test Method 302 Insulation Resistance” standartlarını, içerisinde barındırdığı koruma ve süzme devreleriyle sağlayan süzgeç devreleri tasarlanmıştır. Bu süzgeç devreleri, DA kıyıcılar ile bütünleşik bir şekilde çalışabilmekle beraber, hem kıyıcıları ve hem de devamındaki devreleri dış ortamda oluşan elektromanyetik ve elektriksel bozucu etkilere karşı korumaktadır. Ayrıca kıyıcılar ile devamındaki devrelerden kaynaklanan elektromanyetik ve elektriksel bozucu etkilerin de dış ortama yayılmasını engellemektedir.

Bu süzgeç devreleri olası geçici gerilim yükselmeleri ve yıldırım gibi devamındaki devrelere zarar verebilecek kuvvetli bozucu etkilere karşı koruma görevi de sağlamaktadırlar. Benzetim ve deneysel çalışmalar incelendiğinde istenilen frekans bandında, standartlara uygun bir şekilde elektromanyetik filtreleme oranı ve bozucu etkilere karşı yeterli seviyede koruma sağlandığı test edilmiştir.

Devrenin doğruluğu test edilirken, referans alınan standartlara uygun bir şekilde oluşturulmuş test düzenekleri kullanılmıştır. Bu test çalışmalarının yanı sıra süzgeç elemanları ve süzgeç devrelerinin farklı frekans bantlarına göre kazançlarını ölçebilen Bode-100 network analyzer’ı ile destekleyici çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara ek olarak bilgisayar ortamında tasarımın doğruluğunu gözlemleyebilmek adına benzetim çalışmaları da yapılmıştır. Tüm doğrulama faaliyetlerinin ardından, tasarlanan bu süzgeç devrelerinin DA-DA kıyıcılar ile birlikte, MIL-STD-461 CE102, MIL-STD-461 CS114, DO-160 Section-22 Waveform 4 Level 3 ve MIL-STD-202 Test Method 302 Insulation Resistance standartlarını sağlayacak şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Referans alınan bu standartlara uygun bir şekilde tasarlanmış olmaları, bu süzgeç devrelerinin aviyonik araçlarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Birlikte kullanılacağı DA kıyıcı veya güç modüllerine göre süzme ve koruma konfigürasyonları ayarlanabilir olduğu için genel bir kullanım kolaylığı da sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Hossain, M. Z., and Rahim, N. A. (2018). Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 205-230.

2. Kaur, M., Kakar, S., and Mandal, D. (2011, April). *Electromagnetic interference*. In 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. IEEE, 4, 1-5.

3. Lai, R., Maillet, Y., Wang, F., Wang, S., Burgos, R., and Boroyevich, D. (2009). An integrated EMI choke for differential-mode and common-mode noise suppression. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(3), 539-544.

4. Perez, R. (Ed.). (2013). *Handbook of electromagnetic compatibility*. Academic press London, 4, 25-54.

5. Liao, Y. C., Zhao, H. B., Liu, Y. J., and Yu, Q. (2014). The design of active low pass filter. *In Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications Ltd, 541, 419-423.

6. Tran, M., Kuwana, A., and Kobayashi, H. (2020, July). *Design of Active Inductor and Stability Test for Passive RLC Low Pass Filter*. In 10th Int. Conf. on CCSEA, 10(10), 203-224.

7. Kaiser, C. J. (Ed.). (2012). *The capacitor handbook*. Ontario: Springer Science & Business Media.

8. Bahl, I. J. (2001). High-performance inductors. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(4), 654-664.

9. Kostov, K., and Kyyra, J. (2009, September). *Common-mode choke coils characterization*. In 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 1-9.

10. Fan, J., Shaofeng, L., and Drewniak, J. L. (2001, August). *Including SMT ferrite beads in DC power bus and high-speed I/O line modeling*. In 2001 IEEE EMC International Symposium. Symposium Record. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Cat. No. 01CH37161). IEEE, 1, 336-339.

11. AMSC, N., and EMCS, A. A. (1996). Department Of Defense Test Method Standard For Measurement Of Electromagnetıc Interference Characterıstıcs.

12. Han, S. M., Huh, C. S., and Choi, J. S. (2011). A Validation of Conventional Protection Devices in Protecting EMP Threats. *Progress In Electromagnetics Research*, 119, 253-263.

13. Kossowski, T., and Szczupak, P. (2022). Identification of Lightning Overvoltage in Unmanned Aerial Vehicles. *Energies*, 15(18), 6609.

14. Burdette, A., Goodnow, M., and Singer, C. (2004). An overview of MIL-STD-704, MIL-HDBK-704, 28 volt DC aircraft utilization compliance testing, electrical power quality causes and impacts. New York: *SAE transactions*, 1759-1766.

15. Harper, C. A. (1977). *An improved materials system for maintaining high resistivity of electrical insulation in humid environments*. In 1977 EIC 13th Electrical/Electronics Insulation Conference. IEEE, 112-116.



Gazili olmak ayrıcalıktır