



**T.C.
HALIÇ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK İÇİN
İLETİM YOLLU ELEKTROMANYETİK GİRİŞİME
KARŞI BAĞIŞIKLIK ARTIRMA VE İLETİM YOLLU
EMİSYON AZALTMA TEKNİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hazırlayan
Canbey Mehmet YILDIZ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Soner ÖZGÜNEL**

İstanbul – 2020

**T.C.
HALIÇ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK İÇİN
İLETİM YOLLU ELEKTROMANYETİK GİRİŞİME
KARŞI BAĞIŞIKLIK ARTIRMA VE İLETİM YOLLU
EMİSYON AZALTMA TEKNİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hazırlayan
Canbey Mehmet YILDIZ**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Soner ÖZGÜNEL**

İstanbul – 2020

Canbey Mehmet Yıldız

ORIJINALLIK RAPORU

% **12**

BENZERLİK ENDEKSİ

% **8**

İNTERNET
KAYNAKLARI

% **2**

YAYINLAR

% **8**

ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	uzmangruposgb.com.tr İnternet Kaynağı	% 1
2	polen.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	% 1
3	www3.dogus.edu.tr İnternet Kaynağı	% 1
4	es.scribd.com İnternet Kaynağı	<% 1
5	www.emo.org.tr İnternet Kaynağı	<% 1
6	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	<% 1
7	Submitted to Karadeniz Teknik University Öğrenci Ödevi	<% 1
8	Submitted to TechKnowledge Turkey Öğrenci Ödevi	<% 1

Dr. Öğretim Üyesi
Soner ÖZGÜNEL



15/08/2020

TEZ ETİK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Elektromanyetik Uyumluluk İçin İletim Yollu Elektromanyetik Girişime Karşı Bağışıklık Artırma ve İletim Yollu Emisyon Azaltma Teknikleri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Soner ÖZGÜNEL’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Canbey Mehmet YILDIZ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

“Elektromanyetik Uyumluluk İçin İletim Yollu Elektromanyetik Girişime Karşı Bağışıklık Artırma ve İletim Yollu Emisyon Azaltma Teknikleri” isimli araştırma Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı’nda tez olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım değerli hocam Sayın Dr.Öğr.Üyesi Soner ÖZGÜNEL’e, tez savunma sınavı komitesinde bulunan sayın jüri hocalarıma, çalıştığım İBB İSBAK AŞ’ye, bu süreçte her zaman yanımda olan eşim Şemsa YILDIZ’a ve beni bugünlere getirmek için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan annem Nuran YILDIZ ve babam Orhan YILDIZ’a teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul, 2020

Canbey Mehmet YILDIZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
KISALTMALAR	V
SEMBOLLER	VIII
ŞEKİLLER	X
ÇİZELGELER	XVI
ÖZET	XVII
ABSTRACT	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. EMC ve EMI Nedir?	3
2.2. EMC Neden Gereklidir?	5
2.3. Tarihte EMI Kaynaklı Kaza Örnekleri	5
3. TEMEL ELEKTROMANYETİK KAVRAMLAR	7
3.1. EMC ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği	7
3.2. Elektromanyetik Alan/Dalga ve Maxwell Denklemleri	7
3.2.1. Elektrik Alan	8
3.2.2. Manyetik Alan	8
3.2.3. Maxwell Denklemleri	10
3.2.4. Elektromanyetik Dalga	14
4. EMC VE EMI İLKELERİ	18
4.1. Elektromanyetik Girişim (EMI)	18
4.2. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)	22
4.3. Temel EMC Birimleri ve Desibel Tanımı	28
4.4. EMC Açısından Devre Elemanları	31

	Sayfa No.
4.4.1. İletken Telin Direnci	32
4.4.2. İletken Telin Endüktans Etkisi	32
4.4.3. İletken Tellerin Kapasitif Etkisi	33
4.4.4. Gerçek RLC Modelleri	33
4.4.5. Rezonans Devreleri	36
4.5. Gürültü Akım Modları	38
4.5.1. Ortak Mod Akımları	38
4.5.2. Farksal Mod Akımları	39
4.6. Sinyal ve Frekans Analizi	40
4.7. İletim Hatları Modeli	43
4.7.1. Karakteristik Empedans	44
4.7.2. Hat İletim Sabiti	45
4.7.3. Yüklü İletim Hattının Giriş Empedansı	45
4.7.4. Hat Yansıma Katsayısı	46
4.7.5. Durağan Dalga Oranı	47
4.8. İki Kapılı Devreler ve S Parametreleri	48
5. EMC TEMEL STANDARTLARI VE BELGELENDİRME	52
5.1. AB EMC Yönergeleri	52
5.2. CE Markası ve Markalama Süreci	53
5.3. EMC Kuruluşları	57
5.4. EMC Standartları	59
5.4.1. Ticari EMC Standartları	60
5.4.1.1. Temel Standartlar	60
5.4.1.2. Ürün Ailesi Standartları	60
5.4.1.3. Genel Standartlar	60
5.4.1.4. Ürüne Özel Standartlar	61
5.4.2. Askeri Standartlar	61
5.5. Akreditasyon	61
5.6. Kalibrasyon	62
5.7. Raporlama ve Belgelendirme	63

	Sayfa No.
5.8. Piyasa Denetlemesi	63
6. EMC TEST VE ÖLÇÜMLERİ	64
6.1. Emisyon Ölçümleri	67
6.1.1. RF İletim Yollu Emisyon	67
6.1.2. Harmonik Akım Emisyonları	74
6.1.3. Gerilim Dalgalanması ve Kırpışma	75
6.2. Bağışıklık Testleri	76
6.2.1. RF İletim Yollu Bağışıklık	76
6.2.2. Elektriksel Hızlı Geçici Rejim/Patlama Bağışıklığı	78
6.2.3. Darbe Bağışıklığı	80
6.2.4. Gerilim Çukurları, Kısa Kesintiler ve Gerilim Değişmeleri	82
6.2.5. Elektrostatik Boşalma Bağışıklığı	84
7. EMI KORUNMA TEKNİKLERİ	87
7.1. Ekranlama	88
7.1.1. Elektrik Alan Ekranlaması	95
7.1.2. Manyetik Alan Ekranlaması	96
7.1.3. Ekranlama Ürünleri	96
7.2. Topraklama	99
7.2.1. Tek Nokta Topraklama Sistemi	105
7.2.1.1. Seri Bağlı Tek Nokta Topraklaması	105
7.2.1.2. Paralel Bağlı Tek Nokta Topraklaması	106
7.2.2. Çok Nokta Topraklama Sistemi	107
7.3. Filtreler	108
7.3.1. Elektronik Filtreler	109
7.3.1.1. Alçak Geçiren Filtreler	112
7.3.1.2. Yüksek Geçiren Filtreler	115
7.3.1.3. Bant Geçiren Filtreler	115
7.3.1.4. Bant Durduran Filtreler	117
7.3.2. Güç Hattı Filtreleri	117

	Sayfa No.
7.3.2.1. Ortak Mod Girişim Filtresi	119
7.3.2.2. Farksal Mod Girişim Filtresi	120
7.3.2.3. Hibrit Şebeke Filtresi	121
7.3.3. Ferrit Filtreler	123
7.4. Kablo ve Konnektörler	131
7.4.1. Kablolar	131
7.4.2. Konnektörler	139
7.5. Baskı Devre Tasarımı	141
7.6. Empedans Uyumlandırma	148
7.7. Elektronik Malzeme Seçimi	149
8. EMC PROBLEM GİDERME UYGULAMASI	150
8.1. Test Edilecek Ürün ve Ürün Standardı	150
8.2. İletim Yollu Emisyon Ölçüm Deneyi	152
8.3. EMC İyileştirmesi İçin EMI Filtre Tasarımı	157
8.4. EMC İyileştirme Sonrası Deney Tekrarı	168
9. SONUÇLAR	172
KAYNAKLAR	173
ÖZGEÇMİŞ	178

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ABS	: Anti-lock Braking System
AC	: Alternating Current
ACEC	: Advisory Committee on Electromagnetic Compatibility
AG	: Alçak Geçiren
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
AGK	: Araya Girme Kaybı
AM	: Amplitude Modulation
AMN	: Artificial Mains Network
AV	: Average
BEM	: Biyoelektromanyetik
BG	: Bant Geçiren
BG	: Bant Genişliği
CDN	: Coupling/Decoupling Network
CE	: Conducted Emission
CE	: Conformity European
CENELEC	: European Committee for Electrotechnical Standardization
CI	: Conducted Immunity
CISPR	: International Special Committee on Radio Interference
CM	: Common Mode
CS	: Conducted Susceptibility
DC	: Direct Current
DDO	: Durağan Dalga Oranı
DM	: Differential Mode
EA	: European co-operation for Accreditation
EEC	: European Economic Community
EFT	: Electrical Fast Transient
EM	: Elektromanyetik

EMC	: Electromagnetic Compatibility
EMI	: Electromagnetic Interference
EN	: European Norm
ESD	: Electrostatic Discharge
EU	: European Union
EUT	: Equipment Under Test
FCC	: Federal Communications Commission
GND	: Ground
HDMI	: High Definition Multimedia Interface
HSS	: His/Her Majesty's Ship
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IL	: Insertion Loss
IoT	: Internet of Things
ISO	: International Organization for Standardization
ITU	: International Telecommunication Union
L	: Line
LCD	: Liquid Crystal Display
LED	: Light Emitting Diode
LISN	: Line Impedance Stabilization Network
LVD	: Low Voltage Directive
N	: Neutral
NATO	: North Atlantic Treaty Organization
PCB	: Printed Circuit Board
PE	: Protective Earth
PK	: Peak
QP	: Quasi-Peak
RE	: Radiated Emission
RF	: Radyofrekans
RI	: Radiated Immunity
RL	: Return Loss
RMS	: Root Mean Square

RS	: Radiated Susceptibility
SE	: Shielding Effectiveness
SF	: Sharpness Factor
SMD	: Surface Mount Device
SNR	: Signal to Noise Ratio
SWR	: Standing Wave Ratio
TE	: Transverse Electric Modes
TEM	: Transverse Electromagnetic Modes
TH	: Through-Hole
TM	: Transverse Magnetic Modes
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
TÜRKAK	: Türkiye Akreditasyon Kurumu
TV	: Televizyon
USS	: United States Ship
YG	: Yüksek Geçiren

SEMBOLLER

A	: Amper
B	: Manyetik akı yoğunluğu
C	: Coulomb
c	: Işık hızı
D	: Elektriksel akı yoğunluğu
dB	: Desibel
dk	: Dakika
E	: Elektrik alan şiddeti
e	: Euler sayısı
F	: Farad
f	: Frekans
G	: Giga, 10^9
H	: Manyetik alan şiddeti
Hz	: Hertz
J	: Akım yoğunluğu
k	: Kilo, 10^3
L	: Endüktans
M	: Mega, 10^6
m	: Metre
n	: Nano, 10^{-9}
N	: Newton
Np	: Neper
P	: Güç
Q	: Elektrik yükü
R	: Direnç
R	: Yansımaya kaybı faktörü
rad	: Radyan
s	: Saniye
S	: Siemens

T	: Tesla
t	: Zaman
v	: Hız
V	: Volt
W	: Watt
Wb	: Weber
Z	: Empedans
μ	: Manyetik geçirgenliği (permeability)
α	: Zayıflama sabiti
β	: Faz sabiti
γ	: İletim sabiti
δ	: Deri kalınlığı
ϵ	: Elektriksel geçirgenlik (permittivity)
λ	: Dalga boyu
ξ	: Sönüm oranı
π	: Pi sayısı
ρ	: Yük yoğunluğu
σ	: İletkenlik (conductivity)
ω	: Açısal frekans
Ω	: Ohm
Γ	: Yansıma katsayısı
η	: Ortam empedansı

ŞEKİLLER

Sayfa No.

Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum.....	4
Şekil 3.1. Elektrik alan çizgileri.....	8
Şekil 3.2. İletken tel etrafındaki manyetik alan	9
Şekil 3.3. Bir manyetik dipolün manyetik akı çizgileri	9
Şekil 3.4. EM dalga parametreleri	14
Şekil 3.5. Uzaklığa göre E ve H alan değişimleri	15
Şekil 3.6. Düzlem EM dalga bileşenleri	16
Şekil 3.7. EM dalganın düzgün düzlemsel dalgaya dönüşmesi	17
Şekil 4.1. Aynı şebekeye bağlı cihazlarda EMI etkileşimi	19
Şekil 4.2. EMI unsurları	19
Şekil 4.3. EMI kuplaj mekanizmaları	20
Şekil 4.4. EMC'nin genel sınıflandırması	24
Şekil 4.5. Aynı şebekeye bağlı cihazlar arasındaki EMI etkileşimi	25
Şekil 4.6. Ürün geliştirme sürecinde EMC teknikleri ve maliyet	26
Şekil 4.7. EMC uyumlu elektronik sistem geliştirmede temel adımlar	27
Şekil 4.8. Bir cihaz için EMC sınır değerleri ve uyumluluk seviyesi	28
Şekil 4.9. dB tanımı için temel devre modeli	29
Şekil 4.10. Temel devre elemanları	31
Şekil 4.11. Bir direncin gerçekçi modeline ait eşdeğer devre	33
Şekil 4.12. Gerçek direnç modeli empedansı	34
Şekil 4.13. Bir endüktansın gerçekçi modeline ait eşdeğer devre	34
Şekil 4.14. Gerçek endüktans modeli empedansı	35
Şekil 4.15. Bir kapasitansın gerçekçi modeline ait eşdeğer devre	35
Şekil 4.16. Gerçek kapasitans modeli empedansı	36
Şekil 4.17. Seri ve paralel rezonans devreleri	37
Şekil 4.18. Seri ve paralel rezonans devrelerinin empedans eğrileri	37
Şekil 4.19. Ortak mod akımları	38
Şekil 4.20. Farksal mod akımları	39

	Sayfa No.
Şekil 4.21. Frekans düzleminde sinyal ve gürültü	40
Şekil 4.22. Bir sinyalin zaman ve frekans uzayındaki görüntüleri	41
Şekil 4.23. İletim hattı modeli	44
Şekil 4.24. İki iletkenli iletim hattı eşdeğer devresi	44
Şekil 4.25. Yüklü iletim hattının toplu elemanlı eşdeğer devresi	46
Şekil 4.26. Yansıma katsayısının Smith ölçeğinde yeri	47
Şekil 4.27. İki kapılı devre akım ve gerilimleri	48
Şekil 4.28. İki kapılı devrede S parametreleri	50
Şekil 5.1. CE işareti	54
Şekil 5.2. Uluslararası EMC kuruluşları ve etkileşimleri	57
Şekil 5.3. TC77 yapısı	58
Şekil 6.1. EMC mühendislik uygulama aşamaları	64
Şekil 6.2. EMC test ve ölçüleri	65
Şekil 6.3. Cihaz üzerinde EMI	66
Şekil 6.4. Yapay şebeke ağı (LISN)	68
Şekil 6.5. LISN devre şeması	69
Şekil 6.6. RF iletim yollu emisyon test düzeni	70
Şekil 6.7. Dedektör tipleri	71
Şekil 6.8. RF iletim yollu emisyon test geçme diyagramı	72
Şekil 6.9. RF iletim yollu emisyon limitleri	73
Şekil 6.10. Spektrum analizörü	74
Şekil 6.11. Test bileşeni bağlantıları	74
Şekil 6.12. %80 genlik modülasyonlu işaret	77
Şekil 6.13. RF iletim yollu bağışıklık test düzeni	78
Şekil 6.14. EFT/Burst işareti dalga biçimi	79
Şekil 6.15. EFT/Burst test düzeni	80
Şekil 6.16. Darbe dalga biçimi	81
Şekil 6.17. Darbe bağışıklık test düzeni	81
Şekil 6.18. 25sn'lik %70 gerilim çukuru	82
Şekil 6.19. %40 gerilim çukuru RMS grafiği	83

Şekil 6.20. Kısa kesinti grafiği	83
Şekil 6.21. ESD tabancası	85
Şekil 6.22. ESD dalga biçimi	85
Şekil 6.23. ESD bağışıklık test düzeni	86
Şekil 7.1. Ekranlı güç kaynağı	89
Şekil 7.2. Ekranlama etkinliği	89
Şekil 7.3. EMI ekranlama şematik gösterim	90
Şekil 7.4. Bazı metallere ait deri kalınlığı grafiği	93
Şekil 7.5. E ve H alanlarına karşı ekranlama	93
Şekil 7.6. Örnek bir ekranlı mahfaza	97
Şekil 7.7. Ekranlı contalar	97
Şekil 7.8. Ekranlı havalandırma panelleri	98
Şekil 7.9. Devre düzeyinde ekranlama	98
Şekil 7.10. Devre düzeyinde ekranlama – II	99
Şekil 7.11. Topraklama sembolleri	101
Şekil 7.12. Topraklama iletkenleri	103
Şekil 7.13 Topraklama, ortak ve farksal mod akımları	103
Şekil 7.14. Seri bağlı tek nokta topraklaması	105
Şekil 7.15. Paralel bağlı tek nokta topraklaması	106
Şekil 7.16. Tek nokta topraklama sistem ve alt sistem uygulaması	107
Şekil 7.17. Çok nokta topraklaması	107
Şekil 7.18. Çok nokta topraklama sistem ve alt sistem uygulaması	108
Şekil 7.19. Filtre sınıfları	109
Şekil 7.20. Filtre tipleri	111
Şekil 7.21. Filtrede araya girme kaybı	112
Şekil 7.22. Alçak geçiren filtre	112
Şekil 7.23. Empedans ilişkilerine göre filtreler	114
Şekil 7.24. Empedans ilişkisine göre L filtreleri	114
Şekil 7.25. Yüksek geçiren filtre ve frekans cevabı	115
Şekil 7.26. Bant geçiren filtre ve frekans cevabı	116

	Sayfa No.
Şekil 7.27. Bant geçiren filtre için AGK	116
Şekil 7.28. LC tipi bant durduran filtre devresi	117
Şekil 7.29. Ortak mod ve farksal mod akımları	118
Şekil 7.30. Tek fazlı sistemde RF girişim gerilimleri	119
Şekil 7.31. Ortak mod gürültü filtresi	120
Şekil 7.32. Ortak mod şok bobinleri	120
Şekil 7.33. Farksal mod gürültü filtresi	121
Şekil 7.34. Farksal mod şok bobinleri	121
Şekil 7.35. Hibrit şebeke filtresi – I	122
Şekil 7.36. Hibrit şebeke filtresi – II	122
Şekil 7.37. Ticari şebeke filtre örnekleri	123
Şekil 7.38. Basit ferrit filtre tipleri	123
Şekil 7.39. Kilit mekanizmalı ferrit filtreler	124
Şekil 7.40. Ferrite filtreli bir HDMI kablosu	125
Şekil 7.41. SMD ve through-hole tip ferrite filtreler	125
Şekil 7.42. Ferrite filtreler için sarım sayısı empedans grafiği	126
Şekil 7.43. Ferrit filtre eşdeğeri ve araya girme kaybı bağıntısı	128
Şekil 7.44. Ferrit filtre örnek araya girme kaybı değerleri	129
Şekil 7.45. Çoklu sinyal kablolarına ferrit filtre uygulanması	130
Şekil 7.46. Ferritli ve ferritsiz filtre karşılaştırması	131
Şekil 7.47. İletkenlerin anten etkisi	132
Şekil 7.48. Tek, çift ve burgulu çift kablo manyetik alanı ve emisyon seviyeleri ..	133
Şekil 7.49. Düz ve burgulu çift iletkenlerin çıkış gerilimleri	134
Şekil 7.50. Ekransız kablo için zırh kılıf	134
Şekil 7.51. Kablo ekranlaması ve ekran kesim frekansı	135
Şekil 7.52. Ekranlı kablo iç yapısı	136
Şekil 7.53. Ekranlı kablonun topraklanması	137
Şekil 7.54. Kabloların hatalı ve doğru yerleşimi	137
Şekil 7.55. Kabloların uygun dizilimi	138
Şekil 7.56. Topraklama iletkeni tipleri	138

Sayfa No.

Şekil 7.57. Kablo ekranlarının topraklama bağlantıları	139
Şekil 7.58. Uzun kabloların ekranlarının topraklanması	140
Şekil 7.59. Ekranlı kablo topraklaması için EMC kablo kelepçesi	140
Şekil 7.60. Ferrit filtrenin gürültü kaynağına yerleşim uzaklığı	142
Şekil 7.61. Örnek bir devre kartı yerleşim düzeni	143
Şekil 7.62. PCB tasarımında EMC açısından bazı yanlışlar ve doğruları	143
Şekil 7.63. Dekuplaj kapasitörü ile döngü alanının küçültülmesi	144
Şekil 7.64. Örnek bir 10 katlı PCB katman düzeni	145
Şekil 7.65. Devre kartı üzerindeki elektrik ve manyetik alanlar	146
Şekil 7.66. Manyetik alan probu ile PCB emisyon ölçümü	146
Şekil 7.67. Elektrik alan probu ile PCB emisyon ölçümü	147
Şekil 7.68. Yakın alan ve voltaj prob bağlantıları	148
Şekil 8.1. Trafik sinyal lamba ve modülü	150
Şekil 8.2. EN55022 B sınıfı emisyon limitleri	151
Şekil 8.3. Trafik sinyal modülü devre blok diyagramı	152
Şekil 8.4. LED devre kartı	152
Şekil 8.5. SMPS devre kartı	153
Şekil 8.6. Deney düzeni diyagramı	154
Şekil 8.7. Deney düzeni	154
Şekil 8.8. Deney ortam koşulları	155
Şekil 8.9. İlk ölçüm faz	156
Şekil 8.10. İlk ölçüm nötr	156
Şekil 8.11. EMI filtreli trafik sinyal modülü devre blok diyagramı	157
Şekil 8.12. Gürültü ayrıştırıcı bağlantısı	158
Şekil 8.13. 9 kHz – 30 MHz faz ölçüm tekrarı	159
Şekil 8.14. 9 kHz – 30 MHz nötr ölçüm tekrarı	159
Şekil 8.15. Tipik EMI şebeke filtre devresi	161
Şekil 8.16. Farksal mod kesim frekansı doğrusu	162
Şekil 8.17. Tasarlanacak EMI filtre devresi	163
Şekil 8.18. EUT akım ölçümü	163

	Sayfa No.
Şekil 8.19. L_{DM1} endüktans ölçümü	164
Şekil 8.20. L_{DM1} endüktans ölçümü	164
Şekil 8.21. C_{X1} kapasitans ölçümü	165
Şekil 8.22. C_{X2} kapasitans ölçümü	165
Şekil 8.23. Ortak mod şok bobini empedans grafiği	166
Şekil 8.24. Ortak mod şok bobini AGK grafiği	167
Şekil 8.25. EMI filtre komponentleri	167
Şekil 8.26. EMI filtre devresi	168
Şekil 8.27. Tasarlanan EMI filtresinin PCB görüntüsü	168
Şekil 8.28. Son ölçüm deney düzeni	169
Şekil 8.29. Son ölçüm ortam koşulları	169
Şekil 8.30. İyileştirme sonrası faz ölçümü	170
Şekil 8.31. İyileştirme sonrası nötr ölçümü	170

ÇİZELGELER

	Sayfa No.
Çizelge 3.1. EM büyüklükler ve birimleri	11
Çizelge 3.2. Genel formda Maxwell denklemleri	11
Çizelge 3.3. Harmonik alanlar için Maxwell denklemleri	12
Çizelge 4.1. EMI kuplaj mekanizmalarının özeti	21
Çizelge 4.2. Temel EMC birimleri	28
Çizelge 4.3. Devre teorisi ve elektromanyetik teori birimleri	28
Çizelge 4.4. Desibel cinsinden birim dönüşümleri	31
Çizelge 4.5. İletim hattı modellemesinde hat parametreleri	43
Çizelge 5.1. CISPR yapısı	59
Çizelge 5.2. Genel EMC Standartları	61
Çizelge 6.1. IEC/EN temel EMC test ve ölçüleri	66
Çizelge 6.2. CISPR temel EMC test ve ölçüleri	67
Çizelge 6.3. FCC/CISPR A sınıfı iletim yollu emisyon limitleri	72
Çizelge 6.4. FCC/CISPR B sınıfı iletim yollu emisyon limitleri	72
Çizelge 6.5. İlk dört harmonik akım limitleri	75
Çizelge 6.6. RF iletim yollu bağışıklık test seviyeleri	77
Çizelge 6.7. EFT/Burst test seviyeleri	79
Çizelge 6.8. Darbe bağışıklık test seviyeleri	80
Çizelge 6.9. Gerilim çukuru test seviyeleri	84
Çizelge 6.10. Kısa kesintiler test seviyeleri	84
Çizelge 6.11. Elektrostatik boşalma test seviyeleri	84
Çizelge 7.1. Ekranlama etkinliği seviyeleri	91
Çizelge 7.2. Bazı metallerin frekansa göre deri kalınlığı değerleri	92
Çizelge 7.3. Sinyal frekansına göre PCB katman ve yüzey seçimi	145
Çizelge 8.1. Test cihazları listesi	154
Çizelge 8.2. Faz ve nötr için en yüksek PK değerleri ve frekansları	160

GENEL BİLGİLER

Adı ve Soyadı : Canbey Mehmet YILDIZ
Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Soner ÖZGÜNEL
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Ağustos 2020

ÖZET

ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK İÇİN İLETİM YOLLU ELEKTROMANYETİK GİRİŞİME KARŞI BAĞIŞIKLIK ARTIRMA VE İLETİM YOLLU EMİSYON AZALTMA TEKNİKLERİ

Elektrikle çalışan tüm cihazların CE etiketi alabilmeleri için tabi oldukları standartlardaki elektriksel testleri başarı ile geçerek bu gereklilikleri karşılamaları gerekir. Bu testler içerisinde cihazların elektromanyetik olarak kendi kendilerini ve çevredeki cihazların çalışmalarını olumsuz etkilemeyecek şekilde ve yine başka cihazların çalışmasından da olumsuz olarak etkilenmeden normal çalışmalarını sürdürebilmeleri “Elektromanyetik Uyumluluk” olarak adlandırılır. Cihazlar tasarım aşamasında elektromanyetik uyumluluk esaslarına göre tasarlanmalıdır. Tasarımdan sonra cihazlar birçok elektromanyetik uyumluluk testlerine tabi tutulurlar. Bu çalışmada elektronik cihazlarda elektromanyetik uyumluluğun sağlanması için iletim yollu kuplaj üzerinden elektromanyetik girişime karşı bağışıklığın artırılması ve emisyonların azaltılması teknikleri, gerekli elektromanyetik teori ve EMC/EMI ilkeleri ile birlikte sunulmuştur. Aynı zamanda EMC testleri, standartlar ve ürün belgelendirme konularına ilaveten elektronik bir cihazın iletim yollu emisyon ölçüm deneyi ile EMC probleminin tespiti ve uygun EMI şebeke filtre tasarlanmasıyla testten başarılı bir şekilde geçmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Uyumluluk, Elektromanyetik Girişim, Elektromanyetik Kuplaj

GENERAL KNOWLEDGE

Name and Surname : Canbey Mehmet YILDIZ
Field : Electrical and Electronics Engineering
Program : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Soner ÖZGÜNEL
Degree Awarded and Date : Master of Science – August 2020

ABSTRACT

TECHNIQUES OF IMPROVING CONDUCTED IMMUNITY AGAINST ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AND REDUCING CONDUCTED EMISSIONS FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

All electrically powered devices must successfully pass the electrical tests in the standards they are subject to and meet these requirements in order to receive CE marks. In line with these tests, the ability of the devices to continue their normal operation electromagnetically without negatively affecting themselves and the operation of other devices around and also without being negatively affected by the operation of other devices is called “Electromagnetic Compatibility”. Devices must be designed in accordance with electromagnetic compatibility principles during the design phase. After the design, the devices are subjected to several electromagnetic compatibility tests. In this study, techniques of increasing immunity and reducing emissions against electromagnetic interference via conducted coupling in order to ensure electromagnetic compatibility in electronic devices are presented together with the necessary electromagnetic theory and EMC/EMI principles. In addition to EMC tests, standards, and product certification issues, an electronic device was ensured to pass the test successfully with the detection of the EMC problem by the conducted emissions measurement and the design of a suitable EMI mains filter.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Interference, Electromagnetic Coupling

1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimine paralel olarak elektronik cihazların insan hayatındaki yeri ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Yarı iletken teknolojisinin sürekli gelişimi hemen hemen tüm elektrikli cihazlarda kendini göstermektedir. Özellikle insanların en büyük vazgeçilmezlerinden biri olan haberleşme ihtiyacı da teknolojinin gelişiminde en öndeki uygulama alanlarından biri haline almıştır. Cep telefonu, tablet, bilgisayar gibi çok kullanılan mobil cihazların yanı sıra internete bağlanan elektronik ürün çeşitliği de artmaktadır. 5G haberleşme altyapısının test edildiği günümüzde elektronik cihazların birçoğunun yakın zamanda IoT (Internet of Things) desteği alacağı ve birbirleriyle haberleşeceği söylenebilir. Ayrıca yapay zeka alanındaki çalışmaların artması ve insanların hayatlarını kolaylaştıracak yenilikler sunması günlük yaşam içerisindeki elektronik cihaz sayısının ve çeşitliliğinin artmasında büyük rol oynamaktadır. Etrafımızda sayısı sürekli artan bu elektronik cihazlar çalışırken buldukları ortam içerisinde istemli ve istemsiz olarak elektromanyetik sinyaller üretirler. Üretilen bu elektromanyetik sinyaller aslında görülmeyen çevresel bir kirlilik oluşturur ve olumsuz etkileri hem cihazlar açısından hem de insan sağlığı açısından problemlere sebep olabilmektedir.

Kullandığımız elektrikle çalışan cihazların sayısına bakıldığında etrafımızdaki elektromanyetik dalgaların fazlalığı anlaşılabilir. Bu elektromanyetik kirliliğin insan sağlığı açısından etkilerini biyoelektromanyetik (BEM) mühendisliği disiplini inceler. Elektromanyetik kirliliğin cihazlar üzerindeki etkilerini ise elektromanyetik uyumluluk (EMC) mühendisliği alanı incelemektedir. Bu tez çalışmasında ise elektromanyetik etkiler EMC mühendisliği bakış açısından ele alınacaktır.

Elektromanyetik ortam içerisinde cihazlar ve sistemler birbirlerinin hatta kendi kendilerinin bile çalışması üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Elektromanyetik uyumluluk cihazların ve sistemlerin birbirlerini elektromanyetik olarak etkilemeden fonksiyonelliklerinden ödün vermeden çalışabilmesidir. Tarihte EMC problemi kaynaklı kazalar nedeniyle elektromanyetik etkilerin önemi artmış ve bu alandaki çalışmalar hız kazanmıştır. Elektrikle çalışan cihaz ve sistemlerin geçmiş

olumsuzluklardan yola çıkarak yeniden tasarlanması bu alanda bir bilgi birikimi ortaya çıkmasına ve tasarımların bazı kritik kurallara dikkat edilerek üretilmesine sebep olmuştur. Bütün bu gelişmeler sonrasında bu alanda standartlar oluşmasına zemin hazırlamıştır. Günümüzde artık ürünlerin tasarlanırken tabi oldukları standartlara uygun olarak tasarlanmaları zorunluluk haline gelmiştir.

Elektronik cihaz ve sistemlerin birbirlerini etkilemesinde üç unsur bulunmaktadır. Bunlar elektromanyetik girişime sebep olan kaynak, elektromanyetik girişimden etkilenen kurban ve kaynak ile kurban cihazlar arasındaki elektromanyetik girişim yoludur. Elektromanyetik girişim yolu; iletim yollu ve atmosfer yollu olmak üzere iki çeşittir. Atmosfer yollu girişim kaynak ile kurban arasında herhangi bir iletken üzerinden değil havadan ışıyım yaparak etki etmesidir. İletim yollu girişimde ise iletkenler aracılığıyla etki söz konusudur.

Bir cihazdan dışarıdan gelen bozucu elektromanyetik sinyallerden etkilenmeden çalışması istenir. Tasarlanırken elektromanyetik alınganlığı düşük, bağışıklığı yüksek olarak tasarlanması gerekir. Buna ek olarak bir cihaz tasarlanırken de yakınındaki cihazların çalışmasını bozacak kadar elektromanyetik girişime sebep olmaması istenmektedir. Bu yüzden olumsuz etkiler oluşturmayacak kadar az seviyede emisyon oluşturması gerekir.

Bu tez çalışmasında iletim yollu girişim ele alınacak, cihaz ve sistemlerin elektromanyetik girişime karşı bağışıklıklarının artırılması ve emisyonlarının azaltılması teknikleri üzerinde durulmuştur. Çalışmanın ilk dört bölümünde EMC'nin tanımı, tarihçesi, gereklilikleri, iyi anlaşılabilmesi için gerekli olan elektromanyetik teori ve EMC'nin temel kavramları ile EMI ilkeleri verilmiştir. Beşinci bölümde EMC gereklilikleri ve temel standartlar, altıncı bölümde EMC test ve ölçüleri, yedinci bölümde EMI korunma yöntemleri üzerinde durulmuştur. Sekizinci bölümde ise anahtarlamalı güç kaynağına sahip bir trafik sinyal lambasının iletim yollu emisyon testleri gerçekleştirilerek EMC problemi ortaya konulmuş, uygun tekniklerin uygulanmasıyla ölçüm sonuçları iyileştirilerek karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise çalışma sonucu yer almaktadır.

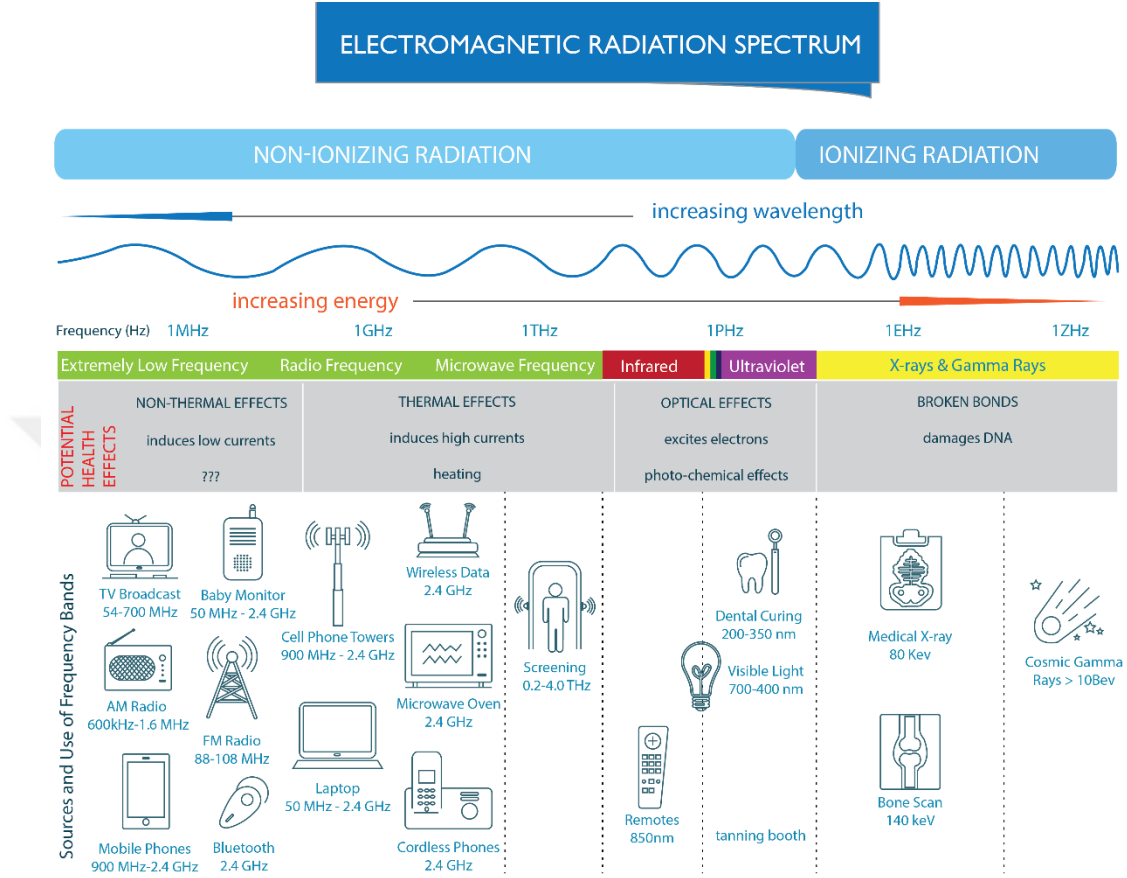
2. GENEL BİLGİLER

2.1. EMC ve EMI Nedir?

Elektromanyetik uyumluluk (EMC), bir elektromanyetik ortam içerisindeki cihaz ve sistemlerin, ortamın elektromanyetik etkilerinden ve cihazların oluşturdukları elektromanyetik girişimden etkilenmeden fonksiyonel işlevlerini istenildiği şekilde sürdürebilecek kabiliyete sahip olmasıdır.

Elektromanyetik (EM) dalgalar gözle görülmezler. Çevremizde çok çeşitli ve farklı genlik seviyelerinde elektromanyetik dalgalar bulunur. Bu yoğun ve karmaşık elektromanyetik dalgalar aslında çevre kirliliği türlerinden bir tanesidir. Bazı EM dalgalar özellikle belli bir amacı yerine getirmek için üretilmektedir. Özellikle haberleşme alanında bilginin kablosuz olarak aktarılmasında EM dalgalar ortama istemli bir şekilde yayılır. Kablosuz haberleşme cihazları radyofrekans (RF) sinyaller üreterek veriyi aktarırlar. Günümüzde cep telefonu, tablet, bilgisayar, navigasyon, radyo ve TV gibi çok kullanılan haberleşme cihazları çevremizde çok yoğun ve karmaşık bir EM ortam oluşmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda enerji nakil ve iletim hatları, güç kaynakları, elektrikli ev aletleri, lambalar, ısıtıcılar, motorlar ve jeneratörler gibi elektrikle çalışan tüm cihaz ve sistemler elektromanyetik kirlilik kaynaklarıdır. Bu kaynaklar insan yapımı olup ayrıca ortamda doğal kaynaklı EM işaretler de bulunur. Doğal kaynaklı EM işaretler atmosferik ve meteor hareketlerine bağlı yerküre kaynaklı olaylar ve güneş, yıldızlar gibi gökyüzü kaynaklı kozmik olaylar neticesinde oluşurlar. Doğal kaynaklı EM işaretlerin oluşturabileceği problemler özellikle uzay teknolojilerinde daha büyük önem kazanır. Doğal ve insan yapımı EM kaynakları çok farklı frekanslarda farklı genlik değerlerinde iç içe yer almaktadır. 0 Hz'den 300 GHz'e kadar olan EM işaretler iyonlaştırmayan, 300 GHz'den daha büyük frekansa sahip EM işaretler iyonlaştıran ışımalardır. İyonlaştıran ışımlar nükleer ışıma olarak da adlandırılır. Alfa, beta, gama ve X ışınları bu iyonlaştıran ışıma grubunda bulunur ve insan sağlığı açısından büyük tehlike oluşturan etkileri vardır. Dünyadaki EM işaretlerin frekans düzlemi üzerindeki yerleşimleri ve bu işaretlerin frekanslarına göre sınıflandırılması Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu yoğun

EM ortam içerisinde cihazların birbirlerinden ve ortamdan etkilenmeyecek şekilde tasarlanmaları gerekir. Aynı zamanda bu ortamda çalışacak cihaz ve sistemlerin de çevreye gereğinden fazla ışımaya yaymaması istenir.



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum

Kaynak: <https://www.nontoxicliving.tips/blog/emf-and-cancer-does-extremely-low-frequency-radiation-cause-cancer.>, Erişim tarihi: 1 Aralık 2019

Elektrik ve elektronik sistemlerin EM dalgalar yayarak parazitlenme olarak tabir edilen gürültü üretmelerine ve bu EM gürültünün bir ya da daha fazla hedef üzerinde bozucu etkiler oluşturmalarına elektromanyetik girişim denir. Elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference, EMI), elektronik teknolojisinin gelişmesiyle çevremizdeki cihazların artması ve birbirlerine daha yakın çalışmak durumunda kalmaları sebebiyle gelecekte daha büyük bir problem haline gelecektir. Özellikle elektronik aygıtların gitgide küçülmesi ve haberleşme alanında yeni teknolojiler gelişmesi EMI olmadan cihazların çalışabilmeleri için şartları daha da zorlaştırmaktadır. EMI bir problemdir ve EMC, EMI'nin etkilerini problemler yok oluncaya kadar azaltılması konusunu ele alır.

Günlük yaşamdan örnek EMI problemleri aşağıda verilmiştir.

- TV yakınında bulunan cep telefonunun çaldığında görüntü ve sese bozulmalara sebep olması
- Elektrik süpürgesi ve matkap gibi aletlerin TV'de parazitlenme yapması
- Telsiz ile radyo frekanslarının birbirine karışması
- Otomobillerde bulunan ABS fren sistemlerinin cep telefonu sinyallerinden etkilenmeleri
- Yıldırım düşmesi sebebiyle evdeki elektrik ve elektronik cihazların arızalanması

2.2. EMC Neden Gereklidir?

Elektronik cihaz ve sistemlerin birbirlerinden ve çevredeki EM ortamdaki olumsuz etkilemeden çalışmalarını sürdürebilmeleri için buna uygun tasarlanmaları gerekir. Ortamdan ve diğer cihaz ve sistemlerden etkilenmeden çalışan ve aynı şekilde diğer cihaz ve sistemleri olumsuz etkilemeyecek seviyelerde düşük girişime sahip cihazlar elektromanyetik olarak uyumlu kabul edilir.

Tarihte cihaz ve sistemlerin neden oldukları girişimler birçok ölümlü ve yaralanmalı kazalara sebep olmuştur. EMI problemleri özellikle II. Dünya Savaşı'ndan itibaren daha da önem kazanmıştır. Savunma sistemlerinde ve medikal cihazlardaki herhangi küçük bir EMI probleminin çok büyük sonuçlar doğurabilecek etkileri oluşabilmektedir. Tüm bu etkilerin ortadan kaldırılması ve EMI'nin tehlikesiz seviyelere indirilmesi için EMC'ye ihtiyaç vardır.

2.3. Tarihte EMI Kaynaklı Kaza Örnekleri

- 1967 yılında Vietnam açıklarında USS Forrestal uçak gemisinde oluşan bir elektromanyetik girişim uçaklardan birinde silah sistemine istenmeyen bir sinyal göndererek roketin ateşlenmesine sebep oldu. Roketin diğer uçaklara çarpmasıyla zincirleme patlamalar meydana geldi ve 21'i kullanılmaz hale gelen 40 uçak hasar aldı. 134 kişi yanarak öldü ve 161 kişi ağır yaralandı.
- 1982 yılında Falkland Savaşı sırasında İngiliz savaş gemisi HMS Sheffield oluşan elektromanyetik girişimin füze uyarı sistemini devre dışı bırakması sonucu Arjantin tarafından Exocet füzesi tarafından vuruldu. Gemideki 20 mürettebat öldü ve 26 mürettebat yaralandı.

- ABD Kara Kuvvetleri'ne ait Black Hawk UH-60 tipi helikopter 1981 ve 1987 yılları arasında 5 kez düştü. Kazalara radyo verici kulelerin sinyallerinin uçuş kontrol sistemleri üzerinde neden oldukları elektromanyetik girişimin sebep olduğu tespit edildi. Bu EMI problemi helikopter kokpiti göstergelerinde de gerçek dışı değerler göstermesine sebep olmuş ve yüksek yoğunluklu EMI helikopter stabilatör sisteminin görevini yerine getirememesine yol açmıştır.
- 1992 yılında kalp krizi geçirmekte olan 93 yaşındaki hasta ambulans ile hastaneye götürülürken teknisyenler tarafından tıbbi bilgi verilmek üzere açılan telsiz sinyallerinin oluşturduğu elektromanyetik girişimin hastanın bağı olduğu defibrilatörü kapatması sonucunda yaşamını yitirdi.
- 1993 yılında metal dedektörü ile taranan bir kişi kalp yetmezliği sonucunda öldü. Metal dedektörünün kalp pilinde elektromanyetik girişime sebep olması sonucu öldüğü belirlendi.

3. TEMEL ELEKTROMANYETİK KAVRAMLAR

3.1. EMC ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Elektrik ve elektronik mühendisliğinde iki temel analiz ve problem çözme kuramı bulunmaktadır. Bunlar elektromanyetik teori ve devre teorisidir. Elektromanyetik teori, elektrik ve manyetik alanlar ile ilgilenir. Bu elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik olarak elektromanyetik alanları oluştururlar ve hareketli EM alanlar da EM dalgaları oluştururlar. Devre teorisi ise akım ve gerilimlerle ilgilenir. Bu kuramlar birbirinden bağımsız değildirler ve bir problemde her ikisi de kullanılabilir gibi genellikle problemin türüne göre daha kullanışlı olan tercih edilir. Çünkü bazı problemlerde uygun olmayan kuramı kullanmak analizi ve çözümü zorlaştırabilmektedir. Örneğin, içerisinde anten barındıran bir devrede ışıma karakteristikleri analiz edilecekse elektromanyetik teoriyi, giriş/çıkış empedansı ve güç analiz edilecekse devre teorisini kullanmak çok daha uygun olacaktır (Sevgi, 2019).

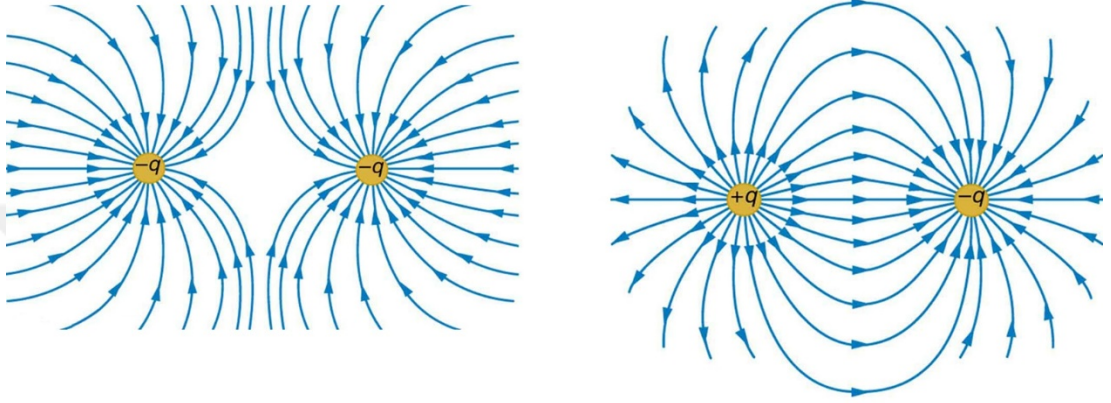
EMC Mühendisliğinin daha iyi anlaşılabilmesi için özellikle elektromanyetik teorisinin iyi anlaşılması gerekir. EM dalgalar yazı, ses, görüntü ve başka birçok tipteki verinin iletiminde rol oynayarak haberleşmesinin temelinde önemli bir yer almaktadır. Ancak EM dalgalar her zaman bu şekilde faydalı değildirler. Bazen de gürültü olarak kabul edilen istenmeyen işaretler şeklinde problemlere sebep olmaktadır.

3.2. Elektromanyetik Alan/Dalga ve Maxwell Denklemleri

Elektromanyetizma geçmişi binlerce yıl öncesine dayanan bir konudur. Birçok bilim adamı bu konuya katkı sağlamış olsa da 18.yüzyılda James Clerk Maxwell elektromanyetik teorisinin temel denklemlerini oluşturmuştur. Maxwell, kendi adını taşıyan bu denklemleri Johann Carl Friedrich Gauss'un Gauss Yasası, André Marie Ampère'in Ampere Yasası ve Michael Faraday'ın Faraday Yasası denklemlerini kullanarak yazmıştır.

3.2.1. Elektrik Alan

Belli bir noktadaki sabit birim yüke etki eden yük başına düşen kuvvet olarak tanımlanır. Elektrik alan bir vektörel kuvvet olduğundan yönlü oklar ile gösterilirler. Elektrik alan çizgileri yüksek potansiyelden düşük potansiyele doğru olduğundan kuvvet yönü artı yükten eksi yüke doğrudur. Şekil 3.1’de aynı ve farklı polariteye sahip yüklerin oluşturdukları elektrik alan çizgileri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrik alan çizgileri

Kaynak: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/18-5-electric-field-lines-multiple-charges>
Erişim tarihi: 11 Aralık 2019

Küresel koordinat sistemi üzerinde merkezde konumlanan bir Q yüküne ait olmak üzere, herhangi bir P noktasındaki elektrik alan şiddeti Denklem (3.1)’deki gibidir.

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \hat{a}_r [\text{V/m}] \quad (3.1)$$

\vec{E} : Elektrik alan şiddeti [V/m]

Q : Q yükü [C]

r : P noktası ile Q yükü arasındaki mesafe [m]

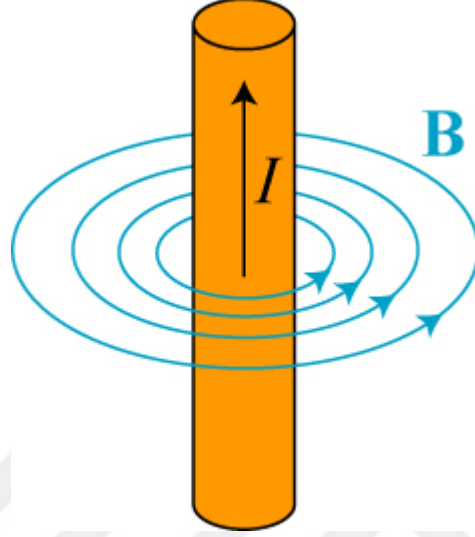
ϵ_0 : Boşluğun elektriksel geçirgenlik (permittivity) sabiti [F/m]

3.2.2. Manyetik Alan

Bir yük hareketinin oluşturmuş olduğu elektrik akımı manyetik alanı meydana getirir. Manyetik alanı, bir noktada v hızıyla hareket eden bir q yükünde F kuvvetini oluşturan alan vektörü olarak tanımlanabileceği gibi hareket eden elektrik yüküne etki eden Lorentz kuvveti olarak da ifade edilebilir. Manyetik alan şiddeti, sadece hareketli

yüklere bağılı olarak ortamdan bağımsız bir vektörel kuvvettir. Manyetik alan çizgileri akımı çevreler ve kendileri üzerinde kapanır (Sevgi, 2006).

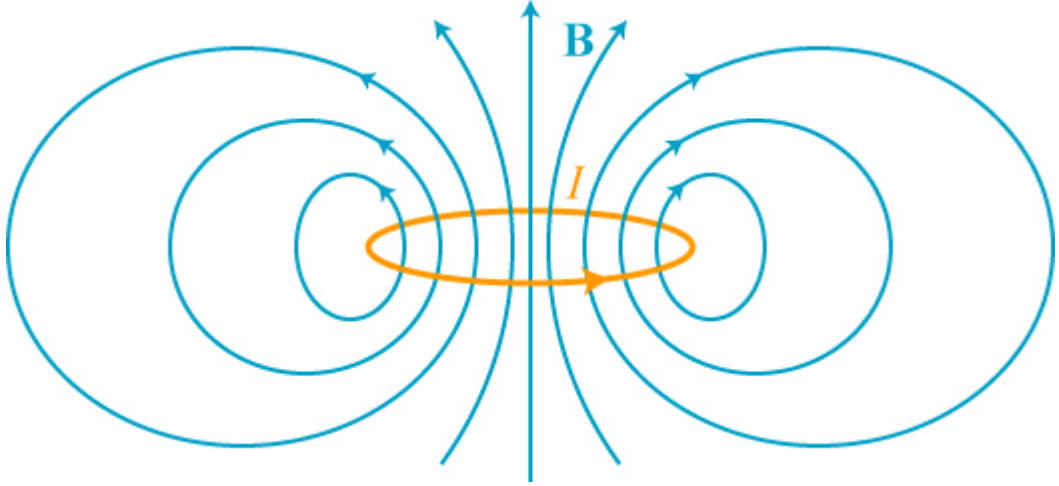
Elektrik akımı geçen bir iletken tel etrafında oluşan manyetik alan çizgileri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İletken tel etrafındaki manyetik alan

Kaynak: <https://skullsinthestars.com/2014/12/12/the-mystery-of-the-magnetic-train>
Erişim tarihi: 11 Aralık 2019

Bir manyetik dipolün manyetik akı çizgileri Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Bir manyetik dipolün manyetik akı çizgileri

Kaynak: <https://skullsinthestars.com/2014/12/12/the-mystery-of-the-magnetic-train>
Erişim tarihi: 11 Aralık 2019

Lorentz kuvveti Denklem 3.2’de, manyetik alan şiddeti Denklem 3.3’de verilmiştir.

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \text{ [N]} \quad (3.2)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \text{ [A/m]} \quad (3.3)$$

\vec{H} : Manyetik alan şiddeti [A/m]

\vec{B} : Manyetik akı yoğunluğu [T]

μ : Ortamın manyetik geçirgenliği (permeability) [H/m]

3.2.3. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri dört denklemden oluşmaktadır. Birinci denklem Faraday Yasası'dır. Faraday Yasası elektrik dolanımıyla ilgili olup, bir kapalı durağan devredeki elektromotor kuvvetin, devreden geçen manyetik akının zamana göre türevinin yani artış hızının negatifine eşit olduğunu ifade eder. Buna göre manyetik alandaki değişiklik elektrik alan oluşturmaktadır.

İkinci denklem Ampere Yasası'dır. Ampere Yasası, kapalı bir yüzeye ait manyetik alan ve toplam akım yoğunluklarının birbiri arasındaki ilişkiyi verir. Buna göre iletken bir telden akan akım ve elektrik alanındaki değişiklik manyetik alanın oluşmasını neden olur. Bu yasada, "herhangi bir kapalı yol etrafındaki manyetik alan şiddetinin dolaşımının, bu yolun sınırladığı yüzey içinden akan serbest akıma eşit" olduğu sonucu çıkar (Cheng, 2009).

Üçüncü denklem elektrik alan için Gauss Yasası'dır. Kapalı yüzeyden geçen elektrik akı ile yüzey içerisindeki elektrik yükü arasındaki ilişkiyi vermektedir. İçinde elektrik yükü olan bir hacmin duvarlarındaki elektrik akısının toplamının elektrik yüke eşit olduğunu gösterir.

Dördüncü denklem manyetik alan için Gauss Yasası'dır. Kapalı bir yüzeyden geçen toplam manyetik akının her zaman sıfıra eşit olduğunu ifade eder. Bu eşitlik manyetik yük olmadığını ortaya koyar.

Maxwell denklemleri ve Çizelge 3.2'de verilen süreklilik denklemi ile birlikte Lorentz kuvvet denklemi elektromanyetik kuramın temelini oluşturmaktadır. Dört Maxwell denklemi birbirinden bağımsız değildir (Cheng, 2009).

Maxwell denklemlerinde kullanılan EM büyüklükler ve birimler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. EM büyüklükler ve birimleri

Sembol	Büyükük	Birim
E	Elektrik Alan	Volt/m
H	Manyetik Alan	Amper/m
J	Yüzey Akım Yoğunluğu	Amper/m ²
ρ	Hacimsel Yük Yoğunluğu	Coulomb/m ³
ϵ	Ortam Dielektrik Katsayısı	Farad/m
σ	Ortam iletkenliği	Siemens/m
μ	Ortam Manyetik Geçirgenliği	Henry/m

Genel formdaki Maxwell denklemleri diferansiyel ve integral formda Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Genel formda Maxwell denklemleri

Diferansiyel Form	İntegral Form	Denklem
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$ $= -\frac{d\Phi}{dt}$	Faraday Yasası
$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \oint_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$	Ampere Yasası
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dv = Q$	Gauss Yasası (Elektrik alan için)
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	Gauss Yasası (Manyetik alan için)
$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$		Süreklilik Eşitliği

Fazör formla dikkate alınarak Maxwell Denklemlerinin harmonik alanlar için yazımı Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Harmonik alanlar için Maxwell denklemleri

Diferansiyel Form	İntegral Form	Denklem
$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}$	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -j\omega\mu \int_S \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}$	Faraday Yasası
$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E}$	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = (\sigma + j\omega\epsilon) \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$	Ampere Yasası
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dv = Q$	Gauss Yasası (Elektrik alan için)
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	Gauss Yasası (Manyetik alan için)
$\nabla \cdot \mathbf{J} = -j\omega\rho$		Süreklilik Eşitliği

Maxwell denklemleri ve süreklilik denklemindeki eşitlikler arasındaki ilişkiler aşağıdaki verilen ifade ve denklemler ile sağlanır.

Elektrik alan, akı yoğunluğuna (D) ve malzemenin yalıtkanlık sabitine (ϵ) bağlıdır. Akı yoğunluğu vektörü elektrik alan vektörü ile aynı yönde ve şiddeti elektrik alanı oluşturan yük ile orantılıdır.

$$\mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E} \text{ [C/m}^2\text{]} \quad (3.4)$$

\mathbf{D} : Elektrik akı yoğunluğu [C/m²]

\mathbf{E} : Elektrik alan şiddeti [V/m]

ϵ : Ortamın elektriksel geçirgenliği (permittivity) [F/m]

Bir malzemenin üzerinde yük depolayabilme özelliği dielektrik ya da yalıtkanlık sabiti denilen bir katsayı ile ifade edilir. Birimi Farad/metre’dir (F/m) ve “ ϵ ” ile gösterilir. Dielektrik sabiti, serbest uzayın dielektrik sabiti (ϵ_0) ve malzemenin bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) ile doğru orantılıdır.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \text{ [F/m]} \quad (3.5)$$

ϵ_0 : Serbest uzayın elektriksel geçirgenlik sabiti (8,85419 . 10⁻¹² F/m)

ϵ_r : Ortamın bağıl elektriksel geçirgenlik katsayısı

Manyetik akı yoğunluğu “B” ile gösterilir. Birimi Tesla (T) veya Weber/metre-kare (Wb/m^2)’dir. Manyetik akı yoğunluğu, ortamın manyetik geçirgenliği (μ) ve manyetik alan şiddetinin (H) çarpımına eşittir.

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \text{ [T]} \quad (3.6)$$

\mathbf{B} : Manyetik akı yoğunluğu [T]

\mathbf{H} : Manyetik alan şiddeti [A/m]

μ : Ortamın manyetik geçirgenliği (permeability) [H/m]

Manyetik geçirgenliğin (μ) birimi Henry/metre (H/m) olup, serbest uzayın manyetik geçirgenlik sabiti (μ_0) ve bağıl manyetik geçirgenlik katsayısına (μ_r) bağlıdır.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \text{ [H/m]} \quad (3.7)$$

μ_0 : Serbest uzayın manyetik geçirgenlik sabiti ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

μ_r : Ortamın bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı

Akım yoğunluğunun (J) birimi Amper/metre-kare (A/m^2)’dir. Akım yoğunluğu elektrik alan şiddeti (E) ile iletkenlik değerinin (σ) çarpımına eşittir. Denklem 3.8’deki akım yoğunluğu eşitliği Ohm Yasası’nın nokta biçimidir.

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E} \text{ [A}/\text{m}^2] \quad (3.8)$$

\mathbf{J} : Akım yoğunluğu [A/m^2]

\mathbf{E} : Elektrik alan şiddeti [V/m]

σ : Öz iletkenlik (conductivity) [S/m]

Öz iletkenlik değeri (σ), iletkenin elektron konsantrasyonuna ve devingenliğine bağlıdır.

$$\sigma = -\rho_e \cdot \mu_e \text{ [S/m]} \quad (3.9)$$

ρ_e serbest elektron yük yoğunluğu, μ_e elektronun hareket yeteneğidir. En yaygın kullanılan iletken olan bakırın öz iletkenlik değeri $5,8 \cdot 10^7$ S/m’dir.

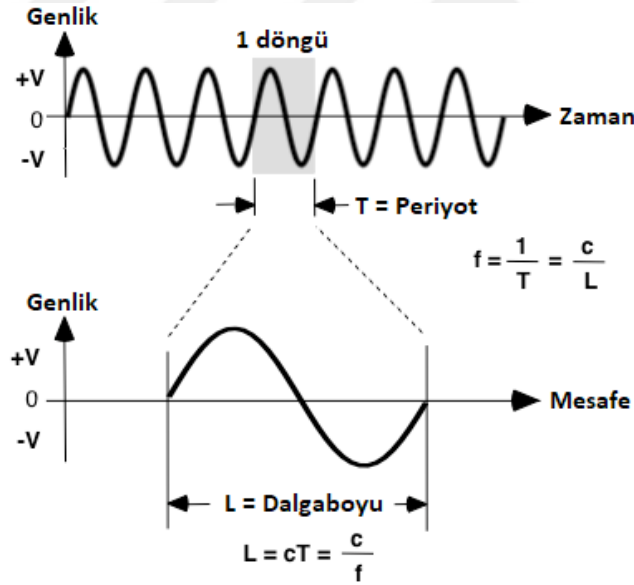
3.2.4. Elektromanyetik Dalga

Elektromanyetik dalgalar hareketli elektrik alanlar ve manyetik alanlardan oluşur. Elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine dik olarak titreşerek hareket ederler

(Bacanak, 2018). Boşlukta ışık hızı ile yayılırlar ve farklı ortamlara geçtiklerinde hızları değişir. Elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri aynı fazdadır ve sinüzoidal bir formda ilerler. Oluşturdukları elektromanyetik dalga ile aynı yöndedir. Işık, özel bir elektromanyetik dalga olduğundan tüm elektromanyetik dalgalar ışık gibi yansıma, kırılma, kırınım ve girişim yapabilme özelliğine sahiptir. EM dalgalar polarize edilebilirler ve soğrulabilirler. EM dalgaları soğuran maddeler ısınırlar.

Elektromanyetik dalgalar titreşerek ilerlediğinden bir frekansa sahiptir. Frekans, EM dalganın birim saniyede gerçekleştirdiği salınım sayısıdır. Frekansın birimi Hertz (Hz)'dir. Dalga boyu, frekansa bağlı olarak EM dalganın bir salınım boyunca aldığı yoldur. Birimi metre (m)'dir.

EM dalganın pozitif polarite alanındaki tepe noktasının ve negatif polarite alanındaki çukur noktasının büyüklüğüne EM dalganın genliği denir. Bir EM dalganın iki boyut üzerindeki görünümü Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. EM dalga parametreleri

Kaynak: <https://copradar.com/chapts/chapt7/ch7d2.html>, Erişim tarihi: 12 Aralık 2019

Elektrik alan potansiyel fark, manyetik alan ise akım kaynaklıdır. Elektrik alanı değiştirmek için yüklü bir parçacığın ivmeli hareket ettirilmesi gerekir ve bunun sonucunda değişen elektrik alan kendisine dik manyetik alanı oluşturur.

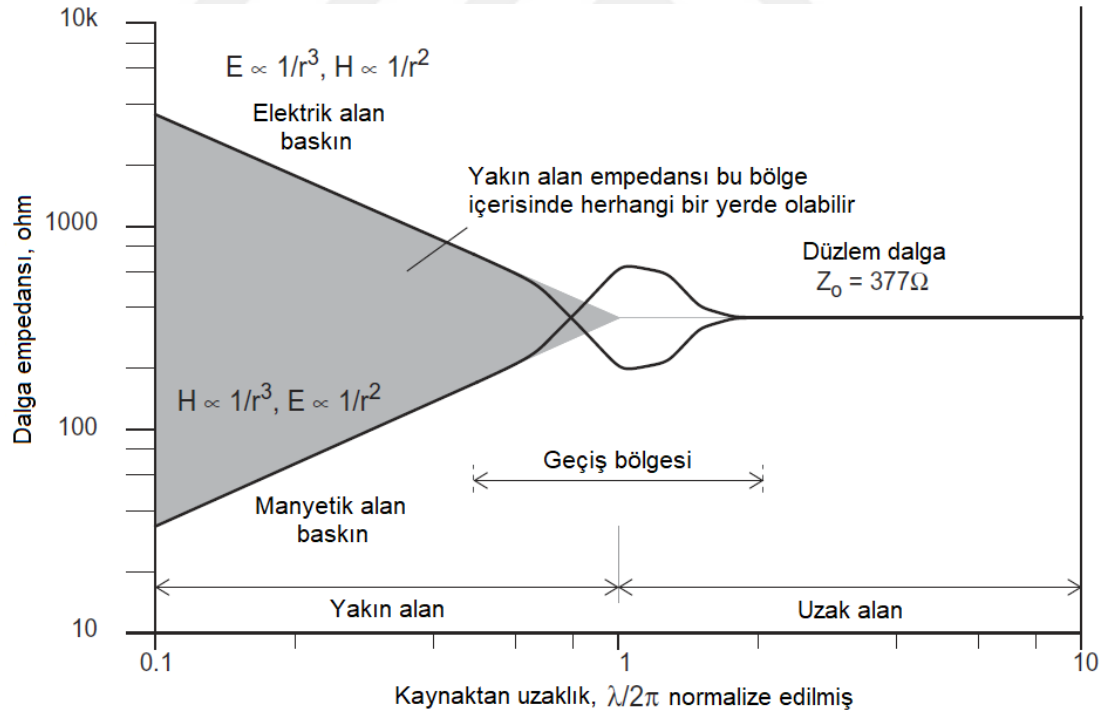
EM dalgalar boşlukta ışık hızı olan 3×10^8 m/s hız ile yayılırlar. EM dalganın hızı (c), EM dalganın frekansı (f) ve dalga boyu (λ) ile ilişkilidir ve Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$\lambda = \frac{c}{f} [m] \quad (3.10)$$

EM dalganın boşluktaki hızı, uzayın dielektrik sabiti (ϵ_0) ve manyetik geçirgenlik (μ_0) değerlerine bağlıdır ve Denklem 3.11’de gösterilmiştir.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 2,998 \times 10^8 [m/s] \quad (3.11)$$

Elektrik alan şiddetinin manyetik alan şiddetine oranına dalga empedansı denir. Dalga empedansı bir elektromanyetik dalganın önemli parametrelerindedir. EMC’de kaynak ile mağdur birbirine belirli mesafede yakın olduğunda elektrik alan ve manyetik alan ayrı ayrı incelenir. Belli mesafeden uzaklarsa elektrik alan ve manyetik alan birlikte meydana getirdikleri elektromanyetik alan olarak incelenir. Yakın alan ve uzak alan birbirinden elektromanyetik kaynağa olan $\lambda/2\pi$ sınır mesafesi ile birbirinden ayrılır. Bu ayrım keskin değildir ve geçiş bölgesi olarak ifade edilir. Kaynaktan uzaklığa göre elektrik ve manyetik alanların değişimi Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Uzaklığa göre E ve H alan değişimleri

Kaynak: Williams, 2016:270

Yakın alanda dalga empedansı kaynağa bağlıdır. Eğer kaynak, yüksek akım ve düşük gerilim karakterli ise yakın bölgede manyetik alan baskın olur. Kaynak, yüksek gerilim ve düşük akım karakterli ise yakın bölgede elektrik alan baskın olur.

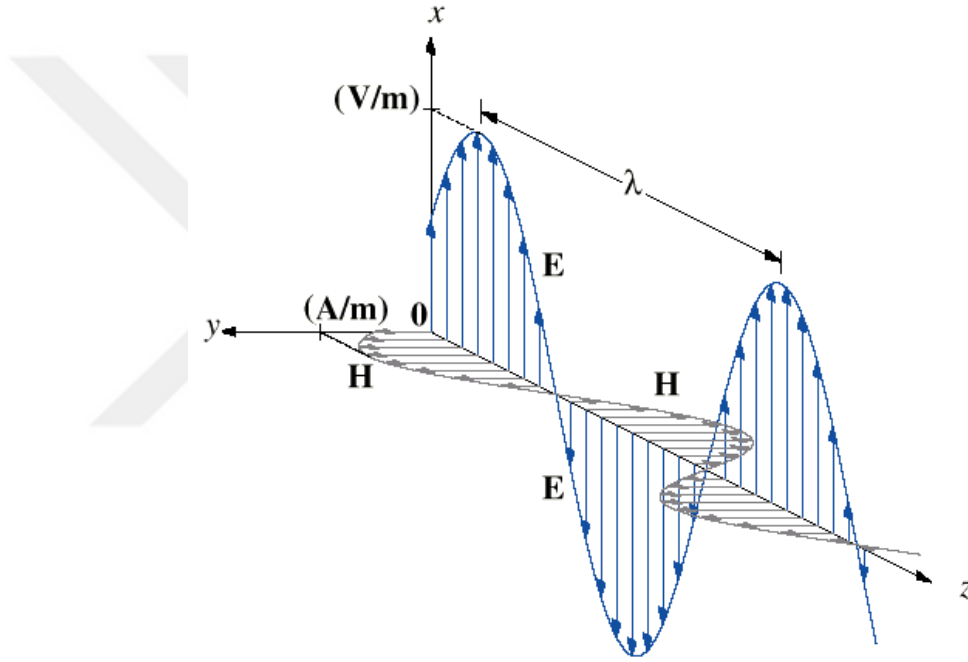
Dalga empedansı,

$$Z_0 = \frac{E}{H} [\Omega] \quad (3.12)$$

denklemini ile bulunur. Burada,

$$Z_0 = \eta_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega \quad (3.13)$$

eşitlikleri sağlandığı durumda ifade ortamın karakteristik empedansı adını alır ve uzak alan bölgesini tarif eder. Uzak alandaki bu yayılım düzlem dalga yayılımı halini alır. Düzlem elektromanyetik dalga bileşenleri ve yönü Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Düzlem EM dalga bileşenleri

Düzlem elektromanyetik dalgalarda elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirine diktir. Aynı zamanda bu bileşenler dalganın ilerleme yönüne de diktir. Bu yüzden EM dalgalar enine dalgalardır. Şekil 3.6'daki düzlem EM dalgaya göre elektrik alan x-z düzleminde kalmaktadır. Buna göre \vec{E} , x yönünde polarizedir. Manyetik alan y-z düzleminde kalmaktadır. Buna göre \vec{H} , y yönünde polarizedir. Burada EM dalga z yönünde ilerlemektedir.

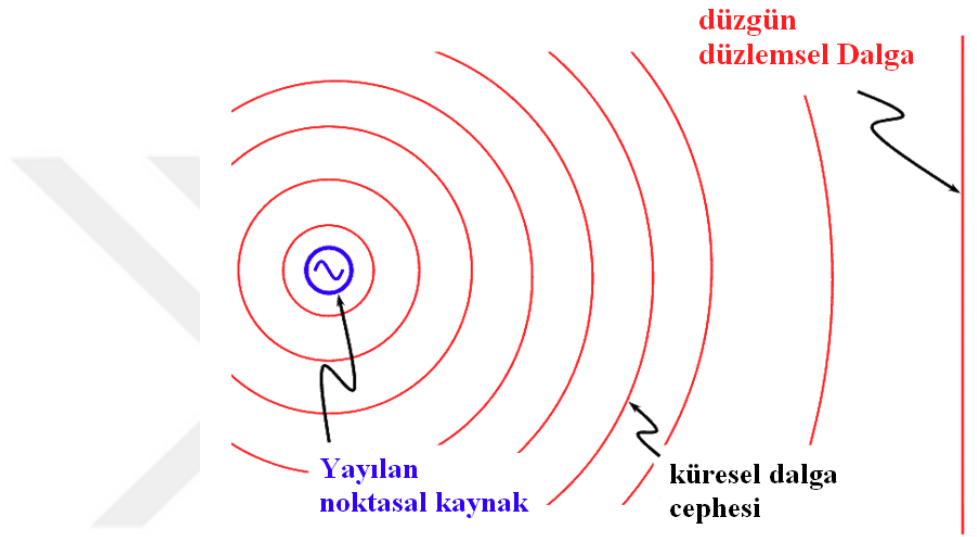
Elektromanyetik dalgalar üç temel modda yayılırlar. Bunlar;

- TE modu dalgalar: İlerleme yönünde E-alan içermezler.
- TM modu dalgalar: İlerleme yönünde H-alan içermezler.

- TEM modu dalgalar: İlerleme yönünde hem E-alan hem de H-alan içermezler.

TE ve TM modu dalga yayılımı yalnızca kılavuzlanmış yapılarda görülür. TEM dalgaları ise serbest uzayda görülür (Sevgi, 2000).

EM dalgalar çok farklı kaynaklardan yayılabilir. Ancak EM dalgalar kaynaktan uzaklaştıkça küresel ve düzlemsel dalgalara dönüşürler (Sevgi, 2000). Şekil 3.7’de noktasal kaynaktan çıkan bir elektromanyetik dalganın düzlemsel dalgaya dönüşmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.7. EM dalganın düzgün düzlemsel dalgaya dönüşmesi

Elektromanyetik dalgalar enerji taşırlar. Bunu elektrik ve manyetik alan yardımı ile gerçekleştirirler ve bu alanların çarpımı Poynting Vektörü denilen güç yoğunluğunu ifade eder. Poynting vektörü olan \mathbf{S} ,

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.14)$$

şeklinde birim yüzey başına düşen gücü ifade eder. \mathbf{S} vektörünün yönü dalganın yayılma doğrultusu boyuncadır (Serway and Beichner, 2009).

4. EMC VE EMI İLKELERİ

Elektromanyetik girişimi ve elektromanyetik girişim problemlerinin yok edilmesini amaçlayan elektromanyetik uyumluluk konularını anlayabilmek için elektromanyetizmanın temel kavramlarının iyi anlaşılması sonrasında bu kavramların üzerine kurulu EMC ve EMI ilkelerinin bilinmesi gereklidir.

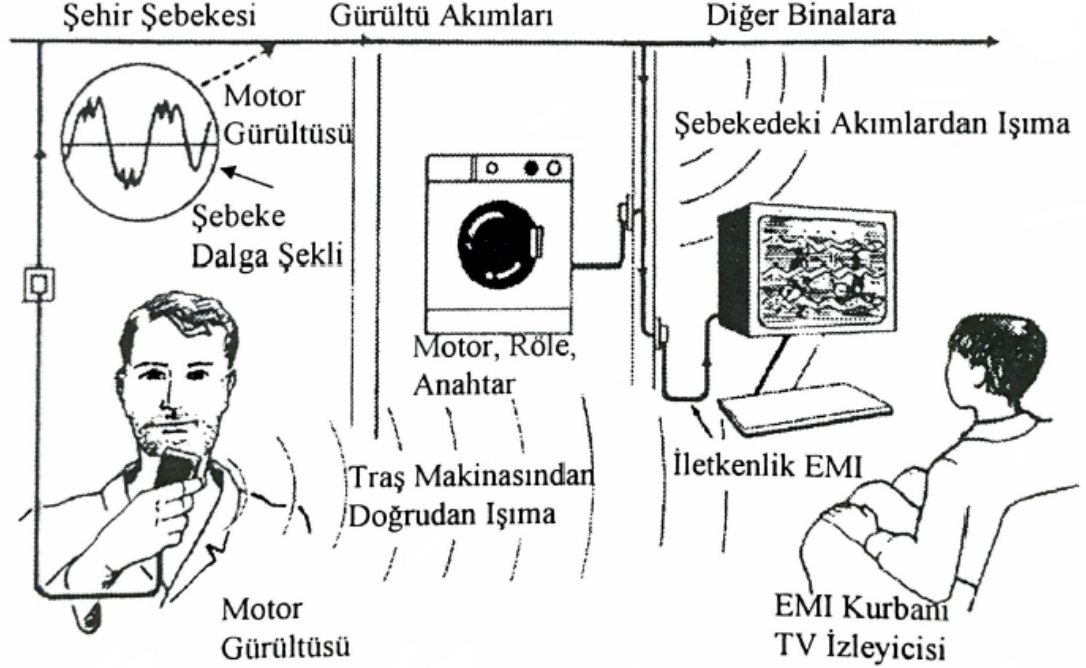
4.1. Elektromanyetik Girişim (EMI)

Elektrik enerjisi ile çalışan tüm cihaz ve sistemler farklı frekans bölgelerinde faydalı ve faydasız sinyaller üretmektedirler. Bu sinyaller elektromanyetik enerji olarak ortama yayılmaktadır. Elektrikli cihazların ya da doğal kaynakların yaymış oldukları elektromanyetik enerji diğer elektrikli cihaz ve sistemlerde bazı fonksiyon bozulmalarına sebep olarak istenmeyen durumların oluşmasına sebep olabilmektedir. Cihaz, sistem ya da doğal kaynakların ürettikleri bozucu elektromanyetik sinyaller sebebiyle diğer cihaz ve sistemleri etkileyerek onlar üzerinde geçici ya da kalıcı olumsuz etkiler oluşturmalarına elektromanyetik girişim (EMI) denilmektedir. Kısaca EMI, bir elektromanyetik sinyalin başka bir elektromanyetik sinyal ile karışması olarak ta ifade edilebilir.

Doğal elektromanyetik kaynaklar ve teknolojinin hızlı gelişmesi sonucu sayısı gittikçe artan elektrikli cihazların yaymış oldukları elektromanyetik dalgalar çevremizde çok karmaşık bir elektromanyetik ortam oluşmasına sebep olmaktadır. Elektromanyetik dalgalar ortamda hem geniş bir spektruma yayılmakta hem de genlik olarak yüksek seviyelere ulaşmaktadırlar. Özellikle cihazların mobil hale gelmesi ve haberleşme teknolojilerinin gelişmesi sonucu yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların ortamdaki yoğunlukları artarken bu cihazların diğer cihazların yaydığı elektromanyetik dalgalardan olumsuz olarak etkilenmeden yani elektromanyetik girişime karşı etkilenmeyecek şekilde tasarlanmaları gerekir.

Bir evdeki televizyonun aynı şebeke ağına bağlı olan bir matkabın çalışması sonucunda televizyon ekranında karıncalanma şeklinde parazite sebep olması ya da

yakındaki bir cep telefonuna çağrı gelmesi sonucunda televizyon ekran ve sesinde bozulmalar meydana gelmesi elektromanyetik girişime örnektir. Aynı şehir şebekesine bağlı elektrikli cihazlar arasındaki elektromanyetik girişim etkileşimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Aynı şebekeye bağlı cihazlarda EMI etkileşimi

Kaynak: Sevgi, 2000:4

Bir elektromanyetik girişim olayında kaynak cihaz, kuplaj yolu ve kurban cihaz olmak üzere üç unsur bulunmaktadır. Kaynak, bozucu elektromanyetik sinyalleri üreten cihazdır. Kurban, kaynak cihazın üretmiş olduğu bozucu elektromanyetik sinyallerden olumsuz etkilenen cihazdır. Kuplaj yolu ise kaynak cihazın üretmiş olduğu bozucu elektromanyetik sinyallerin kurban cihaza ulaşırken izlediği yoldur. Şekil 4.2’de elektromanyetik girişim unsurları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. EMI unsurları

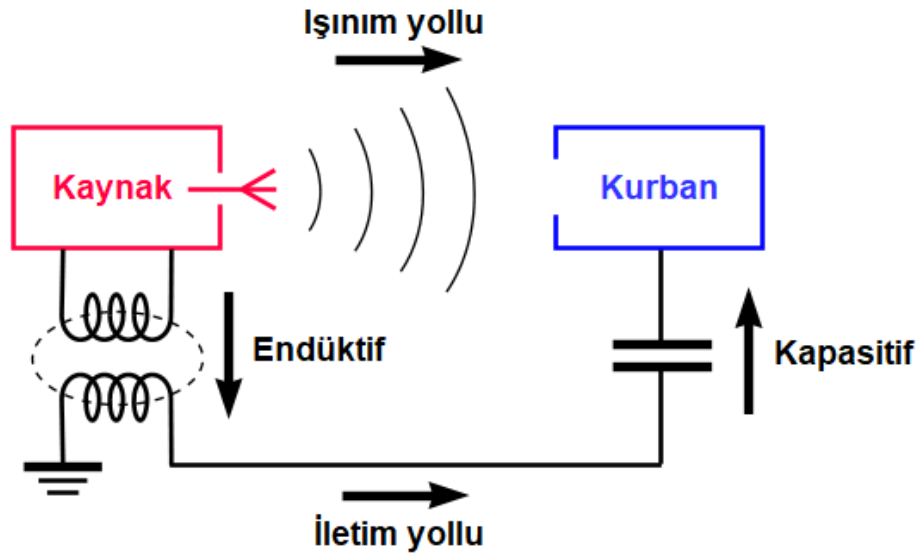
Gürültü, istenen sinyal dışında bir devrede bulunan herhangi bir elektrik sinyalidir. Girişim, gürültünün istenmeyen etkisidir. Bir gürültü voltajı bir devrenin yanlış çalışmasına neden olursa girişim vardır. Gürültü giderilemez, ancak girişim

giderilebilir. Gürültü, girişim problemi ortadan kalkıncaya kadar büyüklükçe azaltılabilir (Ott, 2009).

Bir elektromanyetik girişim olayında girişim gürültüsünün kaynaktan kurbanına doğru ilerlediği kuplaj yolları iki çeşittir. Bunlar;

- İletim yolu (conducted)
- Işıma yolu (radiated)

olarak bir girişim olayındaki kuplaj yollarını belirtir. Ayrıca iletim yolu, ışıma yolu, endüktif ve kapasitif kuplaj mekanizmaları vardır. Işıma yolu girişim kuplajı uzak alan (far – field), endüktif ve kapasitif girişim yakın alan (near – field) kuplaj mekanizması olarak girişim gösterir. Uzak alan kuplajı elektromanyetik alanların ışımasını, yakın alan kuplajı olan endüktif kuplaj manyetik alan ışımasını ve yakın alan kuplajı olan kapasitif kuplaj elektrik alan ışımasını ifade eder. İletim yolu girişim kuplajı ortak empedans kuplajı ya da galvanik kuplaj olarak ta ifade edilebilmektedir. Endüktif kuplaj genelde akımda oluşan büyük ve hızlı değişimlerde, kapasitif kuplaj ise genelde gerilimde oluşan büyük ve hızlı değişimlerde görülmektedir. Şekil 4.3'te bir girişim kaynağı ile mağdur cihaz arasındaki kuplaj mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.3. EMI kuplaj mekanizmaları

Kaynak: https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_compatibility
Erişim tarihi: 17 Nisan 2020

Elektromanyetik dalgalar katı, sıvı ve gaz farketmeksizin maddenin üç halinden geçerek yayılabilir. Delik ve yarıklardan geçebileceği sızıntısız katı malzemelerde de geçebilir. EM dalgalar bu özelliklerinden dolayı arada bir iletken

bulunmasa da başka bir cihaz, sistem ya da bileşeni ışımaya yollu girişim yaparak etkileyebilir. İletim yollu girişim ise gürültü sinyalinin iletkenler ile taşınarak bir cihaz, sistem ya da bileşeni etkilemesidir. Bu iki kuplaj yolu girişimin taşınma şekline göre farklı olsa da içinden akım geçen bir iletkenin faydalı ve faydasız işaretleri iletim yolu ile taşınmasının yanı sıra özellikle yüksek frekanslarda anten etkisi göstererek ışımaya yolu ile de ortama elektromanyetik enerji ile işaretler yayarlar. Aynı şekilde bir iletken, ortamdaki elektromanyetik gürültüyü anten gibi davranarak ışımaya yolu ile alıp iletim yolu boyunca taşıyabilir. Bu anlamda bazı girişim olaylarında bu iki kuplaj yolu birlikte değerlendirilmesi gerekebilir.

İletkenlerin pürüz, büküm ve kıvrımlar nedeniyle kaçak endüktans göstermesi endüktif kuplaja, birbirine yakın ve paralel olan iletkenlerin kondansatör etkisi oluşturmasıyla kaçak kapasitans göstermesi kapasitif kuplaja sebep olur (Sevgi, 2019).

Elektromanyetik girişim kuplaj mekanizmalarının özeti Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. EMI kuplaj mekanizmalarının özeti

Kuplaj yolu açıklaması	Kategori	Tipik gürültü kaynağı	Baskın fiziksel nicelik	Kuplaj yolu etkinliğinin nasıl azaltılabileceği
İletim yollu kuplaj, Ortak empedans	Galvanik	Yüksek akımlar	Ortak yol ve kabloda gürültü akımı gürültü voltajına yol açar	Gürültü kaynağı ve kurbanın ortak akım yolu ayrılmalıdır
Kapasitif kuplaj	Yakın- alan	Hızlı sinyal transiyentleri, yüksek voltaj	E-alan. Eğer elektrik alan baskınsa enerji $1/r^3$ oranında, değilse $1/r^2$ oranında düşer	Gürültü kaynağı sinyalinin transiyentleri azaltılmalıdır. Gürültü kaynağı ekranlanmalıdır
Endüktif kuplaj	Yakın- alan	Yüksek akımlar, bobinler, transformatörler	H-alan. Eğer manyetik alan baskınsa enerji $1/r^3$ oranında, değilse $1/r^2$ oranında azalır	Gürültü kaynağı ve kurbanın döngü alanları azaltılmalıdır. Gürültü kaynağı ve kurban ekranlanmalıdır
İşımaya yollu kuplaj	Uzak- alan	PCB yolları ve kablolar, anten yapıları	Elektromanyetik alan (EM-alan, E- ve H- alanlar birlikte). Enerji $1/r$ oranında azalır	Gürültü kaynağı ve kurban ekranlanarak aralarına filtre eklenmeli (ferrit ve kapasitör)

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-in-a-nutshell.>, Erişim tarihi: 17 Nisan 2020

4.2. Elektromanyetik Uyumluluk (EMC)

Çevremizde elektrikle çalışan cihaz ve sistemlerin artmasıyla aynı ortamda çalışan cihaz ve sistemlerin oluşturduğu elektromanyetik alanlar daha da karmaşık hale gelmektedir. Bu yoğun ve karmaşık elektromanyetik ortam içerisinde cihaz ve sistemlerin girişim problemleri oluşturmadan ve bu problemin mağduru haline gelmeden normal çalışmalarını sürdürebilmeleri önemli bir gerekliliktir.

Elektromanyetik girişim cihaz ve sistemlerin fonksiyonel ve güvenilir çalışabilmeleri açısından tehdit oluşturan bir problemdir. Elektromanyetik uyumluluk (EMC) ise elektromanyetik girişim problemlerinin yok edilmesi konusu işler. EMC ile EMI problemleri ortadan kaldırılarak cihaz ve sistemlerin beklendiği gibi çalışması sağlanır.

Elektromanyetik uyumluluk (EMC), uluslararası standartlarca “bir aygıt, donanım veya sistemin, bulunduğu elektromanyetik çevre içerisinde, bu çevreyi veya diğer donanımları rahatsız edecek düzeylerde elektromanyetik gürültü oluşturmadan ve ortamdaki diğer sistemlerin oluşturduğu girişimden etkilenmeden, kendisinden beklenen işlevlerini yerine getirme yeteneği” şeklinde tanımlanmaktadır (Arı ve Özen, 2008).

Bir cihaz veya sistem dışarıdan gelen EM enerjiden etkilenmeden çalışmasını sürdürebiliyorsa ve aynı zamanda ortamdaki diğer cihaz ve sistemlerin çalışması üzerinde olumsuz bir etki oluşturmuyorsa bu cihaz veya sistem elektromanyetik uyumlu kabul edilir.

EMC, bir cihaz veya sistemin elektromanyetik olarak istenmeyen şekilde etkilenmemesi ve diğer cihaz ve sistemleri de etkilememesi olarak tanımlansa da sistem içi elektromanyetik uyumluluk problemleri de olabilmektedir. Sistemler arası uyumluluğun yanı sıra sistem içi uyumluluk kavramı da EMC'nin bir parçasıdır.

Buna göre bir cihaz veya sistemin elektromanyetik uyumlu kabul edilebilmesi için;

- Ortamdaki doğal EM kaynaklardan ve diğer cihaz ve sistemlerin yaymış oldukları EM gürültüden etkilenmeden çalışmayı sürdürebilmesi
- Ortamdaki diğer cihaz ve sistemlerin çalışması üzerinde herhangi bir bozucu etki oluşturacak seviyede EM gürültü yaymaması

- Kendi içerisinde herhangi bir bileşenin başka bir bileşenin çalışması üzerinde EM olarak bozucu bir etki oluşturmaması

koşullarının tamamını karşılayabilmesi gerekir.

Cihaz veya sistemler tasarlandıktan sonra aynı ortam içerisinde birbirlerinin çalışması üzerinde olumsuz etkiler oluşturabildikleri için bu uyumsuzluk problemlerinin büyük ölçüde azaltılabilmesi için uluslararası standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlar da zamanla günümüz teknolojilerine uyumlu şekilde güncellenmekte ya da iptal edilerek yerini yeni standartlara bırakmaktadır.

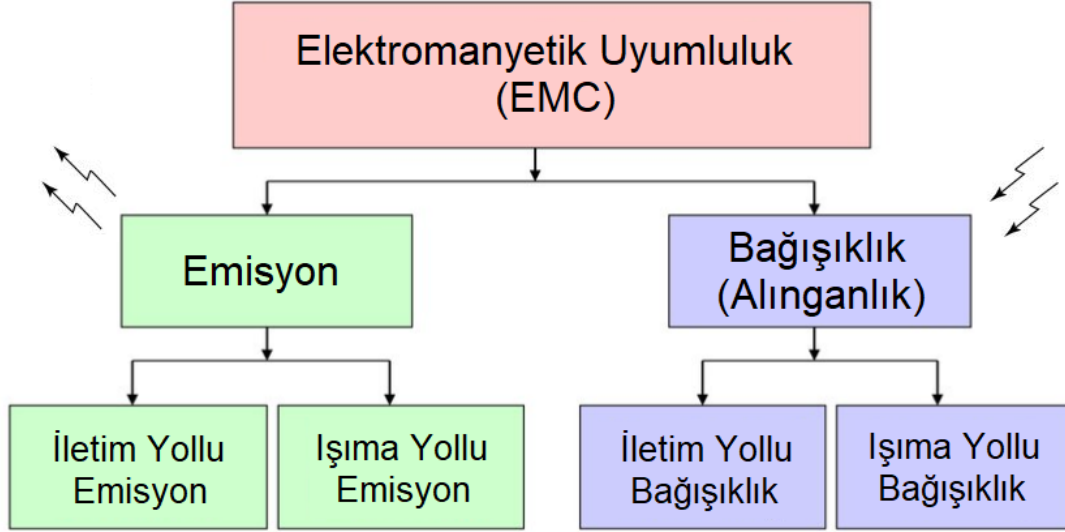
Bir elektromanyetik uyumluluk problemi oluşturan elektromanyetik girişim olayında girişim gürültüsü oluşturan kaynak, girişim gürültüsünden etkilenen kurban ve kaynaktan kurban gürültünün aktarıldığı kuplaj yolu olmak üzere üç unsur vardır. Kuplaj yolu ise iletim yollu ya da ışınım yollu olmak üzere iki çeşittir. Bir cihaz ya da sistem, bir girişim olayı modelinde kaynak ya da kurban olarak değerlendirilse de tüm girişim durumları birlikte ele alındığında bir cihaz ya da sistem aynı anda hem girişim kaynağı hem de kurban olarak yer alır. Bir cihaz ya da sistem için EMC bu noktada ikiye ayrılır. Cihaz veya sistemin diğer cihaz veya sistemlerin çalışması üzerinde tehdit oluşturmayacağı kadar elektromanyetik girişim oluşturması, cihaz veya sistemin yaydığı elektromanyetik gürültünün ölçülerek standartlarca izin verilen belli limitlerin altında kalması sağlanarak oluşturulur. Bu şekilde cihazın yaydığı elektromanyetik gürültünün ölçülerek yaydığı elektromanyetik gürültünün tehlikesiz seviyelere çekilmesi EMC'nin emisyon (yayılm) tarafını oluşturur. Bir cihaz veya sistemin uluslararası standartlarca belirlenen seviyelerde elektromanyetik girişim gürültüsüne maruz bırakılarak çalışmasında geçici ya da kalıcı fonksiyon kayıpları olup olmadığının test edilmesi EMC'nin bağışıklık (immunity) tarafını oluşturur.

EMC'nin dört temel etkileşim biçimi;

- İletim yollu emisyon (Conducted Emissions - CE)
- İletim yollu bağışıklık/alınanlık (Conducted Immunity/Susceptibility – CS)
- Işınım yollu emisyon (Radiated Emissions – RE)
- Işınım yollu bağışıklık/alınanlık (Radiated Immunity/Susceptibility – RS)

olarak ifade edilmektedir.

Bir cihaz ya da sistemin EMI'ye karşı göstermiş olduğu bağışıklık ve yaydığı emisyonun kuplaj yollarına göre ayrılmasıyla EMC'nin ana hatları ortaya çıkmaktadır. EMC'nin genel sınıflandırması Şekil 4.4.'te verilmiştir.



Şekil 4.4. EMC'nin genel sınıflandırması

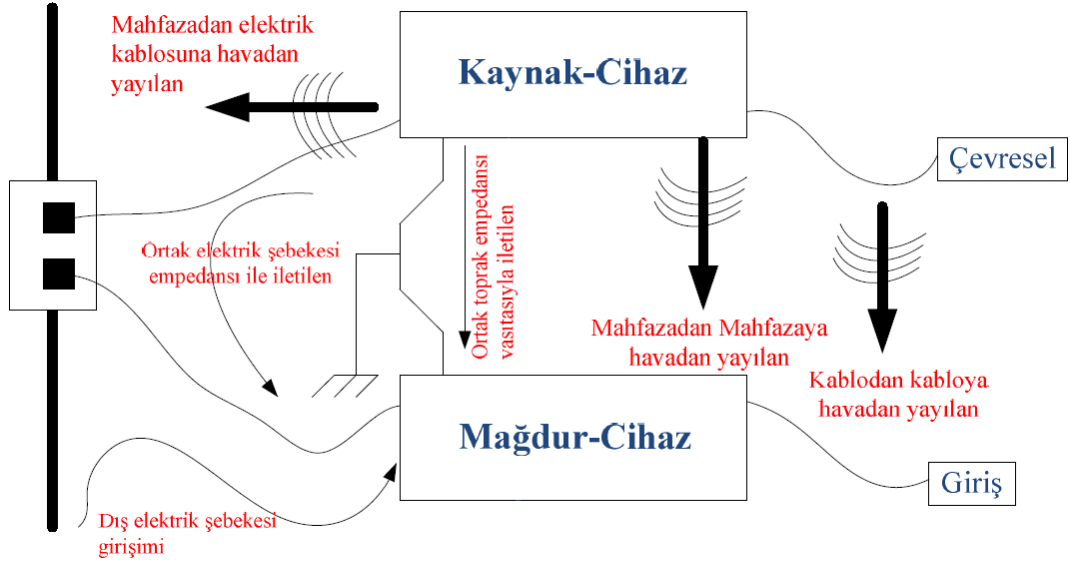
Bir cihaz ya da sistemin elektromanyetik uyumluluğu belirlenirken test ifadesi kullanılsa da aslında emisyon değerleri ölçülmekte, bağışıklık seviyesi ise test edilmektedir. Bağışıklık (immunity) ifadesi yerine hassasiyet ya da alınanlık (susceptibility) kavramları da kullanılmaktadır. Ancak bu yerine kullanımda bağışıklık ile hassasiyet ve alınanlık ifadelerinin birbirlerinin tersi olarak kullanıldığına dikkat edilmelidir. Düşük bağışıklık, yüksek hassasiyet ve yüksek alınanlığa karşılık gelir. Yani bir cihaz ya da sistemin elektromanyetik olarak bağışıklığını artırmak onun hassasiyetini ve alınanlığını düşürmek demektir.

İletim yollu girişim genellikle 30 MHz frekansına kadar, ışınım yollu girişim ise 30 MHz'den sonrasını kapsar. Bunun sebebi iletkenlerde iletim yollu girişim gürültüsü sinyallerinin 30 MHz'den sonra etkisini yitirmesidir. 30 MHz'den daha büyük frekanstaki girişim gürültülerinde iletkenler anten gibi davranarak ışınım gerçekleştirirler. Bu yüzden 30 MHz frekansı, iletim yollu girişim ile ışınım yollu girişim arasında bir sınır olarak kabul edilir.

Bir elektromanyetik uyumluluk probleminin çözülmesi için elektromanyetik girişimin ortadan kaldırılması üç şekilde olabilir:

- Girişim kaynağı yok edilebilir. Elektromanyetik girişimin kaynağı tespit edilerek ortadan kaldırılabılır, tasarımı değiştirilebilir, farklı malzeme ya da komponent kullanılarak gürültü kaynağının oluşturduğu emisyon problem ortadan kaldırılıncaya kadar azaltılabilir.
- Kurban sağlamlştırılarak alınganlık seviyesi düşürülebilir. Elektromanyetik gürültüden etkilenen mağdur, kaynağın oluşturduğu emisyondan etkilenmeyecek kadar bağışıklık seviyesi yükseltilebilir.
- Kuplaj yolları ortadan kaldırılabilir. Kaynaktan yayılan elektromanyetik gürültünün kurban cihaza ulaştığı kuplaj yolu ortadan kaldırılarak veya zayıflatılarak elektromanyetik gürültünün kurbanı iletimi önlenabilir. Genelde ekranlama ve filtreleme teknikleri ile gerçekleştirilir.

Aynı şebekeye bağı iki cihazın arasındaki elektromanyetik girişim etkileşim etkileşimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

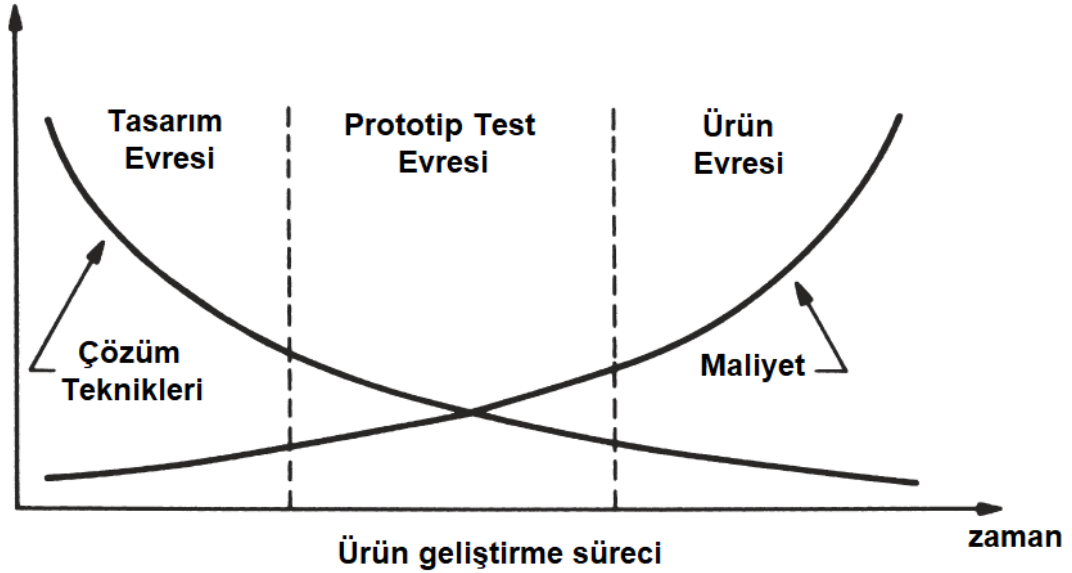


Şekil 4.5. Aynı şebekeye bağı cihazlar arasındaki EMI etkileşimi

Kaynak: Beer, 2008:17

Elektromanyetik uyumluluk problemlerinin çözümü tasarım aşamasında genelde daha basittir. Bu evrede problemlerin ortadan kaldırılması için daha çok seçenek bulunur ve daha düşük maliyet gerektirir. Tasarım geliştirme aşamasından sonra ürün prototipi ile yapılan test evresi ve sonrasında ürün evresi gelir. Tasarım aşamasından ürün haline gelinceye kadarki bu süreçte zaman geçtikçe EMC problemlerine çözüm bulmak hem güçleşir hem de maliyetli hale gelir. Bu nedenle zorlu ve maliyetli EMC problemleriyle karşılaşmamak için bir cihaz veya sistem henüz

tasarlanmamışken EMC gereklilikleri belirlenmeli ve EMC kriterlerine uygun şekilde tasarım yapılarak tüm süreç içerisinde elektromanyetik uyumluluğun sürekliliği sağlanmalıdır. Bir cihaz veya sistemin tasarım geliştirmesinden son ürün haline gelinceye kadarki süreçte EMC problemlerine karşı uygulanabilecek tekniklerin miktarı ve çözüm maliyetlerine ait grafik Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Ürün geliştirme sürecinde EMC teknikleri ve maliyet

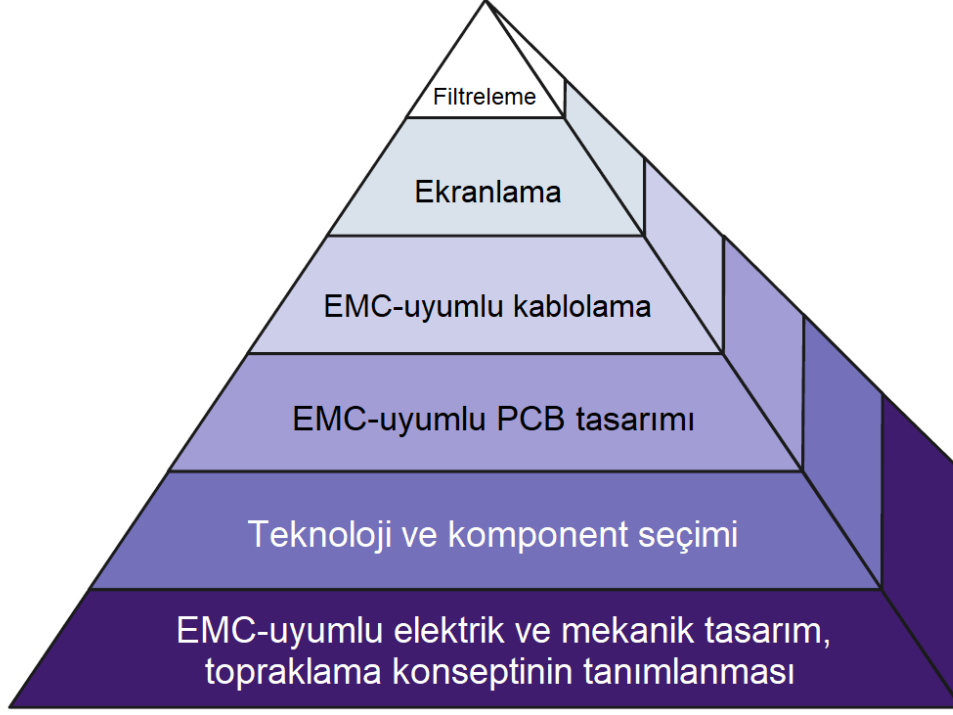
Kaynak: Ott, 2009:5

Bir cihaz veya sistemin ürün geliştirme süreci içerisinde genellikle, tasarım geliştirme evresinde girişim kaynağının yok edilmesi ve kurbanın sağlamaştırılması teknikleri kullanılırken ürün evresinde kuplaj yollarının ortadan kaldırılması teknikleri kullanılmaktadır. Çünkü tasarımı tamamlanmış cihazlar üzerinde alt seviyelerde çözüm uygulamak zor hale gelir. Bunun yerine üründe ekranlama ve filtre ekleme gibi tasarıma çok fazla müdahale etmek zorunda kalınmayan çözümler tercih edilir. Ancak bu çözümler çok daha maliyetlidir.

Elektromanyetik girişim sebebiyle oluşan elektromanyetik uyumluluk problemleri aşağıdaki seviyelerde gerçekleşir:

- Sistem seviyesi
- Ekipman (veya alt sistem) seviyesi
- Devre kartı seviyesi
- Komponent seviyesi

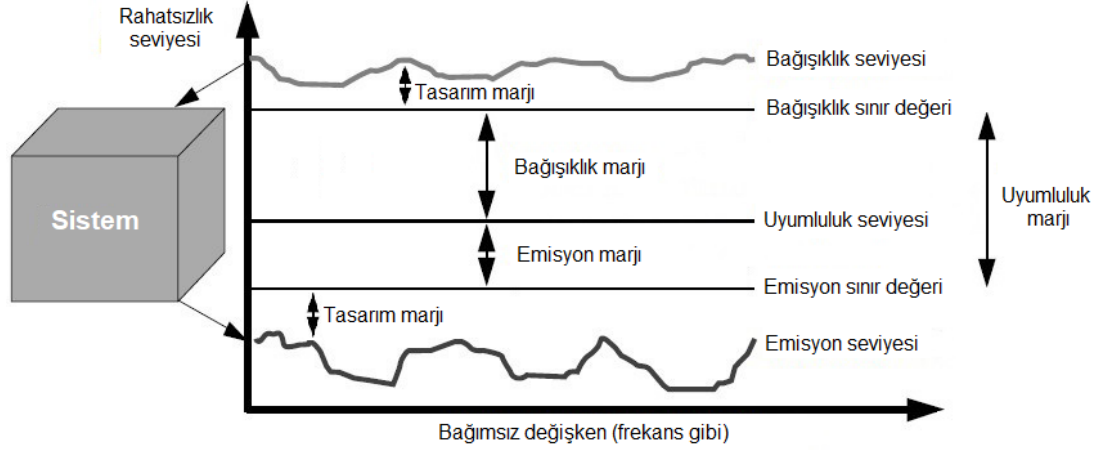
EMC uyumlu bir cihaz veya sistem geliştirmesinde elektrik ve mekanik tasarım ile topraklama konseptinin kullanımı sistemin EMC performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Şekil 4.7’de elektronik bir sistem geliştirmedeki temel adımlar verilmiştir. Bu piramitte aşağıdan yukarıya tekniklerin uygulama sırasını vermekte ve her bir katmanın boyutu o adımın önemini vermektedir (Lienig and Bruemmer, 2017).



Şekil 4.7. EMC uyumlu elektronik sistem geliştirmede temel adımlar

Kaynak: Lienig and Bruemmer, 2017:183

Bir cihaz tasarımında I cihazın bağışıklık seviyesini, E cihazın maruz kaldığı emisyon seviyesini göstermek üzere, cihazın EMC uyumluluk koşulu $I > E$ bağıntısı ile mümkündür. Buna göre cihaz maruz kaldığı emisyon seviyesinden daha büyük bir bağışıklık seviyesinde tasarlanmalıdır. Buradaki bağışıklık seviyesinin emisyon seviyesi ile farkı bağışıklık tasarım marjını vermektedir. Cihazın yaymış olduğu emisyon seviyesi ise standartların izin verdiği emisyon sınır değerinin altında olmalıdır. Cihazın emisyon seviyesi ile izin verilen emisyon sınır değerı arasındaki fark emisyon tasarım marjını vermektedir. Tasarım marjları ne kadar büyük olursa cihazın uyumluluk seviyesi de o kadar yüksek olacaktır. Bir cihaz için bağışıklık, emisyon değerleri ile tasarım ve uyumluluk marjları arasındaki ilişki Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Bir cihaz için EMC sınır değerleri ve uyumluluk seviyesi

Kaynak: ABB, 2018:5

4.3. Temel EMC Birimleri ve Desibel Tanımı

Elektromanyetik uyumluluk alanında temel devre teorisi ve elektromanyetik teori birimleri kullanılmaktadır. Ancak bu birimler genellikle desibel karşılıkları ile kullanılır. EMC alanında kullanılan temel büyüklükler, birimleri ve test/ölçümlerde sıkça kullanılan desibel formlarıyla Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Temel EMC Birimleri

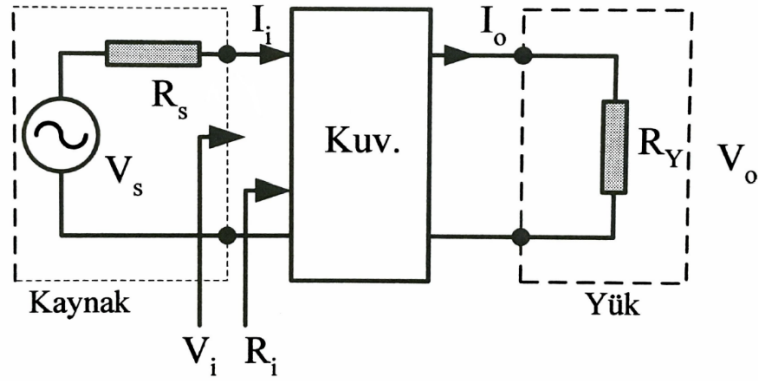
Değişkenin Tanımı	Birimi	EMC’de sıkça kullanılan dB formu
V: Gerilim	V	$\text{dB}\mu\text{V}$, dBmV
I: Akım	A	$\text{dB}\mu\text{A}$, dBmA
E: Elektrik alan şiddeti	V/m	$\text{dB}\mu\text{V/m}$, dBmV/m
H: Manyetik alan şiddeti	A/m	$\text{dB}\mu\text{A/m}$, dBmA/m
P: Güç	W	$\text{dB}\mu\text{W}$, dBmW
S: Güç yoğunluğu	W/m^2	$\text{dB}\mu\text{W/m}^2$, dBmW/m^2

Devre teorisi ve elektromanyetik teorinin birimlerine ait karşılaştırma Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Devre teorisi ve elektromanyetik teori birimleri

Devre teorisi	Elektromanyetik teori
Voltaj V (Volt)	Elektrik alan E (V/m)
Akım I (Amper)	Manyetik alan H (A/m)
Empedans Z (Ohm)	Karakteristik empedans Z_0 (Ohm)
$Z = V/I$	$Z = E/H$
$P = I^2 \times R$ (Watt)	$P = H^2 \times 377$ (Watt/m ²) uzak alan koşulu

Desibel, bir büyüklüğü doğrusal yerine logaritmik olarak ifade eden bir ölçme birimidir. EMC’de temel elektriksel büyüklükler ve güç kazancı/kaybını tanımlamak için sıklıkla kullanılır. Desibelin kısaltması olarak “dB” kullanılır. Desibeli tanımlamak için bir kuvvetlendirici temel devre modeli Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu devrede kuvvetlendiricinin girişi, gerilimi V_s , iç direnci R_s olan bir kaynağa bağlanmıştır. Kuvvetlendiricinin çıkışı, direnci R_Y olan bir yüke bağlanmıştır.



Şekil 4.9. dB tanımı için temel devre modeli

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:24

V_i, I_i, R_i giriş değişkenleri, I_o, R_Y çıkış değişkenleri olmak üzere,

$$P_i = \frac{V_i^2}{R_i} \quad (4.1)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_Y} \quad (4.2)$$

giriş ve çıkış güçleri olur. Güç kazancı, çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanır ve dB cinsinden güç kazancı,

$$\text{Güç kazancı} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_o}{P_i} \right) [\text{dB}] \quad (4.3)$$

olarak ifade edilir. Güç ifadeleri gerilim ve direnç cinsinden yazılırsa,

$$\text{Güç kazancı} = 10 \log_{10} \left(\frac{V_o^2 / R_Y}{V_i^2 / R_i} \right) [\text{dB}] \quad (4.4)$$

$$\text{Güç kazancı} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_o}{V_i} \right) - 10 \log_{10} \left(\frac{R_Y}{R_i} \right) [\text{dB}] \quad (4.5)$$

şekillerinde ifade edilebilir. $R_Y = R_i$ olması durumunda, gerilim ve akım oranlarına bağlı,

$$\text{Gerilim kazancı} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_o}{V_i} \right) [\text{dB}] \quad (4.6)$$

$$\text{Akım kazancı} = 20 \log_{10} \left(\frac{I_o}{I_i} \right) [\text{dB}] \quad (4.7)$$

gerilim kazancı ve akım kazancı ifadeleri elde edilir. Desibel cinsinden aynı formdaki büyüklüklerin oranları,

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) (\text{Güç oranları}) \quad (4.8)$$

$$\text{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) (\text{Gerilim oranları}) \quad (4.9)$$

$$\text{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{I_2}{I_1} \right) (\text{Akım oranları}) \quad (4.10)$$

eşitlikleriyle tanımlanır.

EMC’de yaygın olarak kullanılan güç, voltaj ve akım seviyeleri dBm, dB μ V ve dB μ A’dır. Bunlar,

$$[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \quad (4.11)$$

$$[\text{dB}\mu\text{V}] = 20 \log_{10} \left(\frac{V}{1 \mu\text{V}} \right) \quad (4.12)$$

$$[\text{dB}\mu\text{A}] = 20 \log_{10} \left(\frac{I}{1 \mu\text{A}} \right) \quad (4.13)$$

şeklinde hesaplanır. Negatif bir dBm değeri, güç seviyesinin 1 mW’ın altında olduğunu anlamına gelir. 1 mW, 0 dBm’e karşılık gelir ve pozitif bir dBm değeri gücün 1 mW’tan büyük olduğu anlamına gelir.

Eğer P_o , P_i ’den büyükse dB değeri pozitif olur. Bu güç kazancının olduğunu yani kuvvetlendirme olduğunu gösterir. Eğer P_o , P_i ’den küçükse dB değeri negatif olur. Sönümlenme olduğunu yani güç kaybı olduğunu gösterir. Kesim frekansında P_o , P_i ’nin yarısıdır. Bu durumda güç, gerilim ve akım kazançlarının tamamı -3 dB olur.

Güç iki katına çıktığında 3 dB artar, yarıya indiğinde 3 dB azalır. Güç 10 katına çıktığında 10 dB artar, 10 kat azaldığında 10 dB azalır. Gerilim ve akım iki katına çıktığında 6 dB artar, yarıya indiğinde 6 dB azalır. Gerilim ve akım 10 katına çıktığında 20 dB artar, 10 kat azaldığında 20 dB azalır.




Lineer akım, gerilim ve güç değerlerinin dB cinsinden karşılıkları Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Desibel cinsinden birim dönüşümleri

Lineer oran	Güç (dB cinsinden)	Gerilim veya akım (dB cinsinden)
0,000 001	-60 dB	-120 dB
0,000 01	-50 dB	-100 dB
0,000 1	-40 dB	-80 dB
0,001	-30 dB	-60 dB
0,01	-20 dB	-40 dB
0,1	-10 dB	-20 dB
1	0 dB	0 dB
2	3,0 dB	6 dB
3	4,8 dB	9,5 dB
5	7,0 dB	14,0 dB
7	8,5 dB	16,9 dB
8	9,0 dB	18,1 dB
9	9,5 dB	19,1 dB
10	10,0 dB	20 dB
20	13,0 dB	26,0 dB
30	14,8 dB	29,5 dB
50	17,0 dB	34,0 dB
100	20 dB	40 dB
1 000	30 dB	60 dB
10 000	40 dB	80 dB
100 000	50 dB	100 dB
1 000 000	60 dB	120 dB

4.4. EMC Açısından Devre Elemanları

Direnç, bobin, kondansatör gibi devre elemanları hesaplamalarda genelde ideal davrandıkları varsayılır. Ancak frekans etkisiyle ideal davranışlardan uzaklaşırlar. EMC’de özellikle yüksek frekans gürültüleri sebebiyle temel devre elemanlarının frekansa bağlı davranışlarının iyi anlaşılması gereklidir. Temel devre elemanları, birimleri, sembolleri ve empedansları Şekil 4.10’da verilmiştir.

Direnç	R [Ω]		$Z = R$
Endüktans	L [Henry]		$Z_L = j\omega L$
Kondansatör	C [Farad]		$Z_C = -j(\omega L)^{-1}$

Şekil 4.10. Temel devre elemanları

Kaynak: Sevgi, 2006:145

4.4.1. İletken Telin Direnci

İletken bir telde DC ve alçak frekanslarda akım homojen bir dağılım oluşturur. Frekans yükseldikçe elektrik yükleri iletkenin dış yüzeylerine doğru yönelir. Bu olaya deri etkisi denir. Deri etkisi,

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \text{ [m]} \quad (4.14)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada,

$$\omega = 2\pi f \text{ (Açısal frekans)}$$

σ : iletkenlik sabiti (S/m)

$$\mu = \mu_r \mu_0 \text{ iletkenin manyetik geçirgenlik sabiti } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-10} \text{ H/m}$$

Yüzeydeki yük yoğunluğunun 1/e, %37'ye düştüğü derinliğe deri kalınlığı denir.

4.4.2. İletken Telin Endüktans Etkisi

Bir iletken telden akım geçtiğinde etrafında manyetik alan oluşmaktadır. Geçen akım AC ise telin uçlarında akımın değişimine tepki gösteren endüktans etkisi adında bir gerilim oluşur.

Uzunluğu l , çapı d olan düz bir iletken telin endüktansı,

$$L = 0,002 \times l \times \left\{ 2,3 \log_{10} \left(\frac{4l}{d} - 0,75 \right) \right\} \text{ [\mu H]} \quad (4.15)$$

eşitliğinden yaklaşık olarak hesaplanabilir (Sevgi, 2006). Bir mikroşerit devrede bağlantı iletkenlerinin endüktans etkisi EMC açısından hesaba katılmalıdır. İletken yollar için 1 cm başına 7-8 nH gibi bir endüktif etki göz önüne alınmalıdır.

Uzunlukları l , aralarındaki mesafe b , çapları d olan birbirine paralel iki iletkenin oluşan bir iletim hattının endüktansı,

$$L = \mu \frac{b \cdot l}{d} \text{ [H]} \quad (4.16)$$

eşitliğinden hesaplanabilir.

4.4.3. İletken Tellerin Kapasitif Etkisi

EMC’de özellikle empedansın düşük tutulması gereken topraklama iletkenlerinde kapasitif etki olumsuz bir durum oluşturur. Topraklama iletkenlerinin sahip oldukları düşük miktardaki kapasitif etki bile yüksek frekanslarda topraklama etkinliğinin azalmasına neden olur.

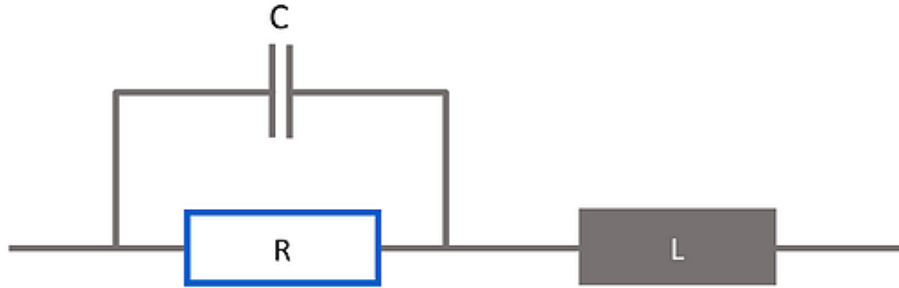
Uzunlukları l , çapları d , aralarındaki mesafe b olan iki paralel iletkenin oluşan bir iletim hattının kapasitif etkisi,

$$C = \epsilon \frac{d \cdot l}{b} \text{ [F]} \quad (4.17)$$

olarak yaklaşık bir şekilde bulunabilir (Sevgi, 2006).

4.4.4. Gerçek RLC Modelleri

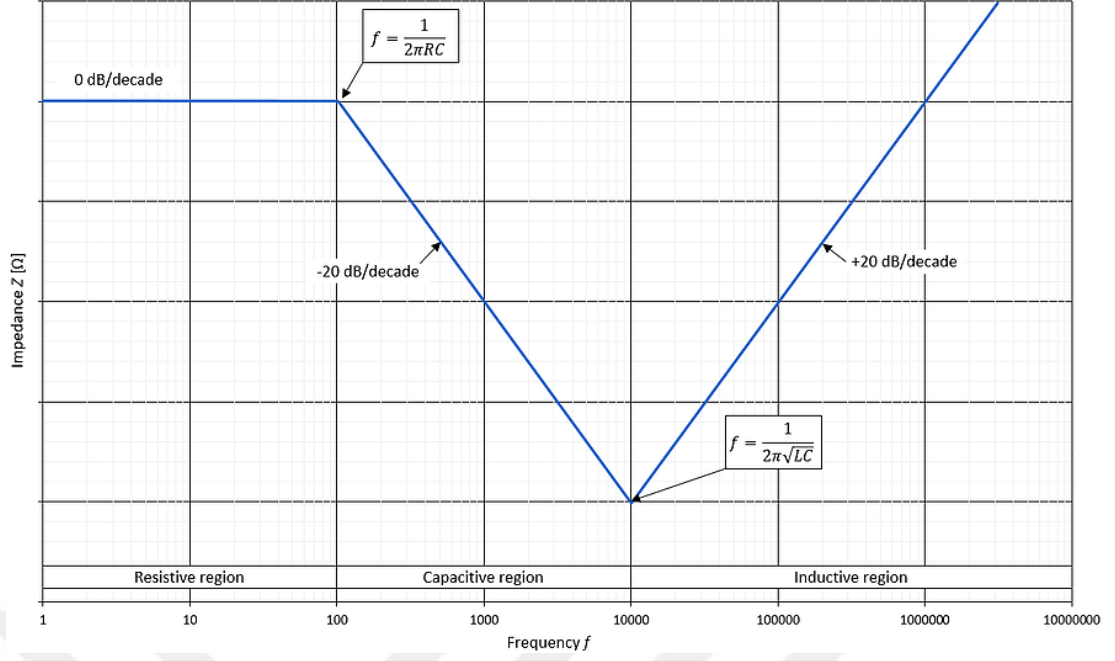
Frekans yükseldikçe temel devre elemanları ideal davranış göstermekten uzaklaşırlar. Pasif devre elemanı olarak bir direnç gerçekçi olarak modellenirken dirence paralel bir kapasitans ve bunları seri bir endüktans ile modellenir. Bir direncin gerçek modellemesine ait eşdeğer devre Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Bir direncin gerçekçi modeline ait eşdeğer devre

Kaynak: [https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base.](https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/), Erişim tarihi: 22 Nisan 2020

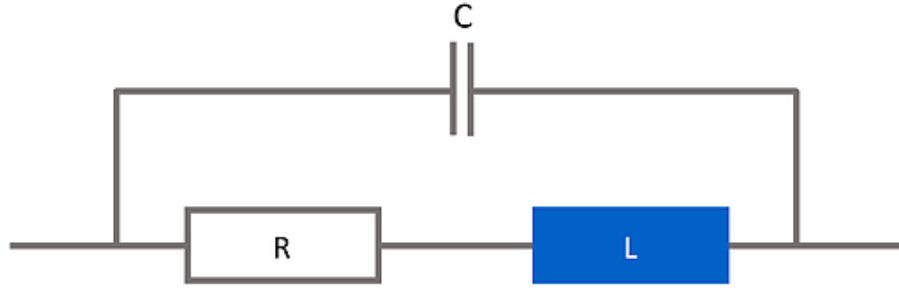
DC gerilimden düşük frekanslara doğru direnç omik etki gösterir. Frekans arttıkça empedans L 'nin rezonans frekansına kadar düşmeye başlar ve rezonans frekansında minimum olur. Rezonans frekansından sonra frekans yükseldikçe empedans artar. Bir direncin empedansının frekansa göre değişimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Gerçek direnç modeli empedansı

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2020

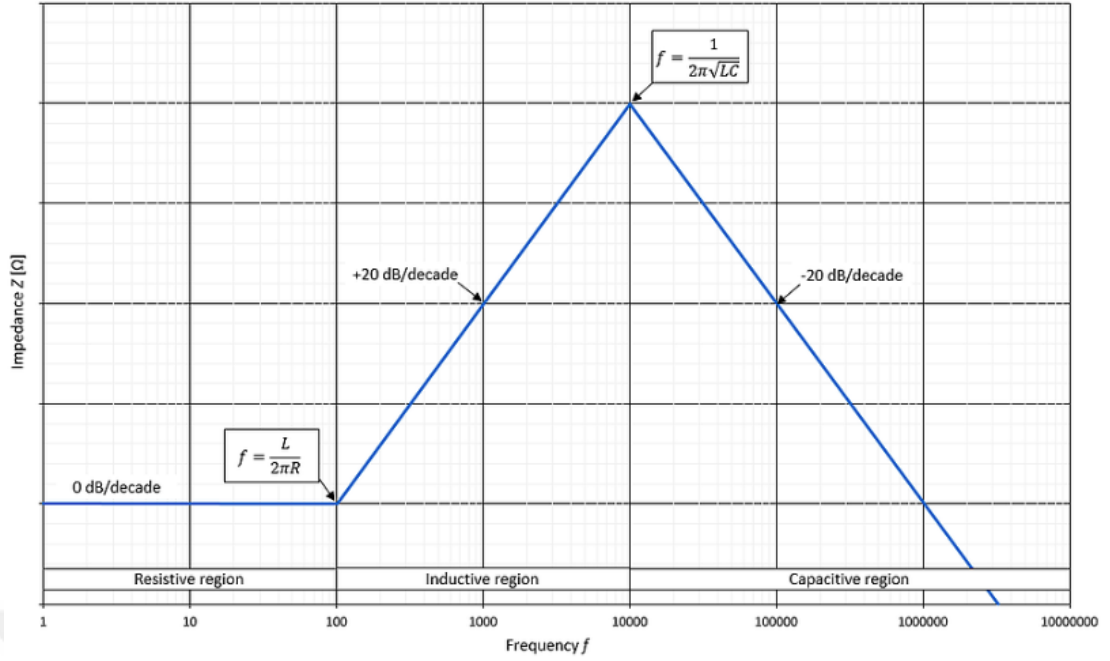
Bir endüktans devre elemanı kendisine seri bir direnç ve bunlara paralel bir kapasitans şeklinde modellenebilir. Bir endüktansın gerçek modellenmesine ait eşdeğer devre Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Bir endüktansın gerçekçi modeline ait eşdeğer devre

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2020

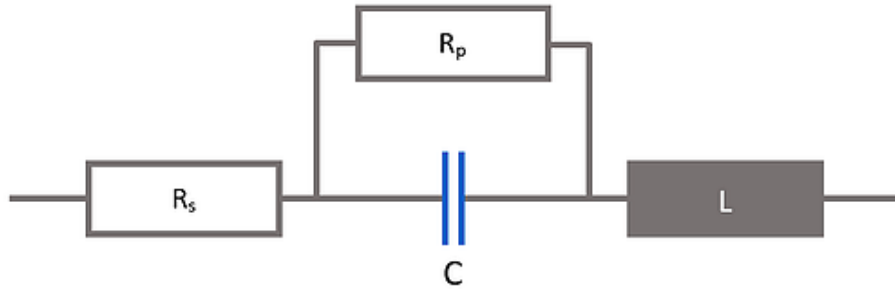
DC ve düşük frekanslarda empedans omik iken L ve C 'nin paralel rezonans frekansına kadar frekans yükseldikçe empedans artar ve maksimum olur. Rezonans frekansından itibaren frekans yükseldikçe empedans düşmeye başlar. Bir endüktansın empedansının frekansa göre değişimi Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Gerçek endüktans modeli empedansı

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2020

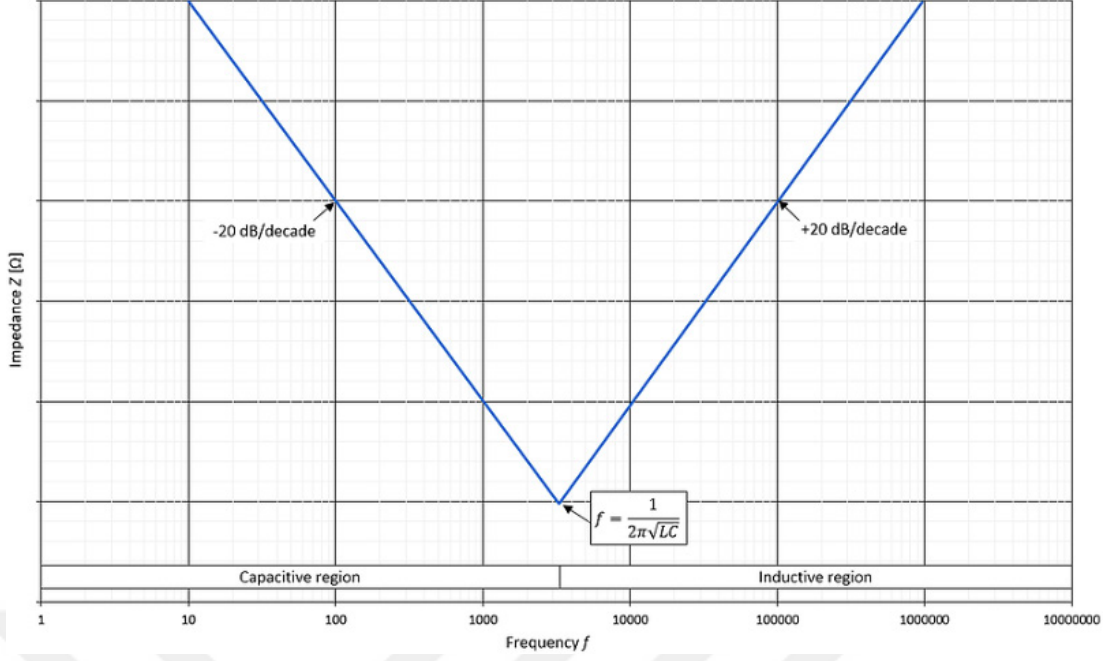
Bir kapasitans devre elemanı kendisine paralel bir direnç ve bunlara seri endüktans ve direnç ile modellenebilir. Bir kapasitansın gerçek modellenmesine ait eşdeğer devre Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Bir kapasitansın gerçekçi modeline ait eşdeğer devre

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2020

DC'den seri rezonans frekansına kadar kapasitans baskın olup empedans düşer. Rezonans frekansından daha yüksek frekanslarda endüktans baskın olur, empedans yükselir. Bir kapasitansın empedansının frekansa göre değişimi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Gerçek kapasitans modeli empedansı

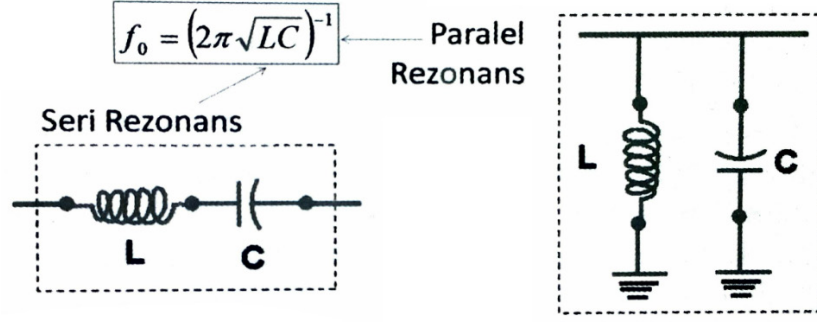
Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2020

4.4.5. Rezonans Devreleri

Kapasitör ve bobinden oluşan devrelere rezonans devresi denir. Rezonans ise genliğin sonsuza gitme eğilimidir ve bu frekans rezonans frekansı olarak ifade edilir. Kapasitör ve bobinden oluşan devrelerde çok düşük frekanslarda bobin kısa devre gibi, kapasitör açık devre gibi davranır. Çok yüksek frekanslarda ise bobin açık devre gibi, kapasitör kısa devre gibi davranır. Seri ve paralel rezonans devrelerinde rezonans frekansı,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (4.18)$$

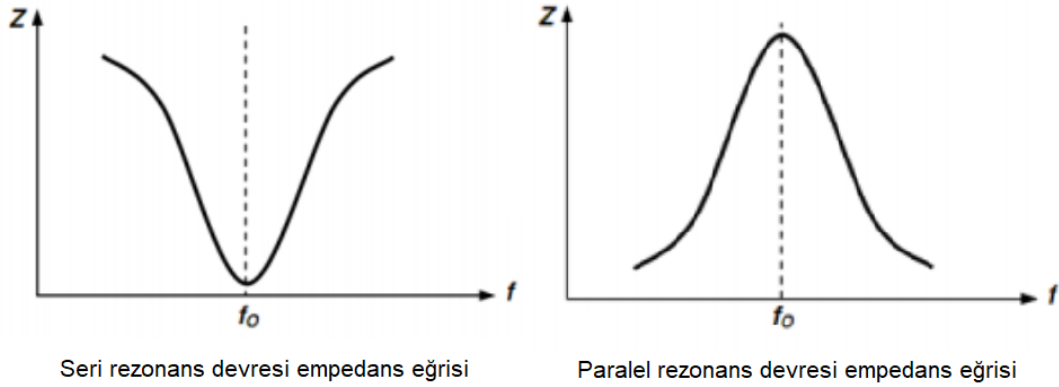
eşitliği ile bulunur. Seri ve paralel rezonans devrelerinin rezonans frekansında gösterdikleri davranış birbirinin tersidir. İdeal seri ve paralel rezonans devreleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Seri ve paralel rezonans devreleri

Kaynak: Sevgi, 2006:168

Seri rezonans devresinde rezonans frekansında empedans idealde sıfır, gerçekte ise kaçak endüktans ve kapasitif etkiler sebebiyle empedans minimum değerde olur. Rezonans frekansında seri rezonans devresinde kısa devre davranışı gözlenir. Paralel rezonans devresinde rezonans frekansında empedans idealde sonsuz, gerçekte ise kaçak endüktans ve kapasitif etkiler sebebiyle empedans maksimum değerde olur. Rezonans frekansında paralel rezonans devresinde açık devre davranışı gözlenir. Seri ve paralel rezonans devrelerine ait frekansa bağlı empedans eğrileri Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Seri ve paralel rezonans devrelerinin empedans eğrileri

Pasif devre elemanları ideal olmamaları sebebiyle kayıplı özellik gösterirler. Bu durumda rezonans frekansıyla birlikte başka temel rezonans devre parametrelerine de bakılır. Bunlar,

Kesim frekansları: Frekans karakteristiğinde genlik maksimum değerinin 3 dB düştüğü yani $1/\sqrt{2}$ 'si kadar olduğu f_1 ve f_2 olarak tanımlanan alt ve üst kesim frekanslarıdır.

Bant genişliği (BG): Alt ve üst kesim frekansları arasındaki farktır.

BG bant genişliği, f_0 rezonans frekansı, f_1 ve f_2 alt ve üst kesim frekansı, Q kalite faktörü olmak üzere,

$$BG = f_2 - f_1 = \frac{Q}{f_0} \text{ [Hz]} \quad (4.19)$$

eşitliği ile bant genişliği bulunabilir.

Kalite faktörü (Q): Devrenin frekans seçiciliğini gösterir. Yüksek Q değeri iyi frekans seçiciliği anlamına gelir. Kalite faktörü,

$$Q = \frac{f_0}{BG} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (4.20)$$

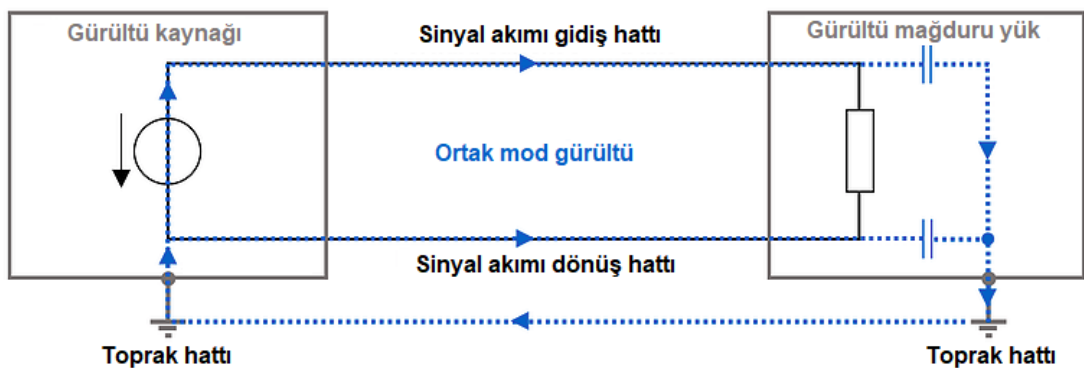
eşitliği ile hesaplanır.

4.5. Gürültü Akım Modları

EMC’de gürültü akımları ortak mod (CM) ve farksal mod (DM) olmak üzere iki türdür.

4.5.1. Ortak Mod Akımları

Gürültü kaynağından yüke doğru iletim hattının tüm iletkenleri üzerinden yük yönünde ilerleyen ve toprak hattı üzerinden devreyi tamamlayarak dönen gürültü akımıdır. Ortak mod akımları Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Ortak mod akımları

Kaynak: [https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base.](https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/), Erişim tarihi: 24 Nisan 2020

Ortak mod akımlarının neden olduğu elektromanyetik ışıma frekansla doğru orantılıdır. Ortak mod akımlarının neden olduğu ışınım yollu yayılım,

$$|E_{CM,max}| = 1,257 \times 10^{-6} \times \frac{|I_{CM}|fL}{d} \text{ [V/m]} \quad (4.21)$$

I_{CM} : Kablodaki ortak mod akımı (A)

f : Frekans (Hz)

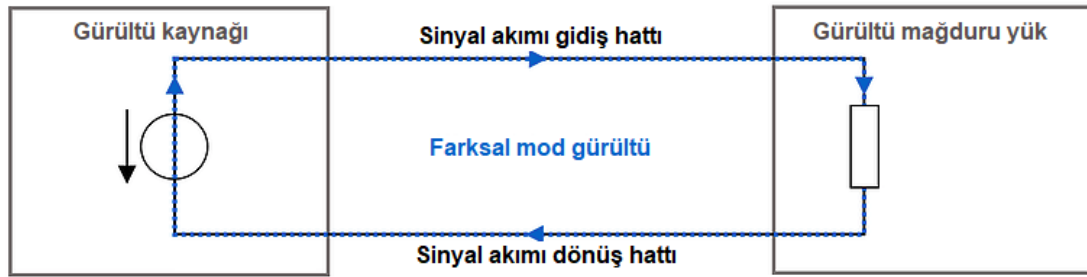
L : Kablo uzunluğu (m)

d : Ölçüm mesafesi (m) (tipik olarak 3 m veya 10 m)

formülü ile yaklaşık olarak bulunabilir (André and Wyatt, 2014).

4.5.2. Farksal Mod Akımları

Gürültü kaynağından yüke doğru gidiş iletkeni üzerinden giderek dönüş iletkeni üzerinden geri dönen gürültü akımlarıdır. Tüm iletkenlerde faydalı sinyal akımı ile aynı yönde ilerler. Farksal mod akımları Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Farksal mod akımları

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base/>, Erişim tarihi: 24 Nisan 2020

Farksal mod akımlarının neden olduğu elektromanyetik ışıma frekansın karesi ile doğru orantılıdır. Farksal mod akımlarının neden olduğu ışınım yollu yayılım,

$$|E_{DM,max}| = 2,63 \times 10^{-14} \times \frac{|I_{DM}|f^2Ls}{d} \text{ [V/m]} \quad (4.22)$$

I_{DM} : Döngüdeki farksal mod akımı (A)

f : Frekans (Hz)

L : Döngü uzunluğu (m)

s : Döngü aralığı (m)

d : Ölçüm mesafesi (m) (tipik olarak 3 m veya 10 m)

formülü ile yaklaşık olarak bulunabilir (André and Wyatt, 2014).

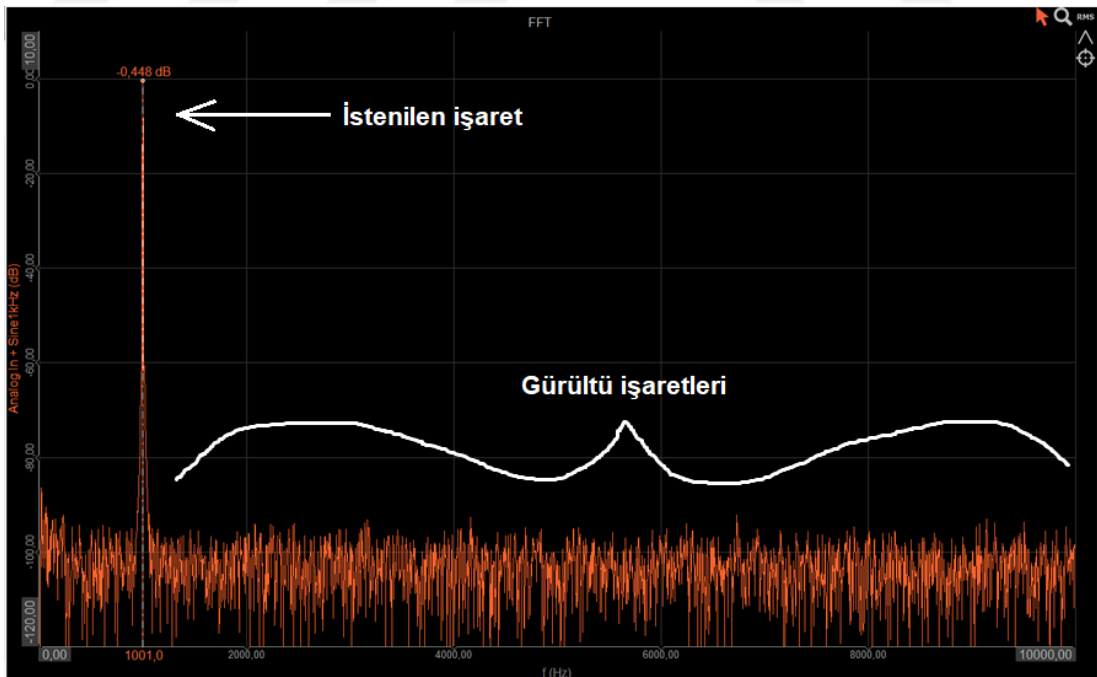
4.6. Sinyal ve Frekans Analizi

EMC problemlerine gürültü sinyalleri neden oldukları için sinyal temellerinin ve oluşturan parametrelerin bilinmesi gereklidir. Gerçekte ideal olmayan durumlar sebebiyle faydalı sinyaller istenmeyen sinyal bileşenlerini de beraberinde taşırlar. Gürültü adı verilen bu bozucu sinyaller faydalı sinyalin kalitesini düşürmekte hatta bazen faydalı işaretin anlamını bozacak kadar etki oluşturabilmektedir. Faydalı sinyal ile istenmeyen gürültü sinyalinin arasındaki bu ilişki sinyal gürültü oranı (SNR - Signal to Noise Ratio) denilen bir oran ile ölçülür.

Sinyal gürültü oranı dB cinsinden hesaplanır. A_{sinyal} sinyal genliğinin, $A_{gürültü}$ ise gürültünün karekök ortalaması (root mean square – RMS) değeri olmak üzere,

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{sinyal}}{P_{gürültü}} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{sinyal}}{A_{gürültü}} \right) = (A_{sinyal,dB} - A_{gürültü,dB}) \quad (4.23)$$

eşitlikleri kullanılarak dB cinsinden sinyal gürültü oranı elde edilebilir. SNR değeri ne kadar büyükse sinyal kalitesi o kadar iyidir. İstenilen işaret ve gürültü işaretlerinin frekans düzlemindeki görüntüsü Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Frekans düzleminde sinyal ve gürültü

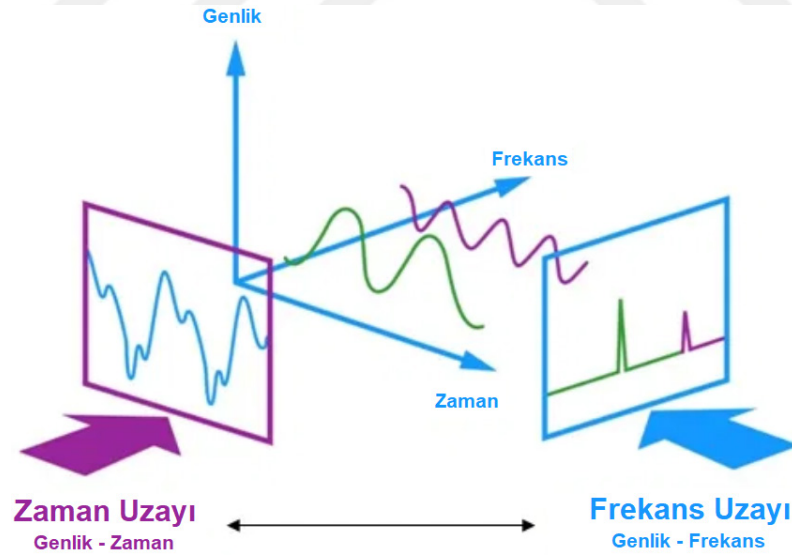
Kaynak: <https://www.monodaq.com/applications/measurement-basics-signal-noise-ratio>
Erişim tarihi: 24 Nisan 2020

Bir sinyalin en önemli parametreleri sinyal genliği ve sinyalin frekansıdır. Aynı ortamda bulunan iki cihazın birbirini etkilemeden çalışabilmeleri şu iki koşuldan birinin gerçekleşmesiyle mümkün olur:

- Cihazlar farklı frekanslarda çalışmalıdır.
- Cihazlar aynı frekanslarda çalışmak durumundaysa mesafe artırılarak sinyal genliklerinin birbirlerini etkilemeyecek seviyelere kadar zayıflamaları sağlanır.

Zamanla değişen işaretler sinyal analizinde zaman uzayının yanı sıra daha çok frekans uzayında incelenir. Bir sinyal için frekans çok önemli bir parametre olduğundan sinyali zaman uzayından çok frekans uzayında incelemek çok daha kullanışlıdır. Sinyali zaman uzayında incelemek için osiloskop, frekans uzayında incelemek için spektrum analizörü kullanılır.

Bir sinyali zaman uzayı ile frekans uzayı arasında geçişi Fourier Analizi ile yapılabilir. Zaman uzayında T zaman periyoduna sahip bir sinusoidal sinyal frekans uzayında bu periyoda karşılık gelen frekansta ($f=1/T$) tek bir çizgi şeklinde görünür. Bir sinyalin zaman uzayı ve frekans uzayındaki görüntüleri Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22. Bir sinyalin zaman ve frekans uzayındaki görüntüleri

Kaynak: <http://play.fallows.ca/wp/radio/ham-radio/signal-analysis-morse-decoder>
Erişim tarihi: 24 Nisan 2020

Frekans analizinde temel bağıntı,

$$\text{zaman} \times \text{band genişliği} = \text{sabit} \quad (4.24)$$

şeklindedir. Sevgi (2006), zaman uzayı ile frekans uzayı arasında şu ilişki durumlarına ifade etmiştir:

- Zaman uzayında sonsuz süreli sinyalin enerjisi tek frekansta yoğunlaşır.
- Zaman uzayında dürtü ya da kısa darbe gibi anlık sinyallerin enerjisi tüm frekans eksenine yayılır.
- Darbe şeklindeki sinyaller geniş bantlıdır. Darbe süresi arttıkça frekans bandı daralır, darbe süresi kısaldıkça frekans bandı genişler.
- Darbesel bir sinyal sonsuz sayıda sinüs sinyalinin toplamından meydana gelmektedir.
- Tek bir dürtünün kapladığı frekans bandı limitte sonsuzdur. Bu da EMC açısından bütün frekansların etkilendiği anlamına gelir.
- Zaman uzayındaki çarpma işlemi frekans uzayında konvolüsyon işlemine denk gelir.

Fourier dönüşümü ile zaman uzayındaki bir sinyal frekans uzayına dönüşür.

Fourier dönüşümü

$$S(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.25)$$

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (4.26)$$

eşitlikleri ile sağlanarak zaman uzayı ve frekans uzayı arasında geçiş yapılabilir. Frekans analizinde kullanılan bu matematiksel dönüşümde Sevgi (2006), şu noktaların önemini vurgulamıştır:

- Fourier dönüşümü sürekli sinyaller için tanımlanan bir dönüşümdür.
- Bir sinyalin frekans analizi o sinyalin tüm zamanlarda gözlemlenmesi ile mümkündür.
- Bir $s(t)$ sinyalinin tüm frekans davranışı fourier dönüşüm formülü ile birebir belirlenir.
- Matematiksel olarak istenilen her frekansta ve frekans sıklığında çözüm sağlanabilir.

4.7. İletim Hatları Modeli

Enerji, haberleşme, veri sinyalleri taşıyan tüm iletkenler birer kuplaj yolu olarak kaynak ve yük arasında hem emisyon hem de bağışıklık tipinde büyük elektromanyetik uyumluluk sorunlarının önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bir noktadan başka bir noktaya enerji ya da sinyal taşınması iletim hatlarıyla gerçekleştirilir. İletim hattı hem gidiş hem de dönüş iletkenini kapsar. Sadece kablolar değil aynı zamanda bir sinyalin kritik dalga boyu olan $\lambda/20$ 'den uzun iletken yapılar da iletim hattı olarak ifade edilir. Sinyal dalga boyu λ 'nın $1/20$ 'sinden daha kısa olan iletkenler iletim hattı yerine R, L ve C değerlerine sahip basit iletkenler olarak düşünülür.

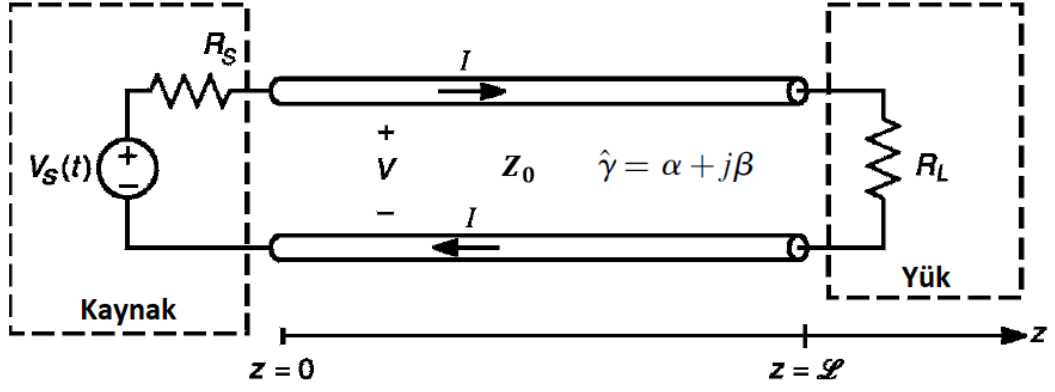
EMC'de gürültünün kaynaktan mağdur sisteme ulaşması kuplaj yolları ile mümkün olduğundan iletim hatları büyük öneme sahiptir. Kaynak, yük ve iletim hattı empedanslarının eşleşmemiş olması kaynaktan yüke maksimum güç aktarımını engeller. Ayrıca bu durum hatta yansımalar meydana getirir. Bir iletim hattının doğru şekilde sonlandırılmaması hem emisyon problemleri hem de bağışıklık problemlerini beraberinde getirir.

İletim hatlarının uzunluğu önemli olduğundan iletim hattı z eksenini boyunca yerleştirilirse, gerilim ve akım değerleri hem zamana hem de konuma göre değişen $v(z, t)$ ve $i(z, t)$ bağımsız değişkenleri kullanılır. Bir iletim hattının modellenmesinde kullanılan birincil hat parametreleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. R ve G parametreleri hat kayıplarını, L ve C parametreleri enerji depolamayı modellemektedir.

Çizelge 4.5. İletim hattı modellenmesinde hat parametreleri

Parametre Sembolü	Parametre Tanımı	Parametre Birimi
R	Birim boy direnci	Ω/m
L	Birim boy endüktansı	H/m
C	Birim boy kapasitesi	F/m
G	Birim boy iletkenliği	S/m

İki iletkenli bir iletim hattı modeli Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. İletim hattı modeli

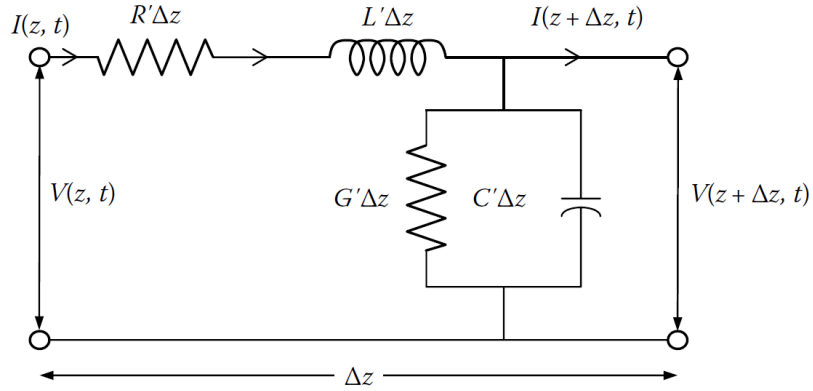
Kaynak: Paul, 2006:178

İletim hattı modelindeki parametreler,

$$-\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = Ri(z,t) + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \quad (4.27)$$

$$-\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = Gv(z,t) + C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \quad (4.28)$$

hat denklemleri ile birbiriyle ilişkilidir. İki iletkenli iletim hattının Δz diferansiyel uzunluğunun eşdeğer devresi Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. İki iletkenli iletim hattı eşdeğer devresi

Kaynak: Kalluri, 2018:24

İletim hattı modellerinde birincil hat parametrelerinin haricinde hat karakteristik empedansı ve hat iletim sabiti denilen ikincil hat parametreleri de vardır.

4.7.1. Karakteristik Empedans

Yansımaysız düzgün bir iletim hattında hat üzerindeki her noktada gerilim dalgası genliğinin akım dalgası genliğine oranı hattın karakteristik empedansı ya da öz empedans olarak tanımlanır. Bir hattın karakteristik empedansı,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} [\Omega] \quad (4.29)$$

genel ifadesi ile bulunur. Kayıpsız iletim hattında ise R ve G değerleri sıfıra eşit olacağından kayıpsız iletim hatları için karakteristik empedans,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (4.30)$$

ile ifade edilir.

4.7.2. Hat İletim Sabiti

İlerleyen dalganın genliğindeki değişiminin ölçüsü hat iletim sabiti olarak tanımlanır. Hat iletim sabiti olan γ karmaşık sayıdır. Gerçel kısım olan α , zayıflama sabiti olarak ifade edilir ve birim boy başına sinyalde hattın meydana getireceği zayıflamayı gösterir. Zayıflama sabitinin birimi Np/m'dir. 1 Neper yaklaşık olarak 8,69 dB'dir. Hat iletim sabitinin sanal kısmı β , faz sabiti olarak ifade edilir ve birim boy başına faz dönmesini gösterir. Faz sabitinin birimi rad/m'dir. Hat iletim sabiti,

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} [m^{-1}] \quad (4.31)$$

denklemleri ile hesaplanır. Kayıpsız bir iletim hattında R ve G değerleri sıfıra eşit olacağından zayıflama sabiti α sıfıra eşit olur. Bu durumda kayıpsız bir iletim hattı için hat iletim sabiti,

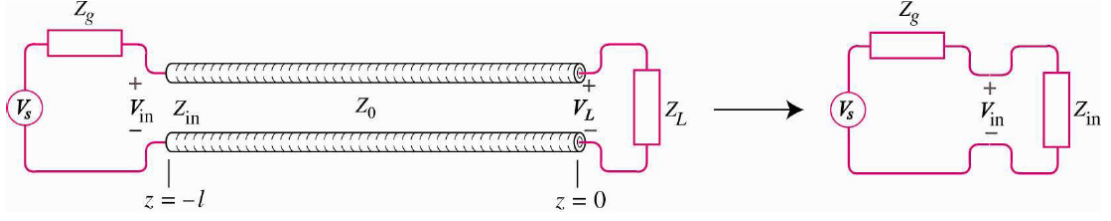
$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} [m^{-1}] \quad (4.32)$$

olarak elde edilir.

4.7.3. Yüklü İletim Hattının Giriş Empedansı

Sonuna yük bağlı bir iletim hattında iletim hattı ile yük empedansının toplu elemanlı devre haline getirildiği empedans iletim hattı giriş empedansı olarak ifade edilir. Giriş empedansı Z_{in} olarak gösterilir.

Yüklü iletim hattının toplu elemanlı devre haline getirilmesi Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Yüklü iletim hattının toplu elemanlı eşdeğer devresi

Z_0 karakteristik empedans, Z_L yük empedansı olmak üzere, Z_{in} giriş empedansı,

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L \cos(\beta l) + jZ_0 \sin(\beta l)}{Z_0 \cos(\beta l) + jZ_L \sin(\beta l)} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} [\Omega] \quad (4.33)$$

formülü ile hesaplanır.

4.7.4. Hat Yansıma Katsayısı

İletim hatları üzerinde gerilim ve akım dalga yapısındadır. İletim hatlarında karakteristik empedanstan farklı bir empedansa sahip bir eleman bağlandığında süreksizlik meydana gelir ve bundan dolayı süreksizlik noktalarında gerilim ve akım dalgaları yansıma yapar. Yansıma katsayısı yansıyan işaret genliğinin giden işaret genliğine oranıdır. Yükteki yansıyan ve gerilim dalgalarının genlikleri kompleksdir. Bu yüzden Z_L yük empedansının gerilim yansıma katsayısı olarak da ifade edilebilen hat yansıma katsayısı kompleks genliklerin oranı biçimindedir. Hat yansıma katsayısı birimsizdir ve $|\Gamma| \leq 1$ olan kompleks bir ifadedir. Genliği 0 ile 1 arasında değişir. 0 olması hiç yansıma olmadığı, 1 olması ise tam yansıma olduğu anlamına gelir.

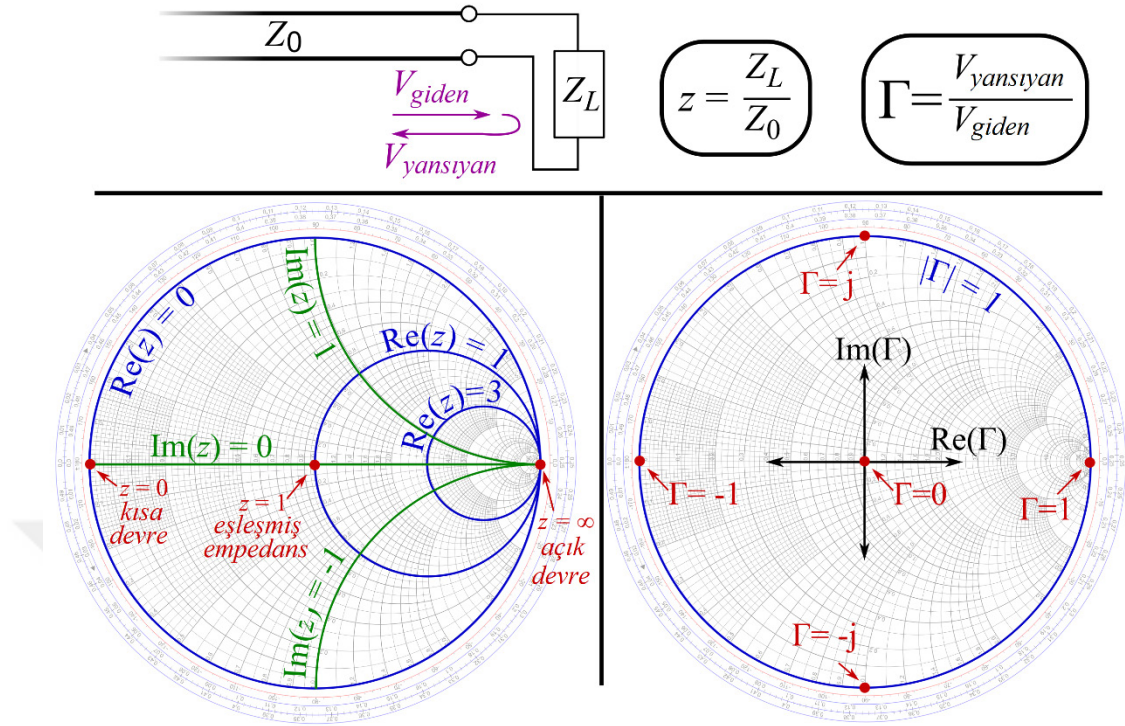
V^- geri yansıyan gerilim, V^+ giden gerilim olmak üzere yansıma katsayısı,

$$\Gamma = \rho = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = |\Gamma| e^{j\phi_r} \quad (4.34)$$

denklemleri ile hesaplanır. $Z_L = Z_0$ ise yani iletim hattı eşlenmiş ise $\Gamma=0$ olur ve yükte hiç yansıma olmaz. Bu durumda verilen gücün tamamı yüke aktarılmış olur. $Z = 0$ ise kısa devre durumu vardır ve $\Gamma = -1$ olur. Kaynaktan çıkan işaret zıt fazlı olarak kaynağa geri döner. $Z \rightarrow \infty$ ise açık devre durumu vardır ve $\Gamma = 1$ olur. Kaynaktan çıkan işaret eş fazlı olarak kaynağa geri döner.

$Z_L \neq Z_0$ olduğunda duran gerilim ve akım dalgaları sebebiyle maksimum ve minimumlar oluşur. V^+ ve V^- gerilim dalgalarının eş fazlı olduğu noktalarda fazörel toplam maksimum, zıt olduğu noktalarda ise minimum değerdedir.

Yansıma katsayısının Smith ölçeğindeki yeri Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Yansıma katsayısının Smith ölçeğinde yeri

Kaynak: https://en.wikipedia.org/wiki/Smith_chart., Erişim tarihi: 25 Nisan 2020

4.7.5. Durağan Dalga Oranı

İletim hattı üzerindeki süreksizliklerin oluşturmuş oldukları giden ve yansıyan gerilim ve akım dalgaları hat üzerindeki bazı noktalarda gerilim ve akım maksimumları ile minimumları oluşmasına sebep olur. Sonlu ve sonlandırılmış bir iletim hattı üzerindeki bu maksimum ve minimum gerilimlerinin oranına durağan dalga oranı (standing wave ratio) denir. Durağan dalga oranı DDO veya SWR olarak kısaltılır. Sembol olarak S harfi ile gösterilir ve birimsizdir.

Gerilim durağan dalga oranı,

$$S = \frac{V_{maks}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (4.35)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Ayrıca S logaritmik ölçekte,

$$S_{dB} = 20 \log_{10} S [dB] \quad (4.36)$$

ile yaygın olarak ifade edilir. Durağan dalga oranı hattın eşleşmesinin ölçüsüdür. Yüksek S değerleri istenilmemektedir. $1 \leq S \leq \infty$ aralığı içerisinde olan duran dalga oranı, hat üzerinde süreksizlik olmadığında $S = 1$ olur ve bu durumda $\Gamma = 0$ olup

kaynaktan yüke maksimum güç aktarımı mümkün olur. Hat üzerinde maksimum ve minimum gerilim ve akımlar oluşmaz. Hat sonu kısa devre olduğunda veya açık devre olduğunda $S = \infty$ olur. Gerilim ve akım dalgalanmaları maksimum olacağından belli noktalarda gerilim ve akım değerleri iki katına çıkabilir (Sevgi, 2000).

4.8. İki Kapılı Devreler ve S Parametreleri

Frekans yükseldikçe devrelerde elektromanyetik ışıma gerçekleşir ve EMC için problem oluşturan ışımların ortadan kaldırılması için devre mantığını kullanan toplu eleman parametrelerini kullanmak yerine elektromanyetik dalga mantığını kullanan dağılmış s parametrelili devre analizi kullanılır.

Pratik EMC problemlerinin çoğu iki kapılı devrelere aittir. Genellikle giriş bağlantı noktası AC şebekesine veya güç kaynağına, çıkış bağlantı noktası yüke bağlanır. Kaynak ve yük doğrudan bağlanabilir ya da araya filtre veya empedans eşleştirici gibi yardımcı devre koyulabilir (Sevgi, 2017). İki kapılı bir devre modelindeki akım ve gerilimler Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. İki kapılı devre akım ve gerilimleri

Kaynak: Gonzalez, 1996:2

İki kapılı devrelerde empedans parametreleri kapı gerilimlerini kapı akımlarına bağlamaktadır. Buna göre iki kapılı devrede empedans parametreleri cinsinden gerilimler,

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \quad (4.37)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (4.38)$$

şeklinde ifade edilebilirler. Bu denklemlere ait empedans matrisi,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

olarak yazılabilir. Bu matrise göre giriş empedansı olan Z_{11} ve diğer empedans parametreleri,

$$Z_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{I_2=0} [\Omega] \quad (4.40)$$

$$Z_{12} = \left. \frac{V_1}{I_2} \right|_{I_1=0} [\Omega] \quad (4.41)$$

$$Z_{21} = \left. \frac{V_2}{I_1} \right|_{I_2=0} [\Omega] \quad (4.42)$$

$$Z_{22} = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{I_1=0} [\Omega] \quad (4.43)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada ilgili empedanslar bulunurken diğer kapılar açık devre edilir.

- Z_{11} kapı-2 açıkken kapı-1'e bakıldığında görülen empedanstır.
- Z_{12} bir aktarım empedansıdır (transfer empedansı). Kapı-1 açıkken kapı-1 geriliminin kapı-2 akımına oranıdır.
- Z_{21} bir aktarım empedansıdır (transfer empedansı). Kapı-2 açıkken kapı-2 geriliminin kapı-1 akımına oranıdır.
- Z_{22} kapı-1 açıkken kapı-2'ye bakıldığında görülen empedanstır.

Empedans parametreleri, ilk olarak kapı-2'nin açılmasıyla V_1/I_1 ve V_2/I_1 oranlarının bulunması ve daha sonra kapı-1'in açılarak V_1/I_2 ve V_2/I_2 oranlarının bulunmasıyla hesaplanmaktadır.

Yüksek frekansların önemli olduğu EMC'de iki kapılı devrelerde S parametreleri kullanmak yerine s parametreleri kullanılır. Çünkü kapılardan içeri giren ve çıkan yansıyan gerilim dalgalarının göz önünde bulundurulması gerekir. Bir kapıdaki toplam gerilim,

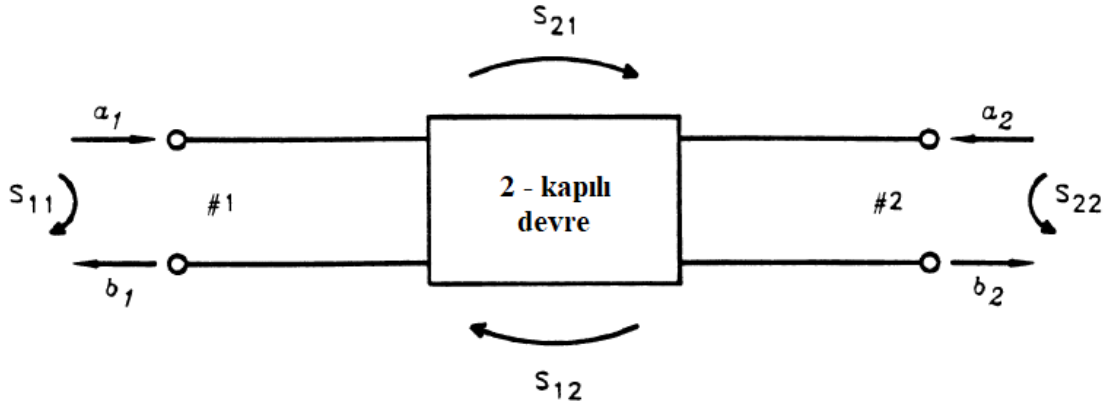
$$V = V^+ + V^- \quad (4.44)$$

olduğundan giden ve yansıyan normalize gerilim dalgaları,

$$a(x) = \frac{1}{2} [v(x) + i(x)] = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}} [V(x) + Z_0 I(x)] \quad (4.45)$$

$$b(x) = \frac{1}{2} [v(x) - i(x)] = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}} [V(x) - Z_0 I(x)] \quad (4.46)$$

olarak tanımlanır. İki kapılı devrede S parametreleri Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. İki kapılı devrede S parametreleri

Kaynak: Chang, 2000:41

Şekil 4.28'deki iki kapılı devre için S parametreleri,

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (4.47)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (4.48)$$

şeklinde ifade edilirler. Bu denklemlere ait S matrisi,

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

olarak yazılabilir. Burada,

S_{11} : 1 kapısındaki gerilim yansımaya katsayısı

S_{21} : 1 kapısından 2 kapısına doğru iletim katsayısı

S_{22} : 2 kapısındaki gerilim yansımaya katsayısı

S_{12} : 2 kapısından 1 kapısına doğru iletim katsayısı

olarak tanımlanır. Bu S parametreleri,

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = \Gamma_1 \quad (4.50)$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = T_{21} \quad (4.51)$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} = \Gamma_2 \quad (4.52)$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = T_{12} \quad (4.53)$$

denklemleri ile ifade edilir. İşaretin yansımından dolayı meydana gelen kayıp geri dönüş kaybı (return loss – RL) olarak adlandırılmaktadır. Devreye ait geri dönüş kaybı,

$$RL = 20 \log \left| \frac{a_1}{b_1} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{S_{11}} \right| \text{ [dB]} \quad (4.54)$$

eşitliği ile bulunur. Ayrıca devre kapılarına yansımatsız sonlandırmalar bağlandığında giriş gücünün çıkış gücüne oranı zayıflama ya da ekleme kaybı (insertion loss – IL) olarak ifade edilir. Zayıflama veya ekleme kaybı,

$$IL = \alpha = 20 \log \left| \frac{a_1}{b_2} \right| = 20 \log \left| \frac{1}{S_{21}} \right| \text{ [dB]} \quad (4.55)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Sevgi (2006), S parametrelerinin önemli özelliklerini şu şekilde özetlemiştir:

- Direnç, bobin, kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşmuş devrelerde S parametreleri genlikleri $0 \leq |S| \leq 1$ aralığında birden küçük karmaşık sayılardır. $|S_{11}| > 1$ olduğu durumlarda bu kapıdan yansıyan gerilimin kapıdan içeriye doğru giden gerilimden daha büyük olduğu yani aktif bir kuvvetlendirme işleminin var olduğu anlamına gelmektedir.
- Kapılardan giren ve çıkan güçler, gerilim dalgalarının genliklerinin karesiyle ifade edilir.

$$P_{giren} = |a|^2 = P_{yansıyan} = |b|^2 \text{ [W]} \quad (4.56)$$

- Kayıpsız devrelerde güç sakınımı vardır. Kapılardan giren güçlerin toplamı, yansıyan güçlerin toplamına eşittir.

$$|a_1|^2 + |a_2|^2 = |b_1|^2 + |b_2|^2 \quad (4.57)$$

5. EMC TEMEL STANDARTLARI VE BELGELENDİRME

5.1. AB EMC Yönergeleri

Avrupa Birliği (AB), elektriksel ürünlerin denetimi için yönergeler oluşturmuş ve pazara girecek ürünler için bu yönergelere uygun olmalarını zorunlu tutmuştur. Elektrik veya elektronik elemanlar içeren tüm cihazlar için ilk olarak 3 Mayıs 1989 tarihinde AB EMC Yönergesi (EMC Directive 89/336/EEC) yürürlüğe girdi. AB pazarına girecek elektriksel cihazların bu yönergeye uymaları 1 Ocak 1992’de zorunlu hale getirildi. Cihazların AB içerisinde serbestçe dolaşabilmesi için bu yönergedeki gerekli koşulların sağlanması gerekli oldu. Bu yönerge ile tüm AB ülkeleri aynı içeriğe sahip EMC kurallarına sahip oldu. İlk yönergeyle birlikte bazı sıkıntılar ortaya çıkmış ve yeni durumların oluşmasıyla yeni yönergelerin ihtiyacı artmıştır. 91/263/EEC, 92/31/EEC, 93/68/EEC ve 93/97/EEC gibi birkaç yönerge değişikliklerinden sonra sorunları ortadan kaldırmak ve piyasanın sağlıklı işlenmesini mümkün kılmak için üreticiye kolaylıklar tanıyan 2004/108/EC EMC Yönergesi hazırlandı. Aralık 2004’te çıkan bu yönerge Temmuz 2007’de eskisinin hükmünü kaldırarak 2 yıllık geçiş sürecinin ardından Temmuz 2009’da zorunlu hale geldi. Yeni yönergede sabit kurulum olarak nitelendirilen ürünler diğer cihazlardan farklı olarak CE (Conformity European) markalaması dışına çıkarılmış ancak yine de güvenlik koşullarını sağlama zorunluluğu devam ettirildi. İlk yönergedeki zorunlu uzman kuruluş (competent body) kaldırılarak atanmış kuruluş (notified body) varlığı devam ettirildi. 2004/108/EC EMC Yönergesi ile CE markalama süreci kolaylaştırılmış, üreticinin bir test merkezinde ürününü test ettirerek standardı sağladığını raporlayabilmesi ve kendine teknik dosya hazırlayabilmesi mümkün kılınmıştır (Sevgi, 2019).

EMC konusunda AB üye ülkelerinin kurallarına harmonize etmek için 2014/30/EU yönergesi 29 Mart 2014 tarihinde yürürlüğe girdi. EMC kuruluşları ile ilgili önemli değişiklikler içeren yönerge geçiş süreci olmadan 20 Nisan 2016’da zorunlu hale gelmiştir.

Türkiye, Avrupa Ekonomik Komisyonu (EEC-European Economic Community) üyesi olduğundan AB EMC Yönergesi'ne uyma zorunluluğu vardır. Bu zorunluluk Türkiye'de Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından sağlanmakta ve yönerge Türkçe'ye çevrilerek Resmi Gazete'de yayımlanmaktadır.

5.2. CE Markası ve Markalama Süreci

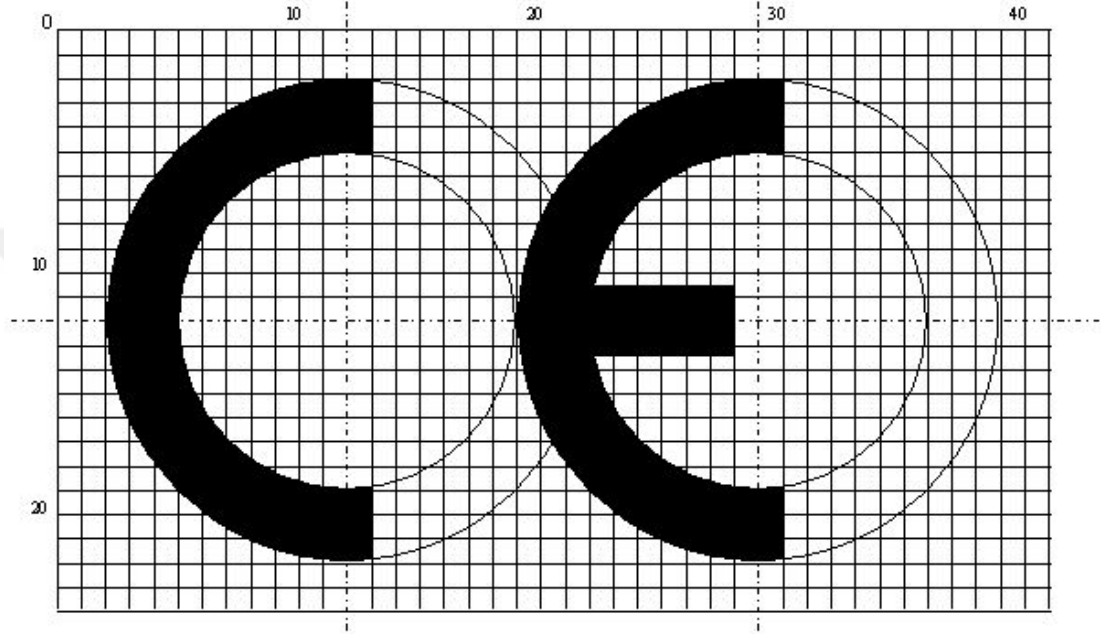
CE markası, AB mevzuatı gereğince üye ülkelerin sınırları içerisine girmeye ve serbestçe dolaşmasına imkan tanıyan bir markalamadır. "Conformity European" kelimelerinin baş harflerinden oluşur. Bu markalama ürünün AB Yeni EMC Yaklaşım Direktiflerine uygunluğunu gösteren pasaport niteliğinde bir işarettir. 25 grup ürün için geçerli olan ve emniyet, sağlık, çevre ve tüketiciyi korumaya yönelik yürürlüğe giren direktiflerdeki koşulları sağlaması yasalarla zorunlu hale getirilmiştir.

Türkiye 1995 yılından bu yana teknik olarak AB uyum çalışmaları yürüterek Ticaret Bakanlığı tarafından hazırlanan 4703 sayılı "Ürünlerle İlişkin Teknik Mevzuatın Hazırlanması ve Uygulanmasına Dair Kanun", 11 Temmuz 2001 tarihli ve 24459 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanmış olup; 11 Ocak 2002 tarihi itibarıyla yürürlüğe girmiştir. İlgili kanuna yönelik hazırlanan "Uygunluk Değerlendirme Kuruluşları ile Onaylanmış Kuruluşlara Dair Yönetmelik", "CE Uygunluk İşaretinin Ürüne İliştirilmesine ve Kullanılmasına Dair Yönetmelik" ve "Ürünlerin Piyasa Gözetimi ve Denetimine Dair Yönetmelik" 17 Ocak 2002 tarihli ve 24643 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak, 11 Ocak 2002 tarihinden itibaren geçerli olmak üzere yürürlüğe girmiştir (www.ticaret.gov.tr., Erişim tarihi: 29 Aralık 2019).

CE markası herhangi bir kuruluş tarafından alınan bir onay değildir. Yeni yaklaşım direktiflerine uygunluğunun beyan edilerek sorumluluğun üstlenilmesidir. Üretici risk taşımayan ürünlerde ürünün uygunluğunu CE logosunu ürünün üzerine, ambalajına, kullanım kılavuzuna ve garanti belgesine basarak ürünün temel gereklere uygunluğunu, yasal ve teknik şartları sağladığını sorumluluğu üzerine alarak beyan eder. CE işareti yalnızca Yeni Yaklaşım Direktifleri kapsamındaki ürünlere basılır. Bunun haricindeki ürünlere basımı yasaktır. CE markalaması bir ürünün AB veya başka bir kuruluş tarafından güvenli olduğunun onaylanması anlamına gelmeyip ürünün kökenini gösteren bir işaret değildir.

Üye ülkeler kendi aralarında kendi yasalarına uygun olarak üretilen ürünlerin ithalatına izin vermek zorundadırlar ve buna “karşılıklı tanınma ilkesi” denmektedir (Sevgi, 2019).

CE logosu oranlara sadık kalmak ve asgari 5 mm ebadında olmak koşuluyla küçültülebilir veya büyültülebilir. CE işaretinin basımında esas alınacak oranlar Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. CE işareti

Kaynak: <https://en.tse.org.tr/IcerikDetay?ID=866.>, Erişim tarihi: 29 Aralık 2019

AB mevzuatı gereğince CE etiketinin ilişitirebileceği 25 ürün grubu şunlardır (<https://ec.europa.eu.>, Erişim tarihi: 29 Aralık 2019):

- 1) Vücuda yerleştirilebilir aktif tıbbi cihazlar
- 2) Gaz yakıt yakan cihazlar
- 3) İnsan taşıma amaçlı kablo üzerinde hareket eden taşıtlar
- 4) İnşaat malzemeleri
- 5) Enerji ile ilgili ürünlerin eko tasarımı
- 6) Elektromanyetik uyumluluk
- 7) Potansiyel olarak patlayıcı ortamlarda kullanılan ekipmanlar ve koruyucu sistemler
- 8) Sivil kullanım için patlayıcılar

- 9) Sıcak su kazanları
- 10) In vitro tıbbi tanı cihazları
- 11) Asansörler
- 12) Alçak gerilim
- 13) Makineler
- 14) Ölçüm aletleri
- 15) Tıbbi cihazlar
- 16) Çevrede gürültü emisyonu
- 17) Otomatik olmayan tartı aletleri
- 18) Kişisel koruyucu donanımlar
- 19) Basınçlı ekipmanlar
- 20) Sivil kullanım için patlayıcılar
- 21) Radyo ekipmanları
- 22) Gezi amaçlı tekneler
- 23) Elektrikli ve elektronik ekipmanlardaki tehlikeli maddelerin kısıtlanması
- 24) Oyuncak güvenliği
- 25) Basit basınçlı kaplar

25 ürün grubu arasına giren ve risk taşımayan ürünler için üretici sorumluluğu üzerine alacak şekilde CE etiketini ürün üzerine basarak uygunluğu kendisi beyan edebilir. Bu beyanı üretici sorumluluğunda olsa da yalnızca üreticiyi değil ithalatçılar, aracı firmalar ve satıcıları da bağlar. Uygunluğu beyan edilip CE etiketi basılan bir ürünün temel yeterlilikleri sağlamadığı ve yönetmeliklere uygun olmadığının tespit edilmesi halinde Ticaret Bakanlığı'nın kendisine verilen yetkileri dahilinde söz konusu ürünün piyasaya arzının kısıtlanması, yasaklanması veya toplatılması gibi önlemler ile karşılaşılabilir (www.tse.org.tr., Erişim tarihi: 29 Aralık 2019).

Risk teşkil eden ürünler için AB'nin resmi olarak tanıdığı ve ilgili Bakanlık tarafından yetkilendirilmiş “onaylanmış kuruluş (notified body)” tarafından ürünün

gerekli koşulları sağladığı belirlenmelidir. Üreticiler riskli ürünler için AB'nin resmi olarak tanıdığı onaylanmış kuruluşlardan istediklerine başvurma hakkına sahiptir.

Risk taşıyan ve onaylanmış kuruluş aracılığıyla gerekliliklerin sağlandığının onaylanması gereken ürünler dışında elektrikli ve elektronik ürünler için Alçak Gerilim Yönergesi (Low Voltage Directive, LVD) ve EMC yönergesi, onaylanmış kuruluş zorunluluğu olmadan üreticinin uygunluğu kendisinin beyan etmesinin mümkün olduğu yönergelerdir.

Bir ürünün CE etiketi taşıması teknik koşulları ve mevzuat gerekliliklerini taşıdığını garanti etmez. Üretici tüm sorumluluğu üzerine alıp riski kabul ederek ürün üzerine CE etiketi basabilir ve ürününü pazara sürebilir. Üzerinde CE etiketi olması bir ürünün sağlığa uygun olduğunu göstermez.

İkili tanıma anlaşmaları ülkeler kendi markalarını tanıyabilmektedir. ABD, Kanada, Japonya, Avustralya ve Yeni Zelanda gibi ülkeler CE markasını tanıdıkları gibi kendi markaları da AB tarafından tanınmaktadır.

Bir üretici yönergelere uygunluğunu beyan ettiği ürün için teknik bir dosya hazırlamak zorundadır. Üretici, teknik dosyayı ve uygunluk beyanını ürünü pazara sunduğu tarihten itibaren 10 yıl boyunca muhafaza etmelidir. Teknik dosya içerisinde;

- Ürünün genel bir tanımı
- Konsept tasarım ve imalat çizimleri ile aksam, parça ve devrelerin ve benzerlerinin şemaları
- Bu çizim ve şemalar ile ürünün işleyişinin anlaşılabilmesi için gerekli tarifler ve açıklamalar
- Kısmen veya tamamen uygulanan uyumlaştırılmış ulusal standartların ve/veya ilgili teknik şartnamelerin referans adlarının listesi ile bu standartların uygulanmadığı durumlarda ilgili teknik düzenlemede belirtilen temel gerekleri karşılamak üzere benimsenen çözümlerin tarifleri ve uyumlaştırılmış ulusal standartların kısmen uygulanması hâlinde, bu standartların hangi kısımlarının uygulandığı
- Yapılan tasarım hesaplamalarının, gerçekleştirilen muayenelerin ve benzerlerinin sonuçları
- Test raporları

mutlaka bulundurulmalıdır (T.C. Resmi Gazete, 23 Şubat 2012, sayı:28213).

CE markalama işlemi sırasıyla;

- Ürün ile ilgili direktif veya direktifler saptanır.
- Varsa uyumlaştırılmış (harmonize) standartlar tespit edilir.
- Modül veya modüller kombinasyonu seçilir.
- Onaylanmış kuruluş (notified body) gerekip gerekmediği belirlenir.
- Uygun değerlendirmesinin ardından uygunluk beyanı ve gerekiyorsa diğer dökümanlar hazırlanır. Teknik dosya düzenlenir ve muhafaza edilir. Ürünün üzerine, ambalajına, kullanım kılavuzuna ve garanti belgesine CE etiketi iliştilir.

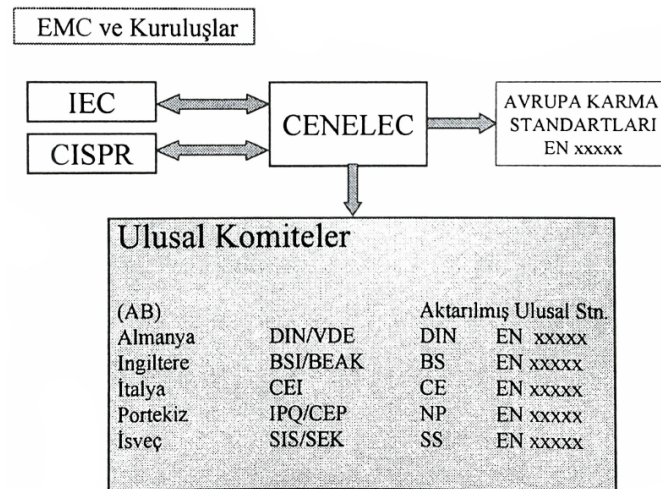
adımları izlenerek ürün piyasaya arz edilir (www.tse.org.tr., Erişim tarihi: 29 Aralık 2019).

5.3. EMC Kuruluşları

EMC ile ilgili kural ve yasalar uluslararası üç kuruluş tarafından standartlar ile oluşturulur. Bu üç kuruluş;

- 1) IEC (International Electrotechnical Commission)
- 2) CISPR (International Special Committee on Radio Interference)
- 3) CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)

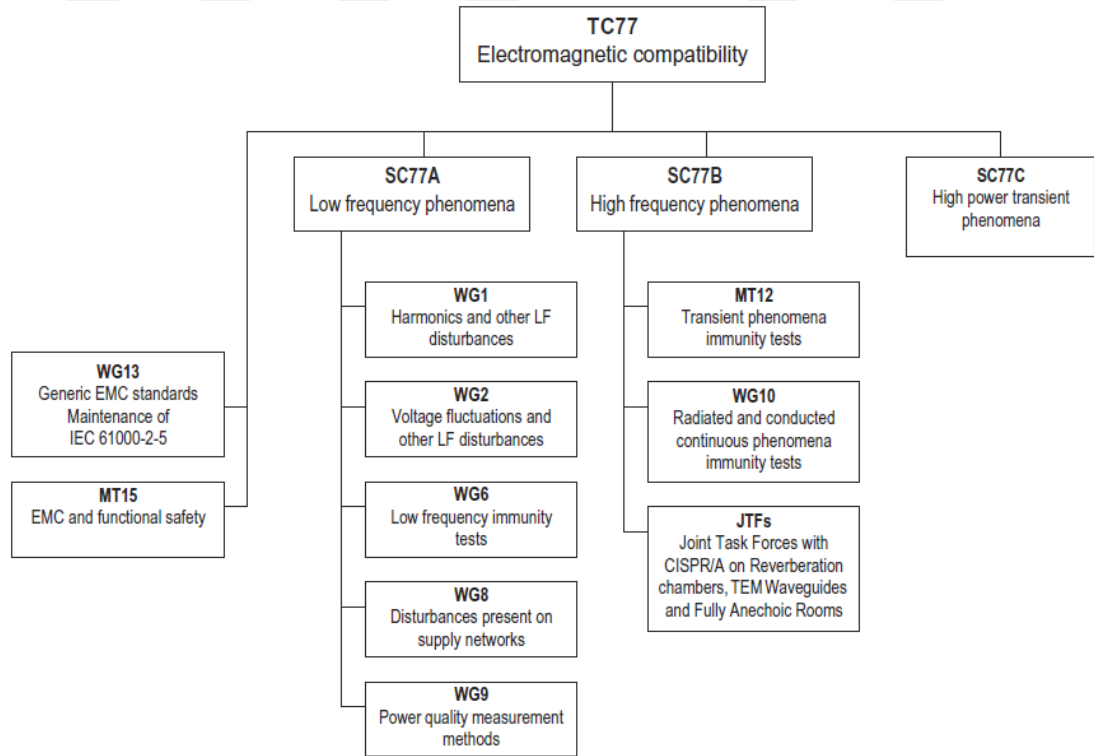
olarak standartları belirlemektedirler. Uluslararası EMC kuruluşları ve etkileşimleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Uluslararası EMC kuruluşları ve etkileşimleri

Kaynak: Sevgi, 2000:27

Tüketiciler uygunluk değerlendirmesi aracılığıyla elektrikli ve elektronik ürünlerin güvenli, enerji tasarruflu ve çevre dostu olduğundan ve beklentileri karşılığında emin olabilir. Uygunluk değerlendirmesi, bir ürünün, sistemin veya hizmetin bir standartta yer alan gereksinimlere karşılık gelip gelmediğini belirleyen herhangi bir etkinliği ifade eder. Standart, bir ürünün, hizmetin veya nesnenin yerine getirmesi gereken özelliklerin teknik bir açıklamasıdır. Tüm elektrik, elektronik ve ilgili teknolojiler için uluslararası standartlar hazırlayan ve yayınlayan dünyanın önde gelen kuruluşu Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC)'dur. IEC, Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) ve Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU), dünya için uluslararası standartlar geliştiren üç küresel kardeş kuruluştur. Elektronik içeren ve elektrik kullanan ya da elektrik üreten ekipman, cihaz ve sistemler, birlikte güvenli ve uyumlu bir şekilde çalıştığının tespiti için IEC uluslararası standartlarına uygunluğunun belirlenmesi gereklidir. IEC, şirketlere, endüstrilere ve hükümetlere ihtiyaç duydukları uluslararası standartları karşılama, tartışma ve geliştirme için bir platform sağlar. IEC kapsamındaki iki EMC ile ilgili kuruluş, EMC Teknik Komitesi (TC77) ve Uluslararası Radyo Girişimi Özel Komitesi (CISPR)'dir. TC77'ye ait yapı Şekil 5.3'te, CISPR'a ait yapı Çizelge 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.3. TC77 yapısı

Kaynak: Williams, 2016:75

Çizelge 5.1. CISPR yapısı

Komite	Başlık/Kapsam	Ana Yayınlar
CISPR/A	Radyo girişim ölçümleri ve istatistiksel yöntemler	CISPR 16, CISPR 17, IEC 61000-4-22
CISPR/B	Endüstriyel, bilimsel ve tıbbi radyo frekansı cihazları; havai enerji hatları, yüksek gerilim ekipmanları ve elektrikli çekiş sistemleri	CISPR 11, CISPR 18, CISPR 28
CISPR/D	Araçlarda ve içten yanmalı motorla çalışan cihazlarda elektrikli/elektronik ekipmanlar	CISPR 12, CISPR 25
CISPR/F	Ev aletleri, el araçları, aydınlatma ekipmanları ve benzeri cihazlar	CISPR 14, CISPR 15
CISPR/H	Radyo hizmetlerinin korunması için sınırlar, genel emisyon standartları	CISPR/TR 31, CISPR/TR 16-4-4, IEC 61000-6-3, -6-4
CISPR/I	Bilgi teknolojileri, multimedya cihazları ve alıcıları	CISPR 13, CISPR 20, CISPR 22, CISPR 24, CISPR 32; CISPR 35

Kaynak: Williams, 2016:76

Elektromanyetik Uyumluluk Danışma Komitesi (ACEC), EMC konusunda IEC danışma komitesidir. ACEC, Standardizasyon Yönetim Kurulu (SMB)'na önerilerde bulunur ve EMC ile ilgili IEC çalışmalarını yönlendirerek koordine eder. ACEC, EMC konusunda uzmandır ve EM hakkındaki yayınların hazırlanması ile IEC'nin teknik komitelerinin EMC çalışmalarını koordine etmesine ilişkin yönergeler sağlamaktan sorumludur. IEC, EMC standartlarının kapsadığı tüm ana ürün ailelerinin bir listesini tutar ve EMC ile ilgili konularda IEC ve endüstri arasındaki iletişimi geliştirmeye yardımcı olmak için çalıştaylar düzenler. Ayrıca IEC'nin EMC ile ilgili çalışmalarını Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC) gibi diğer kuruluşların komiteleriyle koordine eder. EMC mühendisliği süreci, ürünün tasarım aşamasından piyasaya arz edilmesine kadar çeşitli EMC standartlarının yayınlanması da dahil olmak üzere standardizasyon konusunda işbirliğini teşvik etmek için çalışan kurum ve kuruluşlar tarafından yönetilir (Sevgi, 2017).

5.4. EMC Standartları

Elektrikli ve elektronik sistemlerin elektromanyetik uyumluluk performanslarının belirlenmesinde test ve ölçüm kriterleri uluslararası standartlar ile belirtilir. Bu standartlar içerisinde test parametrelerinin ne olduğu, cihazların test ve ölçüm işlemlerinin nasıl yapılacağı ve ortam koşullarının nasıl olması gerektiği gibi detaylı bilgiler yer almaktadır. Cihaz ve sistemler ticari ve askeri kullanımlar için farklı

standartlara tabi olurlar. Türkiye, Avrupa Birliği aday ülkesi olduğundan EN (European Norm) kodlu AB standartlarını temel alarak, EN XXXXX kodlu standartların Türk Standardları Enstitüsü (TSE) tarafından Türkçeleştirilmesiyle elde edilen TSE EN XXXXX kodlu standartları kullanır.

5.4.1. Ticari EMC Standartları

Uluslararası ve ulusal pazarda insanların kullanımını için satışa sunulacak olan elektrikli ve elektronik ürünler EMC standartlarından ticari olanlara tabidir. Uluslararası kuruluşların belirlediği bu standartlar dört çeşittir.

5.4.1.1. Temel Standartlar

Temel standartlar, elektromanyetik uyumluluğu elde etmek için gerekli test kuralları, gereklilikleri ve yöntemlerini, şartlar ve koşullar ile birlikte tanımlayan referans standartlardır. Bütün ürünlere uygulanabilirler. Emisyon ve bağışlık testleri temel standartlarda tarif edilir. Emisyonlara ait temel EMC standartlar CISPR, bağışıklığa ait temel EMC standartlar IEC tarafından oluşturulur. IEC 61000-4-4 Elektriksel hızlı geçici rejime/ani darbeye karşı bağışıklık deney standardı temel standarda örnek olarak verilebilir.

5.4.1.2. Ürün Ailesi Standartları

Ortak genel özelliklere sahip olan birbirine yakın uygulama alanları içerisindeki bir grup ürün için geçerli olan standartlardır. Ürün ailesi standartları kendisine tabi olan bir ürünün temel standartlara atıfta bulunarak hangi temel standartlara sahip olması gerektiğini ve bunların sınır ve ölçülerinin ne olduğunu belirtir. IEC EN 50556 Yol trafik işaret sistemleri standardı ürün ailesi standardına örnek olarak verilebilir.

5.4.1.3. Genel Standartlar

Ürün ailesi standardı bulunmayan ürünler için tanımlanan genel standartlardır. Belirli EMC ortamlarında çalışan ürünler için uyulması zorunlu olan temel standartları ve bunların sınır ve ölçülerini belirtir. Yerleşim birimleri, ticari ve hafif sanayi ile endüstriyel olmak üzere iki farklı ortama yöneliktir. Kendi içinde emisyon ve bağışıklık olarak ikiye ayrılır. Genel standartların ayrımı ve standart kodları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Genel EMC Standartları

Ortam Sınıfı Test-Ölçüm	Yerleşim birimleri, ticari ve hafif sanayi ortamları	Endüstriyel
Emisyon	EN 61000-6-3	EN 61000-6-4
Bağışıklık	EN 61000-6-1	EN 61000-6-2

Kaynak: Williams, 2016:59

5.4.1.4. Ürüne Özel Standartlar

Spesifik ürünlere özel oluşturulmuş standartlardır. İçerisinde temel standartlara atıfta bulunur ve emisyon limitleri ile test gerekliliklerini belirtir. “TS EN 61851-21-1 Elektrikli taşıtların iletken şarj sistemleri - A.A./D.A. besleme şebekesine iletken bağlantısı için elektrikli taşıt üzerinde şarj edicinin elektromanyetik uyumluluk özellikleri standardı” ürüne özel standarda örnek verilebilir.

5.4.2. Askeri Standartlar

Askeri uygulamalarda kullanılan cihaz ve sistemler askeri standartlara tabi olurlar. Askeri standartlar ticari standartlara göre çok daha sıkı kural ve koşullar altında zorlu gereksinimlerin karşılanmasını gerektirir. Askeri standartlar ilk olarak 1964 yılında ABD Savunma Bakanlığı'nın MIL-STD-826 askeri standardını yayınlamasıyla başlamıştır. Sonrasında gereksinimler doğrultusunda standartlar geliştirilerek artırılmıştır. Günümüzde ABD Savunma Bakanlığı'nın MIL-STD-461F ve MIL-STD464C standartlarının yanı sıra NATO'nun AECTP 500, İngiltere Savunma Bakanlığı'nın DEF STAN 59-411, Fransa'nın GAM-EG-13 ve Almanya'nın VG 95370 standartları dünyada bilinen diğer askeri standartlardır (Sevgi, 2019).

5.5. Akreditasyon

Akreditasyon, test ve ölçümlerin doğruluğunu ve kesinliğini ortaya koymak için test ve ölçüm cihazları ile ortam şartlarının yeterliliğini sağlama amacı taşır. Bu amaç akreditasyon kuruluşları tarafından gerçekleştirilir.

Sevgi (2019), akreditasyonun ISO/IEC 17011'de “Uygunluk değerlendirme kuruluşlarının ulusal ve uluslararası kabul görmüş teknik kriterlere göre faaliyet

gösterdiğinin üçüncü parti ve ilgili otorite tarafından onaylanması” şeklinde tanımlandığını ifade etmiştir.

Güvenilir ve bağımsız kuruluşlarca test ve ölçüm merkezlerinin uygun kalite yönetim sistemlerine sahip olduklarının, belli test ve ölçüleri, cihaz/ortam kalibrasyonunun uygun ve gerektiği şekilde yapabileceklerinin ilan edilmesi ile akreditasyon sağlanarak test ve ölçümün sağlıklı olarak gerçekleştirilmesi mümkün olur (Sevgi, 2019).

Türkiye’de akreditasyona yetkili ulusal kurum olarak Avrupa Akreditasyon Birliği’ne (EA) tam üye olan Türkiye Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) bulunmaktadır.

5.6. Kalibrasyon

Test ve ölçüm cihazlarının doğruluğunun tespiti için, gerçek değer ile ölçüm cihazı tarafından okunan değer karşılaştırılması işlemidir. Belli aralıklarla periyodik olarak yapılır.

Sevgi (2019), Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu’nun (International Bureau of Weights and Measures) kalibrasyonu “Belirli koşullar altında doğruluğu bilinen bir referans ölçüm standardı veya ölçüm sistemini kullanarak doğruluğu aranan diğer bir standart veya test/ölçü aleti ya da sistemin doğruluğunun ölçülmesi, saptamalarının belirlenmesi ve rapor edilme işlemi” şeklinde tanımladığını ifade etmiştir.

Sevgi (2019), kalibrasyon işleminin faydalarını;

- Ölçülerin doğruluğunun garanti altına alınması
- Üretim kalitesinin istenilen seviyelere yükseltilmesi
- Üretim aşamalarında doğabilecek farklılıkların giderilebilmesi
- Piyasa ve ileri teknoloji ile uyum sağlanabilmesi
- Rekabet imkanının doğmasıyla haksız kazancın önüne geçilebilmesi
- Tüketici güveninin sağlanması

şeklinde ifade etmiştir.

5.7. Raporlama ve Belgelendirme

Bir ürün kendi türüne göre tabi olduğu standartlarda belirtilen gereklilikleri yerine getirmek durumundadır. Yetkilendirilmiş akredite test merkezleri tarafından test ve ölçümleri standartlara göre gerçekleştirilir. Ürüne özel standart tanımlıysa ürün özel standardı, yoksa ürünün ait olduğu ürün ailesi standardı uygulanır. Aksi durumda ortama göre genel standarda tabi tutulur. Test ve ölçüm sonuçları raporlanır. Standart içerisindeki tüm temel standartların belirtilen sınır değer ve kriterlerde eksiksiz olarak karşılanmasıyla ürün belgelendirilir.

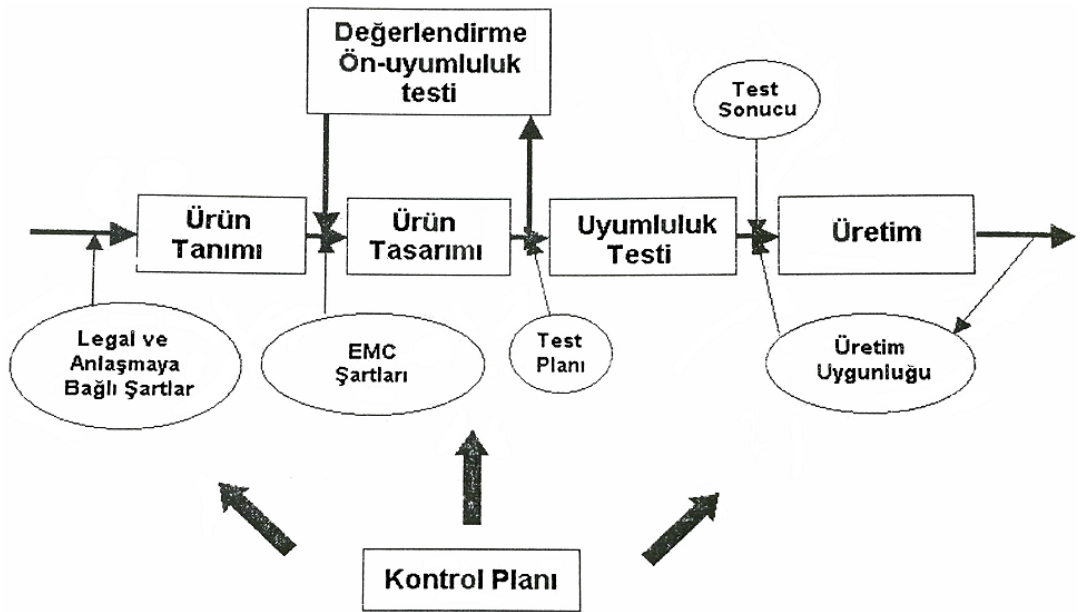
5.8. Piyasa Denetlemesi

Ürünlerin pazarda serbestçe dolaşabilmesini mümkün kılan CE markalamasını ürünleri üzerine yerleştiren üreticiler tüm gereklilikleri karşıladıklarını beyan etmiş olurlar. Ürünlerin CE markalaması ve standartlara uygunluğunun tespit edilmesi adına Türk Standardları Enstitüsü (TSE) pazardan numune cihaz olarak test ve ölçümlerini gerçekleştirir. Sonuçların uygun olmadığının tespit edilmesi halinde ürünlerin belgelerinin iptal edilmesi, piyasadan toplatılması, para cezası gibi yaptırımlar uygulanır.

6. EMC TEST VE ÖLÇÜMLERİ

Etkin bir EMC performansı için bir sistemin içinde bulunduğu elektromanyetik ortamdan etkilenmeden ve diğer cihazların çalışması üzerinde de olumsuz bir etki oluşturmadan çalışması gerekir. Aynı zamanda kendi içerisinde de sistem içi elektromanyetik uyumluluk taşımalıdır. Bu koşulların sağlanabilmesi için EMC, tasarımdan üretime kadar her adımda ihmal edilmeden ön planda tutulmalıdır. Bunun için test ve ölçümler her aşamada uygulanmalıdır. En başından beri uygulanan EMC teknikleriyle hem risk azaltılmış olur hem de zaman ve maliyet açısından kar sağlanır.

Tasarım aşamasından son ürüne kadar olan süreçte ürün prototipi ön uyumluluk (pre-compliance) testlerine tabi tutulur. Son ürün haline geldikten sonra ürün belgelendirme amacıyla yetkili test kuruluşlarında tam uyumluluk (full-compliance) testleri gerçekleştirilir. EMC mühendislik uygulama aşamaları Şekil 6.1'de verilmiştir.



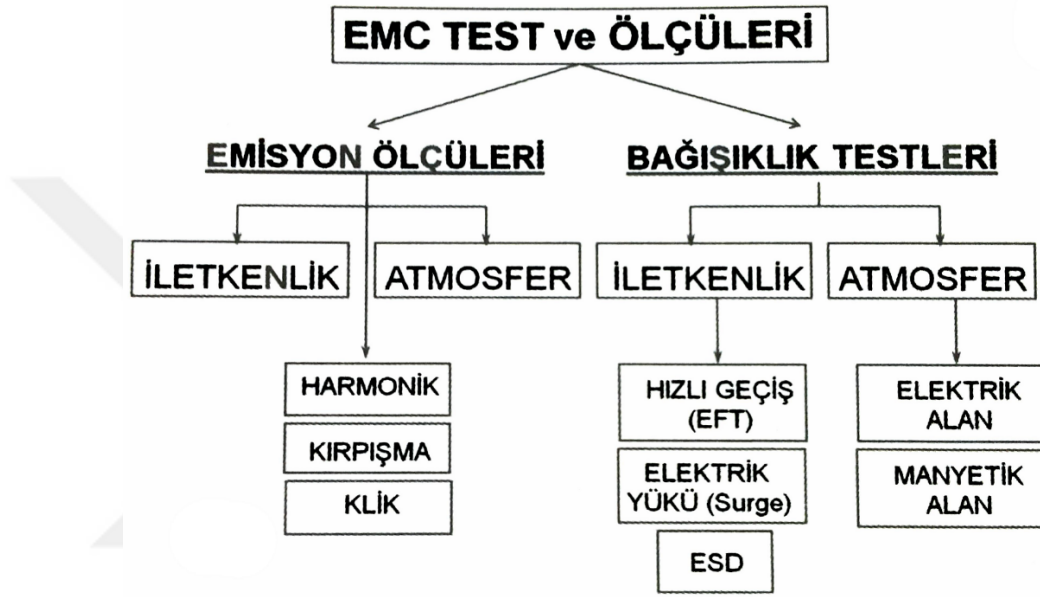
Şekil 6.1. EMC mühendislik uygulama aşamaları

Kaynak: Beer, 2008:176

Elektromanyetik uyumluluk kapsamında bir cihazın dışarıya yaymış olduğu emisyon ölçülür, dışarıdan gelen elektromanyetik gürültülere karşı ise cihaz test edilir.

Yani emisyon ölçülür, bağışıklık test edilir. Ancak yine de iki ölçme ve test işlemlerinin tamamına test ya da deney denmektedir. Elektromanyetik uyumluluk test ve ölçümleri emisyon ve bağışıklık ana başlıklarına ayrılır. Bu ana başlıklar içerisinde bulunan ışıma yollu girişim konusu bu tezin kapsamı dışında olduğundan tanıtılmayacaktır. İletim yollu bağışıklık ve iletim yollu emisyon testleri üzerinde durulacaktır.

Elektromanyetik uyumluluk test ve ölçümleri Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. EMC test ve ölçümleri

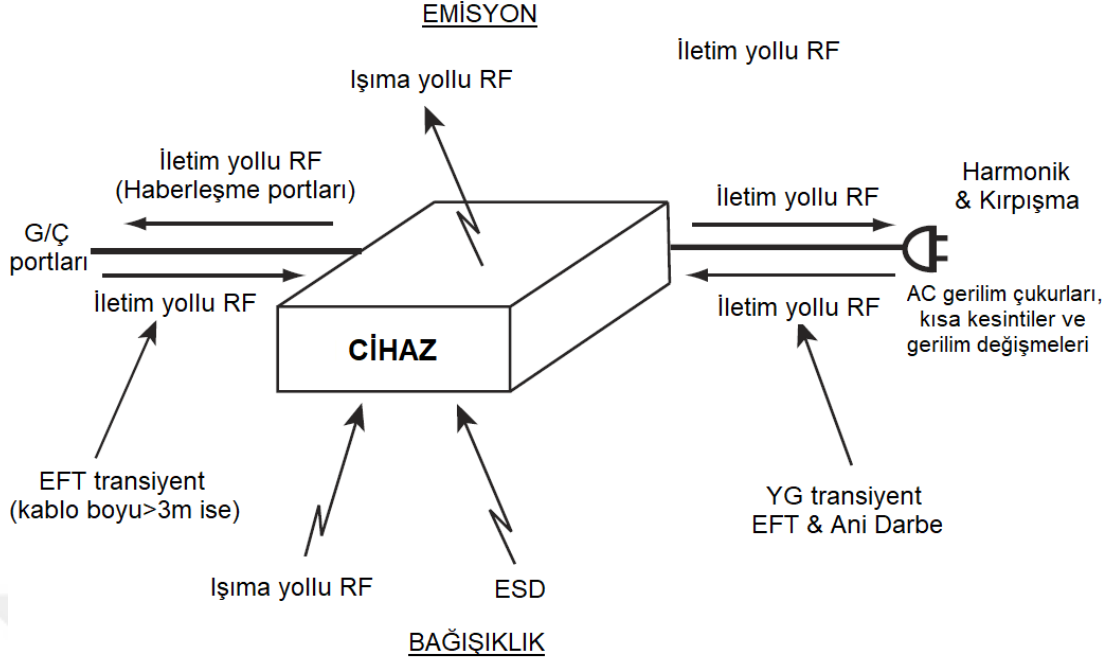
Kaynak: Sevgi, 2019:239

İletim yollu bağışıklık testleri altındaki,

- Elektriksel hızlı geçici rejim/patlama bağışıklık (EFT/Burst immunity)
- Ani yükselmelere karşı bağışıklık (Surge immunity)
- Elektrostatik boşalma bağışıklık (ESD immunity)

testleri geçici (transiyent) gürültüler ile gerçekleştirilir ve geçici rahatsızlık (transient disturbance) grubunda yer alır.

Elektromanyetik girişimlerin bir cihaz üzerinde gösterimi Şekil 6.3’te yapılmıştır.



Şekil 6.3. Cihaz üzerinde EMI

Kaynak: Ott, 2009:27

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) ve Avrupa Birliği standartlarına göre temel EMC test ve ölçüleri ile standart kodları Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. IEC/EN temel EMC test ve ölçüleri

Test	Temel standart kodu
İletim yolu emisyon	EN55022, EN55011, EN55032
Işınım yolu emisyon	EN55022, EN55011, EN55032
Güç parazitleri	EN55014-1
Klik	EN55014-1
İletim yolu bağışıklık	EN61000-4-6, EN55024, EN55014-2
Işınım yolu bağışıklık	EN61000-4-3, EN55024, EN55014-2, 95/54/EC, 72/245/EEC, 75/322/EEC
EFT/Burst	EN61000-4-4, EN55024, EN55014-2
Surge	EN61000-4-5, EN55024, EN55014-2
ESD	EN61000-4-2, EN55024, EN55014-2
Manyetik alan bağışıklığı	EN61000-4-8, EN55024, EN55014-2
Gerilim kesintisi ve çökmesi	EN61000-4-11, EN55024, EN55014-2
Harmonik akımları	EN61000-3-2
Harmonik bağışıklık	EN61000-4-13
Kırpışma	EN61000-3-3

Kaynak: Sevgi, 2019:240

Uluslararası Özel Radyo Girişimi Komitesi'ne (CISPR) göre temel EMC test ve ölçüleri ile standart kodları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. CISPR temel EMC test ve ölçüleri

Standart kodu	Test
CISPR 11	EMC sınır değerleri ve ölçü yöntemleri – ISM RF cihazları
CISPR 14-1	EMC gereksinimleri – Emisyon (Evsel ürünler, elektrikli aletler)
CISPR 14-2	EMC gereksinimleri – Bağışıklık (Evsel ürünler, elektrikli aletler)
CISPR 16-1	EMC gereksinimleri 1 – Emisyon ve bağışıklık ölçüm düzenleri
CISPR 16-2	EMC gereksinimleri 2 – Emisyon ve bağışıklık ölçüm yöntemleri
CISPR 16-3	EMC gereksinimleri 3 – Raporlama ve CISPR önerileri
CISPR 16-4	EMC gereksinimleri 4 – Belirsizlikler ve istatistiksel değerlendirme
CISPR 24	Bilgi teknolojileri cihazları – Bağışıklık, sınır değer ve test yöntemleri

Kaynak: Sevgi, 2019:241

6.1. Emisyon Ölçümleri

Emisyon, cihaz ve sistemlerin dışarıya yaymış olduğu elektromanyetik gürültüdür. Bir cihaz ya da sistem karmaşık elektromanyetik alanlardan etkilenmeden kendi çalışmasını fonksiyonel kayıp olmadan sürdürebilse de diğer sistemler üzerinde bozucu etki oluşturmaması istenir. Bu nedenle elektronik bir ürün tüm kuplaj yolları üzerinden emisyon ölçümlerine tabi tutulur. Tüm ölçüm sonuçlarının ilgili standartlarda belirtilen limit değerlerinin altında kalması beklenir. Cihazın tabi olduğu standart içerisinde ayrıca ürün sınıflarına göre farklı limitler belirlenmiş olabilmektedir.

6.1.1. RF İletim Yollu Emisyon

Bir cihaz ya da sistemin kablolar aracılığıyla bağlı olduğu şebekeye radyo frekans (RF) bölgesinde yaymış olduğu elektromanyetik gürültü seviyesinin ölçülmesidir. Bir cihaz bağlı bulunduğu şebekeye yaymış olduğu gürültü ile aynı şebekeye bağlı diğer aygıtların çalışması üzerinde bozucu etki yapabilmektedir. Bu ölçümlerle en önemli kuplaj yolu olan şebekenin daha temiz kalması sağlanır ve şebekeye bağlı diğer cihazların çalışmasında zarar görmemesi amaçlanır.

ABD'de radyo ve telsiz iletişimini düzenlemekle görevli kurum olan Federal İletişim Komisyonu (FCC) radyo frekans (RF) dalgaların 9 kHz-3000 GHz frekans aralığında olduğunu kabul etmektedir (Paul, 2006). EMC'de RF iletim yollu emisyon ölçüm deneyinde 150 kHz-30 MHz aralığında cihazın AC güç beslemesinden yaymış olduğu gürültünün standartlarda belirtilen limit değerlerinin altında olması istenir.

EN55011, EN55014-1, EN55022, EN55032 standartları amaçları ve çalışma ortamları farklı cihazlar için RF emisyon test standardı bilgilerini içermektedir. Ürünler A ve B sınıfına ayrılmıştır. A sınıfı dijital cihazlar endüstriyel ve ticari ortamlarda çalışan cihazları, B sınıfı dijital cihazlar tüketici ortamında kullanılacak cihazları kapsamaktadır. B sınıfı cihazlar elektromanyetik girişime karşı daha hassas olabilecekleri için daha katı limitlere sahiptir.

Ölçüm işlemi EMI alıcısı ya da spektrum analizörü ile yapılır. Ölçüme alınacak cihaz yapay şebeke ağı (artificial mains network – AMN) ya da hat empedansı stabilizasyon ağı (line impedance stabilization network – LISN) denilen bir cihaza bağlanır. LISN cihazı,

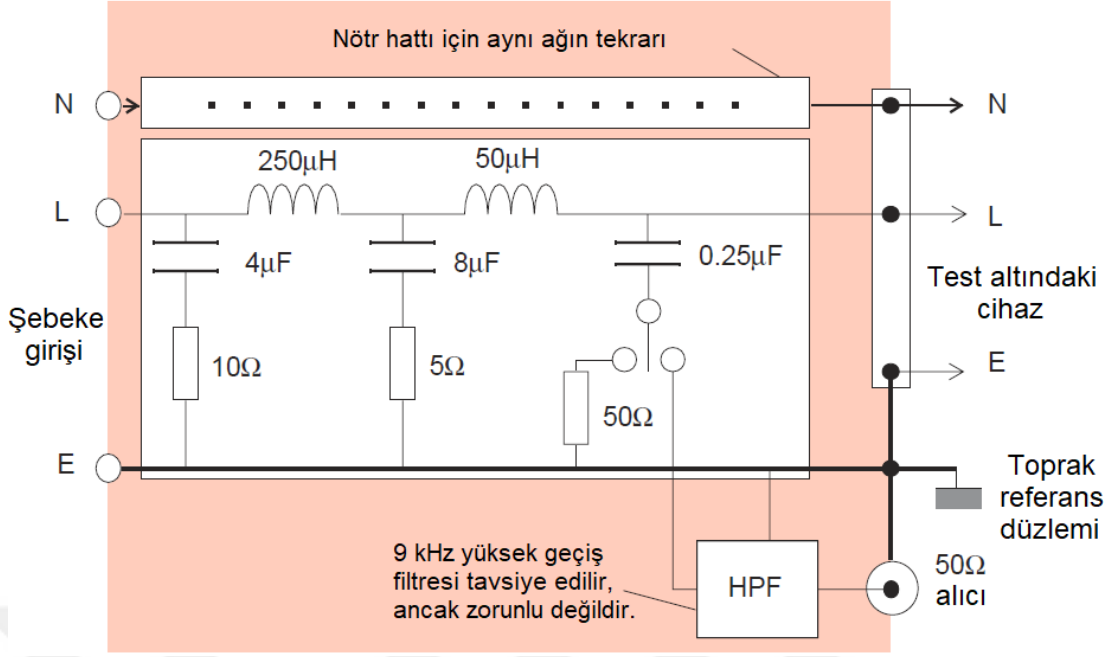
- Cihazın besleneceği şehir şebekesinden gelen enerjiyi süzer ve cihaza temiz enerji sağlamak
- Cihazın neden olduğu RF gürültünün şebekeye karışmasına izin vermeden spektrum analizörüne aktarmak
- Şebeke ile cihaz arasında empedans uyumluluğu sağlayarak istenmeyen yansımaları önlemek

şeklinde üç işlevsel göreve sahiptir. LISN görseli Şekil 6.4’te verilmiştir.



Şekil 6.4. Yapay şebeke ağı (LISN)

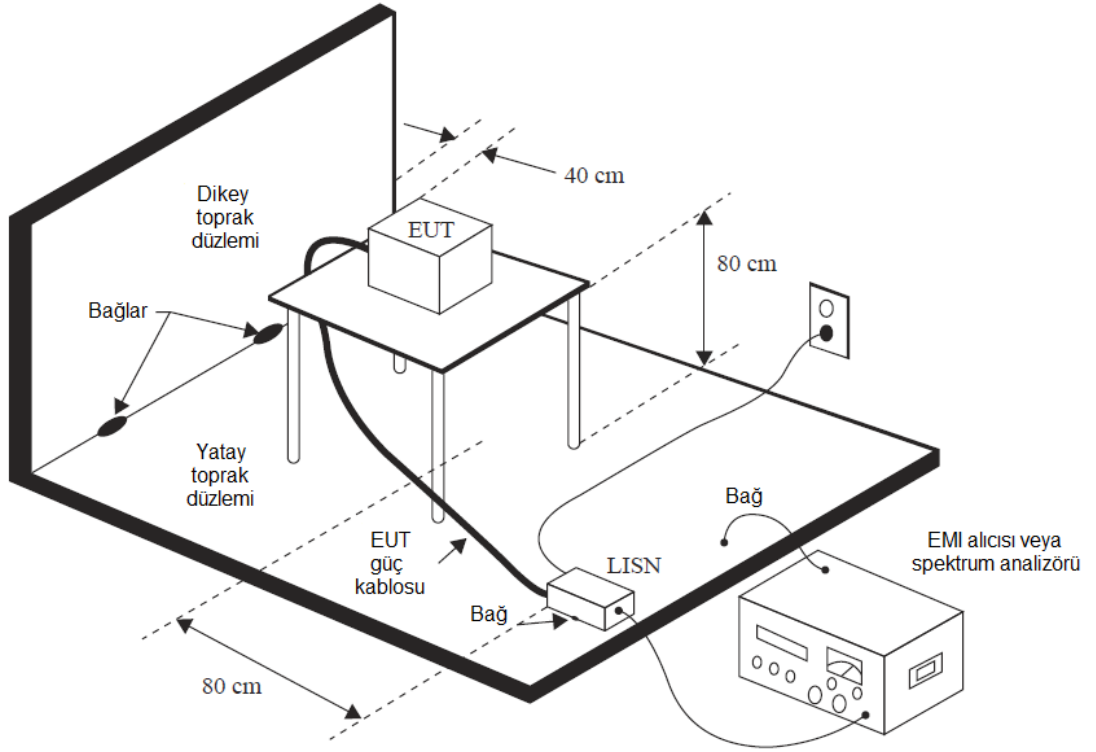
LISN $50\Omega/50\mu\text{H}$ değerlerine sahip olmalıdır. RF iletim yollu emisyon ölçümü için kullanılan LISN cihazının devre şeması Şekil 6.5’te verilmiştir.



Şekil 6.5. LISN devre şeması

Kaynak: Schaffner EMV AG, 2000:6

Emisyon ölçümü yapılacak cihaz standartlarda test altındaki cihaz (equipment under test – EUT) olarak geçmektedir. Test altındaki cihaz şebekeye LISN aracılığıyla bağlanır. Cihazın güç kablosu uzunsa 40 cm’lik demetler halinde bağlanarak kısaltılır. Güç kablosunun topraklı zeminden en az 10 cm yüksekte olmalıdır. Test edilen cihazın şebekeye vereceği RF gürültü LISN tarafından kendisine bağlı olan spektrum analizörüne iletilir. Test edilen cihaz topraklı bakır zemin üzerindeki 80 cm yüksekliğindeki çoğunlukla tahta olan yalıtkan masa üzerinde olmalıdır. Topraklı zemin üzerinde yer alan LISN, RF sinyali özel koaksiyel kablo ile spektrum analizörüne aktarır. Dışarıdan gelen gürültünün test sonuçlarını olumsuz etkilememesi için test ekranlı odada gerçekleştirilir. Ancak ön uyumluluk testleri için gerekli değildir. Hatta tam uyumluluk testleri için bile ekransız odada daha olumsuz şartlarda yapılan testten geçen bir cihaz ekranlı odada daha iyi bir sonuçla geçeceği için ekransız oda sonuçları da kabul edilir. RF iletim yollu emisyon test düzeni Şekil 6.6.’da gösterilmiştir.



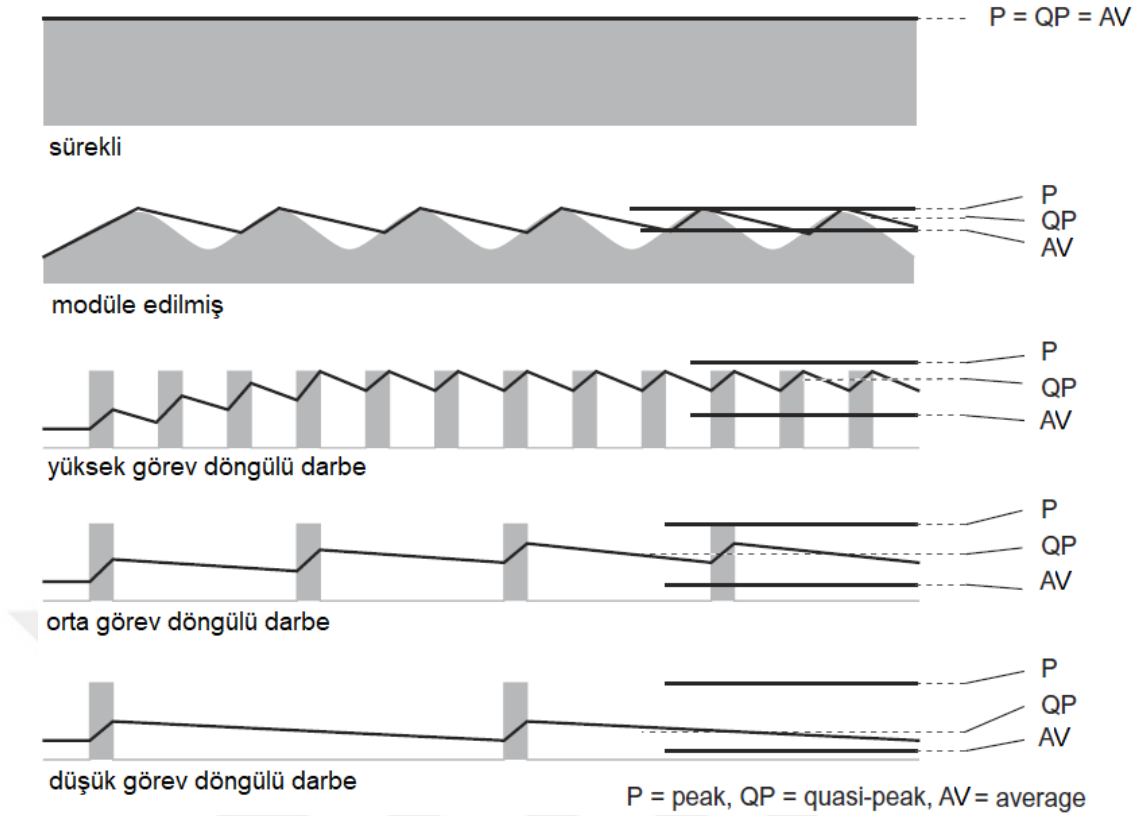
Şekil 6.6. RF iletim yolu emisyon test düzeni

Kaynak: André and Wyatt, 2014:84

Test edilen cihaz normal çalışma modunda iken faz ve nötr iletkenlerinden ayrı ayrı quasi-peak (QP) ve average (AV) ölçüm taraması alınır. EMI test alıcılarında ve spektrum analizörlerinde peak (tepe - PK), quasi-peak (tepe gibi – QP) ve average (ortalama – AV) olmak üzere üç tip dedektör bulunur. Peak dedektörü zamanla değişen gürültü işaretinin en yüksek seviyesini alır. Average dedektörü zamanla değişen gürültü işaretinin belli bir süre boyunca ortalamasını alır. Quasi-peak dedektörü ise zamanla değişen gürültü sinyalinin belli bir süre boyunca tekrarlama sıklığına göre işaret genliğini alır (Sevgi, 2000).

Eğer bir işaret sürekli ise QP değeri PK değerine eşittir. QP değeri bir işaretin genliğine ve tekrarlama sıklığına bağlı olduğundan düşük tekrarlama hızlı darbesel işaretlerde QP ve PK değerleri arasında büyük farklar oluşur. Bu sebeple herhangi bir işaretin QP değeri, PK değerinden küçük veya eşittir (Sevgi, 2006).

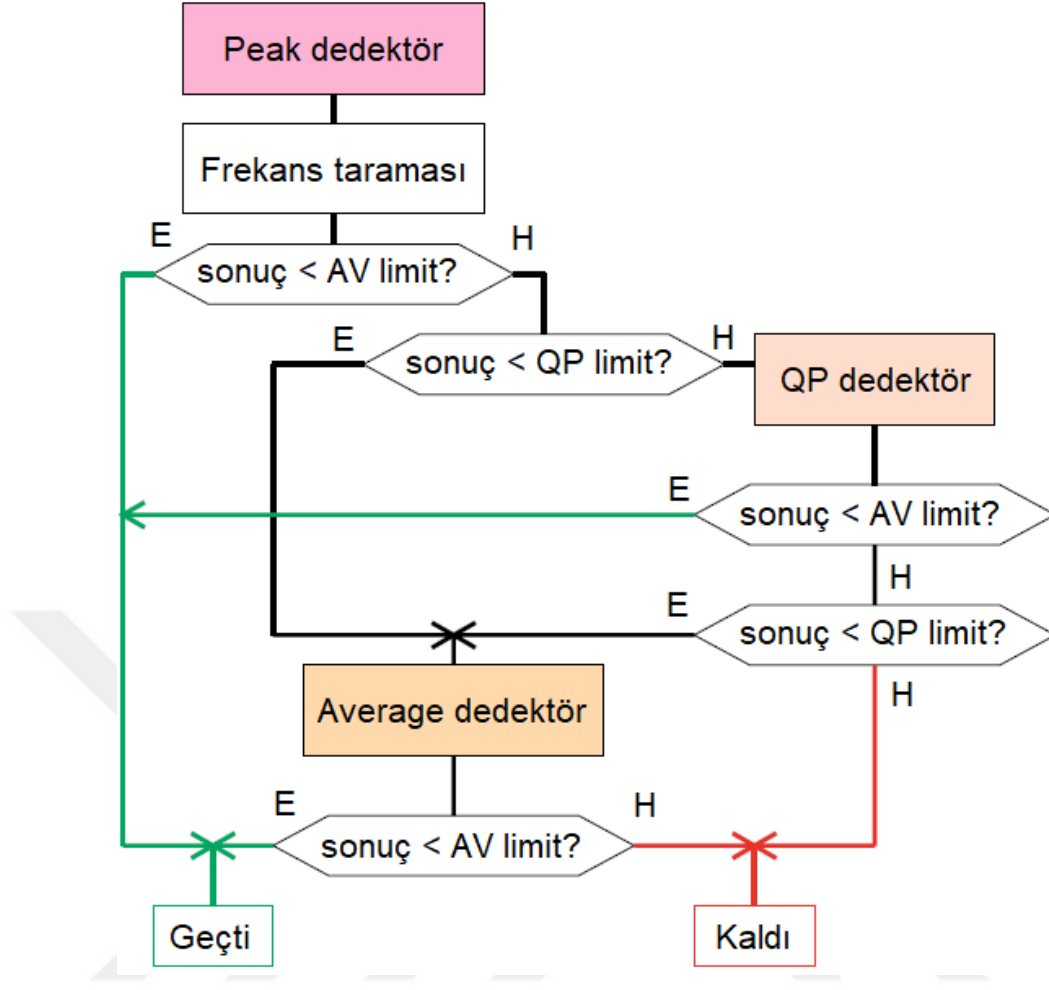
Sürekli bir işaret, modüle edilmiş işaret ile düşük, orta ve yüksek görev döngülü işaretlerin QP ve PK dedektör karşılaştırmaları Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7. Dedektör tipleri

Kaynak: Williams, 2016:145

QP dedektörü ile tarama çok uzun sürdüğünden ve PK dedektörü ile tarama en kötü durumu verdiği için test edilen cihaz faz ve nötr iletkenleri üzerinden PK dedektörü ile taranır. Eğer PK dedektör ölçüm sonucu AV limitinden aşmadıysa cihazın test sonucu başarılıdır. Aksi halde PK dedektör ölçüm sonucu QP limitini aşmamış ve sonrasında AV dedektör ölçüm sonucu AV limitini aşmadıysa cihazın test sonucu başarılı kabul edilir. Bu durumlara da uyulmadığında QP dedektörü ile uzun tarama yapılarak QP dedektörü sonucu QP limitini, AV dedektör sonucu AV limitini aşmaması istenir. Bu durumda herhangi bir limit aşımı olursa cihaz başarısız olarak değerlendirilir. Testten geçme koşul diyagramı Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8. RF iletim yolu emisyon test geçme diyagramı

Kaynak: Teseq AG, 2009:1

A sınıfı iletim yolu emisyon limitleri Çizelge 6.3'te, B sınıfı iletim yolu emisyon limitleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. FCC/CISPR A sınıfı iletim yolu emisyon limitleri

Frekans (MHz)	Quasi-peak (dB µV)	Average (dB µV)
0,15-0,50	79	66
0,50-30	73	60

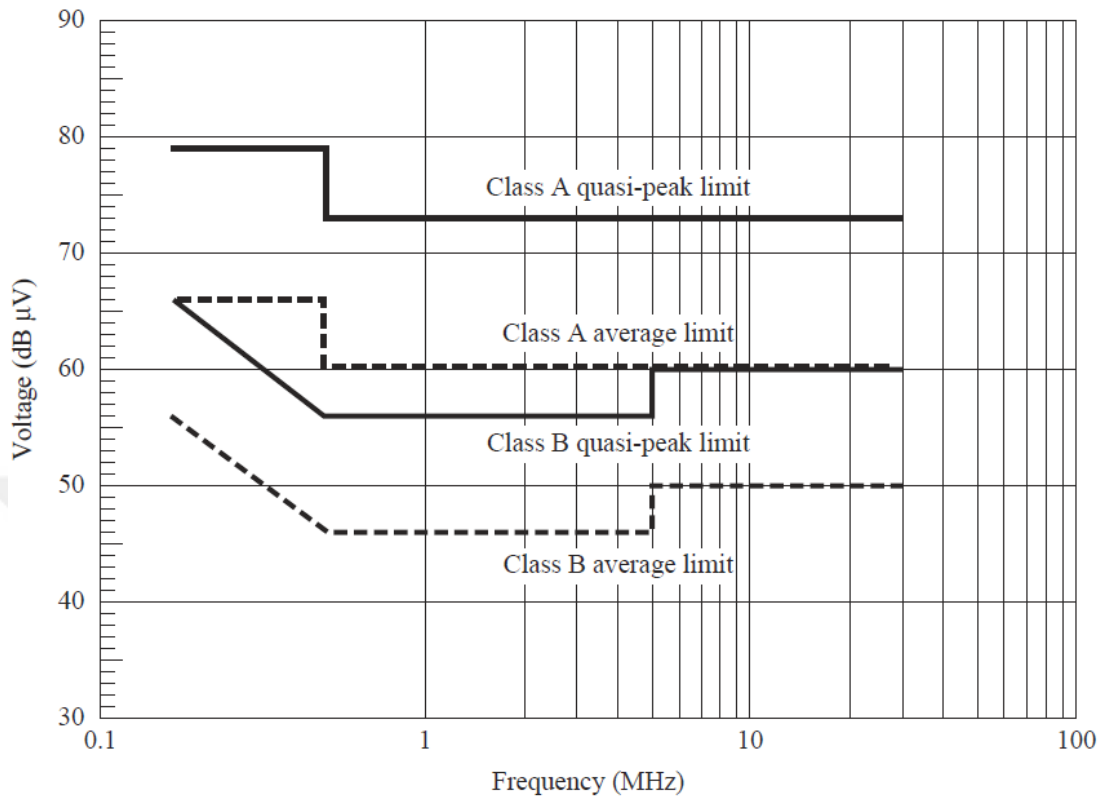
Kaynak: Ott, 2009:13

Çizelge 6.4. FCC/CISPR B sınıfı iletim yolu emisyon limitleri

Frekans (Mhz)	Quasi-peak (dB µV)	Average (dB µV)
0,15-0,50	66 - 56*	56 - 46*
0,50-5	56	46
5-30	60	50
* Limit frekansın logaritmasıyla doğrusal olarak azalır		

Kaynak: Ott, 2009:13

A ve B sınıfları için RF iletim yolu emisyon limitleri Şekil 6.9'da gerilim-frekans grafiği üzerindeki gösterilmiştir.



Şekil 6.9. RF iletim yolu emisyon limitleri

Kaynak: André and Wyatt, 2014:83

RF iletim yolu emisyon ölçümü spektrum analizörü ya da EMI test alıcısı ile test edilen cihazın faz ve nötr iletkenlerinde ayrı ayrı 150 kHz-30 MHz aralığında 9 kHz bant genişliği ve 5970 adet 5 kHz 'lik adımlarla PK dedektörü ile 2 dakika, QP dedektörü ile 100 dakika taranmaktadır. Yüksek darbeli işaretlerin spektrum analizöre zarar vermesini önlemek için spektrum analizörün girişinde darbe limitleyici (pulse limiter) kullanılır. Girişinde darbe limitleyici bulunan 30 GHz'lik bir spektrum analizörü Şekil 6.10'de, test bileşenlerinin bağlantıları Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Spektrum analizörü



Şekil 6.11. Test bileşeni bağlantıları

Spektrum analizörüyle ölçülen değerler genlik-frekans grafiği olarak raporda gösterilir. Limit aşımı olan frekanslar varsa genlik değerleriyle birlikte rapora eklenir ve test sonucu geçti ya da kaldı şeklinde belirtilir.

6.1.2. Harmonik Akım Emisyonları

Doğrusal olmayan yüklerin şebekeden sinüzoidal akım çekmemeleri yüklerin şebeke içerisinde istenmeyen harmonikler oluşturmasına ve bu şekilde birden çok yükün şebeke içerisinde çok sayıda harmonik oluşturması zararlı seviyelere ulaşılmasına neden olmaktadır (Sevgi, 2000). Harmonik test ve ölçümü ile faz başına 16 A'e kadar giriş akımına sahip olan elektrikli ve elektronik cihazların üretebileceği giriş akımının harmonik bileşenlerinin sınırlandırılarak hem şebekenin hem de diğer cihazların korunması amaçlanır.

Harmonik test ve ölçümü EN61000-3-2 standardına göre yapılır. 50 Hz ve 60 Hz şebeke frekansında çalışan 220/380 V, 230/400 V ve 240/415 V gerilimler ile çalışan cihazlara uygulanmaktadır. Harmonik ölçümü yapılacak olan cihaz standartta A, B, C ve D olmak üzere dört gruba ayrılmış olan sınıflardan hangisine uyuyorsa ilgili sınıfının harmonik limitlerine tabi olur. Harmonik akım standardında en fazla 2 kHz'e yani 40.harmoniğe kadar ölçüm harmonik ölçüm cihazı ile alınır. 5 mA'den ya da giriş akımının %0,6'sından daha küçük harmonikler gözardı edilir. Test edilen cihaza ilk enerji verildiğinde ve enerji kesildiğinde 10 s süre boyunca oluşan harmonikler dikkate alınmaz. λ cihazın güç faktörü olmak üzere ilk dört harmonik için izin verilen maksimum akım harmonikleri dört farklı sınıf için Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.5. İlk dört harmonik akım limitleri

Harmonik sırası	Akım limiti				
	Sınıf A	Sınıf B	Sınıf C	Sınıf D	
n	[A]	[A]	Temel frekanstaki giriş akımının yüzdesi olarak ifade edilir [%]	Watt başına izin verilen akım [mA / W]	İzin verilen harmonik akım [A]
2	1,08	1,62	2	-	-
3	2,30	3,45	$3 \times \lambda$	3,4	2,30
4	0,43	0,64	-	-	-

Kaynak: SL Power Electronics, 2018:4

6.1.3. Gerilim Dalgalanması ve Kırpışma

Gerilim değişiklikleri, gerilim dalgalanmaları ve kırpışma ile ilgili sınırlamalar sağlayan ölçüm, faz başına giriş akımı 16A ve daha az olan 50 Hz 220-250 V geriliminde çalışan elektrik ve elektronik ürünleri kapsar. Test ve ölçüm EN61000-3-3 standardına göre yapılır. Cihazın neden olduğu gerilim değişimleri, gerilim dalgalanmaları ve kırpışmalar bu standart ile sınırlandırılarak şebeke ve şebekeye bağlı diğer cihazlara olumsuz etki oluşturması önlemek amaçlanır.

Kırpışma aydınlatma cihazlarında oluşan titreşim şeklindeki rahatsızlıktır. İnsan gözü için kırpışmaya en duyarlı olduğu frekans 8,8 Hz olduğundan cihazların bu frekans bölgesinden uzaklaştırılması hedeflenir (Sevgi, 2000). Kırpışma ölçümleri kırpışma ölçer (flicker meter) ile gerçekleştirilir.

6.2. Bağışıklık Testleri

Bağışıklık (immunity) testleri ya da diğer adıyla alınganlık (susceptibility) testleri cihaz ve sistemlerin elektromanyetik gürültüleme karşı hassasiyetlerinin belirlendiği testlerdir. Bir cihaz elektromanyetik girişimlerden ne kadar çok etkilenirse o kadar bağışıklığı düşük ya da alınganlığı fazla olarak nitelendirilir. Bağışıklık testlerinde test alındaki cihaza farklı yollarla farklı parametrelerde gürültü uygulanır. Her birisi farklı test olarak farklı standartlarda tarif edilmişlerdir. Hepsinde test altındaki cihazın çalışmasında ve fonksiyonlarında bozulma olup olmadığı gözlenir. Bunun için test sırasında cihaza gürültü uygulanırken cihazın tüm farklı çalışma modlarında tüm fonksiyonları dikkatlice gözlemlenir. Gözlemlenen sonuçların performans kriter karşılığı ile birlikte geçtiği ya da kaldığı raporda belirtilir.

Bağışıklık testlerinde şu performans kriterleri kullanılır:

- A: Test edilen cihazda test sırasında herhangi bir bozulma görülmemesi gerekir. Herhangi bir fonksiyon kaybı ya da performans düşüklüğü olmaması istenir.
- B: Test edilen cihazda test sırasında bozulma, fonksiyon kaybı ya da performans düşüklüğü görölse de test sonlandırıldıktan sonra operatör müdahalesi gerekmeden cihaz normal çalışma haline dönmelidir. Test sonrasında fonksiyon kaybı ya da performans düşüklüğü olmamalıdır.
- C: Fonksiyon kaybı ya da performans düşüklüğüne izin verilir. Ancak operatör müdahalesi ile cihaz normal çalışma koşullarına geri dönmelidir.
- D: Donanımsal, yazılımsal hasardan veya veri kaybından dolayı düzeltilemez fonksiyon kaybı ya da performans düşüklüğü vardır.

6.2.1. RF İletim Yollu Bağışıklık

RF iletim yollu bağışıklık testinde bir cihaz ya da sistemin kablo iletkenleri üzerine RF gürültü eklenmesiyle normal çalışmasında fonksiyon kaybı ya da performans düşüşü olup olmadığı gözlenir. EN61000-4-6 Radyofrekans alanlarının neden olduğu temaslı rahatsızlıklara karşı bağışıklık test standardına göre yapılır. AC şebekeden beslenen cihazların enerji kablosuna uygulanır. Ayrıca ürünün tabi olduğu standarda göre cihaz ya da sistemin enerji portu haricindeki sinyal, kontrol ve haberleşme gibi diğer portlara uygulanması da istenebilir. Genelde bu portlara test uygulanması için kablo uzunluğunun 3 m'den uzun olması şartı vardır.

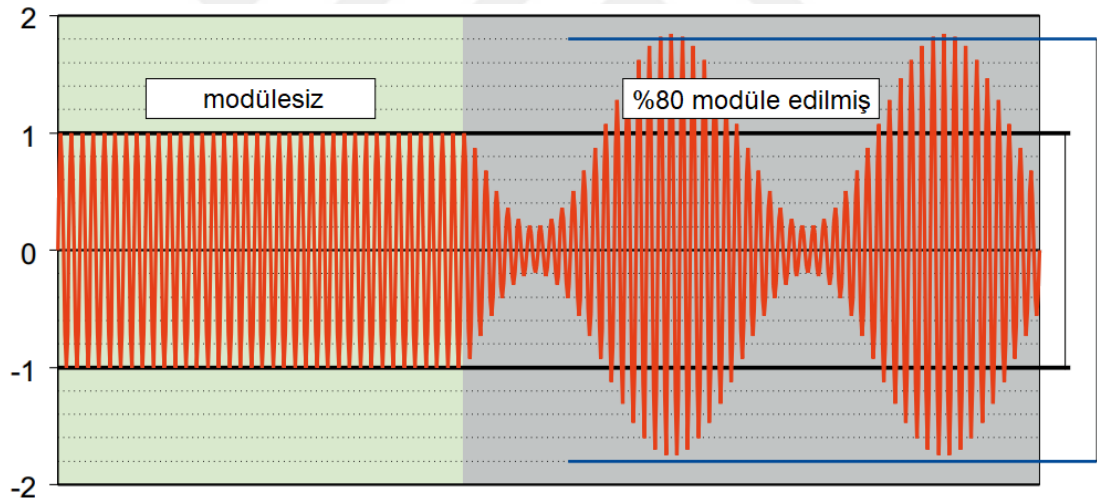
Cihaz ya da sistemin tabi olduğu standarda göre farklı RMS (root mean square) değerlerinde 1 kHz %80 genlik modülasyonu (amplitude modulation – AM) parametrelerine sahip sinüzoidal gürültü işareti 150 kHz- 80 MHz aralığında kablolarına uygulanır.

Çizelge 6.6. RF iletim yolu bağışıklık test seviyeleri

Level	Açık devre test gerilimi ($\pm\%10$)	
	V_{rms}	dB(μ V)
1	1	120
2	3	130
3	10	140
X ^a	özel	
^a "X", diğerleri arasında, üstünde veya altında herhangi bir seviye olabilir. Seviye, özel ekipman spesifikasyonunda belirtilmektedir.		

Kaynak: Loukil and Siala, 2013:81

1 V_{rms} geriliminde modüle edilmemiş bir sinüzoidal işaretin %80 genlik modülasyonlu hali Şekil 6.12'de gösterilmiştir. 1 V_{rms} işarete genlik modülasyonu uygulandığında genliği 1,8 katına çıkmaktadır.

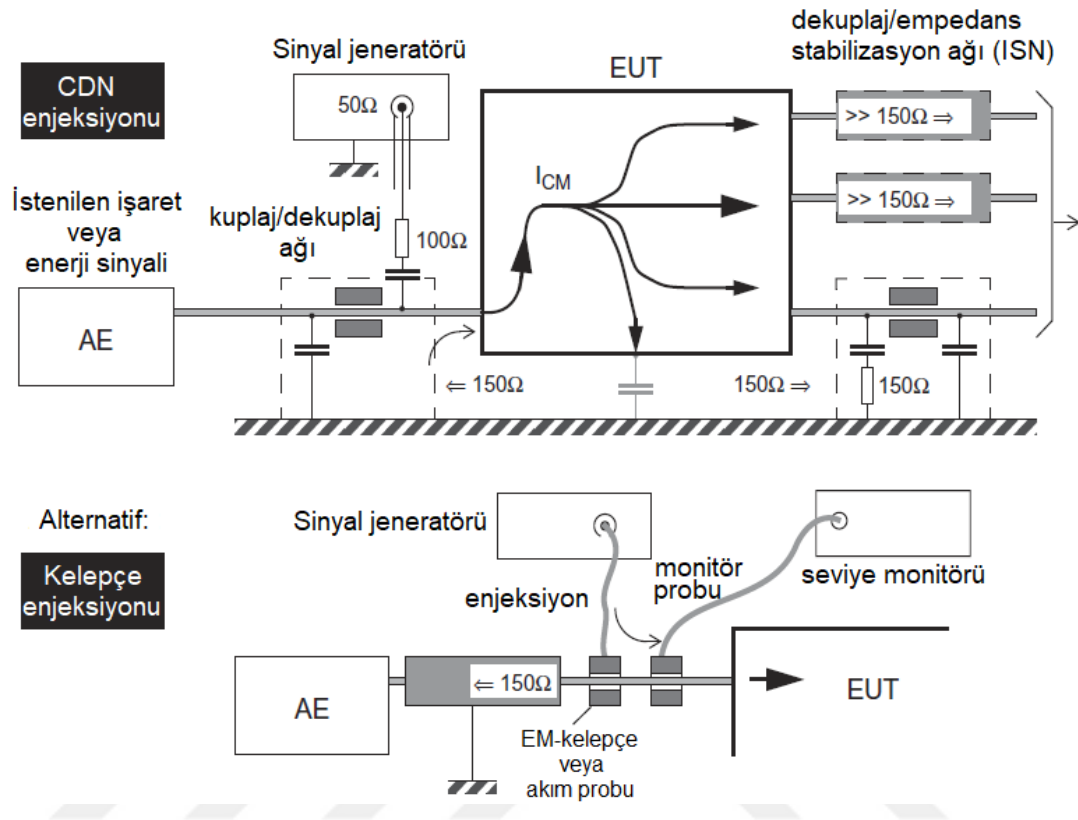


Şekil 6.12. %80 genlik modülasyonlu işaret

Kaynak: Teseq AG, 2009:1

RF iletim yolu bağışıklık testi için gürültü işareti sinyal jeneratörü ile üretilir ve RF kuvvetlendirici ile standarda uygun biçime yükseltilir. Bu gürültü işareti ya kuplaj/dekoplaj ağ (Coupling/decoupling network – CDN) cihazı ile test altındaki cihazın enerji sinyaline eklenerek cihaza kuple edilir, ya da elektromanyetik kelepçe (EM clamp) veya akım enjeksiyon probu (current injection probe) vasıtasıyla enerji/kontrol/sinyal/haberleşme kablolarına kuple ettirilir. Bu testte simüle edilen işaret ortak mod gürültüsü olarak aktarılır. Test sırasında test edilen cihazda meydana

gelen bozulmalar takip edilerek etki seviyesine göre rapor düzenlenir. RF iletim yolu bağımsızlık test düzeni Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



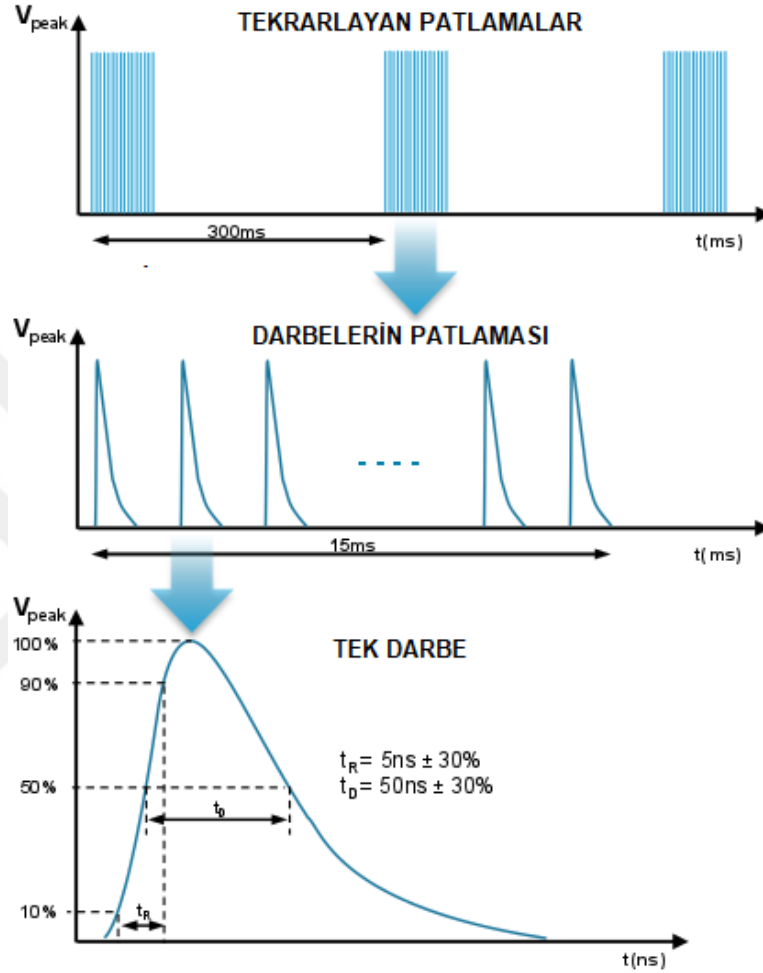
Şekil 6.13. RF iletim yolu bağımsızlık test düzeni

Kaynak: Williams, 2016:210

6.2.2. Elektriksel Hızlı Geçici Rejim/Patlama Bağışıklığı

Bir cihazın bağlı bulunduğu şebekede röle veya kontaktörler gibi endüktif yüklerin enerjileri kesildiğinde ya da yüksek hızlı anahtarlama cihazlarının oluşturmuş olduğu geçici yüksek frekanslı darbeler bağımsızlık seviyesi düşük cihazların çalışmalarında bozulmalara neden olmaktadır. EN61000-4-4 elektriksel hızlı geçici rejim/patlama (EFT/Burst) bağımsızlık test standardı bu yüksek frekanslı ve genlikli gürültü işaretlerinin simüle edilerek test altındaki cihazın bağımsızlığını tespit etmeyi amaçlar. Test edilecek cihazın tabii olduğu ürün ailesi standardında belirtilen genlik seviyesine göre EN61000-4-4 temel standardına uygun olarak test gerçekleştirilir. Test altındaki cihazın enerji beslemesine faz-nötr, faz-toprak ve nötr-toprak terminalleri arasında CDN ya da EM kelepçe ile tek tek gürültü işareti her iki polaritede uygulanır ve bozulmalar gözlemlenir. 3 m'den daha uzun olan sinyal/kontrol/haberleşme kablolarına da EM kelepçe ile gürültü kuple edilir. Gürültü sinyali 1 dk'dan az

olmayacak bir süre boyunca her 300 ms’de bir tekrarlanan 75 darbeden oluşan işaretlerden oluşur. Her darbe 5 ns yükselme süresine ve 5 kHz tekrarlama frekansı ile 50 ns genişliğe sahiptir. Gürültü patlamaları ve darbelerinin dalga biçimi Şekil 6.14’de verilmiştir.



Şekil 6.14. EFT/Burst işareti dalga biçimi

Kaynak: Corsaro et al., 2015:11

EFT/Burst testinin standartta yer alan, güç portlarına ve diğer sinyal portlarına uygulanacak seviyeleri Çizelge 6.7’de verilmiştir.

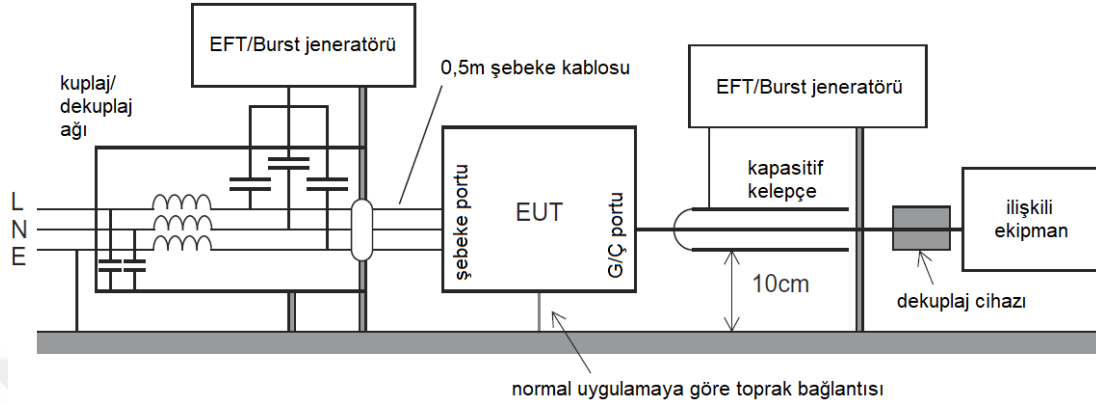
Çizelge 6.7. EFT/Burst test seviyeleri

Test seviyesi	Uygulanacak açık devre test gerilimi (±%10) [kV]	
	Güç portları	Sinyal, veri, kontrol g/ç portları
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
x	özel	özel

Seviye x, imalatçı ve müşteri arasında sözleşmeye bağlı olarak tanımlanır.

Kaynak: Delaballe, 2001:22

Test, gürültü sinyalini oluşturan EFT/Burst test jeneratörü kullanılarak yapılır. Enerji portuna CDN ile diğer giriş/çıkış portlarına ise kapasitif kelepçe ile uygulanır. Bazı EFT/Burst test jeneratörlerinin içerisinde dahili CDN bulunmaktadır. EFT/Burst test düzeni Şekil 6.15’de gösterilmiştir.



Şekil 6.15. EFT/Burst test düzeni

Kaynak: Williams, 2016:217

Test altındaki cihaza tabi olduğu standartta belirtilen seviyelerde gürültü uygulanarak fonksiyon kaybı ya da performans düşüklüğü olup olmadığı izlenir. Gözlemlere göre performans kriteri ve test sonucu raporda belirtilir.

6.2.3. Darbe Bağışıklığı

Darbe (surge) bağışıklık testi, güç hatları ve uzun sinyal hatlarında genellikle hat çevresindeki yıldırım çarpmaları nedeniyle oluşan yüksek enerjili ancak nispeten yavaş geçici aşırı gerilimleri simüle eder. Test edilecek cihaz, tabi olduğu standartta belirtilen test seviyesinde EN61000-4-5 temel standardına göre test edilir. Darbe test jeneratörü tarafından simüle edilen yıldırım darbesi gürültüsü faz-nötr, faz-toprak ve nötr-toprak arasında ayrı ayrı her iki polaritede uygulanır. EN61000-4-5 darbe bağışıklık testine göre deney seviyeleri Çizelge 6.8’de verilmiştir.

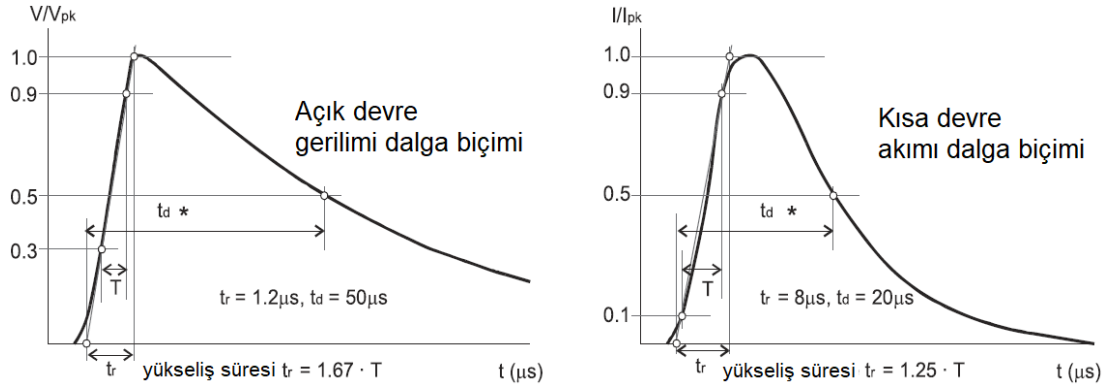
Çizelge 6.8. Darbe bağışıklık test seviyeleri

Test seviyesi	Açık devre test gerilimi ($\pm\%10$) [kV]
1	0,5
2	1
3	2
4	4
x	özel

Seviye x, imalatçı ve müşteri arasında sözleşmeye bağlı olarak tanımlanır.

Kaynak: Delaballe, 2001:23

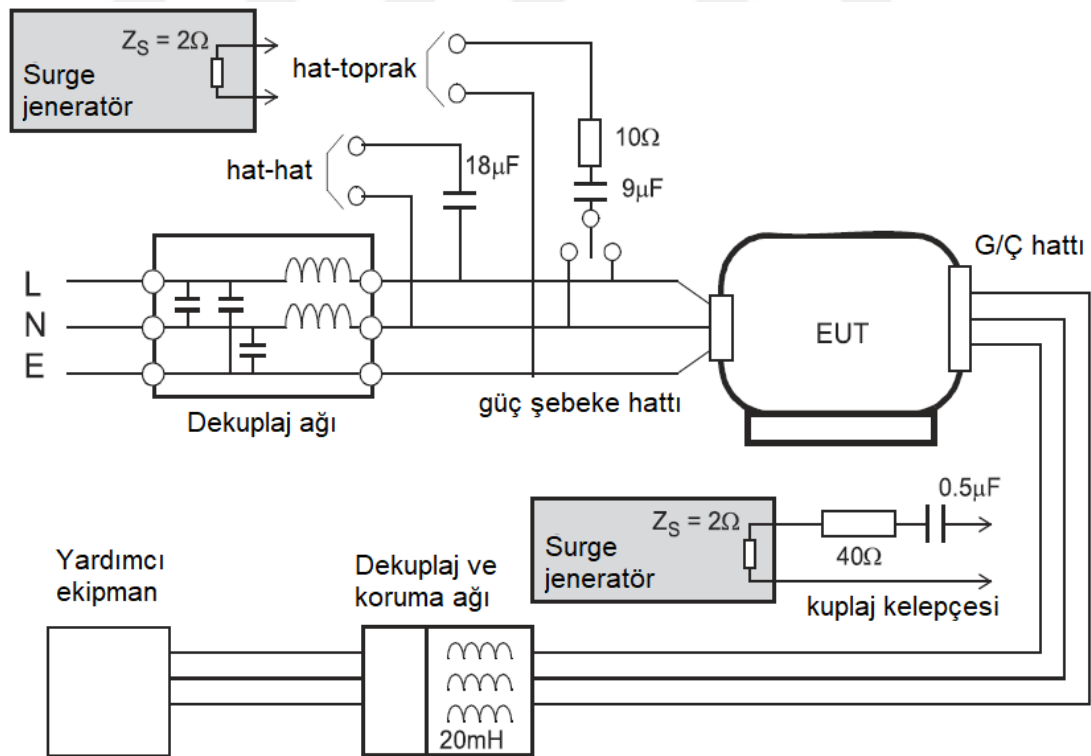
Uygulanan gürültü darbeleri tipik olarak $1,2 \mu\text{s}$ yükselme ve $50 \mu\text{s}$ darbe genişlik süresine sahiptir (Sevgi, 2000). Test gürültü işaretine ait darbe dalga biçimi Şekil 6.16'da gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Darbe dalga biçimi

Kaynak: Williams, 2016:218

Simüle edilmiş yıldırım darbe gürültüleri CDN ile şebeke enerjisine kuple ettirilir. Giriş/çıkış portlarına test uygulaması kuplaj kelepçesi ile gürültünün kablolarla aktarılmasıyla yapılır. Darbe bağışıklık test düzeneği Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17. Darbe bağışıklık test düzeneği

Kaynak: Williams, 2016:218

Test sırasında test altındaki cihazda meydana gelen fonksiyon kayıplar ve performans düşmeleri takip edilir. Uygun performans kriteriyle birlikte test sonucu raporda belirtilir.

6.2.4. Gerilim Çukurları, Kısa Kesintiler ve Gerilim Değişmeleri

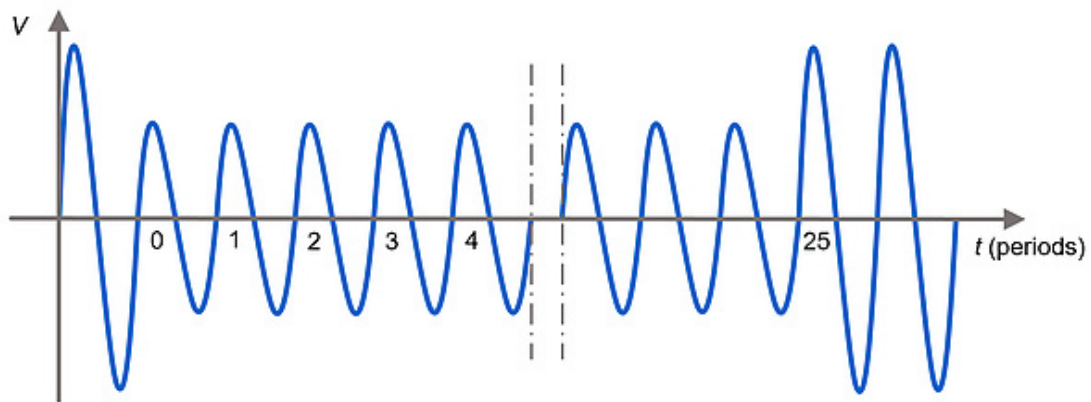
Elektrikli ve elektronik cihazlar, voltaj düşüşlerinden, kısa süreli kesintilerden veya güç kaynağının voltaj değişikliklerinden etkilenebilir. Cihaz ve sistemlerin bağlı oldukları şebekedeki enerji süreksizliklerine karşı bağışıklığını ortaya koyan bir testtir. 50 Hz ve 60 Hz şebekelere bağlı faz başına 16 A akım değerini aşmayan elektrikli ve elektronik cihazlar için geçerlidir. DC cihaz ve sistemlere uygulanmaz. Test parametreleri EN61000-4-11 standardında belirtilmiştir. Test bu standardın uygulanmasını destekleyen bir test jeneratörü ve standarttaki gerilim değerlerini jeneratör için sağlayan bir ayarlı transformatör ile gerçekleştirilir.

Gerilim çukurları, normal çalışma geriliminin kısa bir süreliğine düşmesi ve sonrasında normal değerine ulaşmasını ifade eder.

Kısa kesintiler, tipik olarak 1 dakikayı geçmeyen kısa bir süre için AC voltajının kaybolması ve ardından orijinal voltajın geri kazanılması olarak tanımlanır. Kısa kesinti anlarında voltaj sıfırdır.

Voltaj değişiklikleri, besleme voltajının nominal voltajdan daha yüksek veya daha düşük bir değere kademeli olarak değiştirilmesidir. Süre kısa veya uzun olabilir.

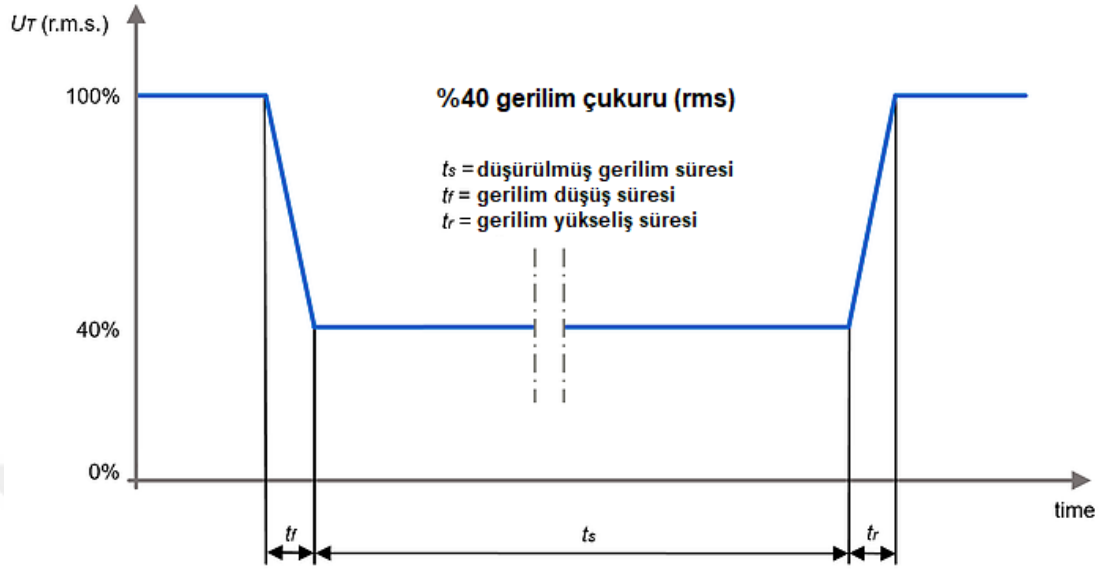
Nominal gerilim değerine sahip sinüzoidal işarete 25 s süre ile %70 gerilim çukuru uygulaması Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18. 25sn'lik %70 gerilim çukuru

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-standards.>, Erişim tarihi: 4 Mayıs 2020

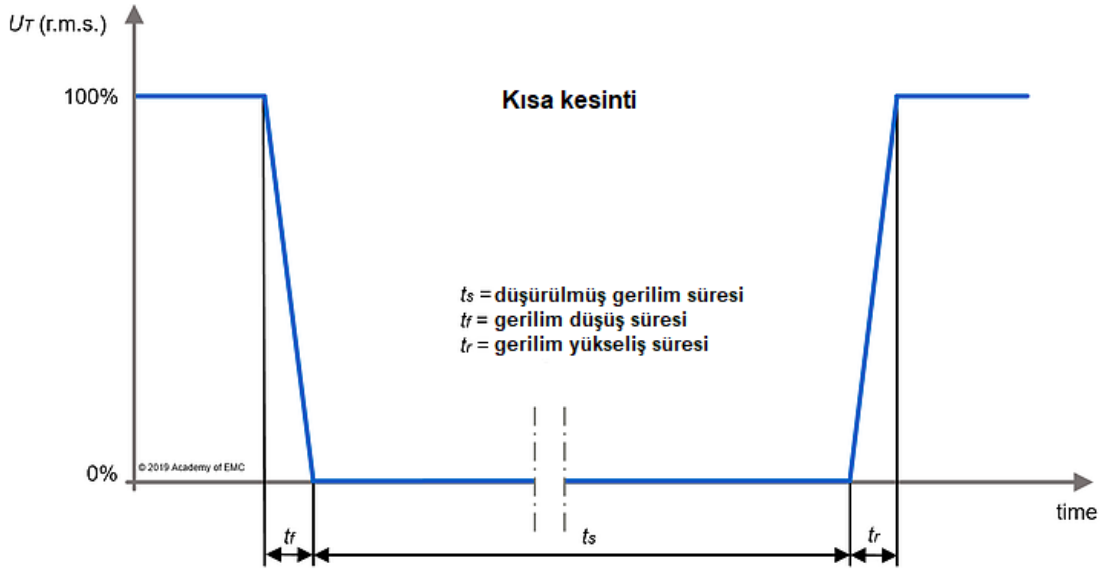
Nominal RMS gerilime %40 gerilim çukurunun uygulanmasına işaret grafiği Şekil 6.19'da verilmiştir.



Şekil 6.19. %40 gerilim çukuru RMS grafiği

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-standards.>, Erişim tarihi: 4 Mayıs 2020

Nominal gerilime uygulanan kısa kesinti grafiği Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.20. Kısa kesinti grafiği

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-standards.>, Erişim tarihi: 4 Mayıs 2020

Test altındaki cihazın tabi olduğu standartta belirtilen seviyede test işlemi test jeneratörü tarafından uygulanır. Gerilim çukurları için test seviyeleri ve parametreleri Çizelge 6.9'da, kısa kesintiler için ise Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Gerilim çukuru test seviyeleri

Sınıf	Gerilim çukurları için test seviyesi ve süresi (50/60 Hz)				
1	Cihaz özelliklerine göre değişir				
2	0,5 çevrim süresince %0	0,5 çevrim süresince %0	25/30 çevrim süresince %70		
3	0,5 çevrim süresince %0	0,5 çevrim süresince %0	10/12 çevrim süresince %40	25/30 çevrim süresince %70	250/300 çevrim süresince %80

Kaynak: SL Power Electronics, 2018:15

Çizelge 6.10. Kısa kesintiler test seviyeleri

Sınıf	Kısa kesintiler için test seviyesi ve süreleri (50/60 Hz)
1	Cihaz özelliklerine göre değişir
2	250/300 çevrim süresince %0
3	250/300 çevrim süresince %0

Kaynak: SL Power Electronics, 2018:15

Test altındaki cihaz tabi olduğu standartta belirtilen seviye ve parametrelerde EN61000-4-11 temel standardına göre gerilim çukuru, kısa kesinti ve gerilim değişimlerine maruz bırakılır. Bu test sürecinde cihazda meydana gelen fonksiyon kayıpları ve performans düşüşleri izlenerek test raporunda geçtiği ya da kaldığı belirtilir.

6.2.5. Elektrostatik Boşalma Bağışıklığı

Statik elektrik yükü taşıyan nesnelere yüksek voltajları sebebiyle elektronik ürünlere değdirildiğinde ya da yaklaştırıldığında zarar verebilmektedir. Bu yüzden elektronik cihazların kV'lar seviyelerinde statik elektrik yüklerine karşı bağışık şekilde tasarlanmaları beklenir. Elektrostatik boşalma (electrostatic discharge – ESD) bağışıklık testi ile elektronik ürünlerin bu bağışıklığı tespit edilir. EN61000-4-2 temel standardına göre yapılır. Test edilecek cihazın tabi olduğu standartta belirtilen seviyelerde yine standartta belirtilen noktalara kV mertebesinde statik yük her iki polaritede standartta belirtilen sayılarda elektrostatik tabanca ile uygulanır. Elektrostatik boşalma bağışıklık test seviyeleri Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Elektrostatik boşalma test seviyeleri

Test seviyesi	Test gerilimi	
	Temaslı	Havadan
1	2 kV	2 kV
2	4 kV	4 kV
3	6 kV	8 kV
4	8 kV	15 kV
x	özel	özel
Test seviyeleri kendinden düşük test seviyelerini de sağlamalıdır.		

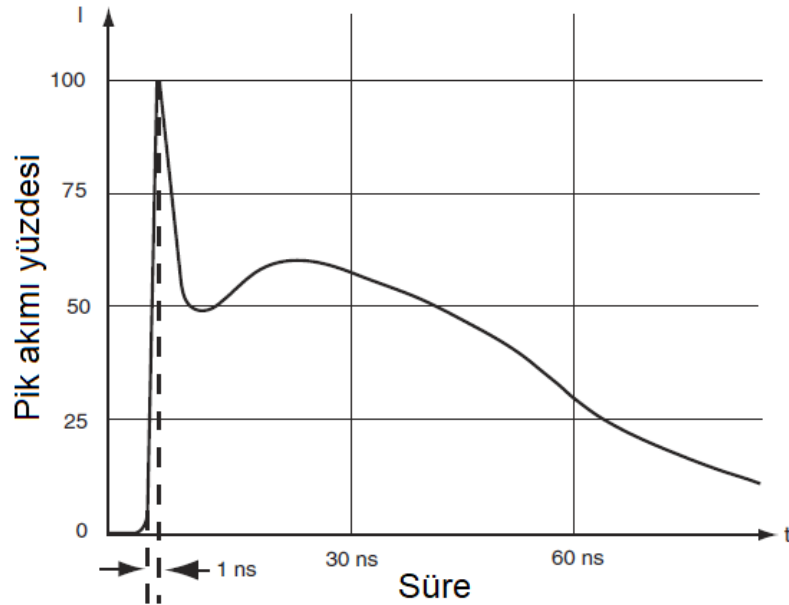
Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-standards.>, Erişim tarihi: 5 Mayıs 2020

Elektrostatik boşalma testinin uygulanmasında kullanılan elektrostatik tabanca Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. ESD tabancası

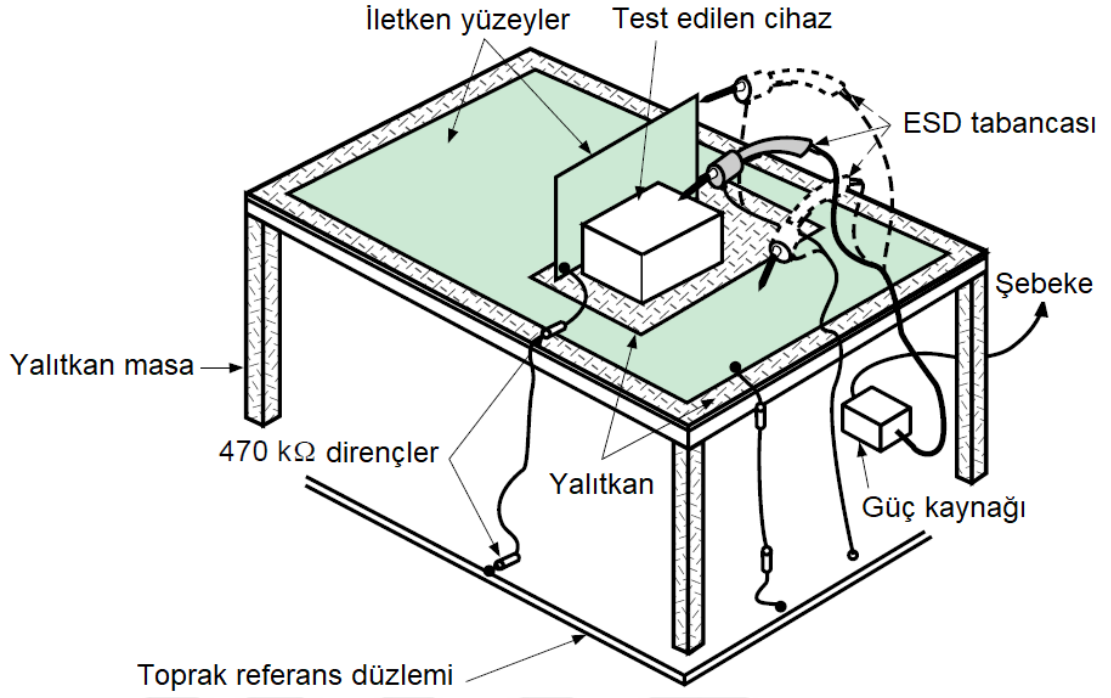
Elektrostatik yük tabancası ile standartta belirtilen şekil ve seviyelerde elektrostatik yük test edilen cihaza uygulanır. Her seviye hem temaslı hem de havadan uygulama içerir. Temaslı uygulamada elektrostatik yük test altındaki cihazın mahfazasındaki metal noktalara dokundurulur. Havadan uygulamada ise elektrostatik yük test altındaki cihazın mahfazasındaki LCD ekran, buton ve LED’ler gibi yüzeylere yaklaştırılarak uygulanır. Yüksek gerilim seviyesi her iki polaritede de uygulanması gerekir. ESD tabancasının ürettiği darbe dalga biçimi Şekil 6.22’de verilmiştir.



Şekil 6.22. ESD dalga biçimi

Kaynak: Ott, 2009:588

Elektrostatik boşalma bağışıklık test düzeni Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



Şekil 6.23. ESD bağışıklık test düzeni

Kaynak: Delaballe, 2001:21

Elektrostatik boşalma bağışıklık deneyi süresince test altındaki cihazda meydana gelen fonksiyon kayıpları ve performans düşmeleri izlenerek uygun performans kriteriyle birlikte test raporunda cihazın testi geçip geçmediğı belirtilir.

7. EMI KORUNMA TEKNİKLERİ

EMC problemleri cihazın EMI'ye karşı olan bağışıklık problemleri ve cihazın emisyon problemleri olarak iki ana grupta incelenir. Bu iki ana başlık kendi içerisinde iletim yollu (conducted) ve ışıma yollu (radiated) olarak ikiye ayrılır. Bu ikiye ayrılması daha ayrılmaktadır. Bu tezin çalışması konusu yalnızca iletim yollu (conducted) problemlerin giderilmesi üzerine olduğundan EMC problemlerinin çözümünde iletim yollu EMI problemlerinin çözüm teknikleri üzerine durulmuştur. Buna rağmen konu bütünlüğünü korumak için ışıma yollu (radiated) EMI problemlerine de yüzeysel olarak yer verilmiştir.

Bağışıklık (immunity) ve emisyon (emission) problemlerinde problem çözme amaçları şunlardır;

1) Bir cihaz veya sistem, elektromanyetik girişime karşı yüksek hassasiyet göstererek çalışmasında geçici veya kalıcı fonksiyon kayıpları oluşuyorsa EMI korunma teknikleri uygulanarak alınganlık (susceptibility) seviyesi düşürülmeli yani bağışıklık (immunity) seviyesi artırılmalıdır.

2) Bir cihaz veya sistem, diğer cihazların çalışmasını olumsuz etkileyecek seviyelerde elektromanyetik girişime sebep olarak diğer cihazlar üzerinde bozucu etkiler oluşturuyorsa EMI korunma teknikleri uygulanarak emisyon (emission) seviyesi azaltılmalıdır.

Bu iki ana gruba dahil EMI problemlerinin yok edilmesinde aşağıdaki EMI korunma teknikleri kullanılmaktadır:

- 1) Ekranlama (shielding/screening)
- 2) Topraklama (grounding)
- 3) Filtreler (filters)
- 4) Kablo ve konnektörler (cable and connectors)
- 5) Baskı devre tasarımı (PCB design)
- 6) Empedans uyumluluğu (impedance matching)

7) Elektronik malzeme seçimi (component choosing)

Bu EMI'den korunma teknik konu başlıkları hem EMI'ye karşı bağıklık artırma hem de emisyon azaltma tekniklerini içermektedir.

7.1. Ekranlama

Ekranlama (screening); kart, devre ya da cihaz seviyesinde iki ortamı birbirinden elektromanyetik olarak ayırarak ortamlar arasında izolasyon sağlanması olarak ifade edilir (Sevgi, 2006). Ekranlama yerine kalkanlama (shielding) ifadesi de kullanılabilir. Elektromanyetik dalgaların enerjisi uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak zayıfladığından ortamdaki bozucu elektromanyetik dalganın etkisinden kurtulmak için gürültü kaynağından uzaklaşılması aradaki mesafenin artırılması gerekir. Ancak bunun mümkün olmadığı durumlar için ekranlama yöntemi ile ortamlar birbirinden izole edilir. Ekranlama malzemesi olarak çoğunlukla iletkenlik değeri yüksek malzemeler kullanılır.

Elektromanyetik girişim kaynakları elektrik dipol ve manyetik dipol gibi davranırlar. İçinden akım geçen iletken tel davranışı elektrik dipol, içinden akım geçen iletken halka davranışı manyetik dipol davranışı gösterir. Elektriksel dipol etrafında şiddetli bir elektrik alan, manyetik dipol etrafında ise şiddetli bir manyetik alan oluşur. Uzak alanda (far field) iki kaynağın etkileri açısından fark bulunmamaktadır. Buna göre; elektriksel dipol davranışlı EMI kaynağı yakınında elektriksel ekranlama, manyetik dipol davranışlı EMI kaynağı yakınında manyetik ekranlama uygulanmalıdır (Sevgi, 2006).

Ekranlama, girişim kaynağı ile kurban arasına konan EMI sönümleyici levha ya da conta gibi bir malzeme olabilir. Buna ilaveten ekranlama malzemesi Faraday Kafesi gibi bir metal mahfaza da olabilir. Şekil 7.1'de faraday kafesi mahfazalı ekranlı bir AC/DC güç kaynağı gösterilmiştir.

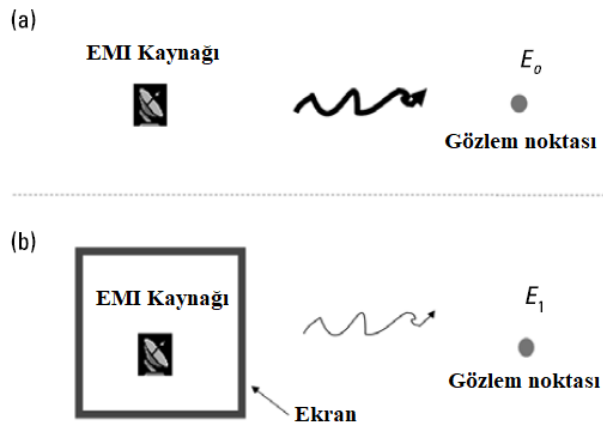


Şekil 7.1. Ekranlı güç kaynağı

Kaynak: <https://electronics.stackexchange.com/questions/135614/switching-power-supply-using-faraday-cage-and-emi-protection.>, Erişim tarihi: 4 Ocak 2020

Ekranlama işleminin seviyesi “ekranlama etkinliği (shielding effectiveness-SE)” ile belirlenir. Ekranlama etkinliği ölçüsü oransal olup desibel (dB) ile ifade edilir. Ekranlama etkinliği, girişim kaynağı ve kurban/alıcı arasındaki ekranlama malzemesi olmadan oluşan alan şiddetinin ekranlama malzemesi bulunmaktayken oluşan alan şiddetine oranı olarak tanımlanmaktadır.

Ekransız bir EMI kaynağı (a) ile ekranlı bir EMI kaynağı (b) ve gözlem noktaları Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2. Ekranlama etkinliği

Kaynak: Sevgi, 2019:278

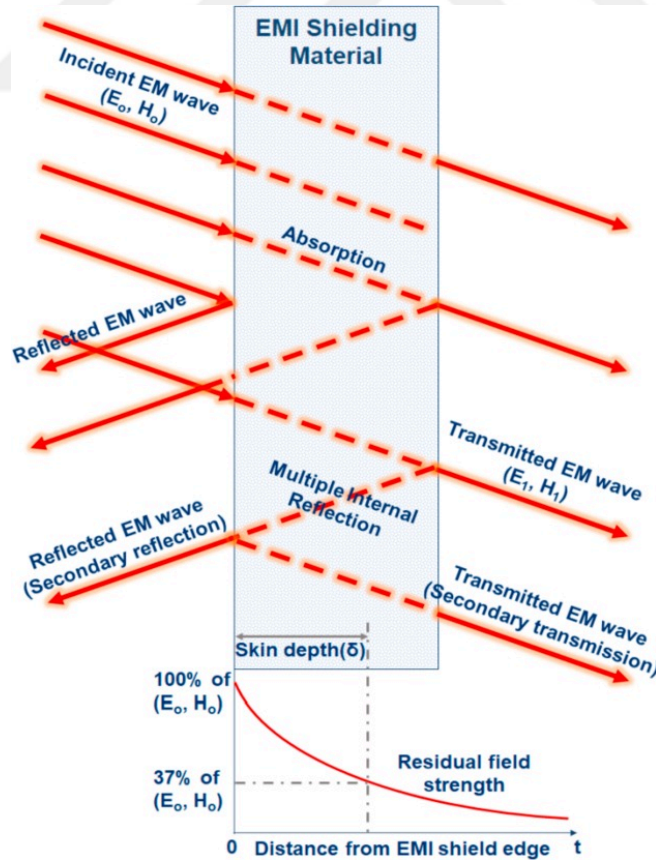
Ekranlama etkinliği tanımına göre;

E_0 ve H_0 ekranlanma yapılmadan kaynaktan yayılan kurban/alıcı noktasında oluşan alan şiddetini, E_1 ve H_1 ekranlanma yapıldıktan sonra kaynaktan yayılan kurban/alıcı noktasında oluşan alan şiddetini temsil etmek üzere ekranlama etkinliği formülü Denklemler 7.1’de verilmiştir.

$$SE = 20 \log_{10} \left(\frac{E_0}{E_1} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{H_0}{H_1} \right) \quad (7.1)$$

SE değerinin büyük olması ekranlama etkinliğinin iyi olması anlamına gelir. SE değerinin negatif çıkması mümkündür. Bu rezonans etkisi sebebiyle ekranlamanın daha kötü bir sonuç oluşturmasına yani gürültüyü zayıflatmak yerine güçlendirdiği anlamına gelmektedir.

Birinci ortamdan ikinci ortama doğru gelen EM dalğının bir kısmı hava ekran sınırından geri yansır. Ekran içerisine giren EM dalğının ise bir kısmı soğrulurken bir kısmı ekran içerisinde çoklu yansımalara uğrar. şekil 7.3’te gelen dalğının ekranlama malzemesindeki soğrulması, yansması ve iletilmesi gösterilmiştir.



şekil 7.3. EMI ekranlama şematik gösterim

Kaynak: Wang et al, 2018

Şekil 7.3'te görülen gelen, yansıyan, yutulan, çoklu yansıyan ve sızan EM dalgalar, dalga empedansı, frekans, polarizasyon, sinyal genliği, ekranlama malzemesinin deri kalınlığı ve elektriksel özellikleri gibi parametrelere göre değişkenlik gösterirler.

Yutulma kaybı faktörü: A, yansıma kaybı faktörü: R, çoklu yansıma etkileri faktörü: B olmak üzere toplam ekranlama etkinliği SE Denklem 7.2'de verilmiştir.

$$SE = R + A + B \text{ [dB]} \quad (7.2)$$

Yutulma kaybı faktörü A, 10 dB'den büyükse çoklu yansıma faktörü B ihmal edilebileceği gibi pratik hesaplamalarda elektrik alanlar ve düzlem dalgalar için de B ihmal edilebilmektedir (Wang et al, 2018).

Ekranlama etkinliği seviyeleri için genel olarak kabul edilen kanı E: EM alan, P: EM güç olmak üzere Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Ekranlama etkinliği seviyeleri

Ekranlama (SE)	$E_{dış}/E_{iç}$	$P_{dış}/P_{iç}$	Açıklama
10 dB	% 32	% 10	Kötü
20 dB	% 10	% 1	Alt sınır
30 dB	% 3,6	% 0,1	Ortalama
60 dB	% 0,1	% 0,0001	İyi
90 dB	% 0,0031	% 0,001 ppm	Çok iyi
120 dB	% 0,0001	% 0,000001 ppm	Olağanüstü

Kaynak: Sevgi, 2006:77

EM dalganın ekran malzemesi içerisindeki ilerlemesi “deri kalınlığı” ya da “cidar kalınlığı” olarak tanımlanır. Kayıplı ortamda ilerleyen EM dalganın başlangıçtaki genliğinin %36,8'ine ($e^{-1} = 0,368$) düştüğü mesafe deri kalınlığıdır (Cengiz, 2009). Deri kalınlığı “ δ ” ile gösterilir ve birimi metredir.

Deri kalınlığı δ ;

$$\delta[m] = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}{2} \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2}} - 1}} \quad (7.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

α : zayıflama sabiti [1/m]

ω : $2\pi f$ açısal frekans [rad/s]

μ : malzemenin manyetik permeabilitesi [H/m]

σ : malzemenin iletkenliği [S/m]

ε : EM dalga yayılım ortamının dielektrik sabiti [F/m]

İyi iletkenler için $\sigma \gg \omega\varepsilon$ olduğundan Denklem 7.3 sadeleştirilerek;

$$\delta[m] = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_r\mu_0\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}} \quad (7.4)$$

formülü elde edilir.

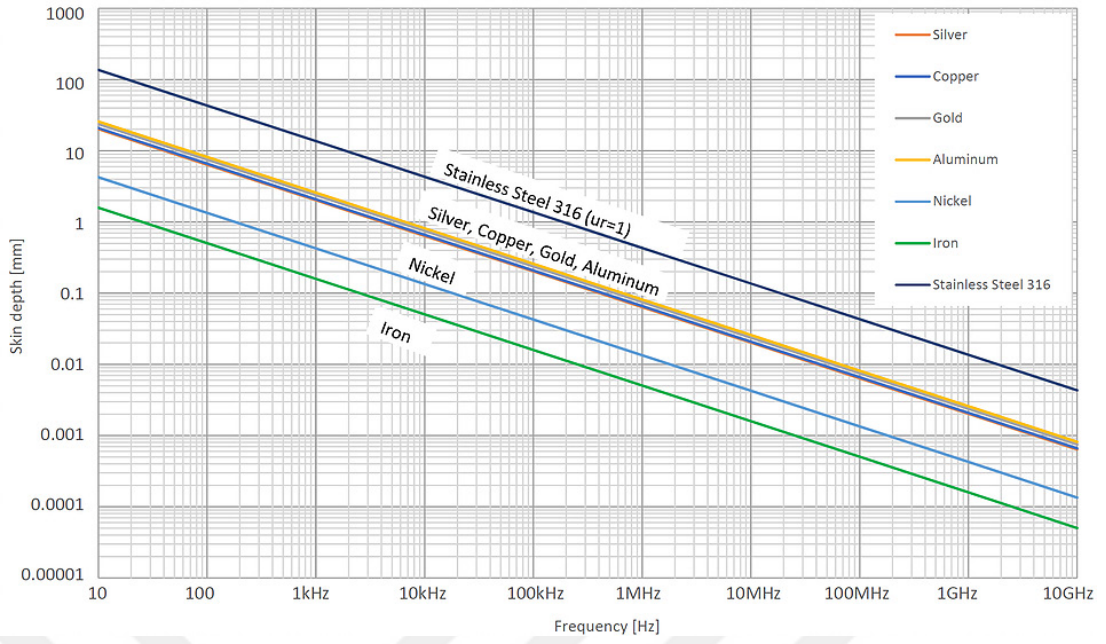
Bazı metallerin frekansa göre deri kalınlığı değerleri Çizelge 7.2’de verilmiştir. Deri kalınlığı frekans, iletkenlik ya da permeabilite arttıkça azalmaktadır.

Çizelge 7.2. Bazı metallerin frekansa göre deri kalınlığı değerleri

Parametreler	Gümüş	Bakır	Altın	Alüminyum	Nikel	Demir	Paslanmaz çelik 316
σ [S/m]	6,20E+0,7	5,82E+0,7	4,50E+0,7	3,80E+0,7	1,40E+0,7	1,00E+0,7	1,36E+0,6
μ_r [1]	1	1	1	1	100	1000	1
Frekans	Deri kalınlığı [mm]						
10 Hz	20,213	20,862	23,725	25,818	4,254	1,592	136,474
100 Hz	6,392	6,597	7,503	8,164	1,345	0,503	43,157
1 kHz	2,021	2,086	2,373	2,582	0,425	0,159	13,647
10 kHz	0,639	0,660	0,750	0,816	0,135	0,050	4,316
100 kHz	0,202	0,209	0,237	0,258	0,043	0,016	1,365
1 MHz	0,064	0,066	0,075	0,082	0,013	0,005	0,432
10 MHz	0,020	0,021	0,024	0,026	0,004	0,002	0,136
100 MHz	0,006	0,007	0,008	0,008	0,001	0,001	0,043
1 GHz	0,0020	0,0021	0,0024	0,0026	0,0004	0,0002	0,0136
10 GHz	0,0006	0,0007	0,0008	0,0008	0,0001	0,0001	0,0043

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base.>, Erişim tarihi: 4 Ocak 2020

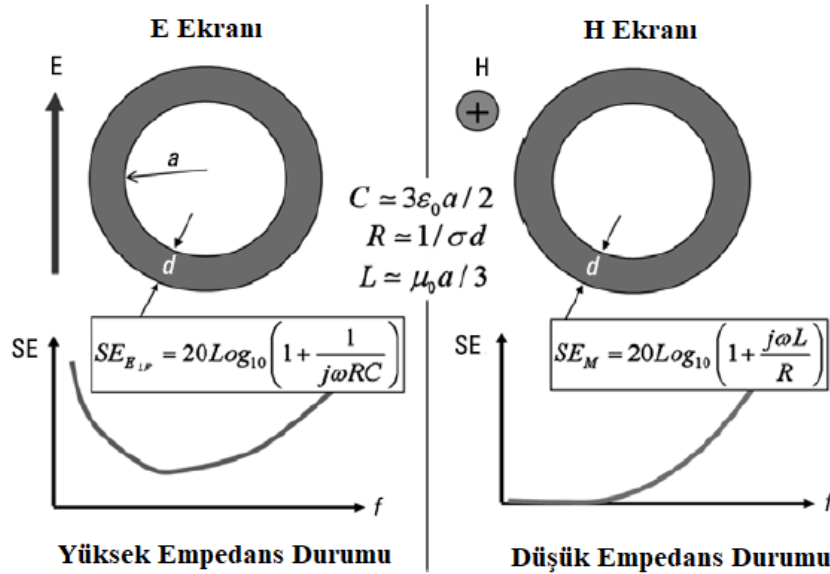
Dielektrik içerisinde deri kalınlığı uzunluğunda ilerleyen EM dalganın şiddeti 8,686 dB azalır. Şekil 7.4’te bazı metallerin frekansa bağlı deri kalınlığı değerlerine ait grafik görölmektedir.



Şekil 7.4. Bazı metallere ait deri kalınlığı grafiği

Kaynak: <https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base.>, Erişim tarihi: 4 Ocak 2020

Ekranlama etkinliği frekansla değişmektedir. Şekil 7.5'te ekranlama etkinliğinin frekansa göre değişimi hem elektriksel dipol hem de manyetik dipol tipi EMI kaynaklarına göre verilmiştir. Frekans arttıkça ekranlama etkinliği elektrik ve manyetik dipol kaynaklar içinde artmaktadır. Düşük frekanslarda ekranlama etkinliği manyetik dipol kaynaklar için yok denecek kadar azdır. Frekans düştükçe elektriksel dipol kaynaklar için ekranlama etkinliği artmaktadır.



Şekil 7.5. E ve H alanlarına karşı ekranlama

Kaynak: Sevgi, 2019:279

Elektrik alan ekranlaması için iletkenlik değeri yüksek metallere, manyetik alan ekranlaması için ferromanyetik malzemeler kullanılmaktadır. Çok ince iletken levhalar bile birkaç yüz dB elektrik alan ekranlaması sağlayabilir. Düşük frekanslarda manyetik alan ekranlaması çok az etkilidir. Levhalar ve mahfazalarda yarıklar bulunuyorsa bu yarıkların boyutu sinyalin dalga boyunun yarısına yaklaşması durumunda izolasyon etkisi sıfıra yaklaşır (Sevge, 2019).

Sevge'ye (2019) göre pratikte şu noktalar önemlidir:

- Ekranlama, elektrik alanın düşük frekansta yansıtılması ve yüksek frekanslarda yutulması ile gerçekleşirken manyetik alanın düşük olduğu frekanslarda yutulması ile gerçekleşmektedir.
- Yüksek iletkenlik değeri yansıma ve yutulmayı olumlu yönde etkiler.
- Yüksek manyetik geçirgenlik yüksek yutulmaya sebep olurken düşük yansıma sağlar.
- Çok düşük frekanslarda manyetik alan ekranlaması için yüksek manyetik geçirgenlik değerine sahip malzemeler kullanılır.
- Ekran kalınlığı arttıkça yutulma artar.
- Elektrik alan ekranlaması için genellikle folyo kalınlığında ince malzemeler yeterli olurken manyetik alan ekranlaması için daha kalın malzemeler kullanılır.
- Girişim kaynağı ile ekran arasındaki mesafe yansıma özelliklerini değiştirmektedir.
- Elektriksel dipol kaynaklar ekrana yakın, manyetik dipol kaynaklar ekrana uzak yerleştirilmelidir.
- Ekranlama yapısı tasarlanmadan önce, elektrik, manyetik ya da her ikisine de ihtiyaç duyulup duyulmayacağı belirlenmelidir. Genellikle yalnızca elektrik alan ekranlaması yeterli olmaktadır.
- Frekans arttıkça manyetik ekranlama etkinliği artmaktadır.
- Belli bir frekansta elektrik alan ekranlanma etkinliği minimum değer alır. Bu değerden her iki yönde de uzaklaşıldıkça ekranlama etkinliği artmaktadır.
- Ekranın EMC performansı, malzemenin özelliklerine, kaynağa ve frekansa, ekranın konumuna, farklı ekran bileşenleri arasındaki bağlantılara, ekran üzerindeki delik ve boşluklara bağlıdır.

7.1.1. Elektrik Alan Ekranlaması

Elektrik alan artı yüklerden eksi yüklere doğru olduğundan elektrik alan çizgilerinin önü kesilerek ekranlama sağlanır. Elektrik alan ekranlaması daha çok 30 MHz ve üstü frekanslar için uygulanmaktadır. Bu frekanslarda iletken anten etkisi göstermektedir. Deliklerin ve açıklıkların ebatları frekans değişimine göre farklı etkilere sebep olur. Bu yüzden EMI'yi önlemek için öncelikle en yüksek frekansı belirlemek gerekir. Buna göre dalga boyu ile en büyük açıklık karşılaştırılmalıdır. Delik ve açıklıklar dalga boyunun onda birinden küçük olmalıdır. Sevgi'ye (2000) göre deneyimler 10 MHz'e kadar materyal ve bağlantının, 10 MHz'in üstünde ise açıklık geometrisinin ekranlama etkinliğini belirlediğini söylemektedir.

Ekranlama için kullanılacak malzemeler performanslarına göre üç gruptan oluşmaktadır (Sevgi, 2000):

i. Yüksek performanslı malzemeler:

Çelik, bakır, paslanmaz çelik gibi malzemelerden yapılmış ve tamamen metal kapalı mahfaza (80-120 dB ekranlama etkinliği)

ii. Standart performanslı malzemeler:

İletken metal tabakalar veya metal parçacıklar içeren plastikler (20-40 dB ekranlama etkinliği)

iii. Zayıf performanslı malzemeler:

Metalleştirilmiş kumaş yapılar, iletken kağıt malzemeler (iletken polimerler) (15-30 dB ekranlama etkinliği)

Sevgi'ye (2000) göre ekranlama performansını azaltan durumların başında;

- Ekran duvarındaki süreksizlikler (bağlantılar, lehimler, perçinler)
- Ekran duvarındaki zorunlu bırakılan açıklıklar (havalandırma delikleri, düğmeler, sinyal lambaları, görüntü ekranı, vb.)

gelir. Ayrıca Sevgi'ye (2000) göre yüksek zayıflama elde edebilmek için şu koşullara uyulmalıdır:

- Ekran kalınlığı, açıklık çapının en az iki katı olmalıdır.
- Açıklığın büyük kenarı ekran kalınlığının 1/6'sından küçük olmalıdır.

- Açıklık malzemesinin direnci çeşitli parçalar arasındaki dirençler de dahil olmak üzere küçük olmalıdır. Yani ızgaralı yapılar yerine delikli levhalar tercih edilmelidir.
- Boş bir açıklığın ya da deliğin içine hiçbir zaman bir iletken yerleştirilmemelidir. Bu durum kılavuzun kesim frekansının değişmesine sebep olur.

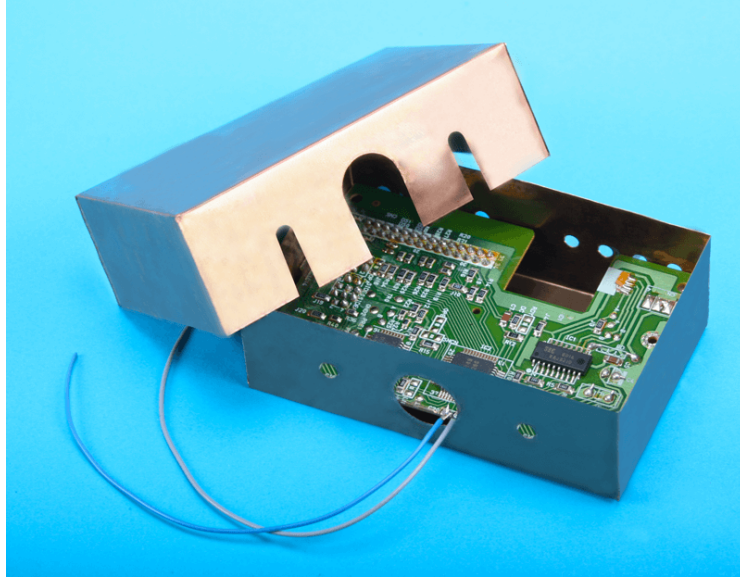
7.1.2. Manyetik Alan Ekranlaması

Manyetik alan çizgileri kendi üzerlerine kapanarak kapalı bir çevrim oluşturduğundan manyetik alan ekranlaması manyetik alan çizgilerinin yerleri değiştirilerek ya da ters yönde manyetik alanlar oluşturularak yapılır. Manyetik alan çizgilerinin dışarı çıkmak zorunda olmasından dolayı Faraday kafesi manyetik alan ekranlamasında işe yaramaz. Manyetik alan ekranlaması 30 MHz'den daha düşük frekanslarda önemlidir. Frekansın artmasıyla manyetik ekranlama artmaktadır. Sevgi'ye (2000) göre manyetik alan ekranlamasında deliklikler ve açıklıklar elektrik alana ekranlamasına göre daha az önemlidir ve manyetik alan ekranlamasında malzeme direnci olabildiğince düşük değerde olmalıdır.

7.1.3. Ekranlama Ürünleri

EMI'ye karşı zayıflatma özellikli mahfazalar, contalar, PCB düzeyinde metal kutular, havalandırma ızgaraları gibi ürünler kullanılmaktadır. Bunları haricinde kablo ekranlaması ayrı bir teknik olarak özelleşmiştir.

Ekranlı mahfaza örnek görseli Şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.6. Örnek bir ekranlı mahfaza

Kaynak: <https://hollandshielding.com/EMI-shielding-theory-applications.>, Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

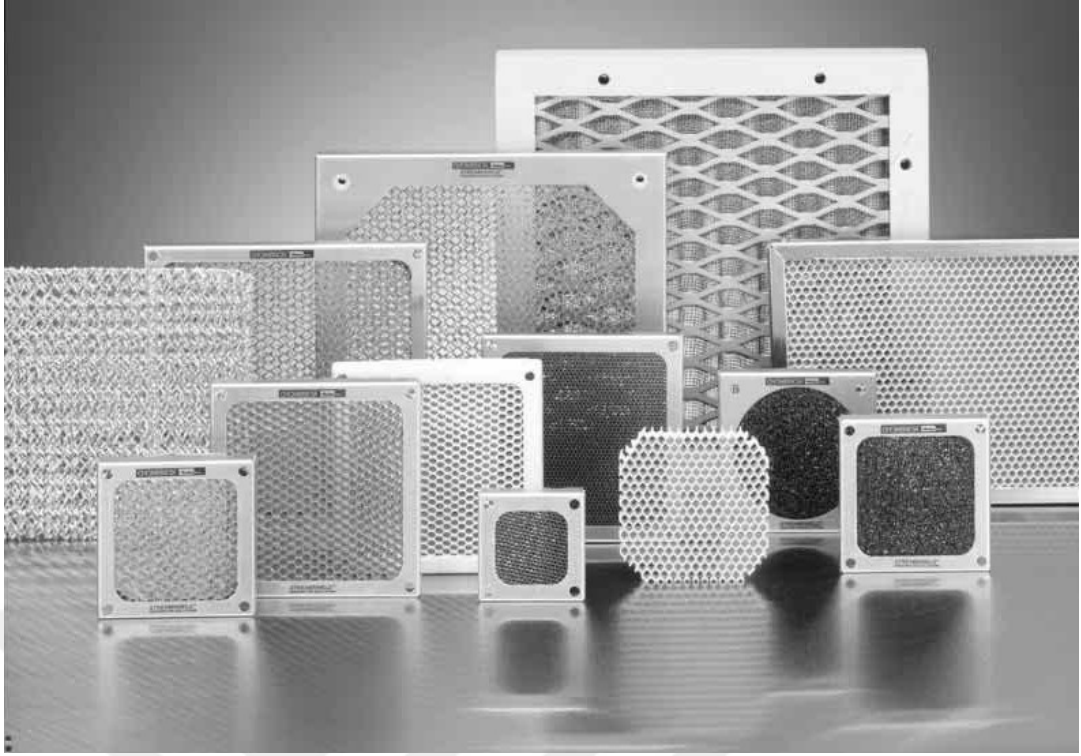
Elektronik cihaz ve sistemlerin mahfazalarında EMI sızdırmazlığı sağlamak için ekranlı malzemeden yapılmış contalar (EMI gasket) kullanılmaktadır. Örnek ekranlı conta görseli Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7. Ekranlı contalar

Kaynak: https://esongemc.com/eng/bbs/content.php?co_id=Ground_Foam_Gasket
Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

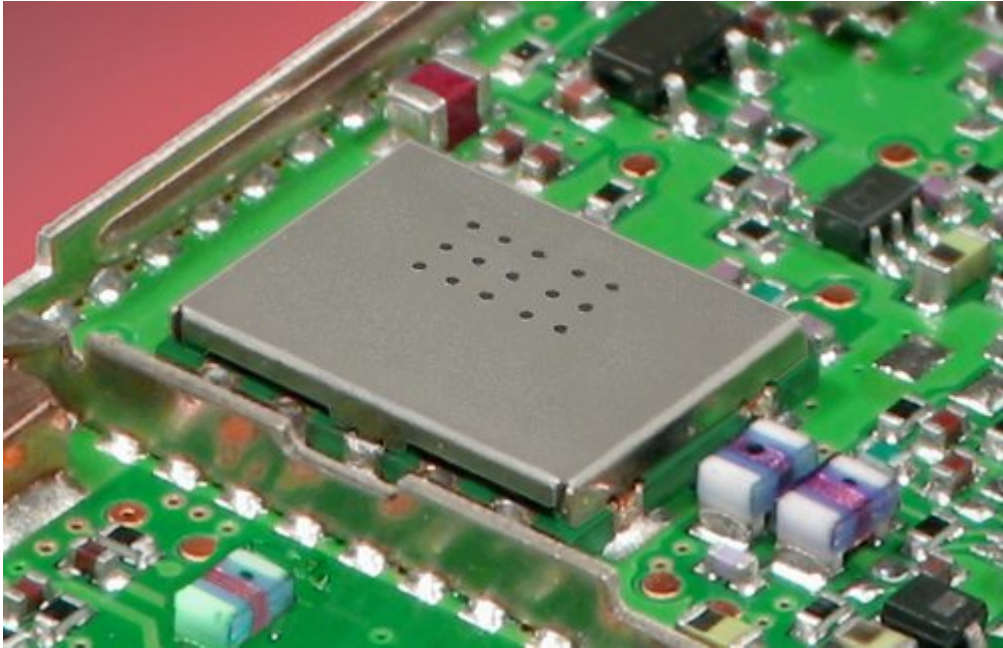
Cihaz ve sistemlerde havalandırma amaçlı açıklıklar bulunuyorsa bunların EMC’ye uygun olarak tasarımında ekranlı havalandırma ızgaraları kullanılmalıdır. Örnek ekranlı havalandırma ızgaraları/panelleri Şekil 7.8’de gösterilmiştir.



Şekil 7.8. Ekranlı havalandırma panelleri

Kaynak: <https://docplayer.net/docs-images/65/54009010/images/1-0.jpg>, Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

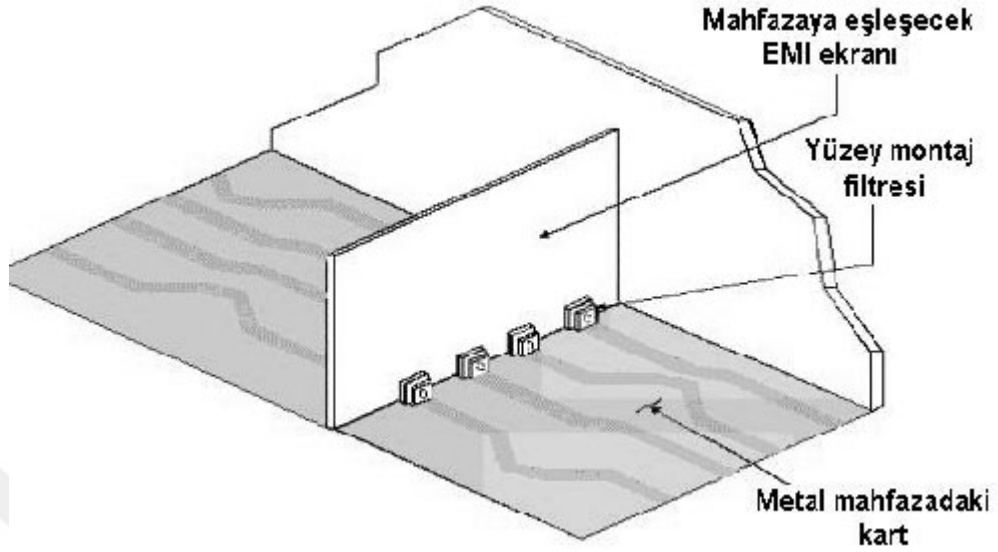
Elektronik cihazların devre kartları üzerinde yer alan hassas bileşenlerin ekranlanmasında PCB tipi ekranlama kutuları (shielding can/case) kullanılır. Devre düzeyinde ekranlama uygulaması Şekil 7.9'da yer almaktadır.



Şekil 7.9. Devre düzeyinde ekranlama

Kaynak: www.fotofab.com/low-profile-shields., Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

Devre kartlarında bölümler arasında izolasyon sağlamak amacıyla yapılan ekranlama örneği Şekil 7.10’da verilmiştir.



Şekil 7.10. Devre düzeyinde ekranlama - II

Kaynak: Beer, 2008:56

PCB seviyesinde ekranlama yapılırken Beer’a (2008) göre şu ilkelere uyulmalıdır:

- Ekranlarda delik ve açıklıklar olmamalıdır. Ancak delikler ve açıklıklar dalga boyuna göre sorun oluşturmayacak kadar küçükse ekranlama etkinliğini düşürmez.
- Ara yüzde filtre kullanılmalıdır.
- Referans düzlemi ekranın bir kısmı olarak kabul edilmelidir.
- Ekran, referans düzleme düzenli aralıklarla bağlanmalıdır.
- Giriş/çıkış noktalarında ekranlı kablolarla eşdeğer korumalı şerit hatlar olmalıdır.

7.2. Topraklama

Dünyanın en büyük meslek örgütü olan The Institute of Electrical and Electronics Engineers’a (IEEE) göre;

“Bir elektrik devresi ya da cihazının, iletken bir ara bağlantı ile istemli ya da istemsiz olarak yeryüzüne ya da toprak yerine geçebilecek referans bir yüzeye bağlanması”

topraklamanın tanımı olarak verilmiştir. Potansiyel, iki nokta arasındaki iş yapabilme kapasitesi anlamına gelirken, birimi Volt olan elektriksel potansiyel (gerilim), iki nokta gerilimlerinin farkını ifade eder (Sevgi, 2006). Herhangi bir noktaya ait gerilimin değeri referans alınan başka bir noktanın gerilim değerine göre görecelik gösterir. Elektriksel potansiyel noktasının gerçek değeri mutlak sıfır olarak kabul edilen yeryüzünün referans alınması ile mümkündür.

Amaçlarına göre topraklama çeşitleri ve tanımları Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği'nde şu şekilde verilmiştir (T.C. Resmi Gazete, 21 Ağustos 2001, sayı:24500):

I- Koruma Topraklaması: İnsanları tehlikeli dokunma gerilimlerine karşı korumak için, işletme akım devresinde bulunmayan iletken bir bölümün topraklanmasıdır.

II- İşletme Topraklaması: İşletme akım devresinin bir noktasının, cihazların ve tesislerin normal işletilmesi için topraklanmasıdır. Bu topraklama iki şekilde yapılabilir:

-Dirençsiz (doğrudan doğruya) işletme topraklaması: Bu durumda, topraklama yolu üzerinde normal topraklama empedansından başka hiçbir direnç bulunmamaktadır.

-Dirençli işletme topraklaması: Bu durumda, ek olarak ohmik, endüktif ya da kapasitif dirençler bulunmaktadır.

III- Fonksiyon Topraklaması: Bir iletişim tesisinin veya bir işletme elemanının istenen fonksiyonu yerine getirmesi amacıyla yapılan topraklamadır. Fonksiyon topraklaması, toprağı dönüş iletkeni olarak kullanan iletişim cihazlarının işletme akımlarını da taşır.

Not: Bir iletişim tesisinin fonksiyon topraklaması, eskiden kullanılan iletişim tesisi işletme topraklaması ile aynıdır. Fonksiyon topraklaması deyimine, örneğin "yabancı gerilim bileşeni az olan topraklama" gibi adlandırmalar da dahildir.

IV- Fonksiyon ve Koruma Topraklaması: Fonksiyon topraklamasının aynı topraklama iletkenini kullanarak ve aynı zamanda koruma topraklaması olarak da kullanıldığı topraklamadır.

Not: Bir iletişim tesisinin fonksiyon ve koruma topraklaması, eskiden kullanılan iletişim tesisi işletme ve koruma topraklaması ile aynıdır.

V- Düşük Gürültü Topraklama: Dış kaynaklardan iletilen (bozucu büyüklüklerle olan) girişimin seviyesi, bağlandığı bilgi işlem veya benzeri donanımda bilgi kayıplarına neden olan kabul edilmeyecek etkiler üretmeyen bir topraklama bağlantısıdır.

Not: Genlik/frekans karakteristikleri ile ilgili olarak ($suseptans = 1/x$) duyarlılık, donanımın tipine bağlı olarak değişir.

VI- Yıldırıma Karşı Topraklama: Yıldırım düşmesi durumunda, işletme gereği gerilim altında bulunan iletkenlere atlamaları (geri atlamalar) geniş ölçüde önlemek ve yıldırım akımını toprağı iletmek için, işletme akım devresine ilişkin olmayan iletken bölümlerin topraklanmasıdır.

VII- Raylı Sistem Topraklaması: İletken kısımlarla raylı sistem toprağı arasındaki dolaysız, dolaylı veya açık bağlantıdır.

Raylı sistem toprağı, geri dönüş iletkeni olarak görev yapan ve traversler veya topraklama tesisleri üzerinden toprakla bağlantısı olan raylar ve bunlara bağlanmış iletken kısımlardır.

Pratikte toprak yerine geçebilecek yapılardan bazıları;

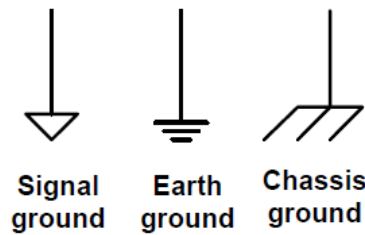
- Çelik kafes binalar
- Araç gövdesi (otomobil, uçak, gemi, uzay gemisi)
- Su boruları
- Toprak elektrotlu sistemler
- Topraklama plakası ve kafesi vb.

olarak söylenebilir (Teker ve Kuyumcu, 2007).

Topraklama güvenlik amaçlı koruma fonksiyonu (earthing) ve hassas cihazların korunması (grounding) olarak ele alınır. EMC açısından bakıldığında hassas cihazların korunması ve istenmeyen gürültülerin iletkenler üzerinden toprağa aktarılması olarak ele alınmaktadır. Genel amaç itibariyle bakıldığında DC ve 50 Hz AC şebekelerin topraklanması ile EMC amaçlı yüksek frekanslı sistemlerin topraklanması arasında önemli farklılıklar vardır. EMC açısından topraklamada en önemli iki unsur öncelikle frekans, sonrasında akımdır. EMC açısından topraklama, faydalı işarete kıyasla problem teşkil edebilecek büyüklükteki gürültü sinyalinin kritik noktadaki girişim gerilimlerini mümkün olduğunca azaltmaktır (Beer, 2008).

Topraklama hattı, akımın kaynağına geri dönebildiği düşük empedanslı yol olduğundan yüksek frekanslı devrelerde toprak hattının empedansı çok yükselir ve bu topraklama hattının her zaman olabildiğince kısa olmasını gerektirir. Toprak hatlarının empedansı çok düşük ve hattın uzunluğu çok kısa tutulmazsa bu topraklamanın verimini düşürecektir.

EMC açısından EMI problemlerinin giderilmesi için kullanılan topraklama türü sinyal topraklamasıdır. Sinyal topraklaması, yeryüzü topraklaması ve şase topraklamasının temsiline ait kullanılan semboller Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



Şekil 7.11. Topraklama sembolleri

Kaynak: Caro, 2011:11

Tüm topraklama türlerinde tek noktadan topraklama yapılması iyi bir yaklaşım değildir. Özellikle EMC amaçlı topraklamada yüksek frekanslı sinyallerde hesaba katılması gerektiğinden tek noktalı toprak hattı yetersiz kalmaktadır. Toprak hattı empedansının mümkün olan en küçük değerlere düşürülmesi çok önemlidir. Toprak hattı empedansı yeterince düşük olmaz ise gürültü sinyali kaçak akım şeklinde toprak empedansına yakın veya daha küçük değerde bir yol üzerinden akar. Bu yüzden çok düşük empedanslı birden çok noktadan topraklama hem güvenlik hem de EMC açısından oldukça önemlidir.

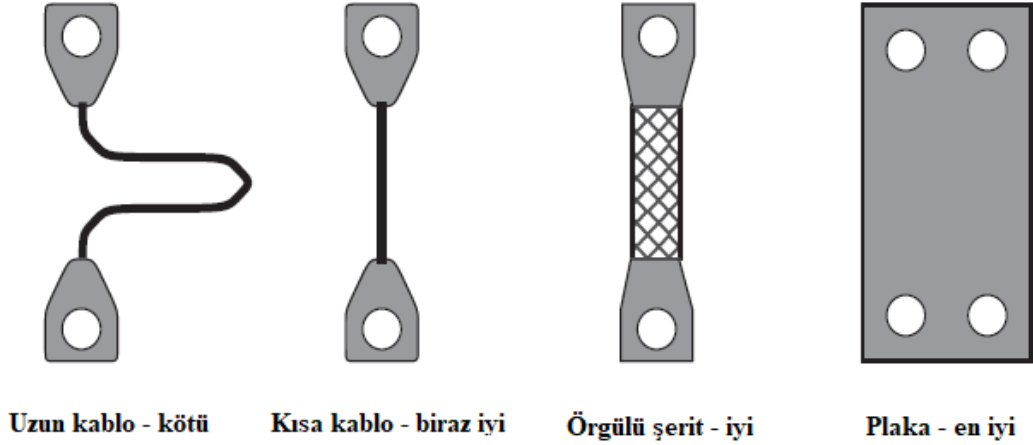
Frekans yükseldikçe empedans arttığından dolayı kHz, MHz ve GHz seviyelerinde akan akım topraklama hattı üzerinde gerilim indüklenmesine sebep olur ve bu ciddi seviyelerde girişime sebep olabilir.

DC ve çok düşük frekanslar için empedans hemen hemen rezistif, orta frekans civarında frekansa bağlı lineer artan şekilde endüktif, yüksek frekanslarda ise iletim hattı ve anten etkilerinin görüleceği şekilde karakteristik özellik gösterir (Beer, 2008).

Williams (2016) topraklama iletkenleriyle ilgili şu önemli noktalara değinmiştir:

- Herhangi bir uzunluktaki iletken birkaç kHz'in üzerinde ağırlıklı olarak endüktif hale gelir. Kısa ve geniş iletken, uzun ve ince iletkene göre daha yüksek bir geçiş frekansına sahiptir.
- Tipik tel uzunluklarının endüktif empedansı 1 MHz'de birkaç ohm seviyesinde, onlarca MHz aralığında ise onlarca ohm seviyesinde olur.
- Bir ucu toprak referans düzlemine bağlı bir iletken telin empedansı, telin uzunluğu çeyrek dalga boyunun katlarında rezonans maksimuma, yarım dalga boyunun katlarında rezonans minimuma düşer.

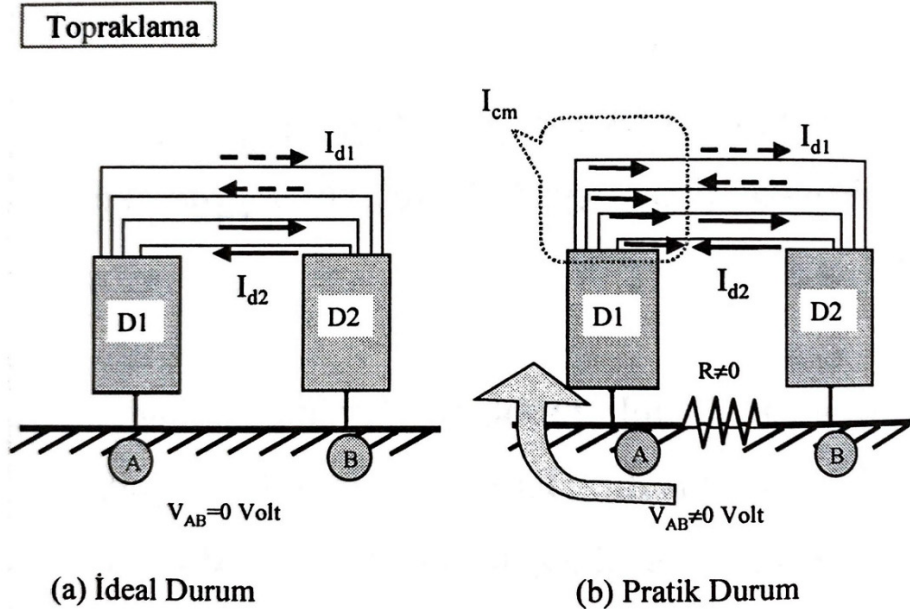
Şekil 7.12'de verilen topraklama iletkenlerinde uzun kablolar en kötü, kısa kablolar biraz iyi, örgülü şerit iyi ve plakalar en iyi topraklama performansı göstermektedirler.



Şekil 7.12. Topraklama iletkenleri

Kaynak: Williams, 2016:462

Topraklamada ideal olarak yeryüzü potansiyeli her noktada eşit kabul edilir. Ancak pratikte yeryüzü potansiyeli her noktada eşit değildir. Çünkü yeryüzü ideal iletken değildir ve farklı noktalar arasında empedans sıfırdan farklıdır. Bu yüzden farklı noktalardan yapılan topraklamada topraklama noktaları arasında istenmeyen gerilimler oluşur. Şekil 7.13'te görüldüğü üzere ideal durumda yalnızca iletim hatları üzerinden akım akarken pratikte toprak üzerinde de akım akar (Sevgi, 2000).



Şekil 7.13 Topraklama, ortak ve farksal mod akımları

Kaynak: Sevgi, 2000:188

Ortak mod akımlarının sebep oldukları ortak mod gerilimlerini düşürmek için tek nokta topraklaması yerine çok nokta topraklaması kullanılmalıdır. Tek nokta topraklaması sadece düşük frekanslı devrelerde etki gösterir. Topraklama hattına ait en uzun iletken boyu ile en yüksek frekanstaki en küçük dalga boyu karşılaştırılarak pratik olarak topraklama boyunun, dalga boyunun onda birinden küçük olma şartı kullanılabilir (Sevgi, 2006).

Baskı devrelerde topraklama çok daha önemli bir hal alır. Sevgi'ye (2019) göre baskı devrelerde etkin bir topraklama gerçekleştirebilmek için şu kurallara uyulmalıdır:

- En önemli faktörün devre yerleşimi olduğu bilinmeli ve endüktans ya da akımın değişim hızı (di/dt) minimize edilerek endüktansın etkileri azaltılmalıdır.
- Kapalı çevrim oluşturan devre yollarının alanları mümkün olduğunca küçültülmelidir. Bu kapalı çevrimler anten gibi davranarak EM alan yayabilir.
- Eleman bacakları (komponent pinleri) kısa tutulmalıdır. Uzun bacaklar empedans artışı ve anten etkisine sebep olur.
- Sinyallerin gidiş ve dönüş yolları birbirine yakın tutulmalıdır. Bu sayede birbirlerinin etkilerini sönümleyici etki gösterir.
- Mümkünse burgulu (twisted pair) iletkenler kullanılmalıdır. Bu gidiş ve dönüş yollarının birbirlerinin etkilerini daha iyi azaltmasına neden olacaktır.
- Ana sinyal hatları referansın yakınında olmalıdır.
- Yüzey montajlı elemanların (Surface mount device-SMD) kullanımı tercih edilmelidir. Through-hole elemanlar pinleri sebebiyle gereksiz empedans ve ışımaya yol açar.
- 0Ω olması istenen toprak iletkeni pratikte hiçbir zaman 0Ω empedansa sahip olmayacaktır. Ancak mümkün olduğunca 0Ω 'a yakın tutulmalıdır. Topraklama iletkeninin iki ucu arasında $0,2 - 0,6 \Omega$ gibi düşük bir empedansın ihmal edilebilir olarak görülmesi 10 kA 'lık bir yıldırım düşmesi durumunda binlerce voltluk bir potansiyel fark oluşturacaktır.

7.2.1. Tek Nokta Topraklama Sistemi

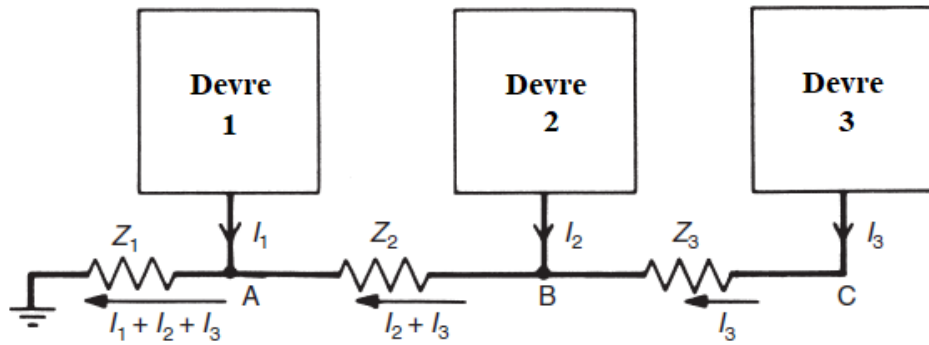
Tek nokta topraklaması en basit topraklama topolojisidir. Bu sistemde her alt sistem toprağa ayrı ayrı bağlanmaktadır. Küçük sistemlere ve düşük frekanslı devrelere uygundur. Büyük sistemlerde topraklama hatlarının endüktans değeri büyük olduğundan ve çok uzun kablolar gerektirdiğinden uygun olmaz.

Tek nokta topraklaması DC'den 20 kHz'e kadar olan düşük frekanslarda kullanılır. Genelde 100 kHz üzerinde kullanılmaz ancak kritik olmayan sistemlerde 1 MHz'e kadar kullanımı ile karşılaşılabılır (Ott, 2009).

Tek nokta topraklama sistemi seri bağlı ve paralel bağlı olmak üzere iki çeşittir.

7.2.1.1. Seri Bağlı Tek Nokta Topraklaması

En ilkel topraklama sistemidir ancak basitliği sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok farklı akım seviyelerinde çalışan devreler arasında kullanılmamalıdır. Çok yüksek akım seviyeleri ortak toprak empedansı yoluyla düşük seviyeli devreleri olumsuz yönde etkiler (Ott, 2009). Bu sistemde toprak hattı iletkenleri olabildiğince kısa tutulmalıdır. Seri bağlı tek nokta topraklamasına ait bağlantı şeması Şekil 7.14'te verilmiştir.



Şekil 7.14. Seri bağlı tek nokta topraklaması

Kaynak: Ott, 2009:125

Şekil 7.14'te seri bağlı tek nokta topraklama sisteminde A noktasına ait potansiyel Denklem 7.5'te, B noktasına ait potansiyel Denklem 7.6'da, C noktasına ait potansiyel Denklem 7.7'de verilmiştir.

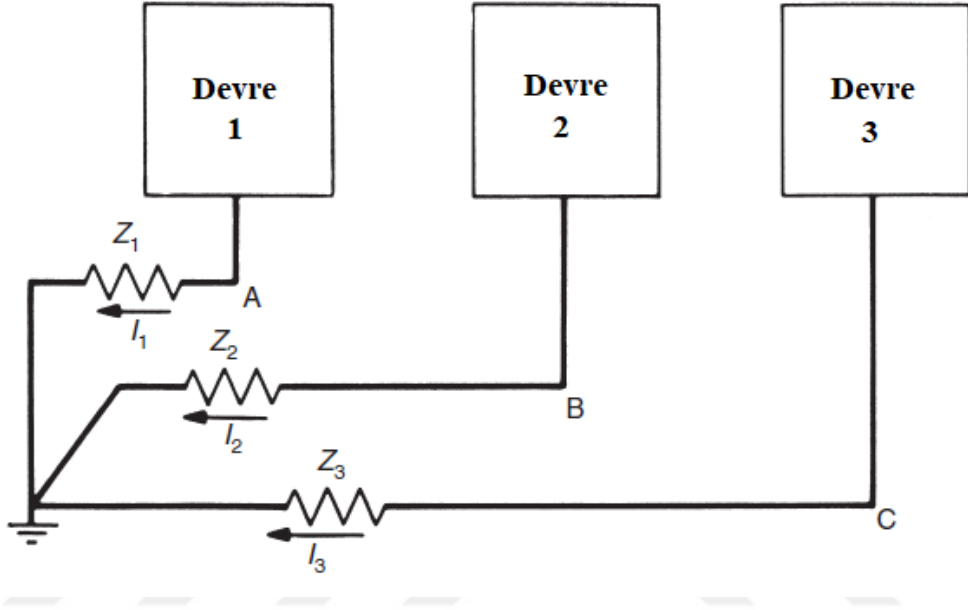
$$V_A = (I_1 + I_2 + I_3) \cdot Z_1 \quad (7.5)$$

$$V_B = (I_1 + I_2 + I_3) \cdot Z_1 + (I_2 + I_3) \cdot Z_2 \quad (7.6)$$

$$V_C = (I_1 + I_2 + I_3) \cdot Z_1 + (I_2 + I_3) \cdot Z_2 + I_3 \cdot Z_3 \quad (7.7)$$

7.2.1.2. Paralel Bağlı Tek Nokta Topraklaması

Paralel bağlı tek nokta topraklaması seri bağlı tek nokta topraklamasına göre daha iyi sonuçları olan ancak büyük sistemlerde fazla topraklama iletkeni gerektiren bir sistemdir. Frekans düşük oldukça iyi bir çözümdür. Paralel bağlı tek nokta topraklamasına ait bağlantı şeması Şekil 7.15'te verilmiştir.



Şekil 7.15. Paralel bağlı tek nokta topraklaması

Kaynak: Ott, 2009:126

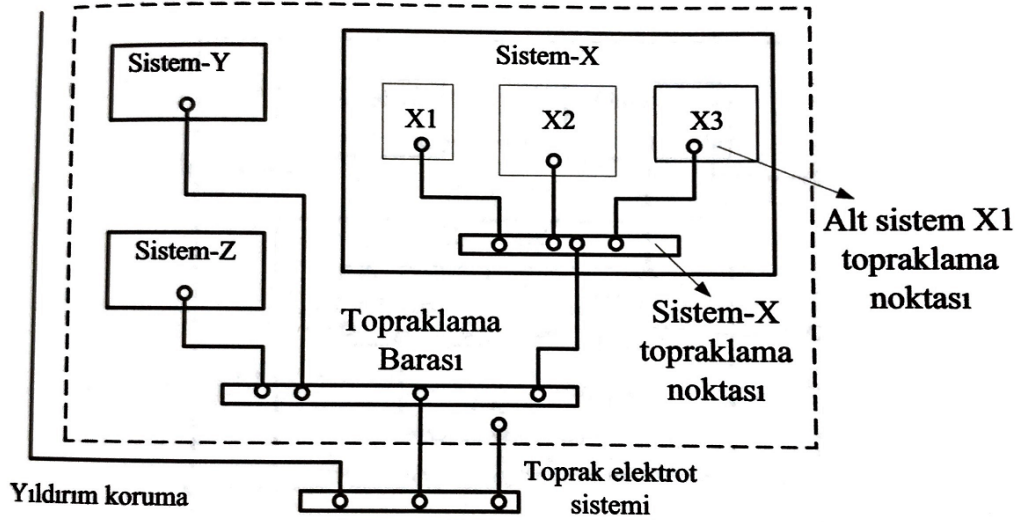
Şekil 7.15'te paralel bağlı tek nokta topraklama sisteminde A noktasına ait potansiyel Denklem 7.8'de, B noktasına ait potansiyel Denklem 7.9'da, C noktasına ait potansiyel Denklem 7.10'da verilmiştir.

$$V_A = I_1 \cdot Z_1 \quad (7.8)$$

$$V_B = I_2 \cdot Z_2 \quad (7.9)$$

$$V_C = I_3 \cdot Z_3 \quad (7.10)$$

Tek nokta topraklama sistemine ait örnek bir sistem ve alt sistem uygulaması Şekil 7.16'da verilmiştir.

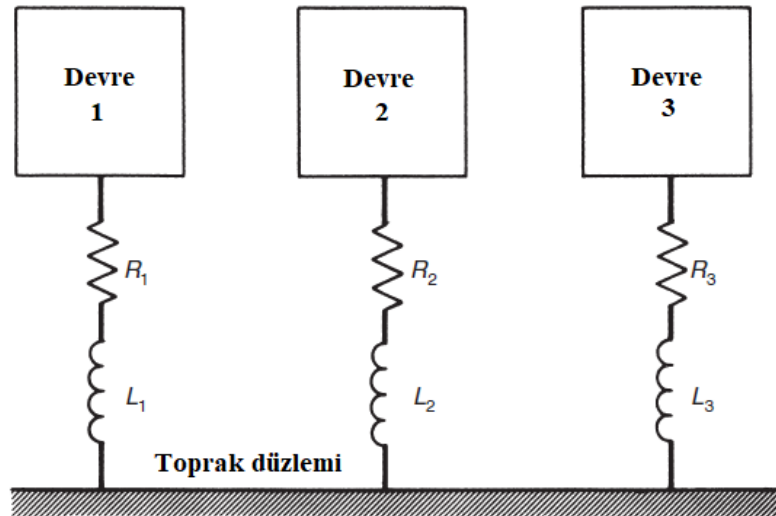


Şekil 7.16. Tek nokta topraklama sistemi ve alt sistem uygulaması

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:187

7.2.2. Çok Nokta Topraklama Sistemi

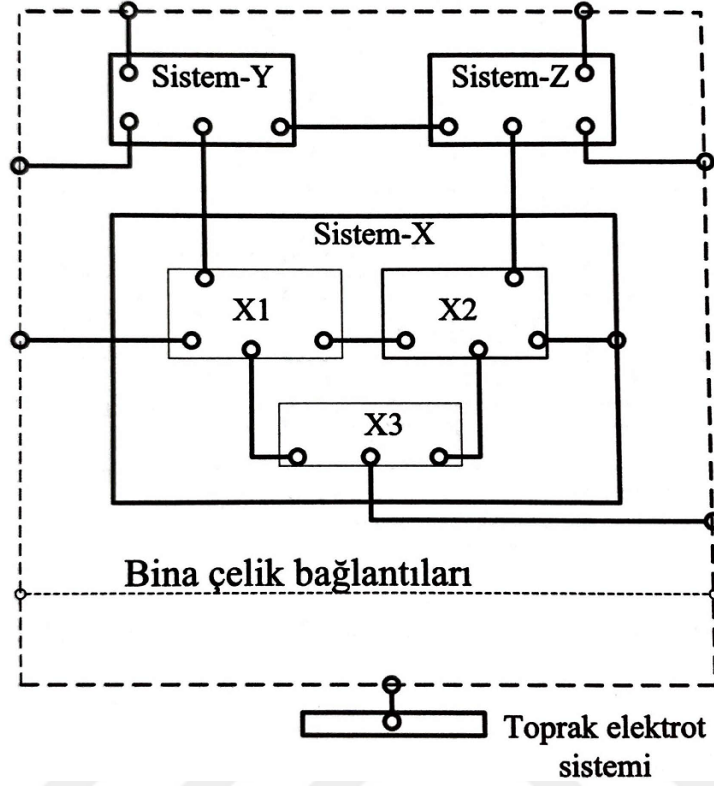
EMC'ye en uygun topraklama sistemi çok nokta topraklamasıdır. Yüksek frekanslı devreler için iyi bir çözümdür. 100 kHz ve üstündeki yüksek frekanslı devrelerde ve dijital devrelerde kullanılır. Mümkünse indüktansı azaltmak için alt sistemler içinde de çok noktadan topraklama uygulanır. Yüksek frekans sebebiyle rezistif empedandan daha çok indüktif empedansın olumsuz etkisi vardır. Bu sebepten indüktans değerlerine çok dikkat edilmeli ve olabildiğince düşük tutulmalıdır. Şekil 7.17'de çok nokta topraklama sistemine ait bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 7.17. Çok nokta topraklaması

Kaynak: Ott, 2009:128

Çok nokta topraklama sistemine ait örnek bir sistem ve alt sistem uygulaması Şekil 7.18’de verilmiştir.



Şekil 7.18. Çok nokta topraklama sistem ve alt sistem uygulaması

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:188

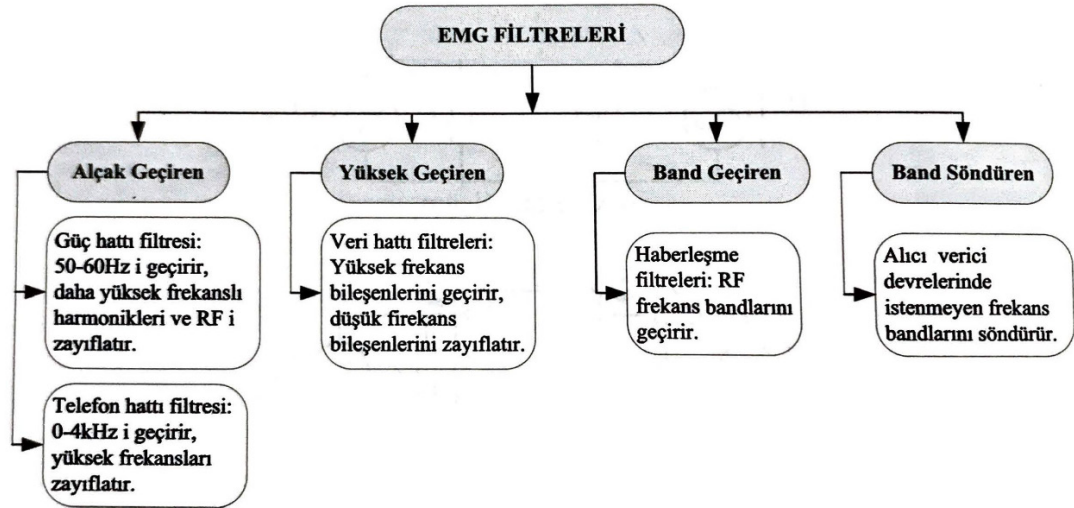
7.3. Filtreler

EMC’de filtreleme genellikle düşük frekansların geçirilmesi ve yüksek frekansların zayıflatılması işlemini ifade eder. Bu işlem için de alçak geçiren filtreler kullanılır. Ancak nadiren sinyal hatlarından geçen işaretin bant aralığına göre bant geçiren, bant durduran ve yüksek geçiren filtreler de kullanılabilir. EMC açısından filtrelemenin amacı istenmeyen gürültü sinyalinin olabildiğince zayıflatılarak bu elektromanyetik girişimin cihazın içerisine ve dışarısına yayılmasını önlemektir. Filtreleme doğrudan iletim yolu girişimin önlenmesine yönelik olsa da kablo ve sinyal hatlarından geçen iletim yolu girişimin azaltılması bu kablo ve sinyal hatlarından hava yolu yayılan girişimin de azaltılmasını sağlar.

Filtreler, elektronik filtreler ve ferrit filtreler olmak üzere iki çeşittir. Ancak elektronik filtrelerden ortak mod ve farksal mod gürültülerin azaltılmasına yönelik güç hattı filtreleri ayrı bir grup olarak ele alınacaktır.

7.3.1. Elektronik Filtreler

EMC korunma yaklaşımlarından biri olan filtreler faydalı işaretlerin bulunduğu frekans bölgelerine dokunmayarak istenmeyen işaretlerin bulunduğu frekans bölgesindeki girişim ve gürültü işaretlerini süzen devre elemanlarıdır (Sevgi, 2019). EMC problemlerinin giderilmesi amacıyla kullanılan elektronik filtreler, güç filtreleri ve haberleşme filtreleri olarak iki çeşittir. Güç filtreleri ise AC şebeke filtreleri ve DC güç kaynağı filtreleri olarak ikiye ayrılır. AC şebeke filtreleri şebeke frekansından büyük frekanstaki işaretlerin yok edilmesi için, DC güç kaynağı filtreleri ise kesim frekansları mümkün olduğunca sifıra yakın bir şekilde yüksek frekanstaki işaretlerin yok edilmesi için alçak geçiren yapıdadır. Haberleşme filtreleri ise veri ve kontrol hatlarında anlamlı sinyallere dokunmadan bozucu girişim sinyallerini yok etmek için kullanılır. Bu yüzden anlamlı sinyallerin bulunduğu frekans bandına göre her türde olabilir. Filtre sınıfları Şekil 7.19’da verilmiştir.



Şekil 7.19. Filtre sınıfları

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:138

Lineer yapıda olan şebeke filtreleri EM gürültünün sisteme girmesini önlemek için ekranlı mahfazaya sahip bir şekilde güç girişine konumlandırılır. Filtre seçimi yapılırken;

- Araya girme kaybı
- Kesim frekansı
- Yükün kapasitif ya da endüktif olması
- Yüksek frekanslarda cihaz empedansının belirlenmesi

- Ortak mod (CM) ve farksal mod (DM) gerekliliği

EMC açısından önemli olan filtre özellikleridir (Sevgi, 2000).

Filtre seçiminde;

- Gerilim aralığı
- Akım
- Sıcaklık
- Maksimum kaçak akım
- Nem sınırları
- Aşırı yük akımı
- Yüksek gerilim karakteristikleri
- İzolasyon direnci
- Boyutlar
- Montaj şekli

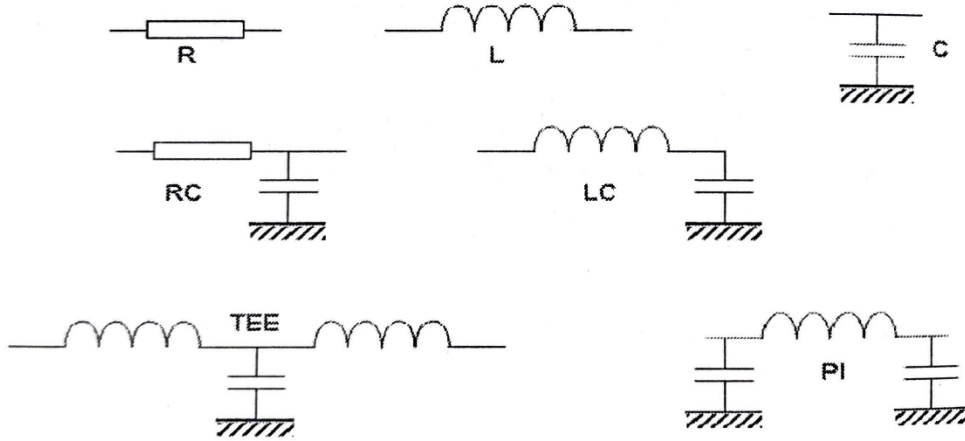
en önemli seçim parametreleridir (Sevgi, 2019).

Filtre performansına etki eden en büyük faktörlerden biri filtrenin konumu ve sistem içerisine monte edilif şeklidir. Filtreler olabildiğince güç girişine yakın olarak konumlandırılmalı ve empedansı olabildiğince düşük tutulmuş olan çok nokta topraklamasına sahip sistem mahfazasına gövde montajlı olarak yerleştirilmelidir. Filtre toprağının bağlantısının kablo ile yapılması tercih edilmemelidir. Şebeke tarafına ait kablolar ile yük tarafına ait kablolar birbirinden etkilenmeyecek şekilde dekuple edilmelidir. Galvanik uyumluluğa dikkat edilmelidir (Sevgi, 2006).

Filtreler istenmeyen işaretlerin bulunduğu frekanslardaki gürültüyü zayıflatırken istenilen frekanslarda faydalı işaretleri geçiren iki kapılı devrelerdir. Analog pasif filtreler en az bir kapasite veya endüktans elemanından oluşabileceği gibi birden fazla direnç, kapasite ve endüktans elemanlarının kombinasyonlarından oluşabilir. EMC problemlerinin çözümünde ilk amaç her zaman gürültüyü kaynağından yayılımını önlemen olmalıdır. Ancak gürültü kaynağının önlenemediği durumlarda ikinci yaklaşım olarak kuplaj yolu kesilmelidir. Bu anlamda filtreler gürültü kaynağı ile kurban sistem arasındaki gürültü kuplajının kesilmesinde kullanılan bir çözüm tekniğidir.

Filtreleme, istenilen sinyalin bulunduğu frekans aralığına düşük empedans, istenmeyen sinyallerin bulunduğu frekans aralığına yüksek empedans gösterme işlemidir. Bu işlem istenmeyen sinyallere düşük şönt empedans veya yüksek seri empedans uygulanmasıyla yapılır. En çok karşılaşılan alçak geçiren filtre tipinde seri direnç ya da indüktansa ilaveten paralel kapasitör kullanılır. Direnç, daha küçük ve daha az maliyetli olmasından, girişim enerjisini soğurması ve rezonansa katkıda bulunmaması sebebiyle indüktansa göre daha avantajlı, indüktans ise düşük DC kaybıyla ve düşük frekans frekansta yüksek RF empedansı ile dirence göre daha avantajlıdır (Beer, 2008).

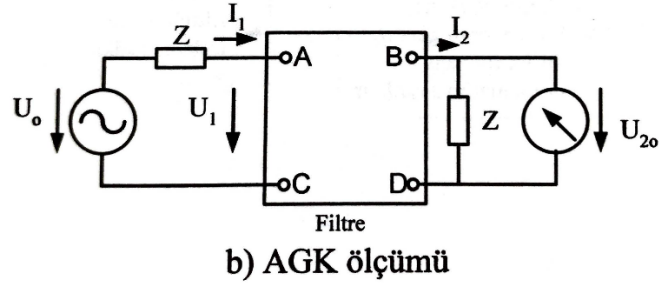
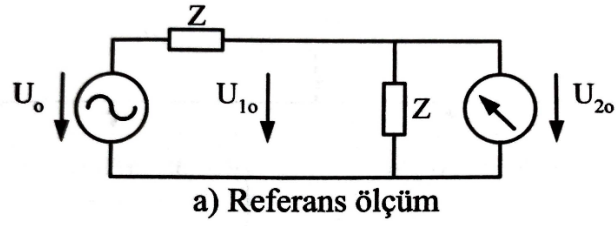
Filtrelerin ideal olmayan bileşenler içermesi yüksek performans göstermelerini engeller. Kapasitörlerin istenmeyen endüktif kaçağa, indüktörlerin ise istenmeyen kapasitif kaçağa sahip olması filtre performansını olumsuz etkiler. Kapasitörler yüksek empedanslı yükler için, indüktörler ise düşük empedanslı yükler için daha etkilidir. Bazı filtre tipleri Şekil 7.20’de verilmiştir.



Şekil 7.20. Filtre tipleri

Kaynak: Beer, 2008:98

Şekil 7.21’de gösterilen devrede filtre öncesi kaynak gerilimi U_0 , filtre sonrası yük gerilimi ise U_2 olarak verilmiştir. Çoğunlukla filtrelerin zayıflama grafikleri şebeke tarafı ve yük tarafı için normalize empedans değeri olan 50Ω için referans alınarak verilir. Uygulamada kaynak ve yük empedans değeri 50Ω ’dan farklı olduğunda verilen bu zayıflama grafikleri gerçeği yansıtmayacaktır. Bazı üreticiler bu sebepten dolayı CISPR 17’ye göre ölçülmüş filtre araya girme kayıp eğrilerini verirler (Arı ve Özen, 2008).



Şekil 7.21. Filtrede araya girme kaybı

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:137

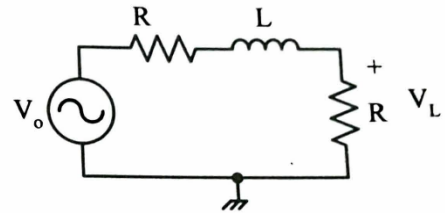
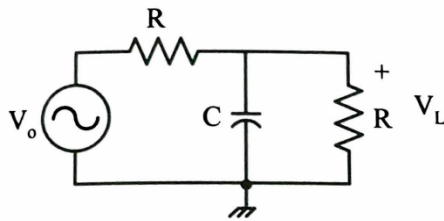
Şekil 7.21'deki devrede gerilim eşitlikleri Denklem 7.11'de, araya girme kaybı ifadesi Denklem 7.12'de verilmiştir.

$$U_{20} = U_{10} = U_0 \frac{Z}{Z+Z} = \frac{1}{2} U_0 \quad (7.11)$$

$$\text{AGK} = 20 \log \frac{|U_{20}|}{|U_2|} = 20 \log \frac{|U_0|}{2|U_2|} \quad (7.12)$$

7.3.1.1. Alçak Geçiren Filtreler

Alçak geçiren filtrelerde şönt kapasite ve seri endüktans elemanları kullanılır. Şekil 7.22'de temel alçak geçiren filtre devre yapısı verilmiştir.



Şekil 7.22. Alçak geçiren filtre

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:139

Şönt kapasiteli alçak geçiren filtreler için araya girme kaybı Denklem 7.12'de, C filtre kapasitesi olmak üzere filtreye ait kesim frekansı f_c Denklem 7.13'te verilmiştir.

$$AGK = 10 \log(1 + (\pi fRC)^2) \text{ [dB]} \quad (7.12)$$

$$f_c = \frac{1}{\pi RC} \text{ [Hz]} \quad (7.13)$$

Seri endüktanslı alçak geçiren filtreler için araya girme kaybı Denklem 7.14'te, L filtre endüktansı olmak üzere filtreye ait kesim frekansı f_c Denklem 7.15'te verilmiştir.

$$AGK = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\pi fL}{R} \right)^2 \right] \text{ [dB]} \quad (7.14)$$

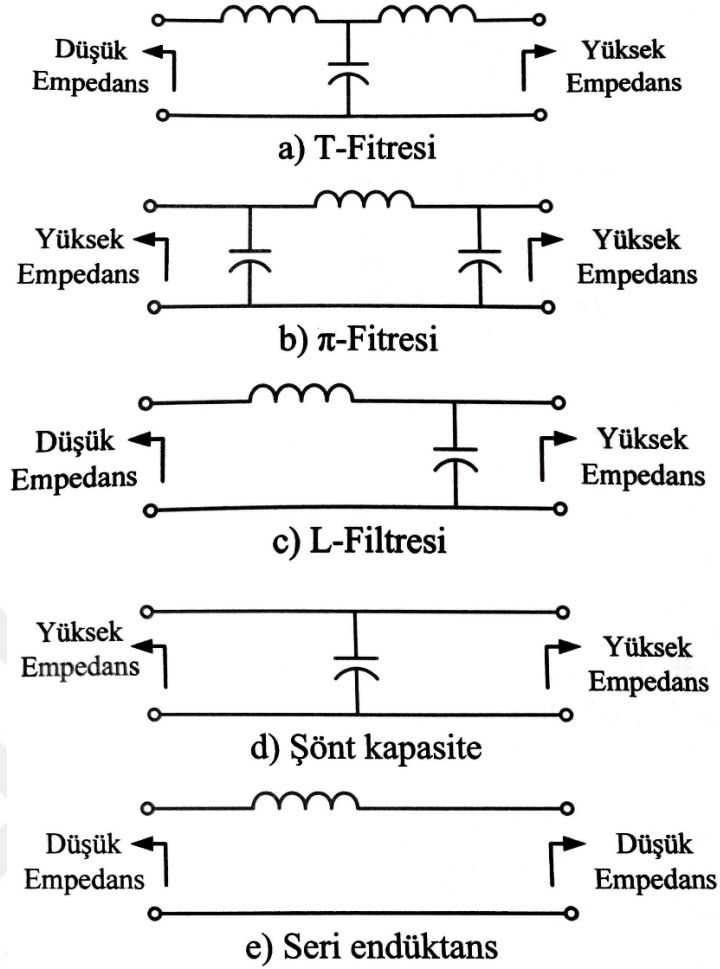
$$f_c = \frac{R}{\pi L} \text{ [Hz]} \quad (7.15)$$

Güç oranlarına bağlı olarak araya girme kaybı, P_A kaynaktan sağlanan maksimum güç ve P_L yükte harcanan güç olmak üzere Denklem 7.16'da, kaynak ve yük empedanslarının reel olması durumunda kaynaktan sağlanan maksimum güç Denklem 7.17'de verilmiştir.

$$AGK = 10 \log \left(\left| \frac{P_A}{P_L} \right| \right) \text{ [dB]} \quad (7.16)$$

$$P_A = \frac{V_L^2}{R} = \frac{(V_0/2)^2}{R} = \frac{V_S^2}{4R_0} \quad (7.17)$$

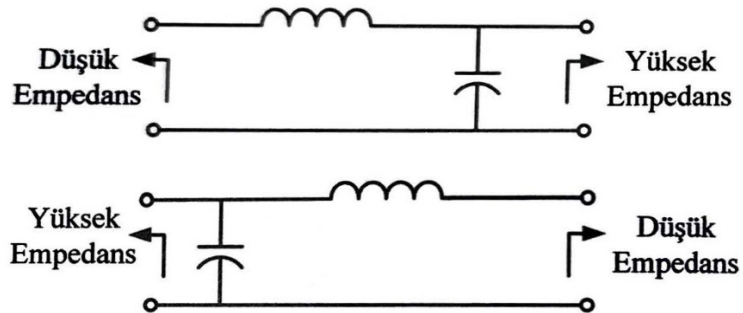
Hat empedans ve girişim kaynak empedans seviyelerine göre kullanılacak filtre yapıları farklıdır. Yüksek empedansa sahip kaynak ve yük için şönt kapasite, düşük empedansa sahip kaynak ve yük için seri endüktans, empedans seviyesinin tam olarak bilinmediği sistemlerde π veya T, kaynak empedansının düşük yük empedansının yüksek olduğu sistemlerde L filtresi tercih edilir (Arı ve Özen, 2008). Empedans ilişkilerine göre filtre tipleri Şekil 7.23'te gösterilmiştir.



Şekil 7.23. Empedans ilişkilerine göre filtreler

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:141

L filtrelerinin empedans ilişkilerine göre çeşitleri Şekil 7.24'te verilmiştir.



Şekil 7.24. Empedans ilişkisine göre L filtreleri

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:142

L filtreleri için araya girme kaybı Denklem 7.18'de, ξ sönüm oranı olmak üzere f_0 merkez frekansı Denklem 7.19'da verilmiştir. LC filtreleri sadece indüktans ve sadece kapasite içeren filtrelere göre yüksek frekanslarda daha etkilidirler (Arı ve

Özen, 2008). LC filtrelerinde rezonans frekansında filtre gürültüyü zayıflatmak yerine gürültüyü daha da kuvvetlendirebilir. Rezonans frekansı f_r Denklem 7.20'de verilmiştir.

$$AGK = 10 \log \left[1 + \frac{(1-\xi)^2(f/f_0)^2}{2\xi} + (f/f_0)^4 \right] \text{ [dB]} \quad (7.18)$$

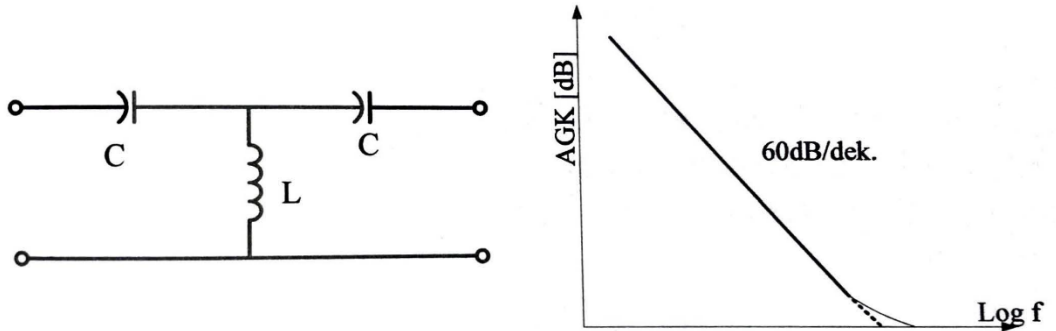
$$f_0 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi RC} = \frac{\sqrt{2}R}{2\pi L} \text{ [Hz]}, \quad \xi = 1 \text{ için} \quad (7.19a)$$

$$f_0 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]}, \quad \xi \neq 1 \text{ için} \quad (7.19b)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (7.20)$$

7.3.1.2. Yüksek Geçiren Filtreler

Yüksek geçiren filtreler 50 Hz AC veya daha düşük frekanslı işaretlerin süzülmesinde kullanılmaktadır (Arı ve Özen, 2008). Yüksek geçiren filtre devre yapısı ve frekans cevabı Şekil 7.25'te verilmiştir.



Şekil 7.25. Yüksek geçiren filtre ve frekans cevabı

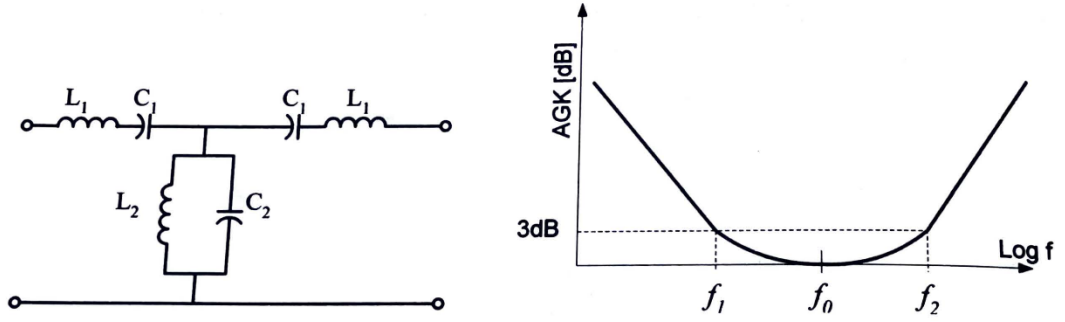
Kaynak: Arı ve Özen, 2008:143

Denklem 7.21'de verilen dönüşüm kullanılarak alçak geçiren filtre yüksek geçiren filtreye dönüştürülebilir (Arı ve Özen, 2008).

$$C_{YG} = \frac{1}{L_{AG}} \text{ [F]} \text{ ve } L_{YG} = \frac{1}{C_{AG}} \text{ [H]} \quad (7.21)$$

7.3.1.3. Bant Geçiren Filtreler

Bant geçiren filtreler belirli frekans aralığındaki sinyalleri geçirip bu aralık dışındaki sinyalleri sönmleyen filtrelerdir. Bant geçiren filtre devre yapısı ve frekans cevabı Şekil 7.26'da verilmiştir.



Şekil 7.26. Bant geçiren filtre ve frekans cevabı

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:144

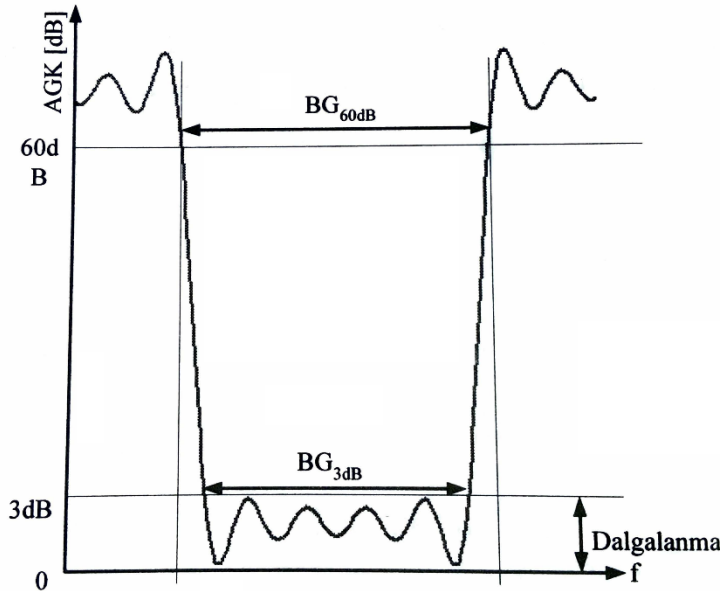
Bant geçiren filtrelerde seri ve şönt kollardaki rezonans frekansları birbirlerine eşit olmalıdır (Arı ve Özen, 2008). Merkez frekansı f_0 Denklem 7.22’de ifade edilmiştir.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} \text{ [Hz]} \quad (7.22)$$

Bant geçiren filtreler için araya girme kaybındaki dalgalanmaların olabildiğince küçük olması istenir. Filtre cevabına ait keskinlik faktörü SF Denklem 7.23’te verilmiştir.

$$SF = \frac{BG_{60dB}}{BG_{3dB}} \quad (7.23)$$

Bant geçiren filtreler için araya girme kaybı Şekil 7.27’de gösterilmiştir.



Şekil 7.27. Bant geçiren filtre için AGK

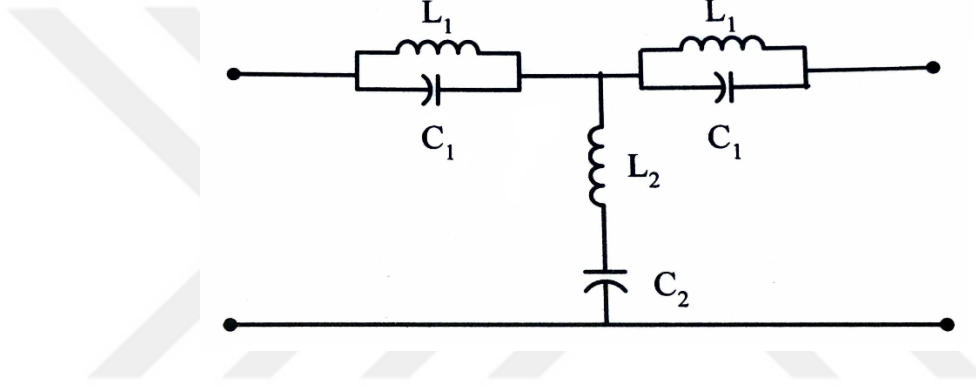
Kaynak: Arı ve Özen, 2008:144

7.3.1.4. Bant Durduran Filtreler

Bant durduran filtreler elektromanyetik girişime sebep olan gürültü sinyallerinin bulunduğu frekanslara özel tasarlanarak istenmeyen işaretleri yok ederler. Gürültü birden çok frekansta görülüyorsa bu frekanslar için özel tasarlanmış filtreler seri bağlanabilirler. Seri ve paralel kollardaki elemanların rezonans frekansları durdurulan bandın merkez frekansı olan f_0 'a eşittir. Merkez frekans f_0 'ın kesim frekansları olan f_1 ve f_2 cinsinden değeri Denklem 7.24'te verilmiştir.

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \text{ [Hz]} \quad (7.24)$$

LC tipi bant durduran filtre devresi Şekil 7.28'de gösterilmiştir.



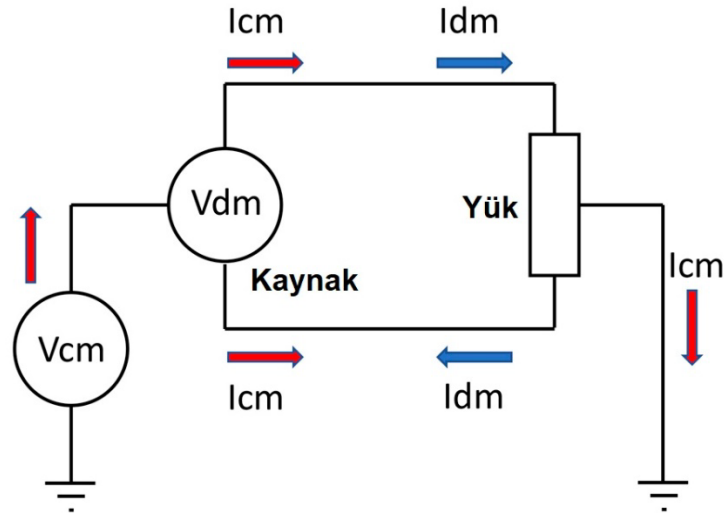
Şekil 7.28. LC tipi bant durduran filtre devresi

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:145

7.3.2. Güç Hattı Filtreleri

Kaynak tarafı ve yük tarafı arasındaki empedans uyumsuzluğu sebebiyle güç hattı filtreleri haberleşme filtrelerine göre farklı durumların göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Güç hatlarında elektromanyetik girişim gürültüsü karakteristik yapısı gereği ortak mod (CM) ve farksal mod (DM) olmak üzere iki çeşittir.

Ortak mod gürültü akımı, güç akımının yönünden bağımsız olarak faz ve nötr hatlarının her ikisinden kaynaktan kurban/alıcı yönünde ilerler. Ortak mod gürültü akımı toprak üzerinden devreyi tamamlar. Farksal mod gürültü akımı ise güç akımıyla aynı yönde ilerler. Kaynağın faz hattından çıkan gürültü akımı kurban/alıcı cihaza giriş yaparak nötr hattı üzerinden kaynağa geri döner. Ortak mod ve farksal mod gürültü akımları Şekil 7.29'da gösterilmiştir.

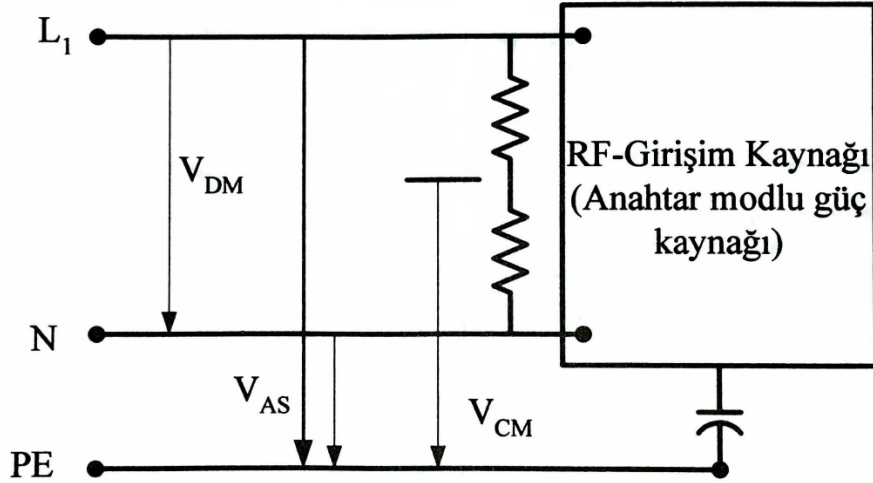


Şekil 7.29. Ortak mod ve farksal mod akımları

Kaynak: <https://www.eenewsautomotive.com/design-center/electronic-pervasiveness-vehicles-brings-emi-challenges/page/0/1>, Erişim tarihi: 12 Şubat 2020

Güç kaynaklarının neden olduğu elektromanyetik gürültü bastırılarak ya da bypass edilerek yük tarafına ulaşması engellenmelidir. EM gürültü akımı kendi frekans bandında etkili bir yüksek empedans üzerinden geçirilerek zayıflatılır ya da çok düşük empedans üzerinden toprağa gönderilir. Anahtarlama yapan elemanlar içeren güç kaynaklarında anahtarlama frekansına bağlı olarak çok sayıda harmonik gürültü bileşeni içerir. Anahtarlama işlemi farksal mod akımlarına sebep olur. Büyük ani akım değişimlerinin neden olduğu farksal mod akımları, kapasite filtrelerinin eşdeğer seri endüktans ve dirençlerinde gerilim düşümüne sebep olurlar ve bu durumun önüne geçmek için düşük seri endüktans ve seri direnç değerine sahip kapasiteler kullanılabilir. Ortak mod gürültü akımları parazit kapasite ve endüktif girişim etkisi sebebiyle elektrik ve manyetik alan temellidir. Anlık büyük gerilim değişimine sahip bir devre toprağa göre önemli bir kapasiteye sahipse girişim elektrik karakterli, anlık büyük akım değişimine sahip bir devrede iletkenler arasında önemli bir manyetik kuplaj varsa girişim manyetik karakterlidir. Ortak mod gürültülerinin yok edilmesi farksal mod gürültülerin yok edilmesine göre daha zordur (Arı ve Özen, 2008).

V_{DM} kaynak terminalleri olan faz ve nötr arasındaki farksal mod yüksek frekans gerilimini, V_{CM} asimetrik ortak mod gürültü toplamının toprağa göre gerilimini, V_{AS} her bir kaynak terminali ile toprak arasındaki yüksek frekans gerilimini ifade etmek üzere tek fazlı bir sistem için RF girişim gerilimleri Şekil 7.30'da verilmiştir.



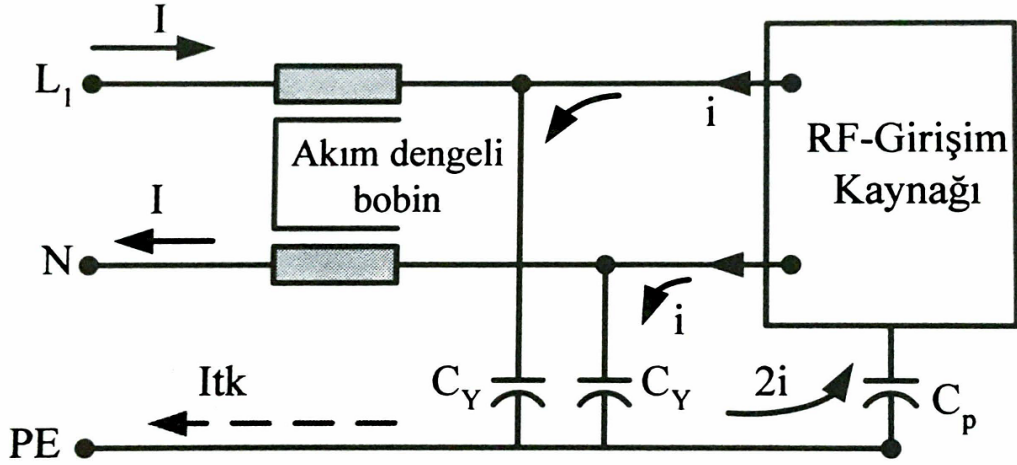
Şekil 7.30. Tek fazlı sistemde RF girişim gerilimleri

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:158

7.3.2.1. Ortak Mod Girişim Filtresi

Ortak mod girişim gerilimleri hat iletkenlerinin toprağa göre gerilimleri olup faz ve genlikleri aynıdır. Bu gerilimlerin oluşturdukları girişim akımları ortak mod akımı olarak ifade edilir ve gürültü kaynağından faz ve nötr iletkenleri üzerinden yük yönünde ilerleyerek C_p parazit kapasitesi üzerinden toprağa akarak geri dönerler. C_p parazit kapasitesi çok düşük değere sahiptir.

Şekil 7.31'de ortak mod gürültü filtre yapısı verilmiştir. Bu yapıda akım dengeli bir şok bobini ve hat iletkenlerini toprağa bağlayan C_Y şönt kapasiteleri bulunur. Ortak mod şok bobinleri yüksek frekanslı gürültüye ait olan ortak mod akımlar üzerinde etkilidir ve normal çalışma akımlarını etkilemezler. Çünkü çoğunlukla demir nüve üzerine sarılmış olan ortak mod şok bobinleri, ortak mod akımlarına karşı yüksek empedans gösterirken farksal mod akımlarına karşı düşük empedans gösterirler. C_Y şönt kapasitörleri farksal mod üzerinde etkili olmadan ortak mod girişimini zayıflatır. Bu kapasitörlerin verimi gürültü kaynağının empedansına bağlıdır. Zayıflatma etkisi 15-20 dB'yi geçebilir. Ortak mod girişim filtresinde ortak mod şok bobini C_Y şönt kapasitörlerine göre daha etkilidir. C_Y kapasitörlerinin sınırlı olduğu durumlarda zayıflatma etkisini artırmak için birden fazla ortak mod şok bobini kullanılabilir.

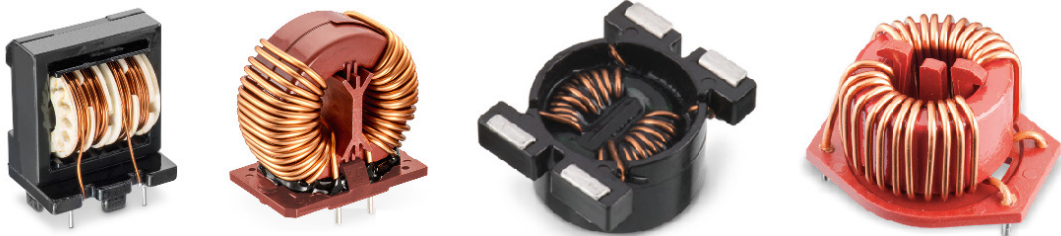


Şekil 7.31. Ortak mod gürültü filtresi

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:159

Standartlarda toprak kaçak akımı I_{tk} için izin verilen en büyük değer 3,5 mA'dır. Medikal cihazlarda ise toprak kaçak akımı 0,5 mA ile sınırlandırılmıştır. Avrupa Birliği standartlarına göre 230V gerilim 50 Hz şebeke frekansı için izin verilen en büyük C_Y kapasite değeri 22nF'dır (Arı ve Özen, 2008).

Şekil 7.32'de bazı ticari ortak mod şok bobinleri gösterilmiştir.

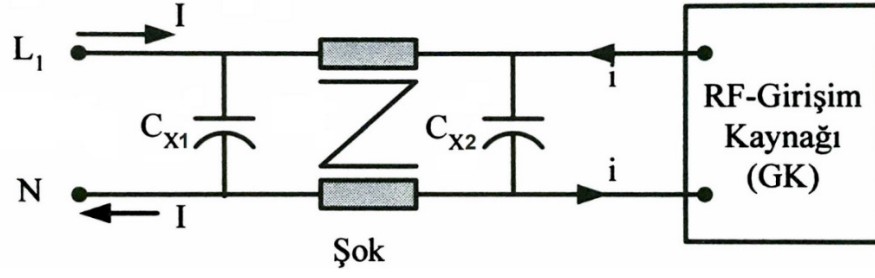


Şekil 7.32. Ortak mod şok bobinleri

Kaynak: www.we-online.com, Erişim tarihi: 12 Mart 2020

7.3.2.2. Farksal Mod Girişim Filtresi

Farksal mod girişim gerilimleri faz ile nötr iletkenleri arasında oluşan yüksek frekanslı gerilimler olup bu girişimi önlemek için alçak geçiren LC filtre faz ve nötr iletkenleri arasına konularak yok edilir. Farksal mod gürültülere genellikle yüksek frekansta anahtarlama yapan güç kaynakları sebep olur. Farksal mod filtre devre yapısı Şekil 7.33'te verilmiştir.



Şekil 7.33. Farksal mod gürültü filtresi

Kaynak: Arı ve Özen, 2008:160

Farksal mod filtre devre yapısı akım dengeli olmayan seri şok bobininden ve C_X kapasitelerinden oluşmaktadır. Farksal mod akımlarıyla birlikte hat akımlarının farksal mod şok bobininde oluşturduğu manyetik alan sebebiyle bobin gövdesinin doyuma ulaşmasını engellemek için hava boşluğuna sahip bobin tipleri tercih edilmektedir. C_X kapasitelerinin değerleri için herhangi bir sınırlandırma bulunmamaktadır. Örnek farksal mod bobinleri Şekil 7.34’te gösterilmiştir.



Şekil 7.34. Farksal mod şok bobinleri

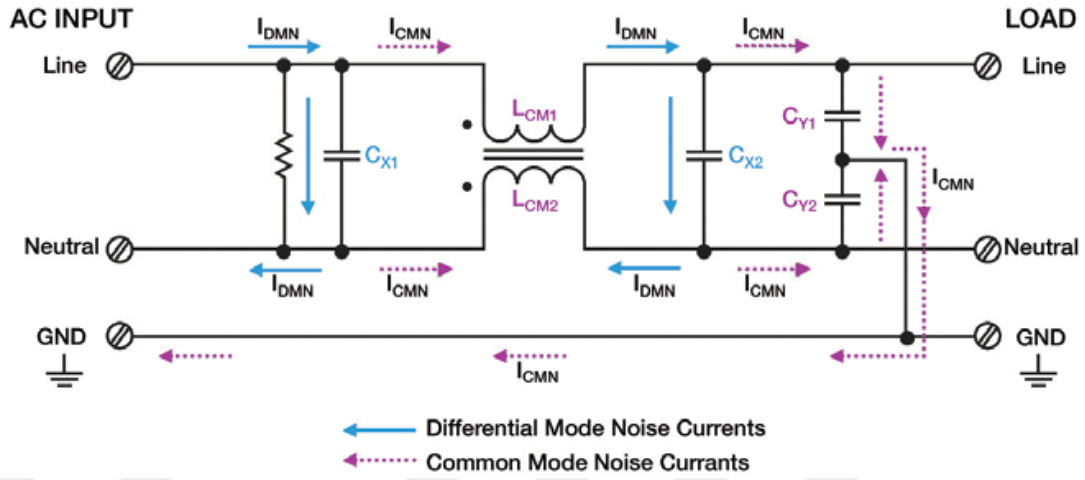
Kaynak: www.we-online.com., Erişim tarihi: 12 Mart 2020

C_{X1} ve C_{X2} kapasitörleri yüksek değerlere sahip olabilen ve yalnızca farksal mod gürültüler üzerinde zayıflatma yapan bileşenlerdir. Kaynak ve yük empedansına bağlı olarak bu kapasitörlerden biri faydasız kalırsa devre yapısı içinde kullanılmayabilir.

7.3.2.3. Hibrit Şebeke Filtresi

Şebeke filtrelerinde ortak mod girişim ve farksal mod girişim gürültüsünü bloke etmek için ortak mod filtre ve farksal mod filtre yapısı bir arada kullanılır. Ortak mod girişiminin neden olduğu gürültü ortak mod şok bobini ile C_{Y1} ve C_{Y2} şönt kapasiteleri ile zayıflatılır. Ortak mod akımı hat iletkenleri ile toprak arasına yerleştirilmiş C_{Y1} ve C_{Y2} kapasitörleri üzerinden toprağa aktarılır. Farksal mod girişimin neden olduğu gürültü ise hat iletkenleri arasına yerleştirilen C_{X1} ve C_{X2}

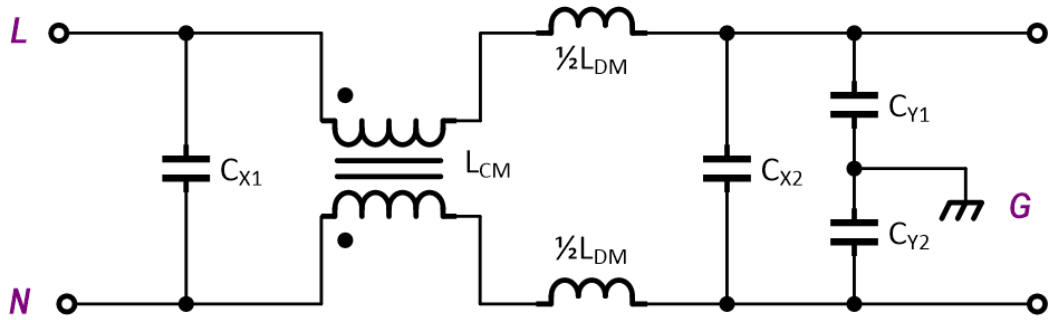
kapasiteleri ile filtre edilerek zayıflatılır. Hibrit şebeke filtre yapısı ile ortak ve farksal mod akımları Şekil 7.35'te gösterilmiştir.



Şekil 7.35. Hibrit şebeke filtresi – I

Kaynak: Berman, 2008

Şebeke filtresindeki C_{X1} ve C_{X2} kapasitelerinin farksal mod akımlarını zayıflatması için yetersiz kaldığı durumlarda kapasitörlerin filtrelemesine ek olarak farksal mod şok bobin kullanılır. Bu yapıdaki bir hibrit şebeke filtre devresi Şekil 7.36'da verilmiştir.



Şekil 7.36. Hibrit şebeke filtresi – II

Kaynak: Wang, 2014

Şebeke filtreleri iletim yolu emisyonu azaltmak için kullanılır. İletim yolu emisyon (conducted emission) eğer havadan yayılan emisyon (radiated emission) sebep oluyorsa iletim yolu emisyonunun azaltılması havadan yayılan emisyonların azaltılmasını da olanak sağlamış olur. Şebeke filtreleri standartların isterlerini karşılayabilmek için 150 kHz ile 30 MHz arasında zayıflatma etkinliği gösterirler. Filtre seçimi ya da tasarımı yapılırken ilk dikkat edilecek olan yükün ihtiyacını karşılayabilecek akımlar için uygun olmasıdır. Sonrasında emisyon problemlerinin

olduğu frekans bölgelerinde daha etkin zayıflatma sağlayacak şekilde filtre tasarımı veya seçimi yapılır. Ticari şebeke filtreleri görselleri Şekil 7.37’de verilmiştir.

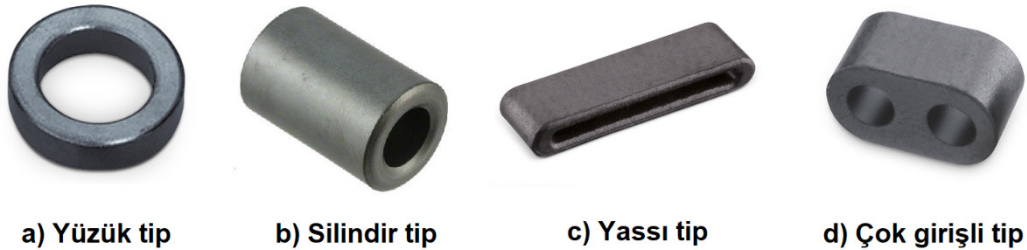


Şekil 7.37. Ticari şebeke filtre örnekleri

Kaynak: www.we-online.com/catalog/en/WE-CLFS., Erişim tarihi: 13 Mart 2020

7.3.3. Ferrit Filtreler

Kablolar ve sinyal yolları elektromanyetik girişim gürültüsünün yayılmasına sebep olurlar. Havadaki elektromanyetik dalgalar kabloların alıcı bir anten gibi davranmasıyla kablodan geçen sinyale ek olarak bir gürültü sinyalinin de eklenmesine sebep olarak bağışıklık problemi oluşturabilir. Aynı zamanda bir kablodan geçen sinyalin yüksek frekanslı bileşenleri o kablonun yüksek frekansta anten gibi davranması sebebiyle havaya elektromanyetik yayılım yaparak emisyon problemi oluşturabilir. Kablolar ve sinyal hatları, elektromanyetik uyumluluğa ait iki tür olan bağışıklık ve emisyon problemlerinde kuplaj yolu olarak büyük bir öneme sahiptir. Girişim problemlerinin azaltılması veya yok edilmesi için filtre özelliği gösteren ferromanyetik malzemeler kullanılır. Kablolar için ferrit bilezik, ferrit nüve, ferrit boncuk ya da ferrit kelepçe olarak adlandırılan ferromanyetik filtreler kabloların içerisinden geçirilmesi suretiyle uygulanır. Kablonun sökülmesini gerektiren yüzük, düz, silindir ve çok girişli ferrit bilezik görselleri Şekil 7.38’de verilmiştir.



a) Yüzük tip

b) Silindir tip

c) Yassı tip

d) Çok girişli tip

Şekil 7.38. Basit ferrit filtre tipleri

Kaynak: www.we-online.com/catalog/en/pbs/emc_components/ferrites_for_cable_assembly
Erişim tarihi: 20 Mart 2020

Yassı tip ferrit filtreler güç sinyali taşıyan kablolardan ziyade haberleşme verisi taşıyan yassı kablolar için kullanılır. Bazı ferrit kelepçeler ise kablonun sökülmesine ihtiyaç duyulmadan açılır-kapanır mekanizması sayesinde kolayca takılabilir. Kilit mekanizmalı ferrit filtreler basit tiplere göre maliyetleri çok daha yüksektir. Ancak kabloların sökülmesinin zorluk oluşturduğu durumlar için idealdir. Kilit mekanizmalı ferrit filtre görselleri Şekil 7.39’da verilmiştir.



Şekil 7.39. Kilit mekanizmalı ferrit filtreler

Kaynak: www.we-online.com/catalog/en/WE-STAR-TEC., Erişim tarihi: 21 Mart 2020

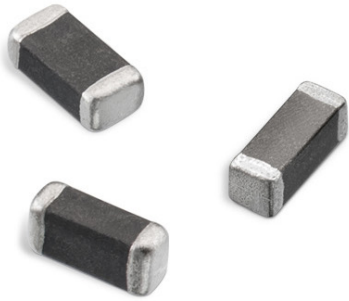
Ferrit filtreler cihazların içinde ve dışında hem enerji kablolarında hem de veri kablolarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle az miktarda parazitin bile sinyal kalitesinde büyük bozulmalara yol açtığı ses ve görüntü kablolarında kullanılması büyük önem taşımaktadır. Görüntü ve ses taşıyan ferrit filtreli HDMI kablosu görseli Şekil 7.40’ta verilmiştir.



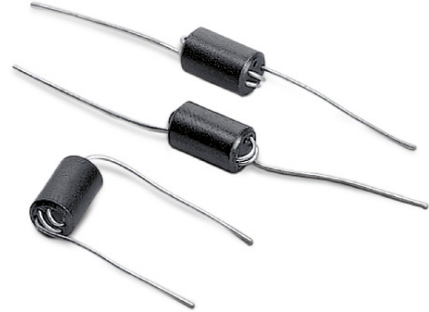
Şekil 7.40. Ferrite filtreli bir HDMI kablosu

Kaynak: www.cmple.com/30-awg-high-speed-hdmi-cable-with-ferrite-cores-3-feet
Erişim tarihi: 21 Mart 2020

Elektronik devre kartları üzerinde sinyal hatlarının filtrelenmesi için ise kablo tipi ferritler yerine SMD (Surface Mount Device-Yüzey monteli eleman) ya da TH (Through hole-delik içinden) tip ferrit filtreler devre kartı düzeyinde kullanılmaktadır. SMD ve Through-hole tipi ferrit filtreler Şekil 7.41’de gösterilmiştir.



a) SMD tip



b) Through-hole tip

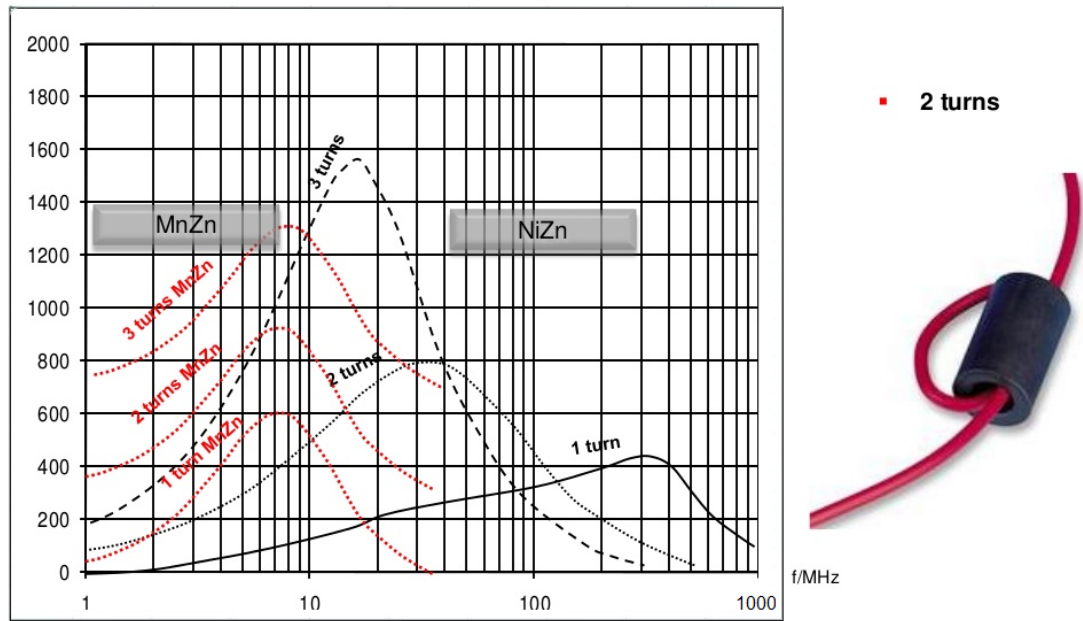
Şekil 7.41. SMD ve through-hole tip ferrite filtreler

Kaynak: www.we-online.com/catalog/en/pbs/emc_components/ferrites_for_pcb_assembly
Erişim tarihi: 21 Mart 2020

Ferromanyetik malzemelerin manyetik alanı depolama özelliği vardır. İçinden akım geçen bir iletken telin etrafında manyetik alan oluşmaktadır. Yüksek frekansa sahip gürültü sinyalinin oluşturmuş olduğu manyetik alan ferrit filtreler tarafından bloklanarak zayıflatılır. Ferrit filtreler genellikle 10 MHz’den yüksek frekanslarda ciddi zayıflatma etkisi gösterirler. Ancak ferrit filtrenin malzeme içeriğinin

değişmesiyle kHz mertebesinde etkili olmaya başlayan ve 1 MHz üzerinde büyük zayıflatma sağlayan ferrit filtrelere de rastlamak mümkündür.

Ferrit filtreler yüksek frekansları bastıran alçak geçiren özellik gösteren bir bobin türüdür. Endüktans değeri çok küçük olan ferrit filtreler bastırdıkları yüksek frekanslı enerjiyi ısı olarak dışarı atarlar. Yüksek geçirgenlik ve çok düşük iletkenliğe sahip olan ferrit filtreler demir, nikel, çinko ve magnezyum gibi elementler içererek yüksek frekansa çok duyarlı pasif bileşenlerdir. Ferrit filtreler rezistif ve indüktif etki gösterirler. Frekans yükseldikçe rezistif özelliği artar. Bir ferrit filtre içerisinde kablo iki kez geçirilerek sarım sayısı artırılırsa empedans etkisi artar ancak rezonans frekansında azalma olur ve etkili olduğu frekans aralığı daralır. Pratikte kaçak kapasitif etki sebebiyle ikiden fazla sarım kullanılmaz. Ferrit filtrede sarım sayısına bağlı olarak empedans değişimi Şekil 7.42’de verilmiştir.



Şekil 7.42. Ferrite filtreler için sarım sayısı empedans grafiği

Kaynak: Wallis, 2015

Kablo tipi ferrit filtreler büyük çoğunlukla ortak mod girişimin önlenmesinde kullanılır. Faydalı sinyal akımı faz ve nötr iletkenlerinde birbirinin tersi yönde ilerlediğinden oluşan manyetik alan birbirini sönmüleyici etki gösterir. Ancak ortak mod girişim gürültüsü faz ve nötr iletkenlerde aynı yönde ilerlediği için kabloya takılan ferrit filtre zayıflatılır. Faz ve nötr iletken çiftinin etrafına takılan kablo tipi ferrit filtreler farksal mod gürültülere etki etmezler. Tek iletken etrafına takılan kablo tipi

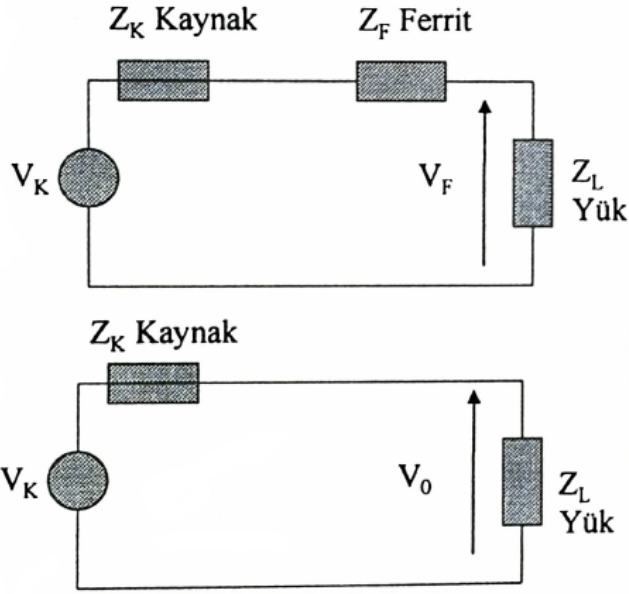
ferrit filtreler farksal mod gürültüleri zayıflatabilir ancak farksal mod gürültüler çoğunlukla yüksek frekanslarda etkinlik gösterdiğinden çok fayda sağlayamazlar.

Elektromanyetik girişimin azaltılmasına yönelik olarak bir elektronik cihaz için ferrit filtre seçimi yapılırken aşağıdaki kriterlerin sağlanması önemlidir.

- Kablo ya da sinyal hattı üzerinde faydalı sinyal frekansı ve elektromanyetik girişim sinyalinin sorun oluşturduğu frekans bölgeleri belirlenir. Sorunlu frekans bölgesinde en etkin zayıflatma değerine sahip ferrit filtreler belirlenir.
- Kabloya göre ferrit filtrenin basit tek parça tip ya da açılır-kapanır kilitli mekanizmaya sahip tipte olacağı belirlenir.
- Kablo tipi ferrit için kablo kesiti belirlenir.
- PCB düzeyinde ferrit filtre seçiminde o sinyal hattından geçecek maksimum akım belirlenip bu akıma dayanacak özellikte olan ferrit filtre seçilir.
- PCB düzeyinde ferrit filtre seçiminde ferritin iç direncinin oluşturacağı gerilim düşümünün faydalı sinyal için sorun teşkil etmeyecek kadar düşük olması sağlanmalıdır.
- Sıcaklığa bağlı performans değişimleri ve DC akım gibi diğer seçim kriterlerine uygunluklar kontrol edilir.

Ferrit filtreler devre içerisinde kaynak ile yük arasında seri empedans gibi etki yapmaktadır. Ferrit filtrelerin araya girme kaybı, ferrit filtrenin olduğunda ve olmadığındaki yük gerilimlerinin logaritmik oranına eşittir. Araya girme kaybı değeri, kaynak ve yük empedansları ve ferrit filtre eşdeğer empedansı parametrelerine bağlıdır. Daha iyi araya girme kaybı elde etmek için ferrit filtre empedansının kaynak ve yük empedanslarından olabildiğince büyük olması gerekir (Sevgi, 2000). Ferrit filtre eşdeğeri ve araya girme kaybı bağıntısı Şekil 7.43'te verilmiştir.

Ferrit Bilezikler



V_F : Ferrit varken yük gerilimi

V_0 : Ferrit yokken yük gerilimi

Araya Girme Kaybı (IL):

$$IL = 20 \text{ Log}_{10} (V_0/V_F)$$

$$IL = 20 \text{ Log}_{10} \left(\frac{Z_K + Z_F + Z_L}{Z_K + Z_L} \right)$$

Şekil 7.43. Ferrit filtre eşdeğeri ve araya girme kaybı bağıntısı

Kaynak: Sevgi, 2000:205

Bir ferrit filtre için araya girme kaybı değeri verilirken genelde sadece kaynak ve yük empedans için nominal değer olan 50Ω 'a göre verilir. Kaynak ve yük empedansları değişirse ferrit filtrenin araya girme kaybı değeri de değişir. Örnek olarak, Şekil 7.44'te verilen ferrit filtre araya girme kaybı değerlerine bakıldığında 500Ω eşdeğer empedansa sahip ferrit filtre, 50Ω empedans değerlerine sahip kaynak ve yük arasına konulduğunda $15,6$ dB araya girme kaybı sağlarken 1Ω empedans değerlerine sahip kaynak ve yük arasına konulduğunda $48,5$ dB ile daha yüksek araya girme kaybı sağladığı görülmektedir (Sevgi, 2000).

Ferrit Bilezikler

$$IL = 20 \log_{10} \left(\frac{Z_R + Z_F + Z_L}{Z_R + Z_L} \right)$$

Örnek: $Z_F = 500\Omega$,

- a) $Z_K = 50\Omega, Z_L = 50\Omega \rightarrow IL = 15.6dB$
b) $Z_K = 50\Omega, Z_L = 500\Omega \rightarrow IL = 5.6dB$
c) $Z_K = 20\Omega, Z_L = 200\Omega \rightarrow IL = 10.2dB$
d) $Z_K = 1\Omega, Z_L = 1\Omega \rightarrow IL = 48.5dB$

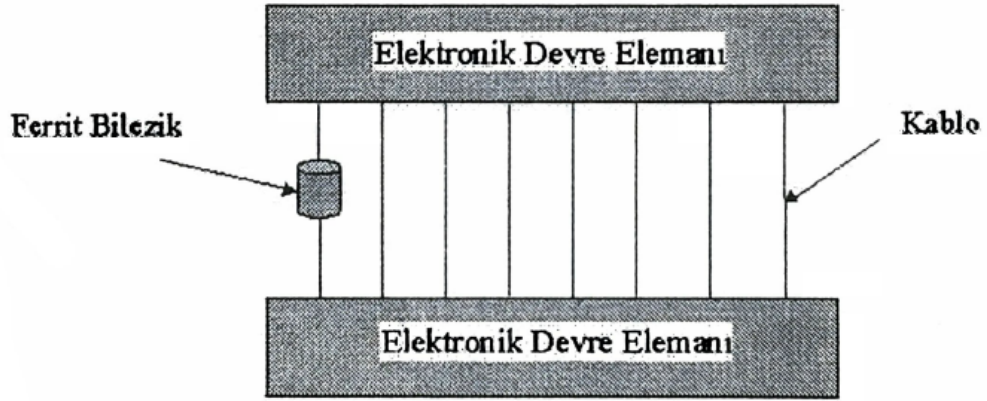
Şekil 7.44. Ferrit filtre örnek araya girme kaybı değerleri

Kaynak: Sevgi, 2000:206

Veri ve sinyal iletiminde genellikle çok damarlı ve yassı kablolar kullanılmaktadır. Bu kablolardaki girişimi engellemek için ferrit filtre kullanımında çoklu kablolardan bir kısmına ferrit filtre uygulanması girişimin azaltılmasında etkin bir çözüm sağlamamaktadır. Bu tip kablolarda ya tüm damarlara ayrı ayrı ferrit filtre uygulanmalı ya tüm kabloyu çevreleyecek çapta ferrit filtre kullanılmalı ya da yassı sinyal kabloları için yassı tip ferrit filtreler kullanılmalıdır.

Şekil 7.45'te verilen elektronik devre bağlantısında formüle göre 8 sinyal kablosunun birine ferrit filtre uygulandığında gürültüyü sadece 0,58 dB azaltırken bu 8 sinyal kablosundan 5'ine ferrit filtre uygulanmasıyla gürültü zayıflamasının 4,3 dB'e çıktığı görülmektedir (Sevgi, 2006).

EMI Filtreleri -Ferrit Bilezikler



•8 iletkenen sadece 1'ine ferrit bilezik kullanmak gürültüyü sadece $10\log_{10} (7/8) = -0.58\text{dB}$ azaltır.

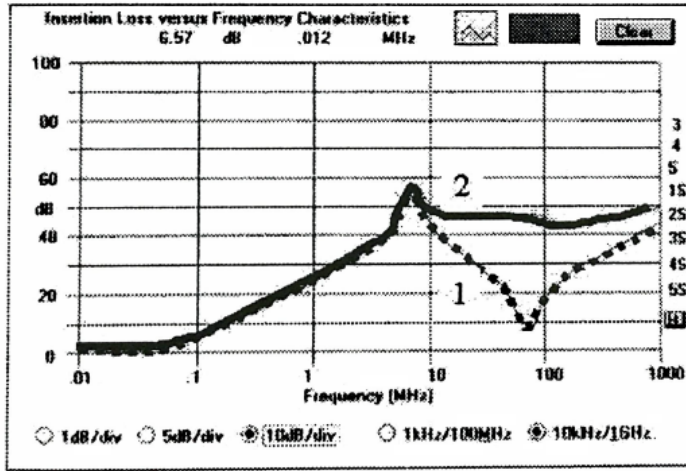
•8 iletkenen 5'ine ferrit bilezik kullanmak gürültüyü sadece $10\log_{10} (3/8) = -4.3\text{dB}$ azaltır.

Şekil 7.45. Çoklu sinyal kablolarına ferrit filtre uygulanması

Kaynak: Sevgi, 2006:91

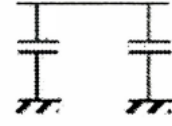
Şekil 7.46'da verilen iki filtre yapısına bakıldığında yalnızca $1\mu\text{F}$ ve 100nF 'lık iki paralel kapasitörden oluşan ilk filtrenin araya girme kaybı 1MHz 'den 10dB 'den başlayarak 8MHz frekansında yaklaşık 58dB araya girme kaybıyla maksimum seviyeye çıkarak 100MHz 'e kadar araya girme kaybı değerinin tekrar 10dB seviyelerine düştüğü görülmektedir. Ancak ikinci filtre yapısında aynı kapasitörler arasına $1,2\mu\text{H}$ eşdeğer empedansına sahip bir ferrit filtre eklendiğinde 1MHz 'ten 1GHz 'e kadar araya girme kaybı değerinin 40dB 'nin altına düşmeden etkinlik gösterdiği görülmektedir (Sevgi, 2006).

Ferrit Bilezikler



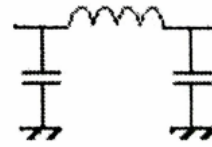
1: Paralel iki Kapasite

(1 μ F, 0H) ve (100nF, 5mH)



2: Paralel iki Kapasite ve Ferrit bilezik

(1.2 μ H) (1 μ F, 0H) ve (100nF, 5mH)



Şekil 7.46. Ferritli ve ferritsiz filtre karşılaştırması

Kaynak: Sevgi, 2006:91

7.4. Kablo ve Konnektörler

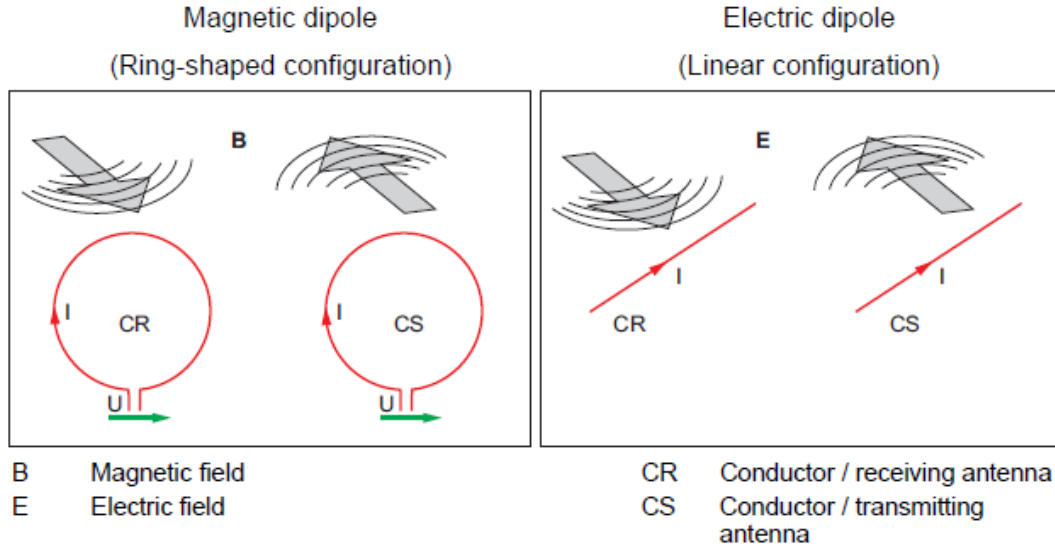
Elektromanyetik uyumluluk problemlerinde en çok soruna sebep olan unsurlardan birisi kablolamadır. Kablolamada sadece kablonun kendisi değil aynı zamanda kablonun ekranlanması, kabloların bağlantı elemanı olan konnektörlerin seçilmesi ve kablo ekranları ile konnektörlerin topraklanması konuları da bu çözümün bir parçası olarak ele alınmalıdır.

7.4.1. Kablolar

Kablolar elektromanyetik uyumluluk performansının en önemli belirleyici bileşenlerinden birisidir. Hem cihazlar arasında hem de cihaz içinde kablolar, faydalı sinyalleri taşıyacaklar da bunla ek olarak gürültü olarak tabir edilen istenmeyen sinyallerin iletimine de olanak sağlarlar. Kablolar uzun olmaları sebebiyle diğer tüm bileşenlere göre elektromanyetik ortamla daha fazla etkileşim halindedir.

Frekans yükseldikçe kabloların anten etkisi göstermesi beraberinde girişim problemlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Kabloların cihaz içerisinde farklı boylarda olmaları farklı frekanslarda rezonansa giren yarım dalga dipol anteni gibi davranmalarına sebep olurken, uzun olmalarından dolayı geniş çevrim yüzeyleri oluşturmaları halka anten gibi davranmalarına sebep olur (Sevgi, 2019).

Kabloların anten gibi davranıp ışıma yaparak emisyon problemi oluşturması ve ortamdaki ışımadan etkilenerek bağışıklık problemi oluşturması Şekil 7.47’de gösterilmiştir.



Şekil 7.47. İletkenlerin anten etkisi

Kaynak: Sew Eurodrive, 2013:9

Kablolar gürültüyü iletim yolu olarak iletebilirken aynı zamanda hem ışıma yolu olarak gürültü yayarak emisyon problemlerinin oluşmasına hem de ortamdaki elektromanyetik alanlardan ışıma yolu olarak etkilenerek bağışıklık problemlerinin oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu bağlamda kablolar, hem iletim hem ışıma yolu olarak, hem emisyon hem de bağışıklık problemlerinin tamamı için çok önemli bileşenlerdir.

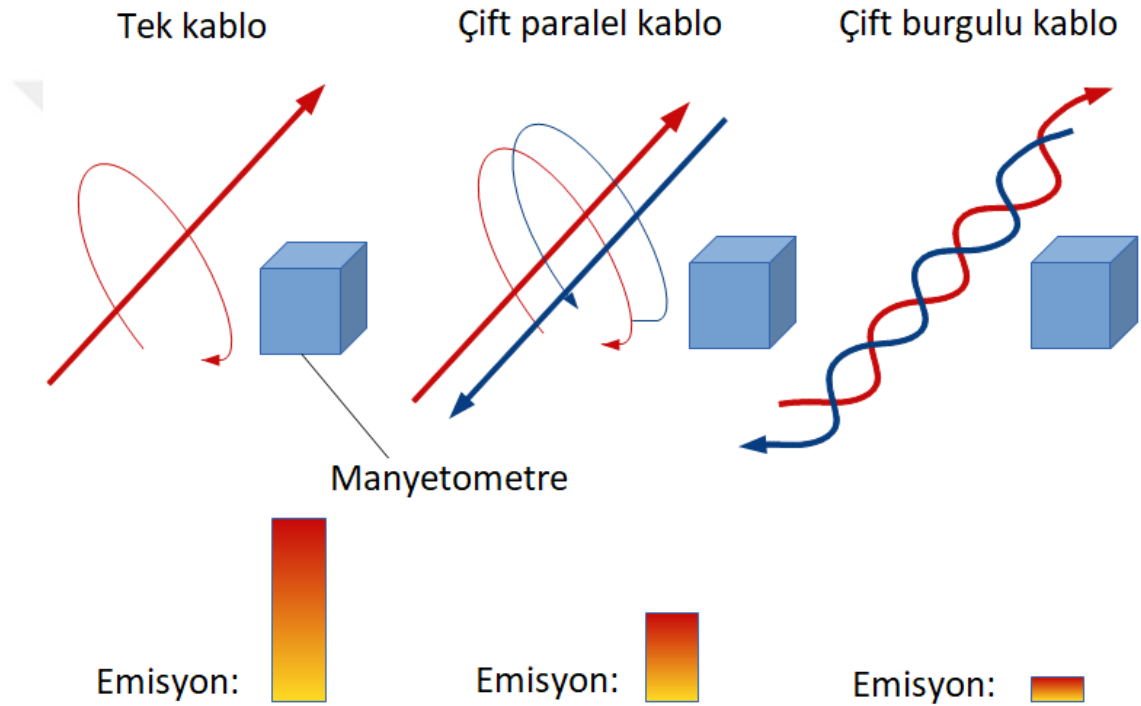
λ en yüksek frekanslı dalganın boyu olmak üzere, $\lambda/20$ 'den uzun herhangi bir iletken anten gibi davranmaya başlar. Tüm kablolar çalışma sırasında aynı olmadıklarından doğru kablo seçiminin önemi öne çıkmaktadır. Bazı özellikteki kabloların pasif devre elemanları gibi davranışlarına;

- 1 MHz frekansında direnci 6Ω 'dan büyük 1 metrelik kablo $1\mu H$ 'lik bir indüktöre eşdeğer olduğu
- 1 mm çapındaki bir kablonun 160 MHz'deki direnci, DC'deki (0 Hz) direncinin 50 katına eşdeğer olduğu
- 25 mm uzunluğunda yarıçapı 1 mm olan bir kablo $1pF$ 'lık kapasitöre eşdeğer olduğu

- 5 MHz'ten yüksek frekansta filtre etkinliğinin sıfıra eşit olduğu 100 mm'lik bir toprak kablosu 100 nH'lik bir indüktöre eşdeğer olduğu

örnekleri verilebilir (Beer, 2008).

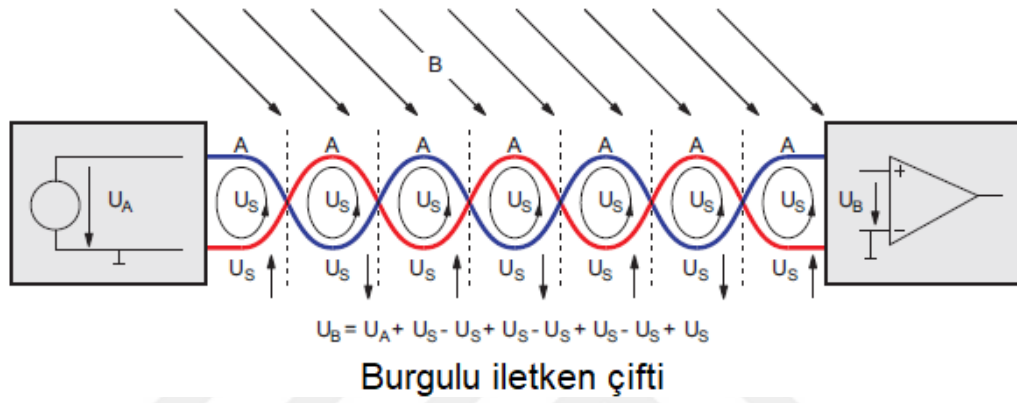
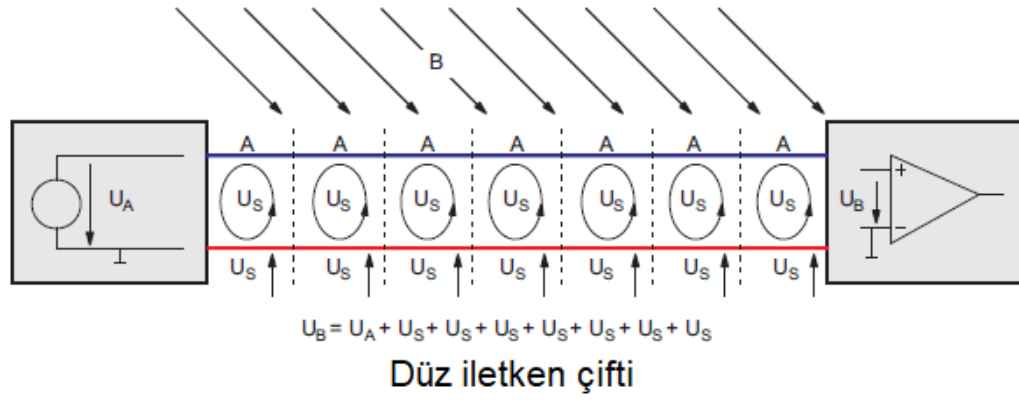
Kabloların elektromanyetik girişimden etkilenmesi en aza indirmek için kablo içerisindeki gidiş-dönüş iletkenlerinin tamamı çift burgulu ya da çift bükümlü (twisted pair) şekilde olmalıdır. Düz tek iletken kablo, düz çift iletken kablo ve burgulu çift iletken kablonun oluşturdukları manyetik alanlar ve emisyon seviyeleri Şekil 7.48'de verilmiştir.



Şekil 7.48. Tek, çift ve burgulu çift kablo manyetik alanı ve emisyon seviyeleri

Kaynak: <https://electronics.stackexchange.com/questions/255687/why-in-some-communication-protocols-the-wires-are-twisted.>, Erişim tarihi: 23 Mart 2020

Düz uzanan iletken çiftlerde ortamın elektromanyetik alanından etkilenerek faydalı sinyale girişim gürültüsünün eklenmesi durumu görülür. Bu sebepten düz iletken çiftler elektromanyetik bağışıklık problemine açıktır. Burgulu çift kablolar ise ortamın manyetik alanın oluşturduğu gerilimler birbirlerini sönmüledikleri için elektromanyetik bağışıklık problemine karşı uygundur. Düz ve çift burgulu iletkenlerin manyetik alandan etkilenmesi ve uçlarındaki oluşan gerilimler Şekil 7.49'da verilmiştir.



Şekil 7.49. Düz ve burgulu çift iletkenlerin çıkış gerilimleri

Kaynak: Sew Eurodrive, 2013:30

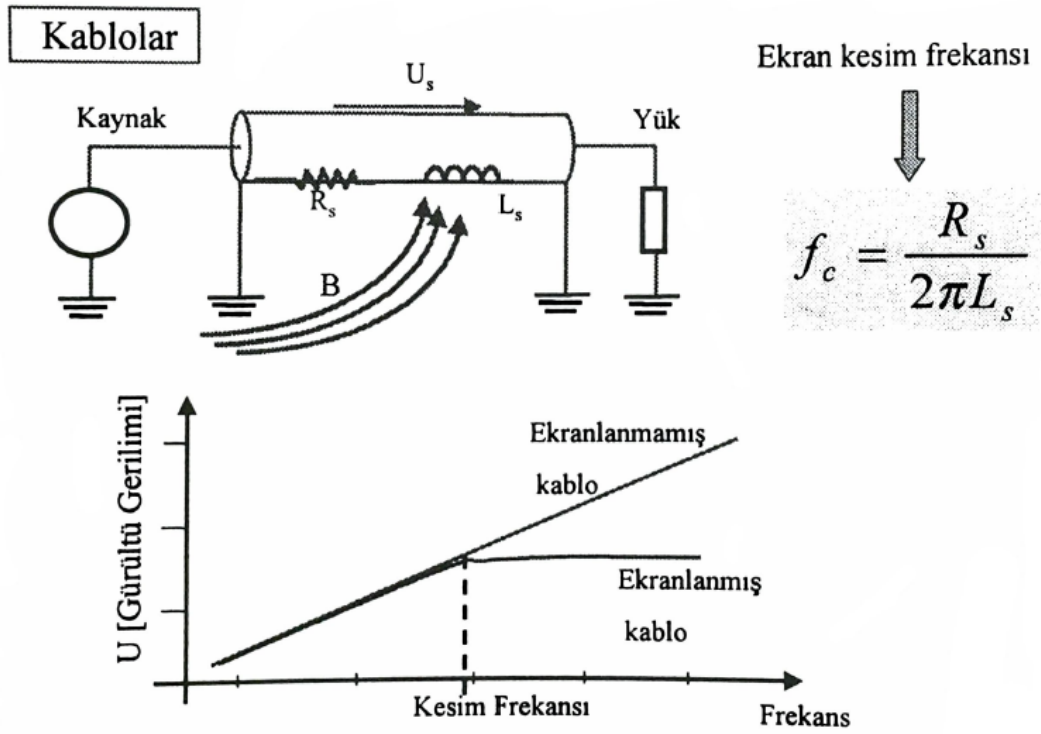
Kabloların elektromanyetik ortamdan etkilenmemeleri için ekranlanmaları ya da ekranlanmış olarak imal edilen kabloların seçilmesi gerekmektedir. Ekransız bir kablonun ekranlanması için zırh kılıflar bulunmaktadır. Örnek bir zırh kılıf Şekil 7.50'de gösterilmiştir.



Şekil 7.50. Ekransız kablo için zırh kılıf

Kaynak: www.we-online.com/catalog/en/WE-ST., Erişim tarihi: 23 Mart 2020

Ekransız kablolarla manyetik alan içerisinde kalındığında frekans yükseldikçe artan gürültü gerilimleri oluşmaktadır. Ekranlı kablolarla ise aynı durum yalnızca kesim frekansına kadar vardır. Uygulamada iyi bir ekranlama olması için gürültünün frekansının 1/5'inden daha küçük kesim frekansına sahip özellikte ekranlı kablo seçilmelidir. Kablo ekranlaması ve ekran kesim frekansı Şekil 7.51'de verilmiştir.



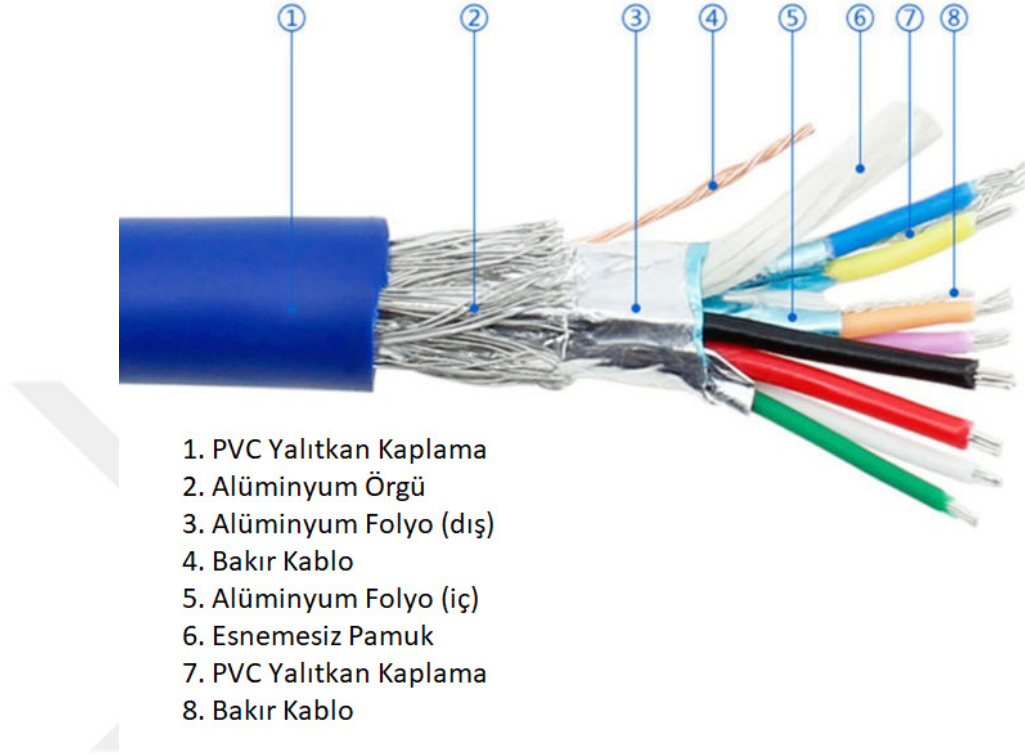
Etkili manyetik ekranlama için $f > 5 \times$ kesim frekansı olmalıdır !

Şekil 7.51. Kablo ekranlaması ve ekran kesim frekansı

Kaynak: Sevgi, 2000:192

Piyasada kablo ekranları ihtiyaca göre büyük değişiklikler göstermektedir. Enerji, analog/sayısal sinyal, kontrol ve veri kablolarını dış elektromanyetik etkilerden korumak için çok çeşitli ekranlı kablo türleri bulunmaktadır. Tek başına metal örgü, tek başına metal folyo ve ferrit izolasyon koruması olduğu gibi birkaçının birlikte ve birden çok katman olarak kullanıldığı ekranlı kablolar bulunmaktadır. Metal folyo ekranı elektrik alana karşı koruma sağlarken metal örgü ve ferrit izolasyon koruması manyetik alana karşı koruma sağlamaktadır. Metal örgünün sıklığı arttıkça ekranlama etkinliği artmakta ancak kablo maliyeti yükselmektedir. Örgü ve folyo metali için genellikle alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum yerine bakır kullanılması daha etkin koruma sağlamakta ancak yine maliyeti artırmaktadır. Ayrıca sinyal türüne göre

uygun ekranlaması yapılmış koaksiyel kablolar da bulunmaktadır. Şekil 7.52’de elektrik alana karşı koruma sağlayan alüminyum folyolu ve manyetik alana karşı koruma sağlayan alüminyum örgülü bir ekranlı kablo iç yapısı gösterilmiştir.



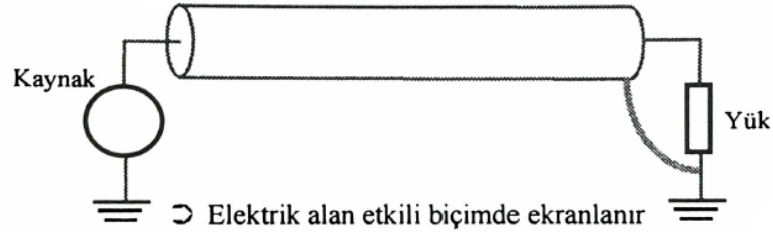
Şekil 7.52. Ekranlı kablo iç yapısı

Kaynak: <https://shopee.co.th.>, Erişim tarihi: 24 Mart 2020

Kabloların ekranlı olması elektromanyetik girişimin etkili olması için yeterli değildir. Ekranlı kabloların etkin olabilmeleri için topraklanmaları gerekir. Ancak bu topraklama işlemi önemli detaylara sahiptir. Gürültünün yüksek frekanslı olduğu göz önüne alınmadan kablo ekranlarının herhangi basit bir kablo yardımıyla toprağa bağlanması ya da hiç topraklanmaması yüksek maliyetli ekranlı kablonun işlevini yerine getirmemesine sebep olmaktadır. Ekranlı kablolar EMC için özel topraklı konnektörler ile topraklanmalıdır. Ayrıca kablonun tek bir ucundan topraklanması orta seviyede yalnızca elektrik alan koruması sağlarken kablonun her iki ucundan topraklanması hem elektrik alan hem de manyetik alan için yüksek seviye koruma sağlamaktadır. Metal folyo ve sık dokulu metal örgüye sahip tipte ekranlı çift burgulu bir kablo, her iki uçtan EMC’ye uygun konnektörler ile toprak bağlantılarının yapılmasıyla çok iyi bir EMI önleme performansı göstermiş olur. Ekranlı kablolarda tek ve iki uçtan topraklanma yapısı ve oluşturduğu fark Şekil 7.53’te verilmiştir.

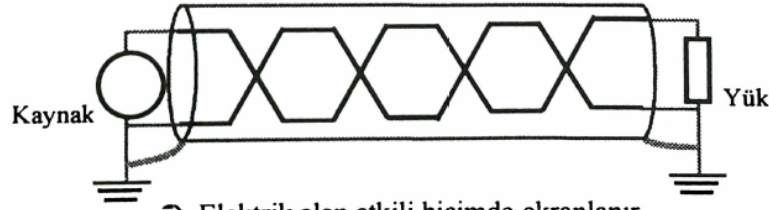
Kablolar

⇒ Sadece yük noktasından topraklama



⇒ Elektrik alan etkili biçimde ekranlanır
⇒ Manyetik alan ekranlanmamış olur

⇒ Ekranlanmış burgulu çift iletken

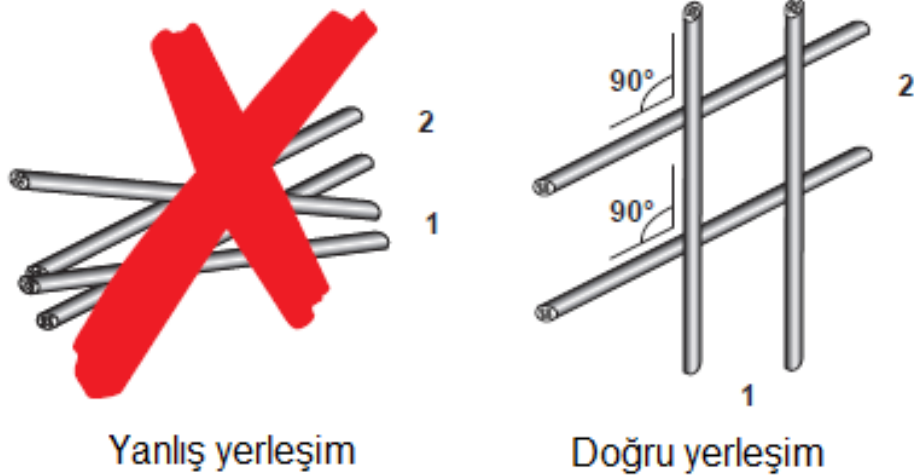


⇒ Elektrik alan etkili biçimde ekranlanır
⇒ Manyetik alan etkili biçimde zayıflatılır

Şekil 7.53. Ekranlı kablunun topraklanması

Kaynak: Sevgi, 2000:193

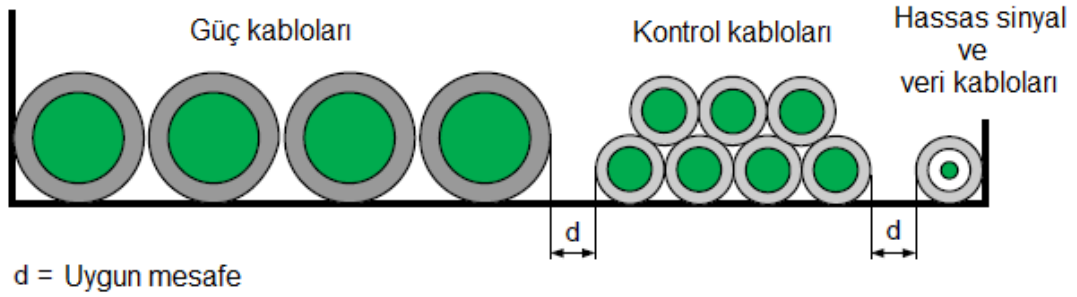
Bir sistem içerisinde kabloların konumlandırılması da EMI açısından önemlidir. Kabloların dağınık bir şekilde birbirine yakın teması girişim seviyesini artırmaktadır. Kablolar ya çeşitlerine göre aralarında uygun mesafe gözetilerek aynı doğrultuda ilerlemeli ya da aynı doğrultuda olmayan kablolar birbirine dik olarak yerleştirilmelidir. Kablo gruplarına ait hatalı ve doğru yerleşim Şekil 7.54'te gösterilmiştir.



Şekil 7.54. Kabloların hatalı ve doğru yerleşimi

Kaynak: Sew Eurodrive, 2013:63

Kablolar yan yana konumlandırılırken türlerine göre sıralamak girişimi en aza indirecektir. Girişime karşı hassas sinyal ve veri kabloları en başta enerji kablolarından sonrasında röle ve diğer kontrol kablolarından uzakta olmalıdır. Şekil 7.55'te kabloların yan yana yerleşiminde önce enerji kablolarının, sonrasında röle ve diğer kontrol kablolarının ve en son hassas veri kablolarının yerleştirildiği görülmektedir.



Şekil 7.55. Kabloların uygun dizilimi

Kaynak: Delaballe, 2001:19

Elektronik bir sistemde kullanılan topraklama kablolarının özellikleri de EMC açısından önemlidir. Topraklama iletkenlerini empedansı düşürmek adına olabildiğince kısa tutmak gerekir. İnce topraklama kabloları yerine topraklama şerit iletkenler daha iyi sonuç verir. Çok noktadan temaslı metal topraklama levhaları ise EMC açısından en iyi seçimdir. Topraklama iletken tipleri Şekil 7.56'da gösterilmiştir.

Uzun kablo:
Düşük frekans için iyi
Yüksek frekans için kötü



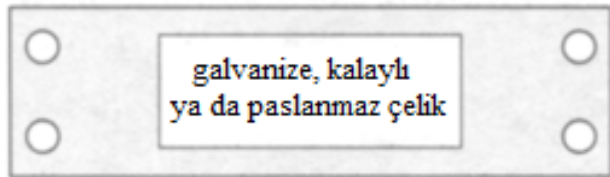
Minimum kablo
uzunluğu iyi



Kısa, geniş şerit
daha iyi



Çok noktadan temaslı
kısa, geniş metal levha
en iyi

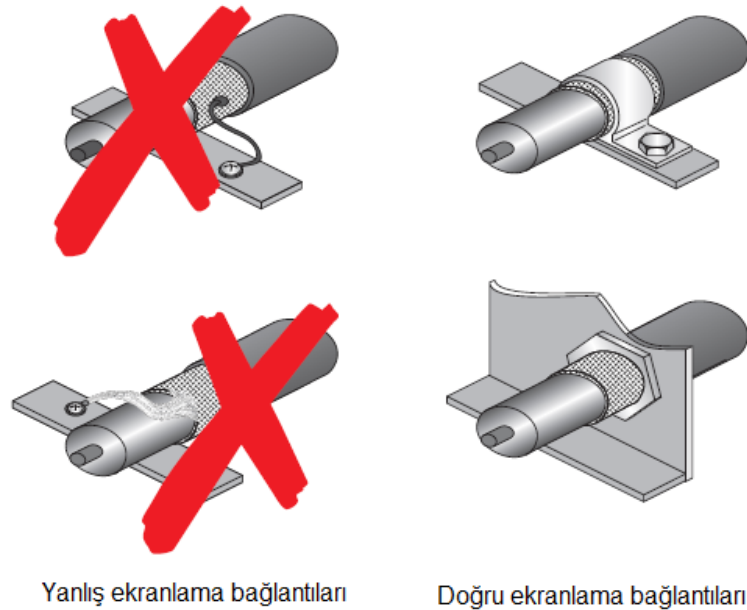


Şekil 7.56. Topraklama iletkeni tipleri

Kaynak: Williams and Armstrong, 2000:114

7.4.2. Konnektörler

Konnektörler, kablo iletkenlerini başka iletkenlere bağlayan elemanlardır. Elektromanyetik uyumluluk açısından çok önemlidirler. Girişimden etkilenmemek için ekranlı kablo kullanıldığında kablo ekranlarının muhakkak topraklanmaları gerekir. Bu noktada ekranlı kablolar için topraklı EMC konnektörleri kullanılır. Etkin ve kapsamlı bir EMI koruması için ekranlı kablolar her iki uçtan EMC'ye uygun topraklı konnektörler ile sonlandırılmalıdır. Ekranlı kabloların ekran kısımlarının harici bir tel vasıtası ile topraklanması koruma sağlamayacağı gibi yüksek frekanslı gürültü sebebiyle toprak iletkeninin de anten gibi davranarak emisyon oluşturmaya sebep olur. Bu yüzden kablo ekranının toprak iletkeni ile topraklanması veya kablo ekran örgüsünün topraklama iletkenine uzatılarak bağlanması yerine girişimin önlenmesine uygun iki yöntemden biri kullanılır. Kablo ekranını topraklama düzlemine bastıran ve 360° topraklanmasını mümkün kılan EMC kablo kelepçeleri kullanılmalı ya da kablo uçlarında topraklı EMC konnektörü kullanılarak topraklı mahfazaya 360° temasla sabitlenmelidir. Şekil 7.57'de kablo ekranlarının yanlış topraklanması ve kablo kelepçesi ile EMC konnektörü ile doğru topraklanması gösterilmiştir.

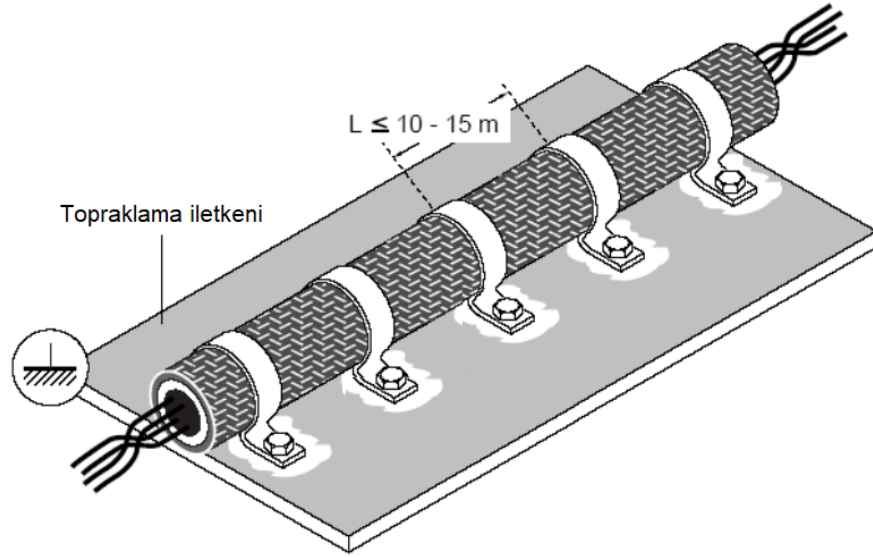


Şekil 7.57. Kablo ekranlarının topraklama bağlantıları

Kaynak: Sew Eurodrive, 2013:67

Elektromanyetik girişime hassas çok uzun kabloların bulunduğu sistemlerde kablo ekranını yalnızca kablonun her iki ucundan topraklamak yeterli olmayabilir. 10 metreden uzun kablolarda her 10 metrede bir kablo ekranının topraklanması gerekir.

Şekil 7.58'deki gibi birden çok yerden kablo ekranı metal kablo kelepçesi ile topraklanmalıdır.



Şekil 7.58. Uzun kabloların ekranlarının topraklanması

Kaynak: Beauvois, 2015:40

Ekranlı kabloların topraklanması için EMC kablo kelepçesi Şekil 7.59'da verilmiştir.



Şekil 7.59. Ekranlı kablo topraklaması için EMC kablo kelepçesi

Kaynak: <https://www.icotek.com/en-uk/mskl.>, Erişim tarihi: 25 Mart 2020

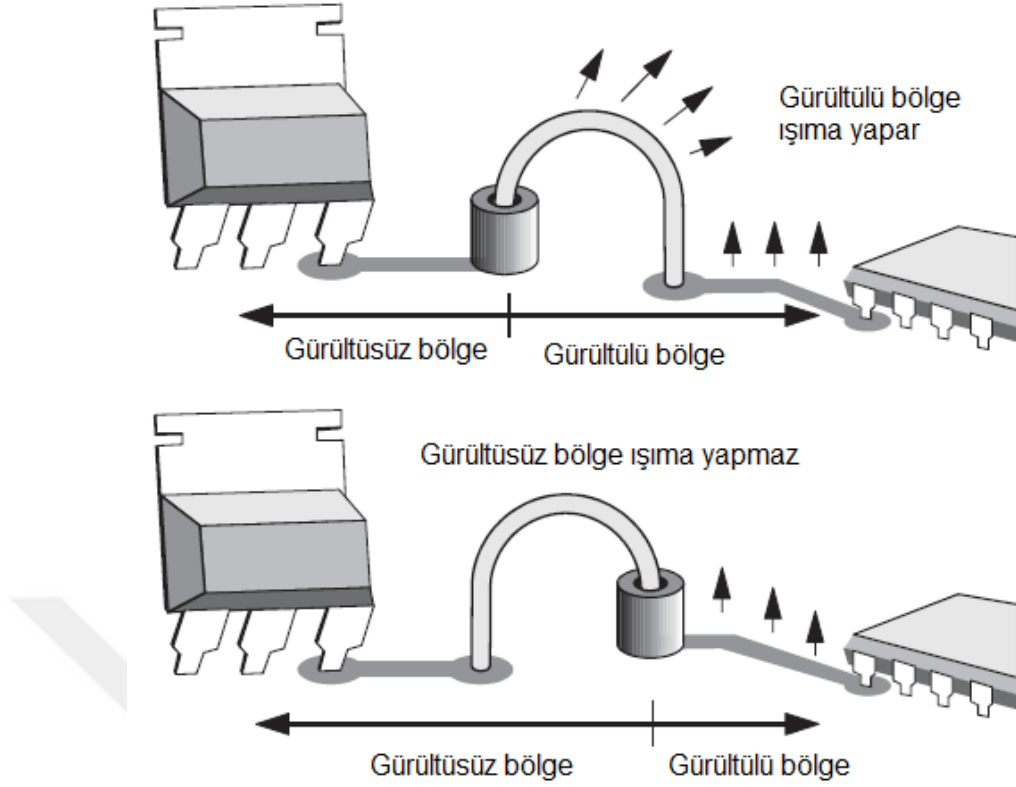
7.5. Baskı Devre Tasarımı

Elektromanyetik girişim problemlerinin önemli bir kısmı devre kartı düzeyinde gerçekleşmektedir. Cihaz ve sistemlerde ciddi EMI problemleriyle karşılaşılması için henüz dizayn aşamasındayken EMC kriterlerine uygun tasarlanmalıdır. Devre kartında EMC kriterlerine uymayan bir tasarım sonradan hem EMC probleminin kaynağının tespitini hem problemin çözümünü güçleştirmekte hem de çözüm maliyetini yükseltmektedir. Aynı zamanda tüm bu süreç zaman açısından da dezavantaj oluşturmaktadır.

Devre kartının EMI açısından yanlış tasarımı, ışıma ve iletim yolu olarak hem bağışıklık hem de emisyon problemlerine yol açabilir. PCB tüm EMI azaltma yöntemleri birlikte düşünülerek tasarlanmalıdır. Topraklama, kablolama, konnektör seçimi, empedans uyumu ve malzeme seçimi, filtreleme gibi teknikler PCB tasarlanırken ayrı tutulamaz.

Baskı devrelerde devre elemanları through-hole ya da SMD tipinde olurlar. Ancak yüksek frekans sebebiyle through-hole elemanların iletkin bacakları anten gibi davranır. Bu etki EMI problemi oluşturduğundan through-hole elemanlar yerine yüzeye monte edilen SMD devre elemanları kullanılmalıdır.

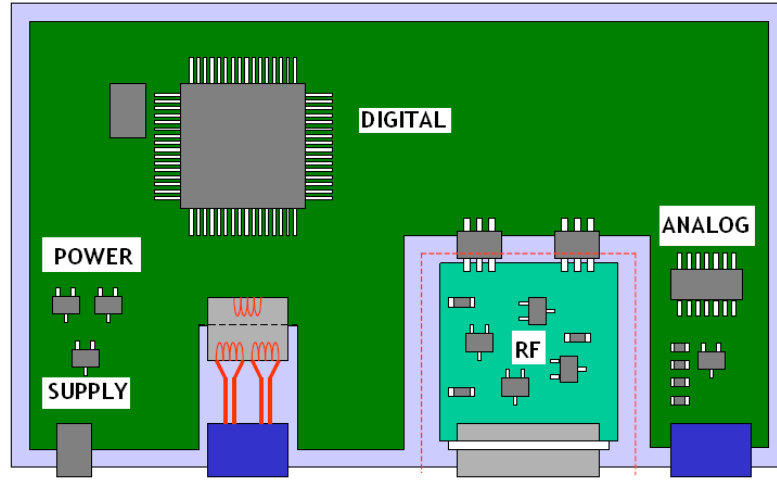
Devre üzerindeki tüm yolların sinyal karakteristikleri belirlenip bu yollara istenmeyen frekansların bastırılması için SMD ferrit filtre elemanları yerleştirilmelidir. Özellikle gürültülü devre elemanları, gürültü sinyalinin diğer devre elemanları ulaşmasını engellemek için filtre edilmelidirler. SMD ferritler gürültü yayan devre elemanlarının yollarına yerleştirilirken gürültüsüz elemanlara değil gürültülü elemana yakın yerleştirilmesi gerekir. Şekil 7.60'ta ferrit filtrenin doğru ve yanlış yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 7.60. Ferrit filtrenin gürültü kaynağına yerleşim uzaklığı

Kaynak: Texas Instruments, 1999

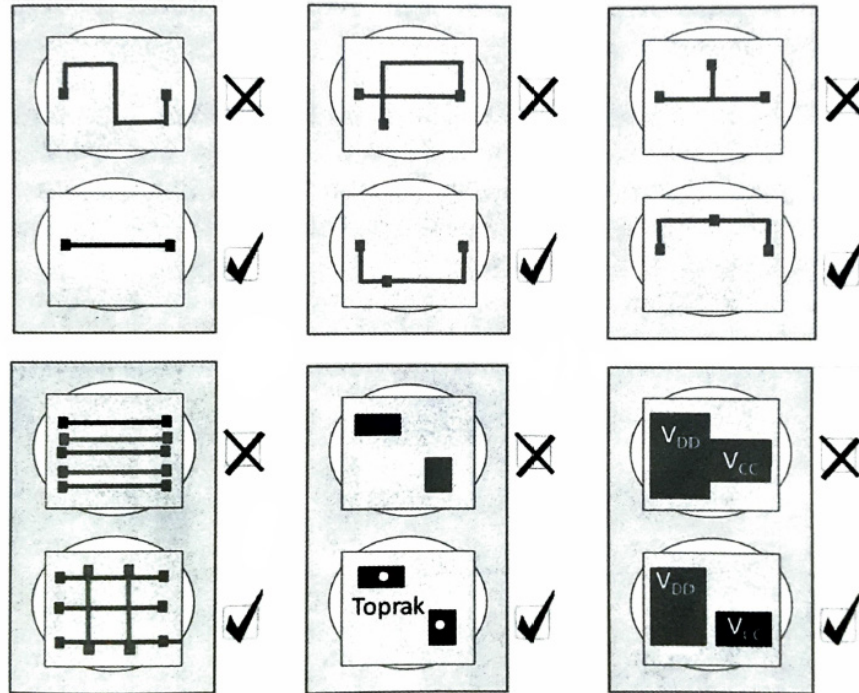
Devre kartı üzerinde elemanların yerleşimi yapılırken gruplandırma yapılarak bu gruplar özelliklerine göre kart üzerinde konumlandırılırlar. Gereksiz yüksek frekans kullanılmamalıdır. Yüksek frekansın kullanılacağı durumlarda yüksek frekanslı mantık devrelerinin bulunduğu bölüm devre çıkışına yakın yerleştirilmelidir. Yüksek frekanslı periyodik sinyaller EMC açısından büyük problem kaynağıdır. Bu yüzden giriş/çıkış portlarına yakın yerleştirilmelidirler. Devre kartı üzerinde giriş/çıkış portları kartın bir tarafında bulunmalıdır. Devre üzerinde diğer bölümler yerleştirilirken girişime hassasiyeti daha az olan gruplar EMI açısından agresif olan RF, sayısal ve güç tarafına yakın yerleştirilirken girişime yüksek hassasiyeti bulunan gruplar yüksek frekans bölgesinden uzağa yerleştirilmelidir. Bir PCB kartında devre elemanlarının yerleşim örneği Şekil 7.61’de gösterilmiştir.



Şekil 7.61. Örnek bir devre kartı yerleşim düzeni

Kaynak: Rangu, 2014:25

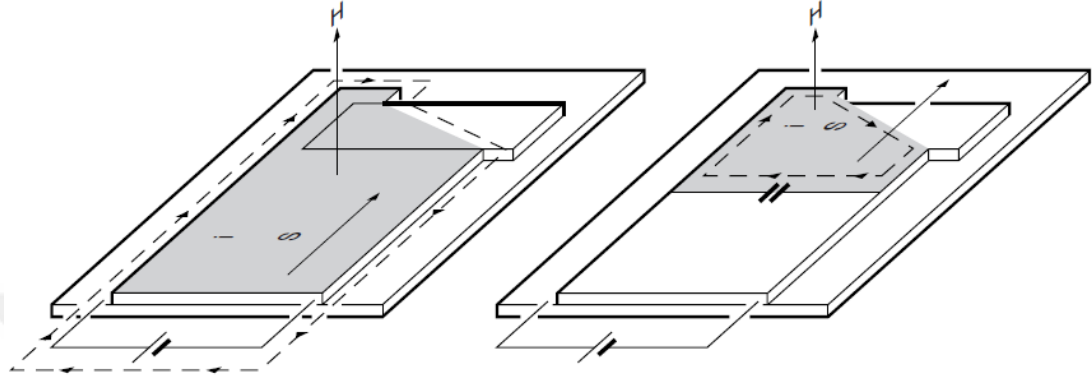
Devre kartının güç beslemesinde ortak mod ve farksal mod filtreler bulunmalıdır. Bağlantı yolları yüksek frekanslarda anten gibi davranacağından devre üzerindeki tüm yollar kısa tutulmalıdır. Keskin dönüşler kırınımı artırdığından 90° dönüş yerine iki adet 45°'lik dönüşler kullanılarak yuvarlatılmalıdır. Yüksek frekanslı hatların kapalı çevrim oluşturmamasına ve tüm çevrimlerin olabildiğince küçük tutulmasına özen gösterilmelidir. EMC açısından uygun olmayan sıkça baskı devrelerde görülen tasarım hatalarının uygun halleri Şekil 7.62'de verilmiştir.



Şekil 7.62. PCB tasarımında EMC açısından bazı yanlışlar ve doğruları

Kaynak: Sevgi, 2019:297

Baskı devre kartlarında döngü alanları dekuplaj kapasitörleri ile küçültmek manyetik alan emisyonunu azaltır ve aynı zamanda manyetik alana karşı bağışıklığın da artmasını sağlar. Bir devre kartındaki büyük bir döngü alanı ve sonrasında dekuplaj kapasitörü ile devre kartı üzerindeki bir döngü alanının küçültülmesi Şekil 7.63'te gösterilmiştir.



Şekil 7.63. Dekuplaj kapasitörü ile döngü alanının küçültülmesi

Kaynak: NXP Semiconductors, 2011:12

PCB tasarımında mümkünse çok katlı kartlar kullanılmalıdır. Toprak yüzeyi olarak kullanılan katlar arasında geçiş deliği kullanılarak yüzeyler arası geçiş sağlanmalıdır. Yollar arasında girişimin azaltılması için bir kattaki yollar diğer komşu katlara dik olmalıdır. Güç sinyali ve toprak hattı tek katlı kartlarda birbirine yakın ve paralel olmalıdır. Çok katlı kartlarda ise bir kattan güç sinyali giderken diğer kattan toprak hattı gitmelidir. Birbirine eşit ve zıt akımlar elektromanyetik girişimi azalttığından zıt sinyal hatları birbirine komşu olarak yerleştirilerek birbirlerinin manyetik alanlarını sönmlemesi sağlanmalıdır.

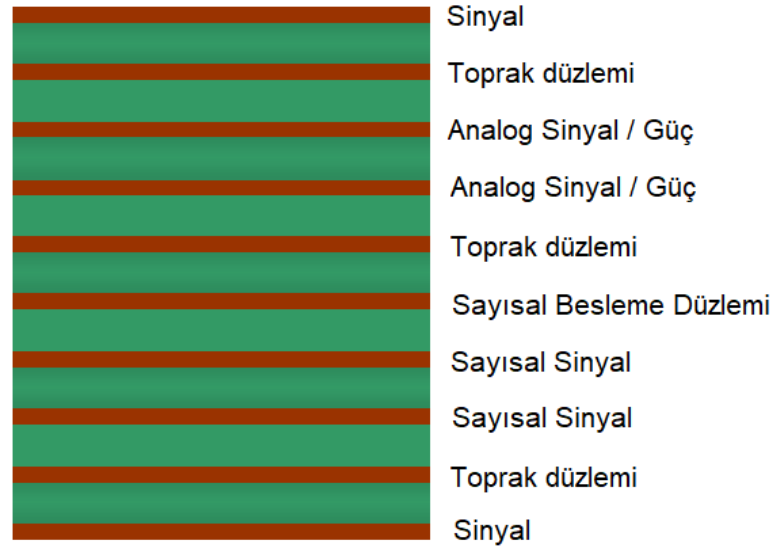
PCB tasarımında katman ve yüzey seçim kriterleri sayısal sinyal frekansına göre Çizelge 7.3'teki gibi yapılabilir.

Çizelge 7.3. Sinyal frekansına göre PCB katman ve yüzey seçimi

Kart Tipi	Sayısal Frekans	Sinyal Yükseliş/Düşüş	Uyarı
Tek katmanlı – Tek taraflı	< 5 MHz	> 6 ns	$10 \times F_{saat} = 1/(\pi \times T_{yükseleş})$
Tek katmanlı – Çift taraflı – İki tarafta yol	< 10 MHz	> 3 ns	Topraklamanın uygulanması
Tek katmanlı – Çift taraflı – Bir tarafta toprak düzlemi	< 20 MHz	> 1,5 ns	Toprak bağlantıları Entegre devreler
Tek katmanlı – Çift taraflı – Bir tarafta toprak düzlemi	< 30 MHz	> 1 ns	Topraklama düzleminde uzun oluklara izin verilmez
Çok katmanlı	-	-	-

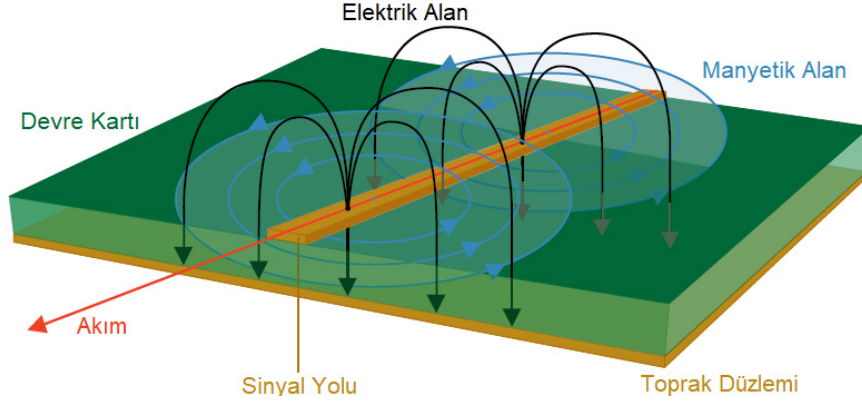
Kaynak: NXP Semiconductors, 2011:18

Çok katmanlı devre kartı tasarımında güç ve sinyal katmanları arasında toprak düzlemlerine yer verilir. 10 Katlı bir PCB’de örnek bir güç, sinyal ve toprak düzlemi katman yerleşimi Şekil 7.64’te verilmiştir.



Şekil 7.64. Örnek bir 10 katlı PCB katman düzeni

PCB tasarım aşamasında prototip kartların elektromanyetik girişim emisyon performansları EMI yakın alan problemler ve osiloskop ya da spektrum analizörü yardımıyla ölçülebilir. Elektrik alan ve manyetik alan problemlerini tarama frekanslarına göre PCB üzerinde gezdirilerek frekans düzleminde yüksek ışınım yapan kart bölgesi ya da bileşen tespit edilebilir. Sinyalleri oluşturan gerilim ve akımların değişmesi elektrik ve manyetik alanlara neden olur. PCB kart üzerindeki elektrik ve manyetik alan çizgileri Şekil 7.65’te gösterilmiştir.



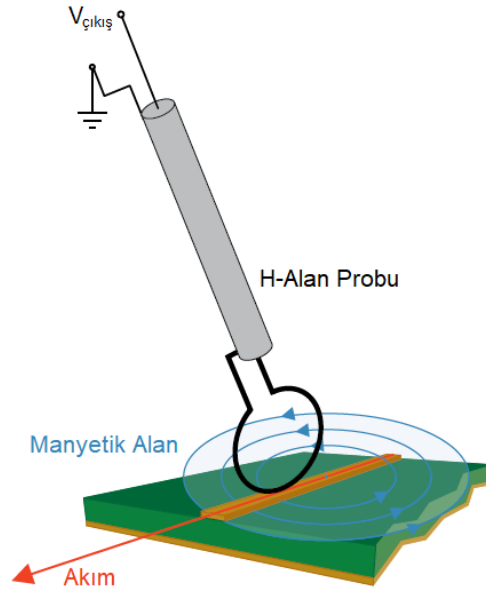
Şekil 7.65. Devre kartı üzerindeki elektrik ve manyetik alanlar

Kaynak: Tektronix, 2015:6

PCB'deki yüksek emisyon bölgelerinin belirlenmesinde manyetik alan problemleri kullanılırken manyetik alan çizgileri probun çemberinden geçecek şekilde taranır. Manyetik alan probu ile;

- Düşük empedanslı düğüm noktaları
- İletim hatları
- Güç kaynakları
- Sonlandırılmış iletkenler ve kablolar

tarafından ışıma yolu ile yayılan manyetik alan seviyeleri ve frekansları spektrum analizörü ya da osiloskop tarafından frekans düzleminde ölçülür. Manyetik alan probu ile PCB üzerindeki manyetik alan ölçümü Şekil 7.66'da gösterilmiştir.



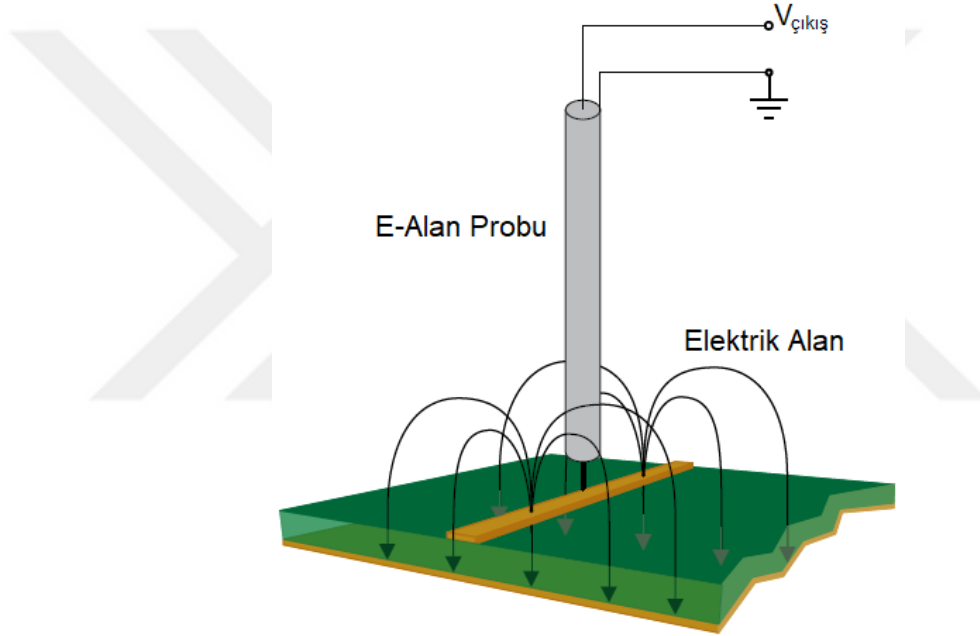
Şekil 7.66. Manyetik alan probu ile PCB emisyon ölçümü

Kaynak: Tektronix, 2015:7

Elektrik alan problemleri küçük monopollü antenler olarak çalışır ve elektrik alan ile voltaj değişimlerine yanıt verirler. Elektrik alan problemleri kullanılırken probun ölçüm düzlemine dik tutulması önemlidir. Elektrik alan problemleri ile;

- Yüksek empedanslı düğüm noktaları
- Sonlandırılmamış sinyal yolları
- Kablolar

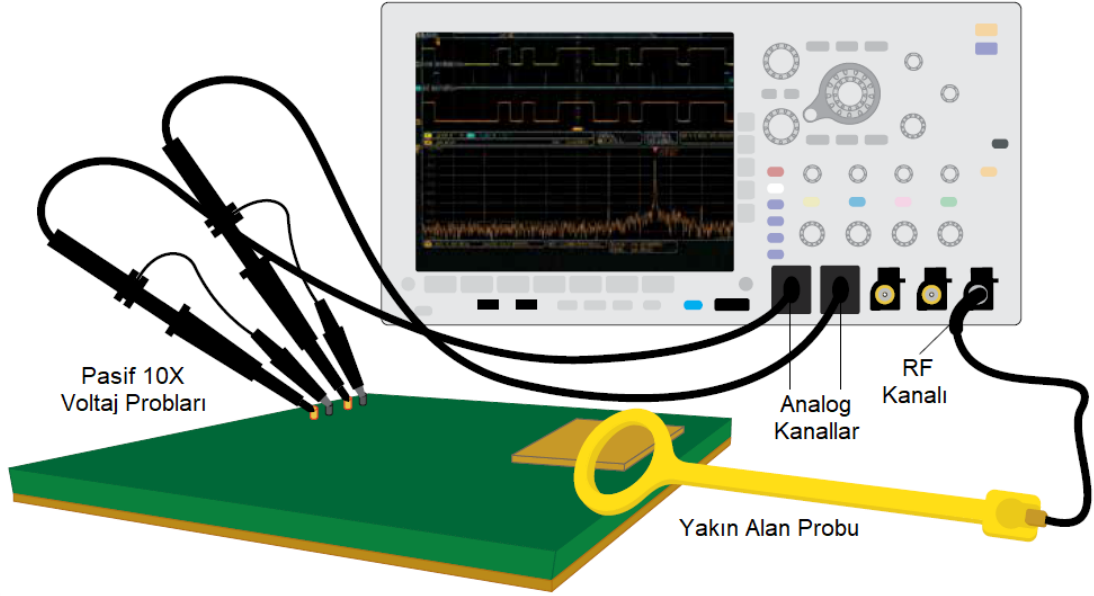
tarafından ışınım yolu ile yayılan elektrik alan seviyeleri ve frekansları spektrum analizörü ya da osiloskop tarafından frekans düzleminde ölçülür. Elektrik alan probu ile PCB üzerindeki elektrik alan ölçümü Şekil 7.67’de gösterilmiştir.



Şekil 7.67. Elektrik alan probu ile PCB emisyon ölçümü

Kaynak: Tektronix, 2015:7

Devre kartı üzerindeki ışınım yollu emisyonların yakın alan problemleri ile, iletim yollu emisyonların ise voltaj problemleri ile ölçülmesi tasarım aşamasındaki ön testlerdir. Bu yöntemler tam uyumluluk testlerinde kullanılan ölçüm ve belgelendirme metodları değildirler. PCB tasarım aşamasında tespit amaçlı yapılan bu ön ölçümler girişim kaynağının yerini belirlemek içindir. Pasif voltaj problemleri ve yakın alan problemleri ile PCB kartı üzerindeki emisyon ölçümlerinin yapılması için osiloskop/spektrum analizörü bağlantısı Şekil 7.68’de gösterilmiştir.



Şekil 7.68. Yakın alan ve voltaj prob bağlantıları

Kaynak: Tektronix, 2015:9

7.6. Empedans Uyumlandırma

Elektromanyetik uyumluluğun sağlanmasında en önemli konulardan biri de empedans uyumluluğudur. Empedans uyumluluğu bir cihazda kablolamadan PCB'ye kadar dikkat edilmesi gereken bir konudur.

Elektrik akımı kablo içinde olsun, sistemler arası iletimde olsun, PCB üzerindeki yollarda olsun geçtiği tüm iletkenlerde karşılaştığı empedans farklılığında yansıma yapar. Bu yansıma, güç kaybına ve sinyal/gürültü oranının düşmesine sebep olurken hem de ışınlamaya yol açar. Tüm bu olumsuzlukların önüne geçilmesi kaynak, iletim hattı ve yük empedansları uyumlandırılarak empedans sürekliliğinin sağlanmasıyla mümkün olur. Tasarım aşamasında genelde empedans uyumluluğunun sağlanması için Smith abağı kullanılır.

Elektronik cihazlarda kaynak ile yük arasında konulan EMI filtreleri için dört empedans vardır. Bunlar şebeke tarafındaki ortak mod ve farksal mod empedansları ile cihaz tarafındaki ortak mod ve farksal mod empedanslarıdır. EMI filtrelerinin gürültü zayıflatma grafikleri kaynak ve yük empedansları için bir RF standardı olarak kabul edilen 50Ω değeri için verilmektedir. Oysaki zamana ve frekansa göre değişen empedans değerleri kaynak ve yük empedansları için 1Ω 'dan $2 \text{ k}\Omega$ 'lara kadar geniş bir aralıkta değişkenlik gösterebilir. EMI filtrenin giriş-çıkış $50/50 \Omega$ değerlerine göre

verilen gürültü zayıflatma grafikleri bu gerçek değerler için büyük farklılıklar göstermektedir. Hatta bazı filtreler gürültüyü zayıflatmak yerine tam tersi gürültüyü kuvvetlendirebilir. Bunun için farklı kaynak ve yük empedansları için de zayıflatma grafikleri veya değerleri sunan üreticilerin tercih edilmesi yarar sağlar. Ayrıca 50/50 Ω kaynak-yük empedansı RF standardına uygun olmayan cihazların filtre ile EMI korumasında bir aşamalı yerine birden çok aşamalı filtreler kullanılması çok iyi performans sağlamaktadır. Ancak birden çok aşamalı EMI filtreleri hem büyüklük hem de maliyet açısından dezavantaja sahiptir.

7.7. Elektronik Malzeme Seçimi

Elektromanyetik uyumlu olması istenilen bir elektronik sistem tasarlanırken bu sistemin bileşenlerinin ve malzemelerinin EMC uygunluklarına bakılması önemlidir.

Bir sistemin bileşenlerinden bir kısmı hazır kullanılacaksa bu bileşenin EMC yeterliliklerini sağladığını gösteren EMC test raporları üreticiden istenerek test/ölçüm sonuçlarından bu yeterliliklerin seviyeleri incelenebilir. Örneğin medikal cihaz üretilecekse ve cihaz içinde AC/DC güç kaynağı üretilmek yerine dışarıdan hazır alınıp kullanılacaksa bu güç kaynağının hangi standartlara sahip olduğu ve tüm EMC test raporları istenerek bu bileşenin EMC performansı diğer muadil ürünler ile karşılaştırılabilir ve daha uygun olan seçilebilir. Aynı şekilde elektronik malzemelerinde ürün aileleri içerisinde EMC açısından özel üretilenleri bulunabilir. Yine bunların seçilmesi tüm sistemin elektromanyetik uyumluluğunun oluşturulmasını çok daha kolaylaştırır.

Bir sistemin EMC için üretilen malzemelerden ve elektromanyetik uyumluluğa sahip olan hatta EMC performansları yüksek olan bileşenlerden oluşması elektromanyetik uyumluluk testlerinden geçeceğini garanti etmez. Tasarım aşamasında bileşen ve malzemelerin doğru seçimi sadece sistem olarak elektromanyetik uyumluluğu yakalamayı kolaylaştırmış olur.

8. EMC PROBLEM GİDERME UYGULAMASI

Bu bölümde anahtarlamalı güç kaynağı içeren bir trafik sinyal lambasının iletim yollu emisyon testleri gerçekleştirilecek, EMC probleminin belirlenmesi, yorumlanması ve probleme uygun çözümün uygulanması sonrasında test tekrarı yapılarak iyileştirmenin sonuçları ortaya konulacaktır.

8.1. Test Edilecek Ürün ve Ürün Standardı

Trafik sinyal lambaları, kavşaklarda görsel olarak geçiş ve durma ikazı vererek araç ve yaya geçişini düzenleyen işaret sistemleridir. Trafik sinyal denetleyicisi ya da kavşak kontrol cihazı adı verilen sistemlere bağlanarak enerjilendirilmesi ve kontrolü sağlanır. Dünyada farklı gerilim değerlerinde AC veya DC akımlarla çalışan türleri olsa da çoğunlukla 230 VAC şebeke geriliminde çalışırlar. Bir trafik sinyal lambası ve bileşenlerinden biri olan trafik sinyal modülü Şekil 9.1’de gösterilmiştir.



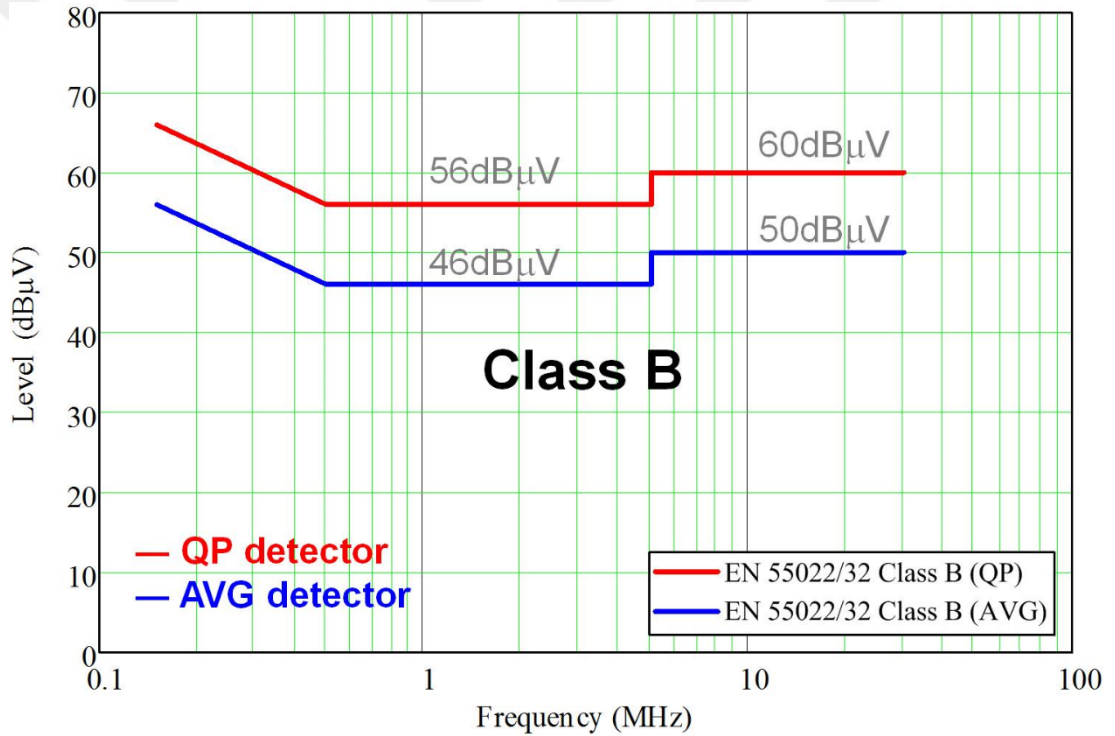
Trafik Sinyal Lambası



Trafik Sinyal Modülü

Şekil 8.1. Trafik sinyal lamba ve modülü

EMC testlerinden iletim yollu emisyon ölçümünün gerçekleştirileceği ürün, 200 mm çapında kırmızı LED trafik sinyal modülü olacaktır. Trafik sinyal lambalarının tabi oldukları standart, TS EN12368:2015 Trafik kontrol donanımları – Sinyal lambaları standardıdır. Bu standartta ürünün elektromanyetik uyumluluk testleri için TS EN50293 Elektromanyetik uyumluluk – Yol trafik işaret sistemleri ürün standardına atıf yapılmaktadır. Buna göre EMC testleri TS EN50293:2013 standardına göre yapılacaktır. Buna göre RF iletim yollu emisyon deneyi için ölçüm limitlerinin EN55022 standardında B sınıfına göre olacağı belirtilmiştir. EN55022 Bilgi teknolojisi cihazı - Radyo bozulma karakteristikleri - Ölçme sınır değerleri ve yöntemleri standardına göre B sınıfı ürünlerin emisyon limitleri Şekil 8.2’de verilmiştir.

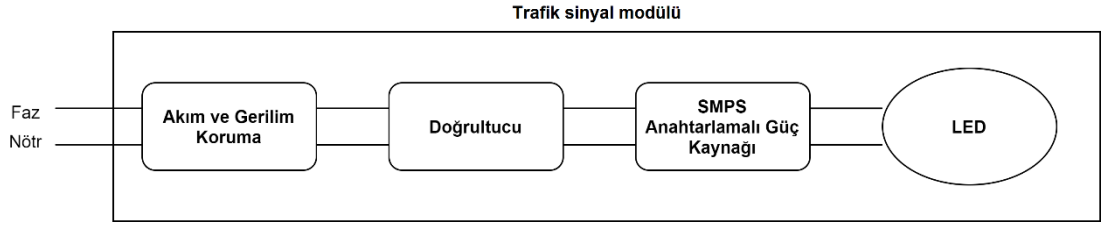


Şekil 8.2. EN55022 B sınıfı emisyon limitleri

Kaynak: https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/archive/2018/06/28/a-review-of-emi-standards-part-1-conducted-emissions., Erişim tarihi: 17 Mayıs 2020

İletim yollu emisyon ölçüm deneyi ile test edilecek cihaz 200 mm çapında kırmızı LED trafik sinyal modül devresinde girişte yüksek akıma karşı 1 A cam sigorta, yüksek gerilime karşı paralel bağlı 275 VAC varistör ve seri bağlı 2,5 A cam sigorta, deşarj direnci olarak 330 k Ω 250 mW direnç bulunmaktadır. Bu koruma bloğundan sonra doğrultma devresi, anahtarlamalı güç kaynağı devresi gelmektedir. LED’ler için uygun gerilim dönüşümü yapıldıktan sonra enerji DC olarak LED dizgi

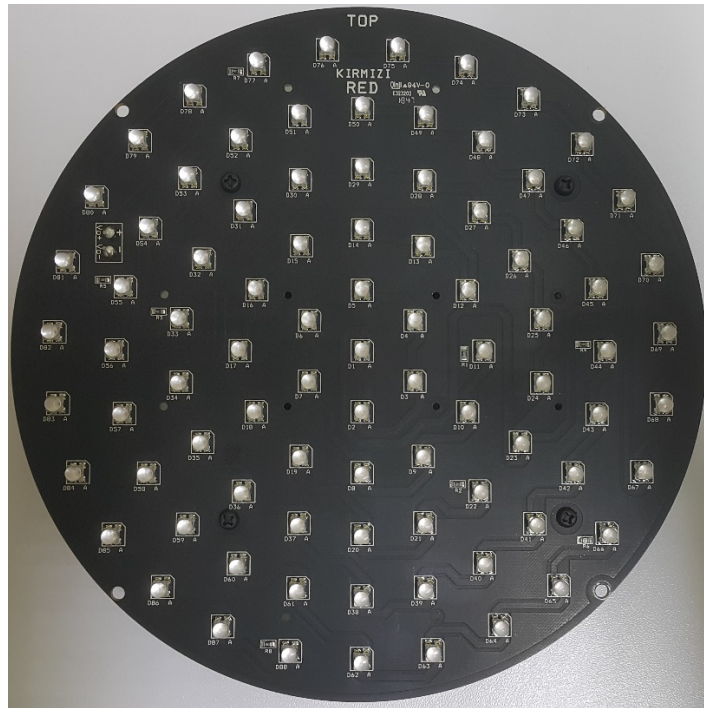
kartına aktarılarak LED'ler sürülmektedir. Trafik sinyal modülüne ait devre blok diyagramı Şekil 8.3'te verilmiştir.



Şekil 8.3. Trafik sinyal modülü devre blok diyagramı

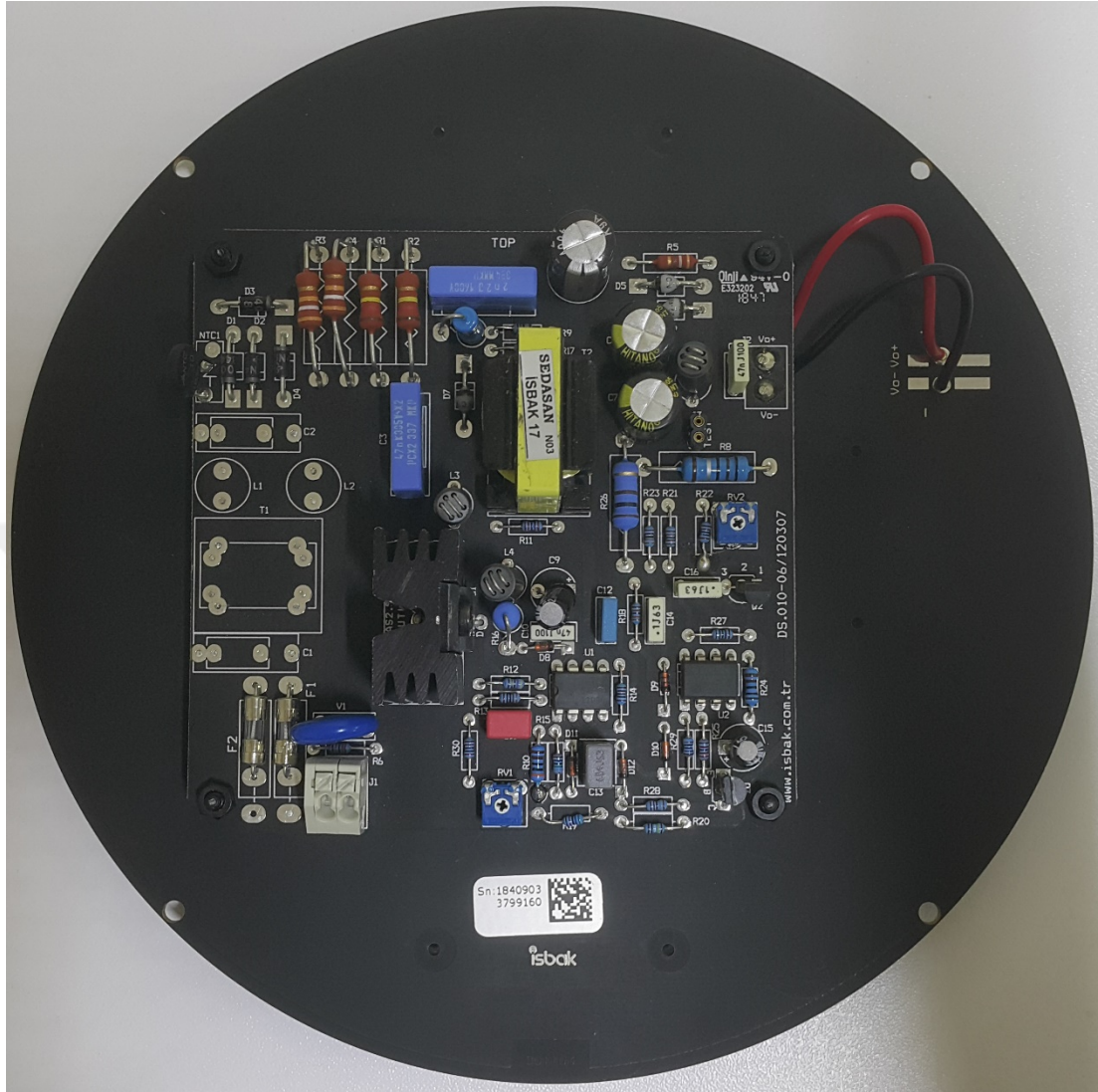
8.2. İletim Yolu Emisyon Ölçüm Deneyi

İletim yolu emisyon ölçüm deneyi yapılacak 200mm çaplı kırmızı LED trafik sinyal modülü içerisinde anahtarlama güç kaynağı (SMPS) bulundurmaktadır. Anahtarlama güç kaynakları, EMC açısından oldukça problemlilik elektronik yapılarıdır. Yüksek frekanslı anahtarlama işaretleri sebebiyle devre içerisinde güçlü gürültü sinyalleri ve bunların harmonikleri oluşmaktadır. Bu yüzden test edilecek trafik sinyal modülünün SMPS devre kartı tasarlanırken devre besleme girişinde EMI filtre devresi ve bileşenleri için tasarımda yer ayrılmıştır ve EMI filtre katı kısa devre edilerek bypass edilmiştir. Trafik sinyal modülü LED devre kartına ait görsel Şekil 8.4'te verilmiştir.



Şekil 8.4. LED devre kartı

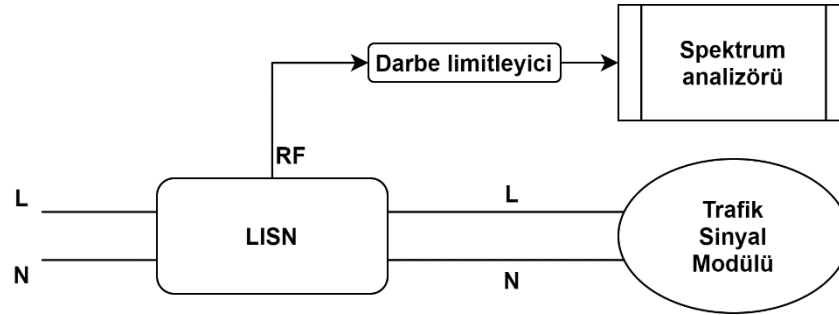
Trafik sinyal modülü SMPS devre kartına ait görsel Şekil 8.5'te verilmiştir.



Şekil 8.5. SMPS devre kartı

İletim yollu emisyon ölçüm deneyi için standarda uygun topraklama zemini üzerindeki yalıtkan test masası üzerine test edilecek cihaz yerleştirilmiştir. Test edilen cihaz enerji beslemesini LISN çıkışından alır. LISN ise şebekeye bağlıdır ve test edilen cihazın ürettiği gürültüyü şebekeye vermeden RF çıkışı üzerinden spektrum analizörüne ölçüm için aktarır. Ekranlı kablo ile aktarılacak emisyon gürültüsü darbe limitleyici (pulse limiter) üzerinden spektrum analizöre giriş yapar. Darbe limitleyici spektrum analizörün zarar görebileceği kadar yüksek genlikteki işaretleri bastıran bir sinyal zayıflatıcıdır. Darbe limitleyici parametreleri spektrum analizörüne tanımlanmıştır. Test edilen cihazın kablosu toprak zeminden en az 10 cm yüksekte olmalıdır. Bu yüzden kablonun toprak zemine yaklaşmasını engellemek için 10 cm

yüksekliğinde tahta sehpa kullanılmaktadır. Deney düzeni diyagramı Şekil 8.6'da, deney düzeni görseli Şekil 8.7'de verilmiştir.



Şekil 8.6. Deney düzeni diyagramı



Şekil 8.7. Deney düzeni

Deney sırasında kullanılan test cihazlarının listesi Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Test cihazları listesi

Cihaz	Marka	Model
30 GHz Spektrum Analizör	Rohde&Schwarz	R&S FSP 30 1093.4495.30
9 kHz-30 MHz LISN	Schwarzbeck Mess	NSLK 8127
10 dB Darbe Limitleyici	Rohde&Schwarz	ESH3-Z2

Test sonuçlarının doğruluğu için elektriksel kararlılık oluşması amacıyla trafik sinyal modülünden ölçümler alınmadan önce 30 dakika boyunca ölçüm alınmadan enerji verilerek çalıştırılmıştır. Deney sırasında 25,8°C ortam sıcaklığı ve %47 nem

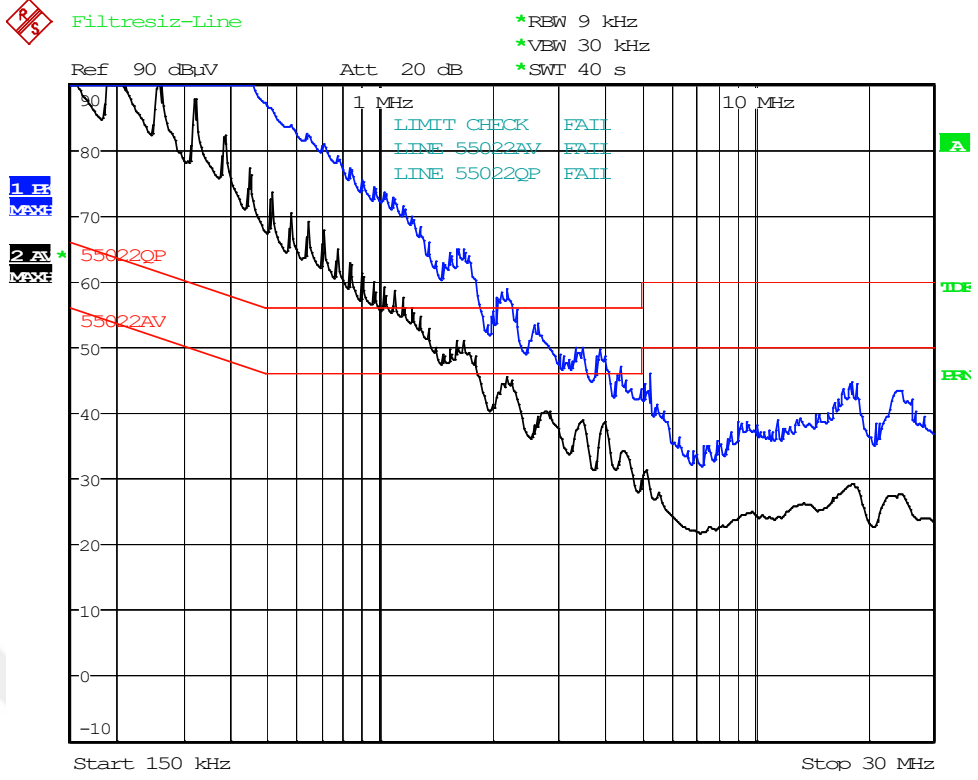
ölçülmüştür. Ortam koşullarına ait sıcaklık ve nem değerleri Şekil 8.8’de gösterilmiştir.



Şekil 8.8. Deney ortam koşulları

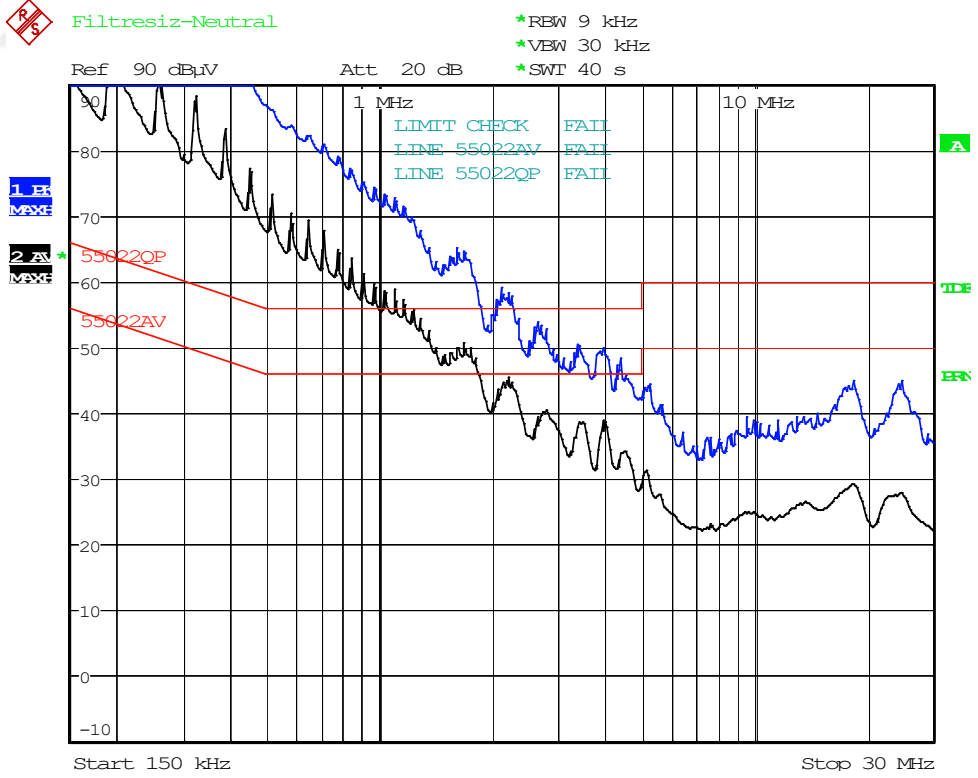
EN55022 standardında B sınıfı ürün emisyon limitleri spektrum analizöründe tanımlanmıştır. Deneyde AV limitleri spektrum analizöründe AV dedektörü ile ölçülür. Ancak QP limitleri için QP dedektörü yerine gürültü işaretlerinin daha olumsuz değerlere sahip olan tepe noktalarını baz alan PK dedektörü ile ölçüm alınabilir. Bunun nedeni QP dedektör ile tarama almanın uzun sürmesidir. Bunun yerine çok daha hızlı bir şekilde PK dedektörü ile alınan sonuçlar kıyas edilir. PK dedektörü ile tarama alınarak başarılı sonuç alan bir cihaz QP dedektörü ile tarama alındığında daha başarılı sonuçlar verir.

Fazdan alınan tepe (PK) ve ortalama (AV) ölçüm sonucu grafiği Şekil 8.9’da, nötrden alınan tepe ve ortalama ölçüm sonucu grafiği Şekil 8.10’da verilmiştir.



Date: 20.MAY.2020 14:23:27

Şekil 8.9. İlk ölçüm faz



Date: 20.MAY.2020 14:25:41

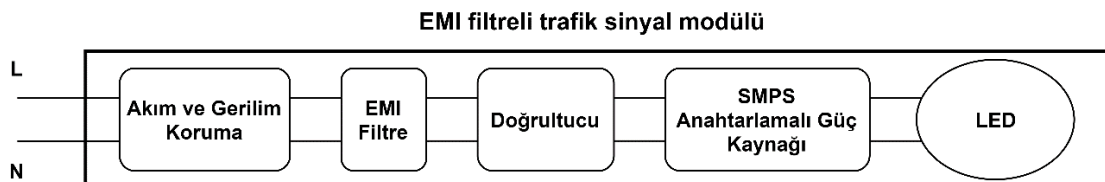
Şekil 8.10. İlk ölçüm nötr

Mavi çizgi gürültü işaretinin o frekanstaki tepe değerini, siyah çizgi ise gürültü işaretinin o frekanstaki ortalama değerini göstermektedir. Tepe değerleri için üstteki kırmızı QP limit çizgisi, ortalama değerleri için alttaki kırmızı AV limit çizgisi referans alınır. Buna göre PK ve AV ölçüm değerleri kendi limitlerini birçok frekans noktasında büyük farkla aşmıştır. Bu şekliyle spektrum analizör ekranında da görüldüğü üzere deneyden başarısız (FAIL) sonuç alınmıştır.

8.3. EMC İyileştirmesi İçin EMI Filtre Tasarımı

EN50293 standardına göre EN55022 standardının emisyon limitleri esas alınarak deney yapılmış ve sonuç olarak limitler fazlasıyla aşılarak ürün, iletim yollu emisyon testinden başarısız olmuştur. Sonuçlar yorumlanarak bir EMI filtre tasarımı gerçekleştirilecektir. Bir EMC probleminin çözülmesinde ya girişim kaynağı tespit edilerek kaynağın girişim oluşturması engellenir ya da girişimin aktarıldığı kuplaj yolu zayıflatılarak problem ortadan kaldırılmaya çalışılır. Girişim kaynağının tespit edilmesi zordur ancak tespit edilirse problem ortadan kaldırılması kolaydır. Ancak bu yöntem ile çoğu zaman tasarımsal değişiklik yapılır. Anahtarlamalı güç kaynaklarının çalışma frekansları şebeke frekansından çok daha yüksek olduğundan emisyon seviyeleri girişim kaynaklarının yok edilmesi yerine kuplaj yolunun zayıflatılması ile düşürülür. SMPS içeren bir cihazın girişine EMI filtre tasarlanarak uygulanması kuplaj yolunu zayıflatacaktır. Girişim kaynağının yok edilmesi yerine kuplaj yolunun zayıflatılması yöntemi kullanılacağından test edilecek cihazın devre şemasının bilinmesine gerek bulunmamaktadır. Filtre tasarımında komponentlerin seçimi için cihazın akım değerinin ölçülmesi yeterlidir.

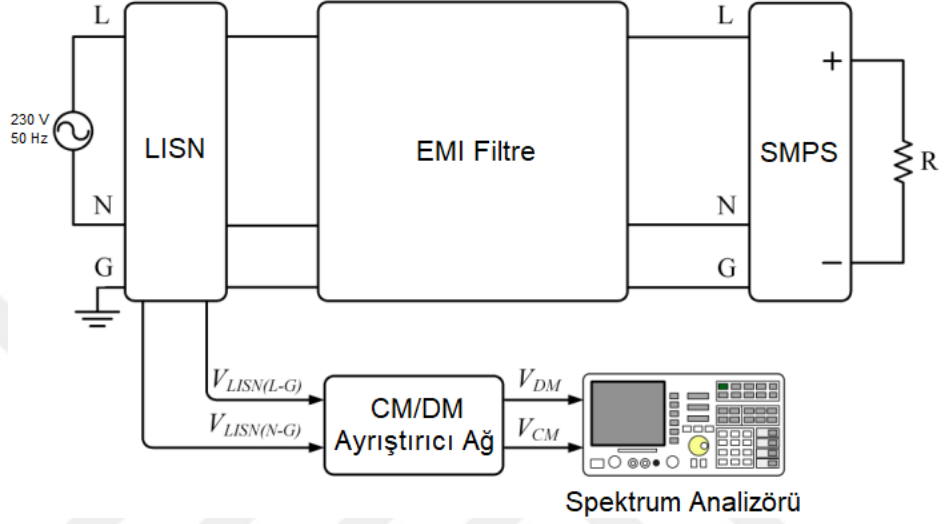
EMI filtre tasarımı sonrasında trafik sinyal modülüne ait devre blok diyagramı Şekil 8.11'deki gibi olacaktır.



Şekil 8.11. EMI filtreli trafik sinyal modülü devre blok diyagramı

EMI filtre tasarımında hedeflenen zayıflatmayı daha yüksek bir doğrulukla elde edebilmek için LISN çıkışı sonrasında emisyon gürültüsünü ortak mod ve farksal

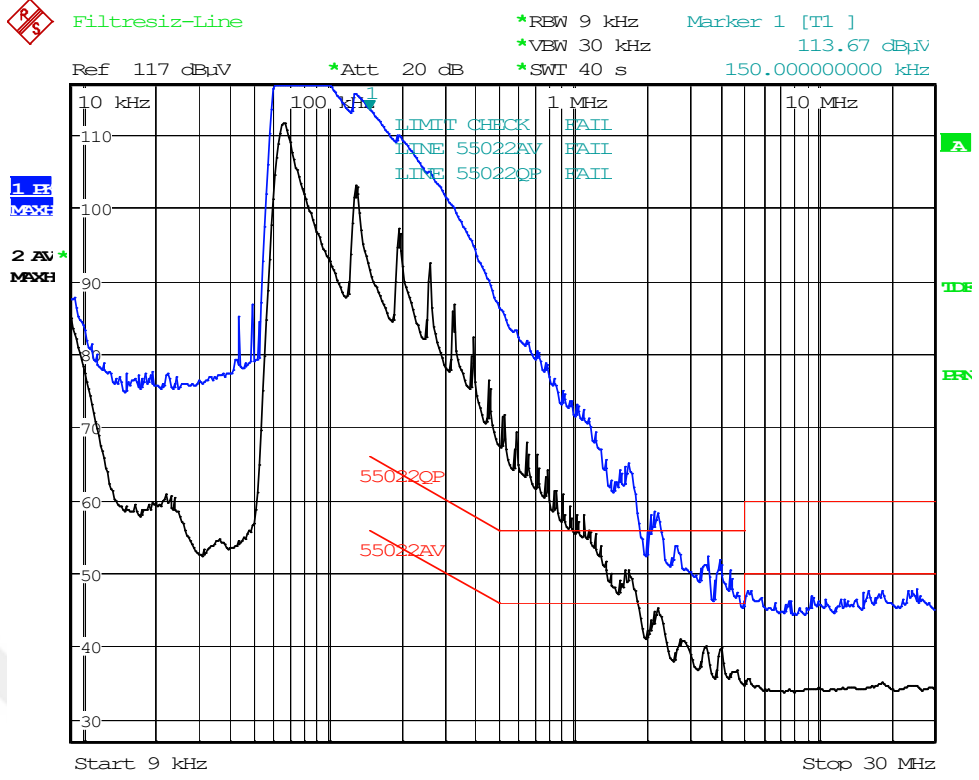
mod olarak ayıran gürültü ayırıcı cihaz kullanılmaktadır. LISN çıkışında gürültüyü ortak mod ve farksal mod bileşenlerine ayrılmasıyla spektrum analizöründe ortak mod ve farksal mod gürültüler ayrı ayrı gözlemlenebilir. Ancak gürültü ayırıcı olmadan da bazı öngörüler ile filtre tasarımı gerçekleştirilebilir. Ortak mod ve farksal mod gürültülerin seviyelerinin tespiti için gürültü ayırıcı kullanılarak gerçekleştirilen deneyde bağlantılar Şekil 8.12'deki gibidir.



Şekil 8.12. Gürültü ayırıcı bağlantısı

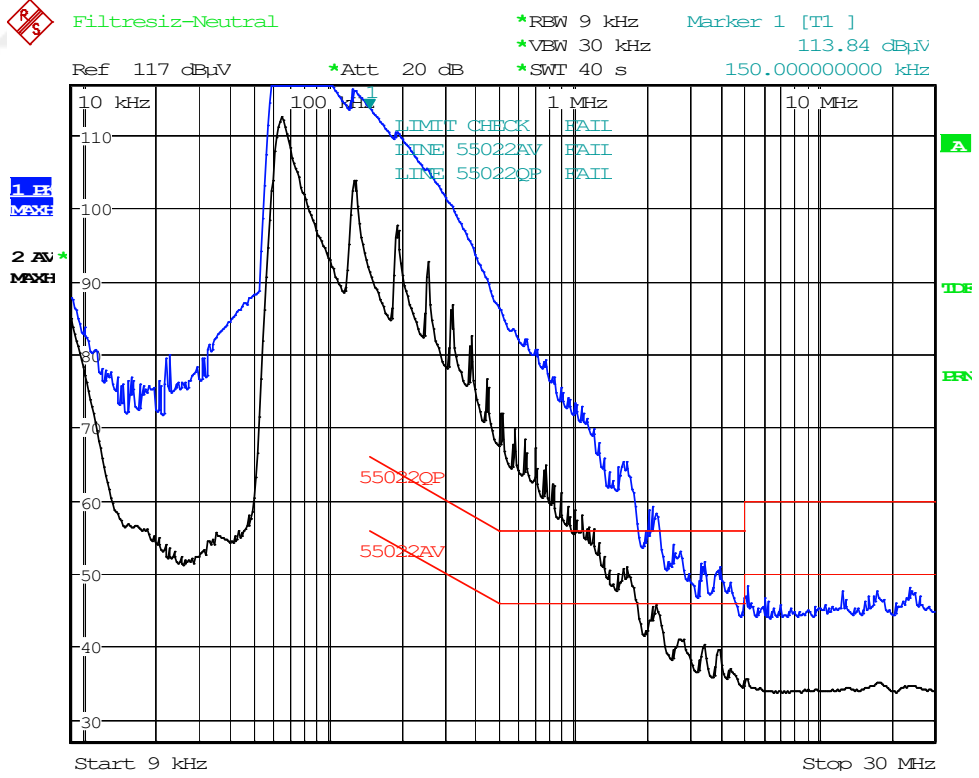
Kaynak: Tarateeraseth, 2012:12

Filtre tasarımı öncesinde 150 kHz – 30 MHz arasında yapılan taramayı 9 kHz – 30 Mhz olarak daha geniş bir frekans aralığında tekrarlırsak ölçüm sonuçları faz için Şekil 8.13, nötr için Şekil 8.14'teki gibi olur.



Date: 20.MAY.2020 14:53:17

Şekil 8.13. 9 kHz – 30 MHz faz ölçüm tekrarı



Date: 20.MAY.2020 14:58:25

Şekil 8.14. 9 kHz – 30 MHz nötr ölçüm tekrarı

Bir iletim yollu emisyon taramasında gürültü için tepe değeri, tepe gibi değerinden büyük veya eşittir. Tepe gibi değeri ortalama değerinden büyük veya eşittir. Buna göre $PK \geq QP \geq AV$ olur. Gürültünün tepe değeri en büyük değeri ifade ettiğinden ölçüm sonuçları içerisinde 150 kHz – 30 MHz aralığında PK değerinin en yüksek olduğu frekans tespit edilir. Faz ve nötr terminaleri için test ölçüm frekans aralığındaki değerler Çizelge 8.2’deki gibidir.

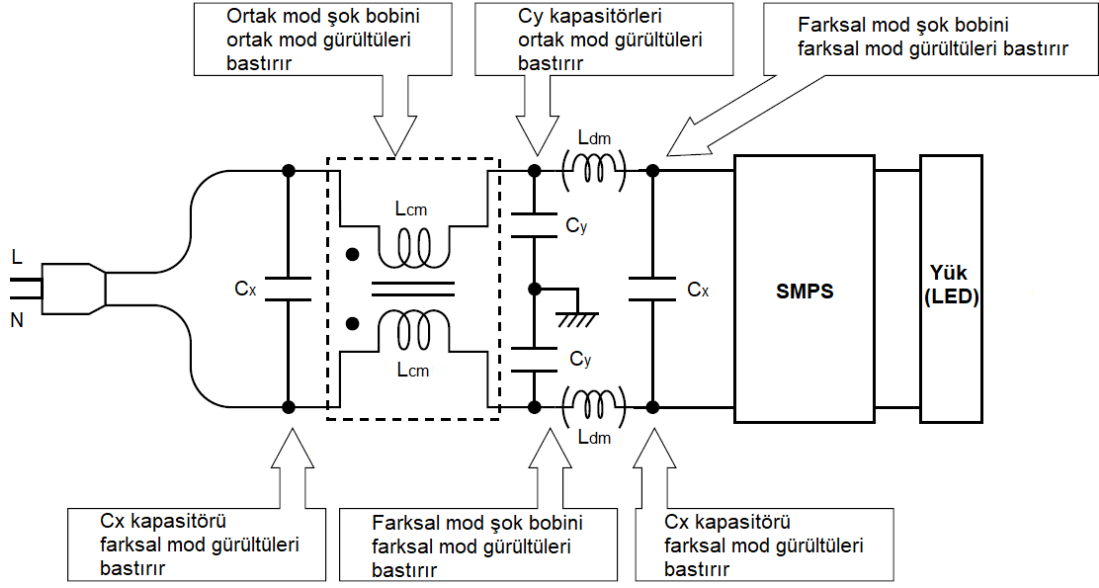
Çizelge 8.2. Faz ve Nötr için en yüksek PK değerleri ve frekansları

Ölçülen terminal [PK]	Frekans [Hz]	Gürültü genliği [dB μ V]
Faz	150,0 kHz	113,67 dB μ V
Nötr	150,0 kHz	113,84 dB μ V

PK ölçüm sonuçlarına göre 150 kHz frekansı gürültünün en yüksek değeri aldığı frekanstır. Faz ve nötr içinden nötr terminalinde gürültü daha yüksek değerli ölçülmüştür. Buna göre gürültünün en yüksek değeri aldığı 150 kHz frekansı 113,84 dB μ V \cong 114 dB μ V elektrik alan gürültü genliği referans alınarak EMI filtre tasarımı gerçekleştirilecektir.

Ölçümler ortak mod ve farksal mod gürültülerin toplamını vermektedir. Filtre tasarımında ortak mod ve farksal mod gürültü değerleri ayrı ayrı ele alınarak tasarım gerçekleştirilir. Ortak mod ve farksal mod gürültünün ayırt edilebilmesi için gürültü ayırıcı cihaz kullanılabilir. Ancak EMC ekipmanları genelde çok pahalı olduklarından bazı öngörüler yardımıyla tasarım gerçekleştirilebilir ve tasarımın doğruluğu denenebilir.

Ortak mod ve farksal mod gürültüleri zayıflatan tipik bir EMI şebeke filtresi tasarımında ortak mod akımları zayıflatmak için ortak mod şok bobini ve C_Y kapasitörleri, farksal mod akımları zayıflatmak için diferansiyel mod bobinler ve C_X kapasitörleri kullanılır. Tipik bir EMI şebeke filtresi devresi Şekil 8.15’te verilmiştir.



Şekil 8.15. Tipik EMI şebeke filtre devresi

C_Y kapasitörleri yüksek frekansları filtrelerken ortak mod akımları toprağa aktarırlar. Bu nedenle toprak hattı bulunması gerekir. Deneye tabi tutulan trafik sinyal modülünde ise toprak hattı bulunmadığından C_Y kapasitörleri kullanılmayacaktır. Ortak mod akımlarının azaltılmasında sadece ortak mod şok bobini kullanılacaktır. 1 MHz'in üzerindeki frekanslarda ortak mod gürültüsü baskınken 1 MHz'in altındaki frekanslarda farksal mod gürültü baskındır (Hofer, 2012). Buna göre emisyon gürültüsünün PK taraması incelendiğinde gürültünün 1 MHz'den düşük frekanslarda yoğun şekilde baskın olduğu, 2 MHz'den sonra limitlerin altına indiği görülmektedir. Buna sebepten gürültü genliğinin çok büyük bir bölümünün farksal mod gürültü bileşeninden oluştuğu söylenebilir. Öyleyse tasarlanacak olan EMI filtrede farksal mod gürültü bastırma bölgesinin EMC probleminin ortadan kaldırılmasında daha belirleyici olduğu söylenebilir.

114 dB μ V ile limitten en uzak nokta olan 150 kHz frekansı filtrenin tasarımına girdi oluşturacaktır. EN55022 standardında B sınıfı ürünler için QP limit değeri 150 kHz için 66 dB μ V'tur. Tasarımda gürültü değerinin keyfi olarak seçilen 4 dB μ V kadar limit değerinin aşağısına çekmek hedeflenecektir. Buna göre ihtiyaç duyulan zayıflatma değeri,

$$A_{\text{zayıflatma}} [\text{dB}\mu\text{V}] = A_{\text{ölçülen}} [\text{dB}\mu\text{V}] - L_{\text{QP}} [\text{dB}\mu\text{V}] + m [\text{dB}\mu\text{V}] \quad (8.1a)$$

eşitliği ile bulunur. $A_{ölçülen}$ 150 kHz frekansında ölçülen 114 dB μ V değerini, L_{QP} 150 kHz için QP limiti olan 66 dB μ V değerini, m ise limit değerinden uzaklaşma marjı olan 4 dB μ V değerini temsil etmek üzere,

$$A_{zayıflama} [dB\mu V] = 114 dB\mu V - 66 dB\mu V + 4 dB\mu V \quad (8.2a)$$

$$A_{zayıflama} = 52 dB\mu V \quad (8.2b)$$

olarak EMI filtre tasarımında hedeflenen zayıflatma değeri bulunmuş olur.

LC filtreler -40dB/dekat zayıflatma eğimine sahiptir. 1 MHz'den daha düşük frekanslarda gürültünün büyük bir kısmının farksal mod gürültü bileşeninden oluştuğunu öngörerek farksal mod filtrenin kesim frekansı,

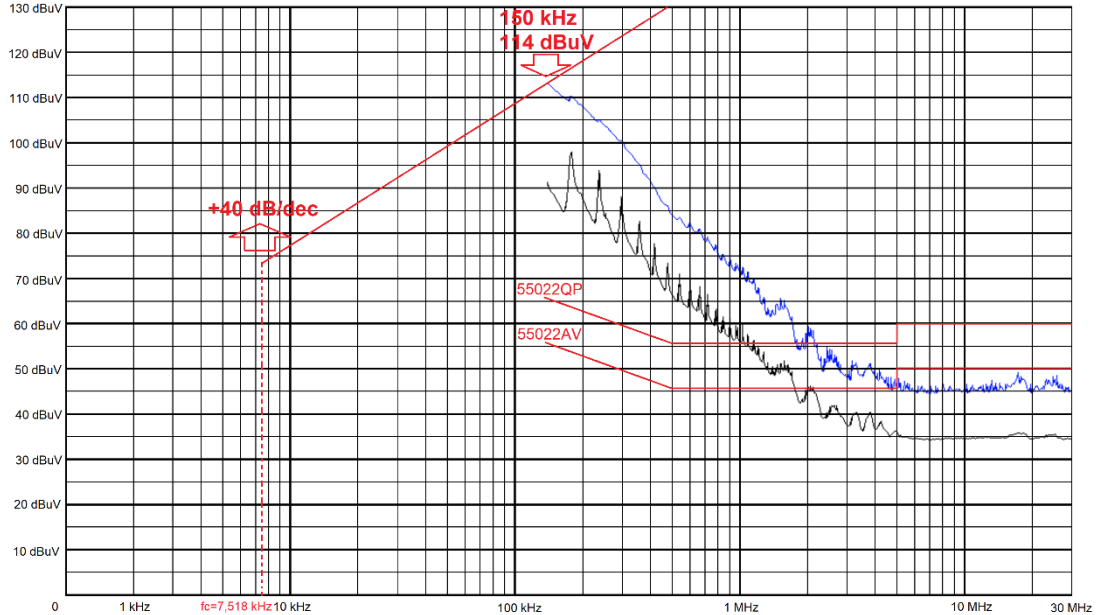
$$f_c = 10^{-\frac{A}{40}} \cdot f [Hz] \quad (8.3)$$

eşitliğinden bulunur. Burada -40 değeri LC filtrelerin -40dB/dekat (onluk) zayıflatma eğimini ifade etmektedir. Buna göre kesim frekansı,

$$f_c = 10^{-\frac{52}{40}} \cdot 150 \text{ kHz} [Hz] \quad (8.4a)$$

$$f_c \cong 7,518 \text{ kHz} \quad (8.4b)$$

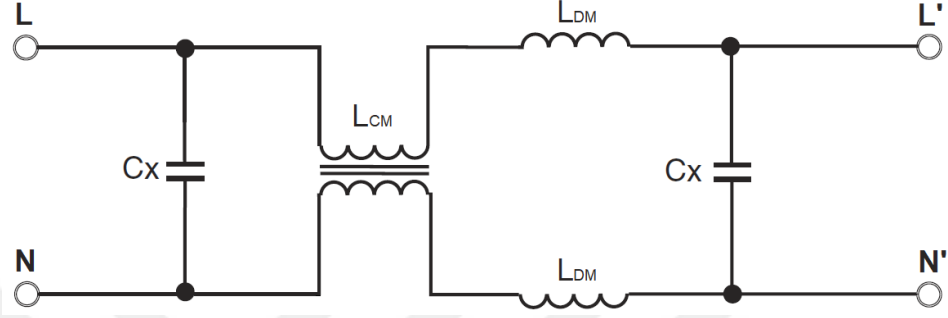
olarak bulunur. Farksal mod için kesim frekansı doğrusu Şekil 8.16'da gösterilmiştir.



Şekil 8.16. Farksal mod kesim frekansı doğrusu

PK ölçüm taramasında 114 dB μ V ile en büyük değere sahip 150 kHz frekans noktası için hedeflenen farksal mod gürültüde 52 dB μ V zayıflamayı sağlayabilmek

için tasarlanacak EMI filtresinde komponentler kesim frekansı olan f_c esas alınarak bulunacaktır. Teste tabi tutulan üründe toprak hattı bulunmadığından ortak mod gürültüsünün zayıflatılması için tek başına kullanılacak olan L_{CM} ortak mod bobini, farksal mod gürültünün azaltılması için kullanılacak L_{DM} bobini ve C_X kapasitörlerinin tasarlanılacak filtre devresindeki yerleri ve filtre devre şeması Şekil 8.17’de verilmiştir.

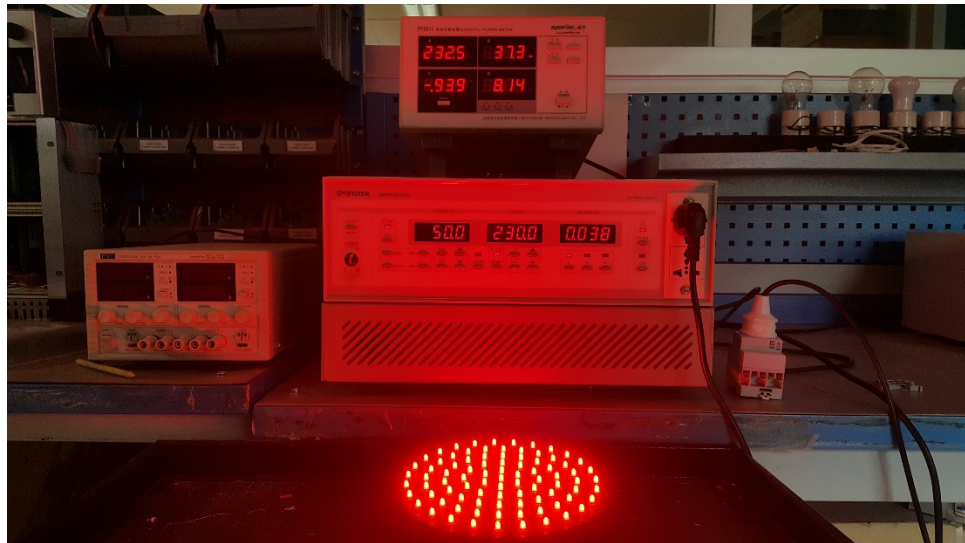


Şekil 8.17. Tasarlanacak EMI filtre devresi

Farksal mod filtre için kesim frekansı ile bobin ve kapasite değerleri,

$$f_{C_{DM}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2 \cdot L_{DM} \cdot C_x}} \text{ [Hz]} \quad (8.5)$$

eşitliği ile ilişkilidir. Burada zayıflatma için kesim frekansı bilindiğine göre bobin endüktasına göre C_X kapasitör değeri değişkenlik gösterecektir. Buna göre komponent seçimleri için öncelikle trafik sinyal modülünün ihtiyaç duyduğu akım miktarı belirlenmelidir. Trafik sinyal modülünün şebekeden çektiği akım 37,3 mA olarak ölçülmüştür. Akım ölçümüne ait görsel Şekil 8.18’de verilmiştir.

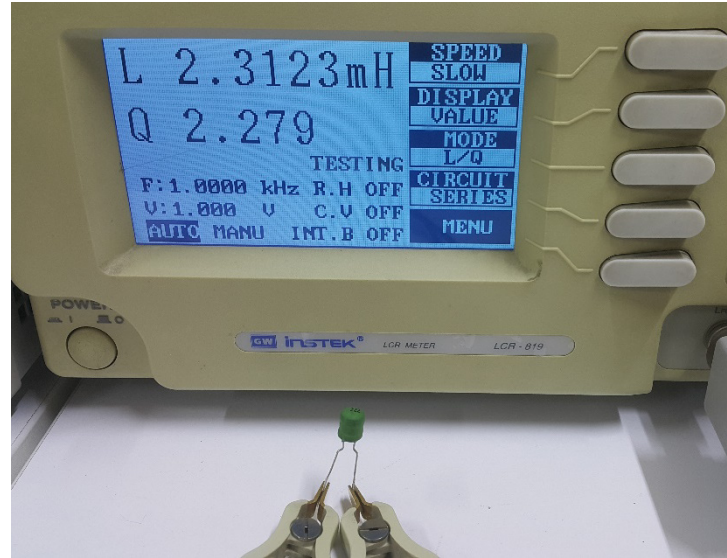


Şekil 8.18. EUT akım ölçümü

EMI filtrenin farksal mod zayıflatma bölümünün tasarımında kesim frekansı ile birlikte girdi oluşturacak bobin endüktans değerinin seçilmesi ve hassas ölçümünün yapılması gerekmektedir. 2,2 mH değerlerinde seçilen 2 adet farksal mod bobin, LCR metre ile hassas şekilde 2,3121 mH ve 2,3123 mH olarak ölçülmüştür. L_{DM1} endüktansına ait ölçüm Şekil 8.19'da, L_{DM2} endüktansına ait ölçüm Şekil 8.20'de gösterilmiştir.



Şekil 8.19. L_{DM1} endüktans ölçümü



Şekil 8.20. L_{DM2} endüktans ölçümü

Ölçülen iki adet farksal mod şok bobinine ait endüktans ortalaması 2,3122 mH olarak C_X kapasitans değerlerinin belirlenmesinde kullanılacaktır. Denklem 8.5'te C_X çekilirse,

$$C_X = C_{X1} = C_{X2} = \frac{1}{8\pi^2 \cdot L_{DM} \cdot f_{cDM}^2} [F] \quad (8.6)$$

olur. Burada $L_{DM} = 2,3122$ mH ve $f_{cDM} = 7,518$ kHz olarak yerine yazılırsa,

$$C_X = C_{X1} = C_{X2} = \frac{1}{8\pi^2 \times 2,3122 \times 10^{-3} \times 7518^2} [F] \quad (8.7a)$$

$$C_X = C_{X1} = C_{X2} = 96,91 \text{ nF} \quad (8.7b)$$

olarak farksal mod kapasitans değerleri bulunmuş olur. 100 nF film kapasitörler içerisinde bu değere en yakın seçilen C_{X1} kapasitörünün ölçümü Şekil 8.21’de, C_{X2} kapasitörünün ölçümü Şekil 8.22’de gösterilmiştir.



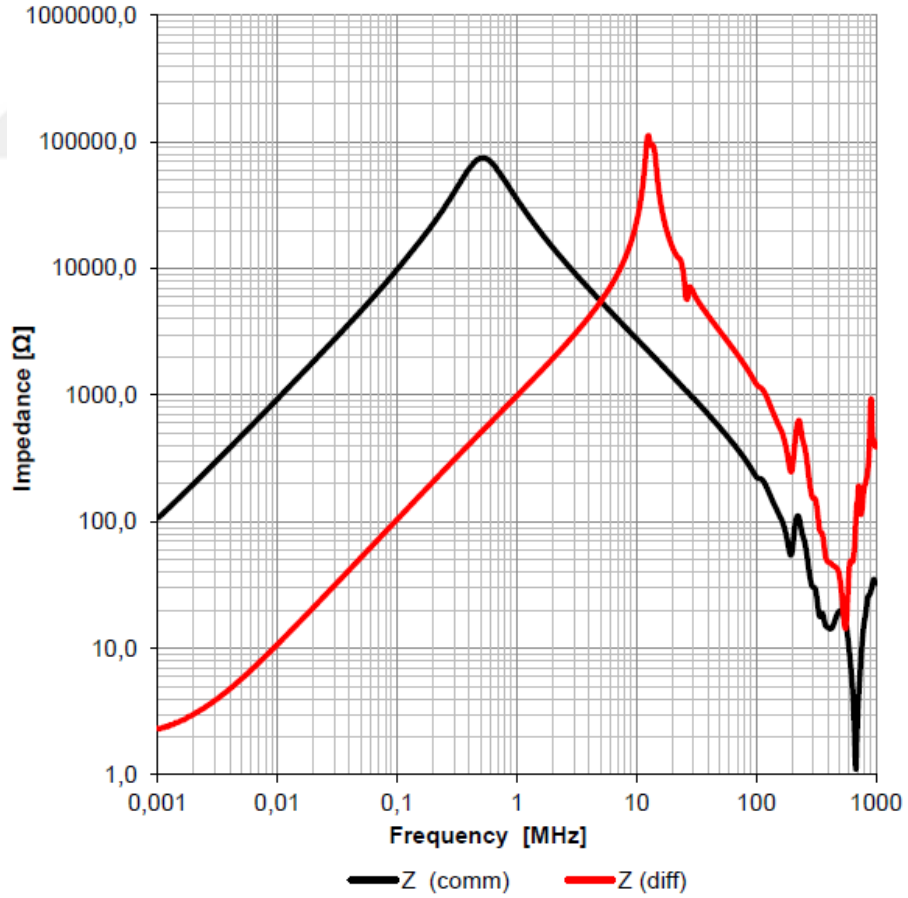
Şekil 8.21. C_{X1} kapasitans ölçümü



Şekil 8.22. C_{X2} kapasitans ölçümü

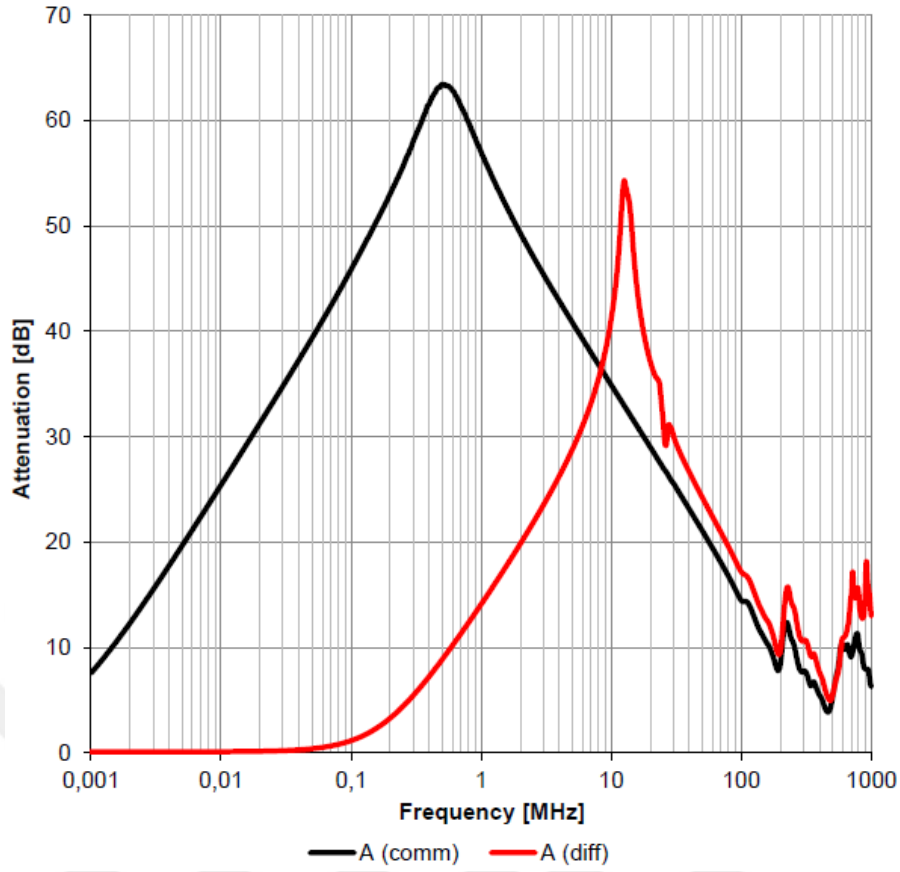
Buna göre $C_{X1} = 96,951$ nF, $C_{X2} = 96,958$ nF kapasitans değerlerine sahiptir. Ortak mod gürültülerin bastırılmasında toprak hattı bulunmadığından C_Y kapasitörleri olmayacağı için yalnızca ortak mod şok bobini seçilecek ve bu seçim bobinin teknik özelliklerinde belirtilen zayıflatma-frekans grafiğine göre yapılacaktır. PK tarama sonucuna göre 2 MHz'den düşük frekans frekanslarda limit aşımı belirlenerek 1 MHz'den düşük frekanslarda farksal mod gürültülerin daha baskın olduğu bilindiğinden grafiğin en yüksek değer aldığı 150 kHz'e göre filtrenin farksal mod bölümüne ait komponent değerleri belirlendi. Limit aşımının olduğu bölgede farksal mod gürültüler baskın olsa da var olan ortak mod gürültünün de azaltılması amacıyla ortak mod şok bobini seçilecektir. Buna göre limit aşımının yoğun olduğu bölgede 500 kHz frekans noktası merkez alınacaktır.

10 mH endüktans değerindeki bir ortak mod şok bobinine ait empedans-frekans grafiği Şekil 8.23'te, araya girme kaybı-frekans grafiği Şekil 8.24'te verilmiştir. Siyah çizgi ortak mod akımları, kırmızı çizgi farksal mod akımları temsil etmektedir.



Şekil 8.23. Ortak mod şok bobini empedans grafiği

Kaynak: <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/7448640402.pdf>
Erişim tarihi: 20 Mayıs 2020

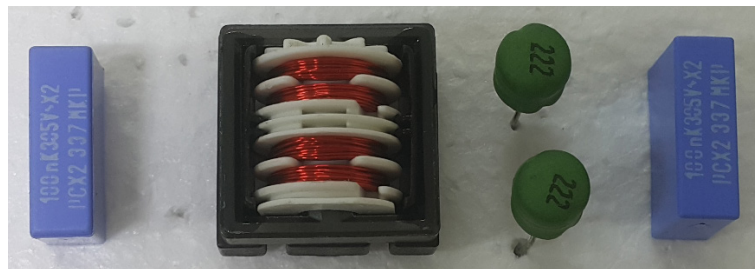


Şekil 8.24. Ortak mod şok bobini AGK grafiği

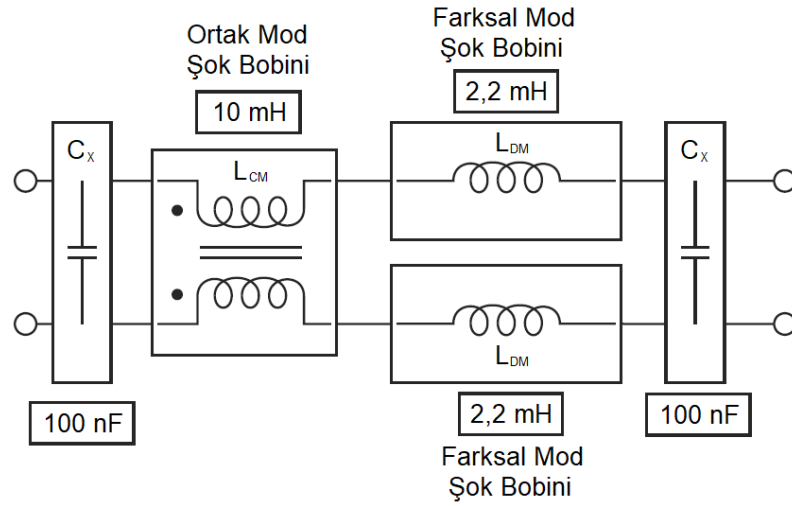
Kaynak: <https://www.we-online.com/catalog/datasheet/7448640402.pdf>
Erişim tarihi: 20 Mayıs 2020

Grafik değerlerine göre seçilen ortak mod şok bobini 500 kHz frekansında 63 dB ortak mod gürültü zayıflaması sağlamaktadır. Ayrıca 13 MHz frekansında farksal mod gürültü zayıflaması sağlamaktadır. Bobinin taşıyabileceği maksimum akım değeri 600 mA olup trafik sinyal modülünün ihtiyacı olan 37,3 mA değerini karşılayabilmektedir.

EMI filtrenin farksal ve ortak mod bölümleri için seçilen tüm komponentlerin görseli Şekil 8.25'te verilmiştir. Seçilen komponentlerin değerleri EMI filtre devresi üzerinde Şekil 8.26'da gösterilmiştir.

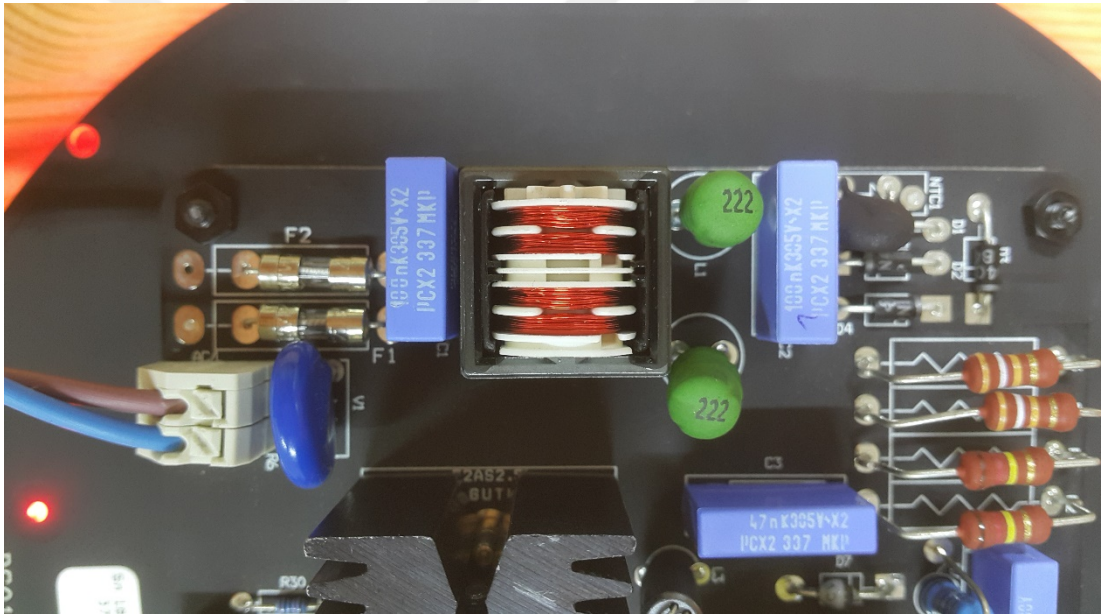


Şekil 8.25. EMI filtre komponentleri



Şekil 8.26. EMI filtre devresi

Filtre devre elemanlarının SMPS devre kartı üzerine yerleştirilmesi sonrasındaki görüntüsü Şekil 8.27’de verilmiştir.



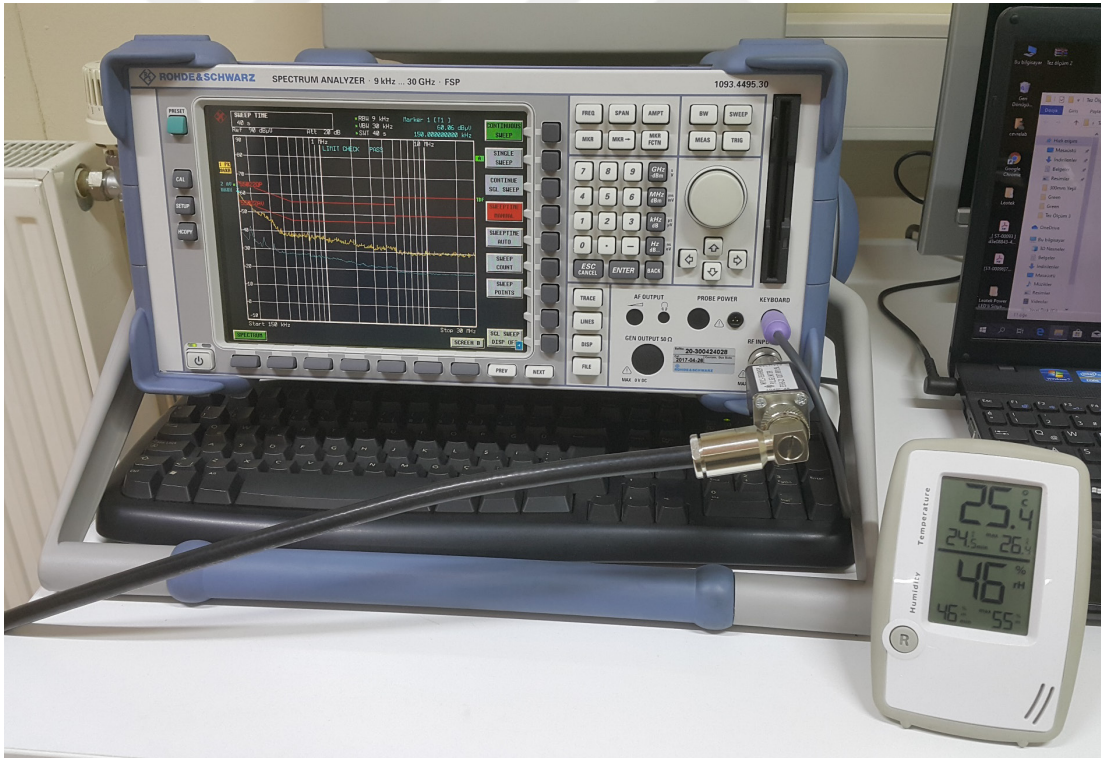
Şekil 8.27. Tasarlanan EMI filtresinin PCB görüntüsü

8.4. EMC İyileştirme Sonrası Deney Tekrarı

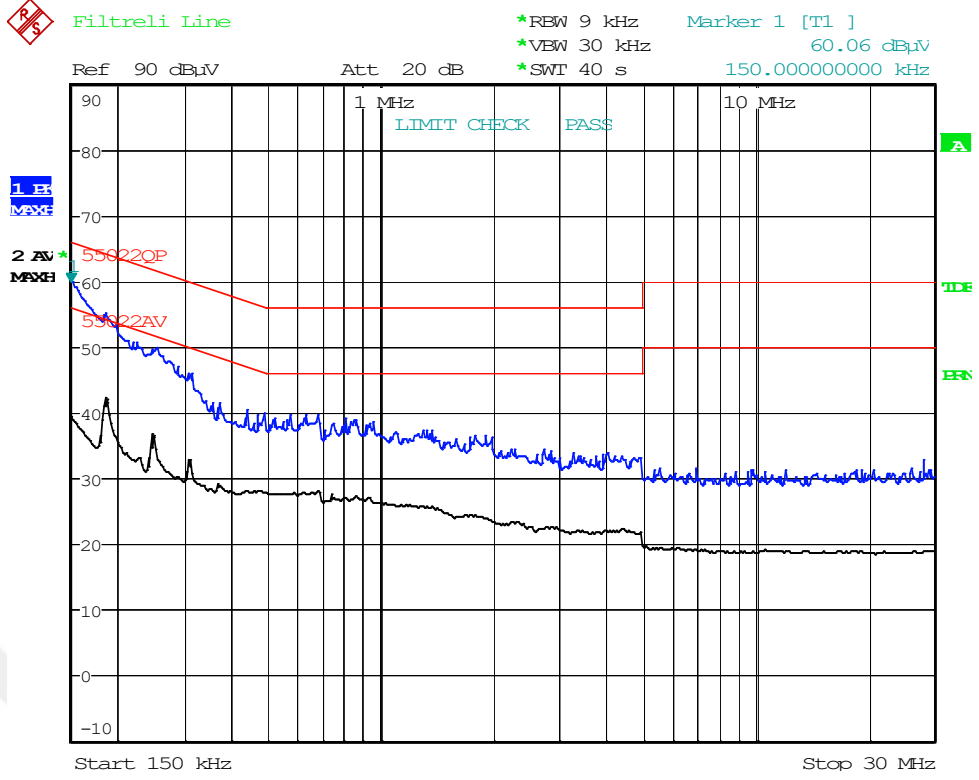
Tasarlanan EMI filtresi sonrasında iletim yollu emisyon ölçüm deney düzeni görseli Şekil 8.28’de, ortam koşulları 25,4°C ve %46 nem olarak Şekil 8.29’da, ölçüm sonuçları faz için Şekil 8.30’da, nötr için Şekil 8.31’de verilmiştir.



Şekil 8.28. Son ölçüm deney düzeni

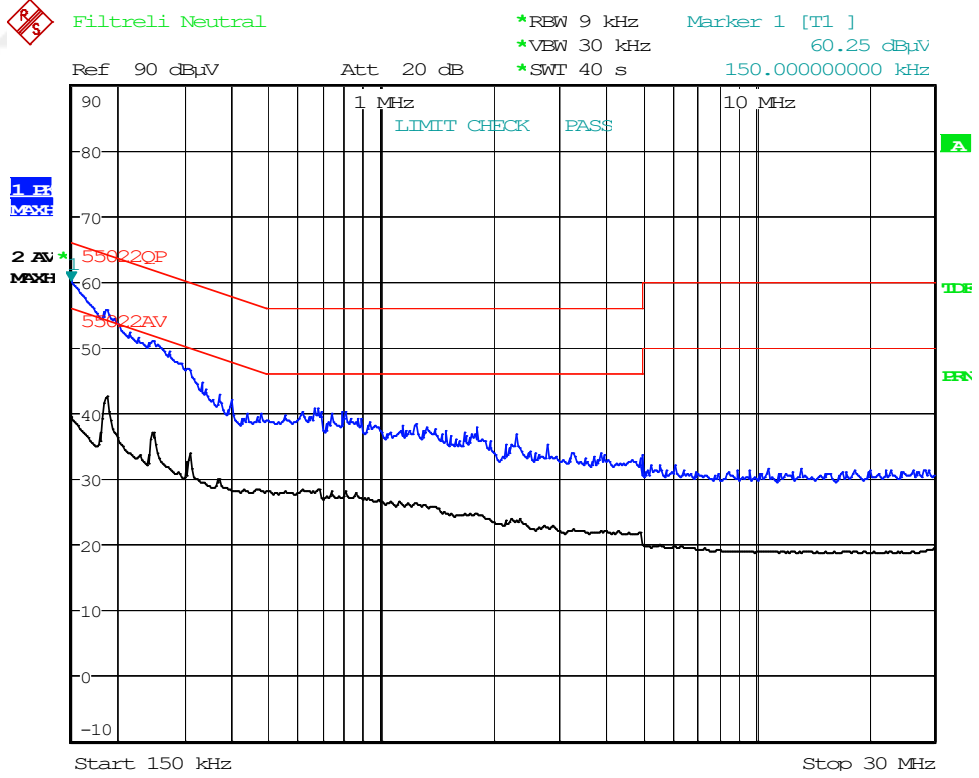


Şekil 8.29. Son ölçüm ortam koşulları



Date: 21.MAY.2020 15:56:38

Şekil 8.30. İyileştirmesi sonrası faz ölçümü



Date: 21.MAY.2020 15:45:29

Şekil 8.31. İyileştirme sonrası nötr ölçümü

EMI filtresi sonrasında teste tabi tutulan cihaz yapılan ölçümlerde hem faz hem de nötr için PK tarama sonuçları QP limitinin altında, AV tarama sonuçları AV limitinin altında kalarak iletim yollu emisyon deneyinden başarılı sonuç almıştır. Gürültünün, tasarım öncesinde 150 kHz frekansında 66 dB μ V olan limitin 4 dB μ V kadar altında olması hedeflenmiş yapılan ölçüm sonucunda 150 kHz frekansında 60,25 dB μ V değer ölçülerek limitin 5,75 dB μ V altında kaldığı görülmüştür. Hedeflenene çok yakın ancak bir miktar daha iyi sonuç elde edilmiştir.



9. SONUÇLAR

Elektronik cihazların ticari pazar içerisinde serbestçe dolaşabilmelerini mümkün kılan CE etiketini taşıyabilmeleri için tabi oldukları standartlardaki gereklilikleri yerine getirmeleri gerekir. Bu gereklilikler içerisinde EMC test ve ölçümleri de yer alır. EMC problemlerinin tasarım aşamasındayken çözümü daha kolay ve daha az maliyetlidir. Tasarım sonrasında EMC problemlerinin ürün belgelendirme testlerinde tespit edilmesi ve ortadan kaldırılmaya çalışılması daha dar ve yüksek maliyetli seçeneklere yerini bırakır. Bu yüzden elektromanyetik uyumluluk, elektronik cihaz ve sistemlerin tasarım sürecinin en başından itibaren önem verilmesi gereken bir konudur. Ürün belgelendirme için tam uyumluluk testlerinden önce Ar-Ge aşaması boyunca ön uyumluluk testlerinin sürdürülmesi büyük önem taşır.

Elektromanyetik girişime karşı iletim yollu bağışıklığın artırılması ve iletim yollu emisyonun azaltılması, EMC kriterlerine uygun tasarım gerçekleştirilmesine bağlıdır. EMC'ye uygun ekranlama, topraklama, filtreleme, PCB tasarımı, kablo ve konnektör seçimi, empedans uyumlandırma ve malzeme seçimi tekniklerinin uygulanması bağışıklık seviyesinin artırılmasında ve emisyon seviyesinin azaltılmasında kritik yöntemlerdir. EMC problemlerinin çözümü ya girişim kaynağının tespit edilerek yok edilmesiyle ya da kuplaj yolunun zayıflatılmasıyla mümkündür. İletim yollu emisyon ölçüm deneyi gerçekleştirilen SMPS içeren bir trafik sinyal modülünün standartta yer alan limitleri aşarak başarısız sonuç aldığı görülmüş, ölçüm sonuçları yorumlanarak farksal mod ve ortak mod gürültüler üzerinde etkili bir EMI şebeke filtresi, kuplaj yolunun zayıflatılması amacıyla tasarlanmıştır. Tasarımda gürültü işaret genliğinin 114 dB μ V değeriyle en yüksek olduğu 150 kHz frekans noktasının 66 dB μ V değerindeki limitin 4 dB μ V kadar altına düşmesi hedeflenmiştir. Tasarım sonucunda bu noktada 53,75 dB μ V azalma sağlanarak 60,25 dB μ V değerine düşürülmüştür. Sonuç olarak limitin 5,75 dB μ V kadar altına inilerek ölçüm deneyinden başarılı sonuç alınmıştır.

KAYNAKLAR

- André, P. G., & Wyatt, K. (2014). EMI Troubleshooting Cookbook for Product Designers. SciTech Publishing, New Jersey.
- Arı, N., & Özen, Ş. (2008). Elektromanyetik Uyumluluk. Palme Yayıncılık, Ankara.
- Bacanak, İ. (2018). Helmholtz Dalga Denklemlerinin Analizi: Maxwell Denklemleri ve Silindirik Elektromanyetik Dalgalar. Maltepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, (Danışman: Prof.Dr.Özay Gürtuğ).
- Beer, A. D. (2005). Elektronik Sistemlerde Pratik: EMC ve EMI, Gürültü Azaltma ve Korunma, Ekranlı Koruma, Topraklama ve PCB/Baskılı Devre Tasarımı. Ed: Bodur A., Çevirenler: Özşar Ç., Bodur A., Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.
- Caro, AL. (2011). Modelling of Textile Reinforced Composite Barriers Against Electromagnetic Radiations. Czech Technical University Department of Telecommunications Engineering, Master Thesis, Prague, (Director: Lukáš Vojtěch, Ph.D.).
- Cengiz, S. (2009). Elektromanyetik Girişimden Korunmada Ekranlama Etkinliği ve Elektromanyetik Ekranlama Uygulamaları. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis, Isparta, (Danışman: Prof.Dr.Mustafa Merdan).
- Chang, K. (2000). RF and Microwave Wireless Systems. John Wiley & Sons Inc. Publication., New York.
- Cheng, D. K. (2009). Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri (2. b.). (A. Köksal, & B. Saka, Çev.) Palme Yayıncılık, Ankara.
- Gonzalez, G. (1996). Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design (2. ed.). Prentice Hall, New Jersey.
- Kalluri, D. K. (2018). Principles of Electromagnetic Waves and Materials (2. ed.). CRC Press, Florida.
- Lienig, J., & Bruemmer, H. (2017). Fundamentals of Electronic Systems Design. Springer International Publishing, Cham.
- Ott, H. W. (2009). Electromagnetic Compatibility Engineering. John Wiley & Sons Inc. Publication, New Jersey.
- Paul, C. R. (2006). Introduction to Electromagnetic Compatibility (2. ed.). John Wiley & Sons Inc. Publication, New Jersey.
- Serway, R. A., & Beichner, R. J. (2009). Fen ve Mühendislik için Fizik (5. b., Cilt 2). Çeviren: Prof.Dr.K. Çolakoğlu, Palme Yayıncılık, Ankara.
- Sevgi, L. (2000). Elektromanyetik Uyumluluk Elektromanyetik Kirlilik. Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, İstanbul.
- Sevgi, L. (2006). Tasarımdan Üretime Elektromanyetik Uyumluluk. Eksen Yayıncılık, İstanbul.

Sevgi, L. (2017). A Practical Guide to EMC Engineering. Artech House, Massachusetts.

Sevgi, L. (2019). Tasarımdan Piyasaya Elektromanyetik Uyumluluk (2. b.). Okan Üniversitesi Yayınları, İstanbul

Teker A., & Kuyumcu FE. (2007). Elektro Manyetik Uyumluluk, Topraklama ve Şebekelere Etkileri. 12. Elektrik Elektronik Bilgisayar Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Eskişehir. http://www.emo.org.tr/ekler/e1901cf37683f08_ek.pdf

TS EN 12368. (2015). Trafik Kontrol Donanımları-Sinyal Lambaları. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 50293. (2013). Elektromanyetik Uyumluluk-Yol Trafik İşaret Sistemleri-Ürün Standardı. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 55022. (2012). Bilgi Teknolojisi Cihazı-Radyo Bozulma Karakteristikleri-Ölçme Sınır Değerleri ve Yöntemleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

Wang C., Murugadoss V., Kong J., He Z., Mai X., Shao Q., Chen Y., Guo L., Liu C., Angaiah, S. (2018). Overview of Carbon Nanostructures and Nanocomposites for Electromagnetic Wave Shielding. Carbon(140), 696-733. https://composites.utk.edu/papers%20in%20pdf/Vignesh_Carbon_2018.pdf

Williams, T. (2016). EMC for Product Designers (5. ed.). Newnes., Oxford.

Williams, T., & Armstrong, K. (2000). EMC for System and Installations. Newnes, Oxford.

ABB. (2018). Technical Application Papers No. 25 Electromagnetic compatibility: theory and application measures in MV environments. [https://library.e.abb.com/public/3cf4f48f111849329da5d93d040a28e8/AP_EM\(EN\)_A_1VCP000721.pdf](https://library.e.abb.com/public/3cf4f48f111849329da5d93d040a28e8/AP_EM(EN)_A_1VCP000721.pdf), Erişim tarihi: 15 Aralık 2019

Beauvois, V. (2015). Grounding and Earthing. Montefiore Institute: [http://www.montefiore.ulg.ac.be/~geuzaine/ELEC0017/4_EM\(EN\)_Design.pdf](http://www.montefiore.ulg.ac.be/~geuzaine/ELEC0017/4_EM(EN)_Design.pdf), Erişim tarihi: 20 Mart 2020

Berman, M. (2008). All About EMI Filters. TDK-Lambda Americas: <https://wenku.baidu.com/view/eb9e54fb4693daef5ef73d39.html>, Erişim tarihi: 12 Mart 2020

Corsaro, A., Parisi, C., & Rotay, C. (2015). EMC Design Guides for Motor Control Applications. https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00182773-emc-design-guides-for-motor-control-applications-stmicroelectronics.pdf, Erişim tarihi: 3 Mayıs 2020

Delaballe, J. (2001). EMC: Electromagnetic Compatibility. <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/3398/3398-ect149.pdf>, Erişim tarihi: 4 Mayıs 2020

Hofer, T., & Negele, R. (2012). EMV Filter Design. Omicron Lab: https://www.omicron-lab.com/fileadmin/assets/Bode_100/Articles_UseCases/EMV_Filter_Design_V2.pdf, Erişim tarihi: 17 Mayıs 2020

Loukil, K., & Siala, K. (2013). EMC Standards. https://www.itu.int/en/ITU-D/Technology/Documents/Events2013/CI_Training_ARB_Tunis_April13/UIT_EM_C_standards.pdf, Erişim tarihi: 3 Mayıs 2020

- NXP Semiconductors. (2011). SMPS EMC and layout guidelines. <http://cdn14.21dianyuan.com/download.php?id=112682.>, Erişim tarihi: 27 Mart 2020
- Rangu, M. (2014). Getting EMC Design Right First Time. EMC FastPass: https://www.emcfastpass.com/wp-content/uploads/2015/04/Getting_EMC_Right_First_Time_Intro.pdf., Erişim tarihi: 25 Mart 2020
- Schaffner EMV AG. (2000). RF Emission Testing a Hand Guide. http://www.unitest.com/pdf/RF_emission_testing_e_2.pdf., Erişim tarihi: 30 Mart 2020
- Sew Eurodrive. (2013). EMC in Drive Engineering. <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11535814.pdf.>, Erişim tarihi: 15 Mart 2020
- SL Power Electronics. (2018). IEC/EN61000 Standards for Power Supplies. https://slpower.com/App-slpower/images/whitepapers/AN-G007_EN61000.pdf., Erişim tarihi: 2 Mayıs 2020
- T.C. Ticaret Bakanlığı (2019). CE İşareti. https://ticaret.gov.tr/data/5b88443f13b87711604c92b1/CE_isareti_ile_ilgili_Soru_ve_Cevaplar.pdf., Erişim tarihi: 29 Aralık 2019
- Tarateeraseth, V. (2012). EMI Filter Design: Part III: Selection of Filter Topology for Optimal Performance. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 1(2), 60-73. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6244975&isnumber=6244963>
- Tektronix. (2015). Practical EMI Troubleshooting Application Note. https://d347awuzx0kdse.cloudfront.net/vicomauis/content-file/3gw-30828-1_vicom.pdf., Erişim tarihi: 28 Mart 2020
- Teseq AG. (2009). LF and RF Immunity. https://www.teseq.com/media/docs/support_downloads/technical-information/wallcharts/LF_and_RF_immunity.pdf., Erişim tarihi: 5 Mayıs
- Teseq AG. (2009). RF Emission Testing. http://materias.fi.uba.ar/6510/Wallcharts%20Teseq/1_RF_emission_testing.pdf., Erişim tarihi: 1 Mayıs 2020
- Texas Instruments. (1999). PCB Design Guidelines For Reduced EMI. <http://www.ti.com/lit/an/szza009/szza009.pdf?ts=1589075246976.>, Erişim tarihi: 22 Mart 2020
- Wallis, G. (2015). EMC Seminar. Wurth Electronics (UK) Ltd: <https://www.scribd.com/document/366741233/Emcseminar2015glenwalliswurth-151130105938-Lva1-App6892.>, Erişim tarihi: 14 Mart 2020
- Wang, E. (2014). Conducted EMI Reduction by Means of Hybrid Common Chokes. Richtek Technology Corporation: https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/~/_media/AN%20PDF/AN008_EN.ashx., Erişim tarihi: 13 Mart 2020
- T.C. Resmi Gazete. Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği. 21.08.2001. Sayı:24500, Başbakanlık Basımevi, Ankara.
- T.C. Resmi Gazete. Ürünlere İlişkin Teknik Mevzuatın Hazırlanması ve Uygulanmasına Dair Kanun. 11.07.2001. Sayı:24459, Başbakanlık Basımevi, Ankara.

T.C. Resmi Gazete. Ürünlerin Piyasa Gözetimi ve Denetimine Dair Yönetmelik. 17.01.2002. Sayı:24643, Başbakanlık Basımevi, Ankara.

T.C. Resmi Gazete. “CE” İşareti Yönetmeliği. 23.02.2012. Sayı:28213, Başbakanlık Basımevi, Ankara.

<http://play.fallows.ca/wp/radio/ham-radio/signal-analysis-morse-decoder.>, Erişim tarihi: 24 Nisan 2020

[https://copradar.com/chapts/chapt7/ch7d2.html.](https://copradar.com/chapts/chapt7/ch7d2.html), Erişim tarihi: 12 Aralık 2019

<https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/18-5-electric-field-lines-multiple-charges.>, Erişim tarihi: 11 Aralık 2019

[https://docplayer.net/docs-images/65/54009010/images/1-0.jpg.](https://docplayer.net/docs-images/65/54009010/images/1-0.jpg), Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/archive/2018/06/28/a-review-of-emi-standards-part-1-conducted-emissions., Erişim tarihi: 17 Mayıs 2020

https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking/manufacturers_en., Erişim tarihi: 29 Aralık 2019

<https://electronics.stackexchange.com/questions/135614/switching-power-supply-using-faraday-cage-and-emi-protection.>, Erişim tarihi: 4 Ocak 2020

<https://electronics.stackexchange.com/questions/255687/why-in-some-communication-protocols-the-wires-are-twisted.>, Erişim tarihi: 23 Mart 2020

<https://en.tse.org.tr/IcerikDetay?ID=866.>, Erişim tarihi: 29 Aralık 2019

https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_compatibility., Erişim tarihi: 17 Nisan 2020

https://en.wikipedia.org/wiki/Smith_chart., Erişim tarihi: 25 Nisan 2020

https://esongemc.com/eng/bbs/content.php?co_id=Ground_Foam_Gasket., Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

<https://hollandshielding.com/EMI-shielding-theory-applications.>, Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

<https://shopee.co.th.>, Erişim tarihi: 24 Mart 2020

<https://skullsinthestars.com/2014/12/12/the-mystery-of-the-magnetic-train.>, Erişim tarihi: 11 Aralık 2019

<https://ticaret.gov.tr/urun-guvenligi/ab-teknik-mevzuat-uyumu/ce-isareti.>, Erişim tarihi: 29 Aralık 2019

<https://tse.org.tr/IcerikDetay?ID=12.>, Erişim tarihi: 29 Aralık 2019

<https://www.academyofemc.com/emc-in-a-nutshell.>, Erişim tarihi: 17 Nisan 2020

<https://www.academyofemc.com/emc-knowledge-base.>, Erişim tarihi: 22 Nisan 2020

<https://www.academyofemc.com/emc-standards.>, Erişim tarihi: 4 Mayıs 2020

<https://www.eenewsautomotive.com/design-center/electronic-pervasiveness-vehicles-brings-emi-challenges/page/0/1>, Erişim tarihi: 12 Şubat 2020

<https://www.icotek.com/en-uk/mskl.>, Erişim tarihi: 25 Mart 2020

<https://www.monodaq.com/applications/measurement-basics-signal-noise-ratio.>,
Erişim tarihi: 24 Nisan 2020

<https://www.nontoxicliving.tips/blog/emf-and-cancer-does-extremely-low-frequency-radiation-cause-cancer.>, Erişim tarihi: 1 Aralık 2019

<https://www.we-online.com/catalog/datasheet/7448640402.pdf.>, Erişim tarihi: 20 Mayıs 2020

https://www.we-online.com/catalog/en/pbs/emc_components/common_mode_chokes_for_power_lines., Erişim tarihi: 12 Mart 2020

www.cmp.com/30-awg-high-speed-hdmi-cable-with-ferrite-cores-3-feet., Erişim tarihi: 21 Mart 2020

www.fotofab.com/low-profile-shields., Erişim tarihi: 5 Ocak 2020

www.we-online.com/catalog/en/pbs/emc_components/ferrites_for_cable_assembly.,
Erişim tarihi: 20 Mart 2020

www.we-online.com/catalog/en/pbs/emc_components/ferrites_for_pcb_assembly.,
Erişim tarihi: 21 Mart 2020

www.we-online.com/catalog/en/WE-CLFS., Erişim tarihi: 13 Mart 2020

www.we-online.com/catalog/en/WE-ST., Erişim tarihi: 23 Mart 2020

www.we-online.com/catalog/en/WE-STAR-TEC., Erişim tarihi: 21 Mart 2020

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2007 yılında girdiği Gaziantep Üniversitesi Fizik Mühendisliği bölümünde iki yıl öğrenim gördükten sonra bölümden ayrılarak 2009 yılında Fatih Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2013 yılında mezun oldu. 2018 yılında Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Aynı zamanda Anadolu Üniversitesi Yönetim Bilişim Sistemleri lisans programından 2019 yılında onur derecesiyle mezun oldu. Yedek subay askerlik hizmetinin ardından Elektrik-Elektronik sektöründe çeşitli işlerde çalışmış olan YILDIZ, 2016 yılından beri İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSBAK A.Ş.'nin lisanslı Ar-Ge merkezinde Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaktadır.