

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK YÖNÜNDEN
TEMEL DEVRE YAPILARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ensar SALİHOĞLU

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

**ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK YÖNÜNDEN
TEMEL DEVRE YAPILARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Öğrenci Ensar SALİHOĞLU
518101052**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518101052 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ensar SALİHOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK YÖNÜNDEN TEMEL DEVRE YAPILARININ İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd.Doç.Dr. Ali Fuat ERGENÇ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Özgür Turay KAYMAKÇI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **24 Nisan 2015**

Savunma Tarihi : **22 Mayıs 2015**

Tüm hayatım boyunca her zaman destek olan aileme,

ÖNSÖZ

Teknolojinin gelişimi ile otonom çalışan sistemlerin geliştirilme arzusu da artmaktadır. Endüstride birçok üretim tesisinde otonom işleyen çarklar kurulmaya çalışılmaktadır. Aradaki insan faktörü etkisi mümkün olduğunca azaltılmaya çalışılarak daha standardize bir düzen oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu gelişmeler ilerledikçe benzeri otonom sistemler sadece endüstriyel alanda kalmayıp, silah sistemleri ve askeri sistemlerde de oluşturulmaya çalışılmaktadır. Karadan ilerleyen otonom araçlar havadan destekçileri olan insansız hava araçları ile koordineli operasyon yapabilir hale gelmiştir. Tüm bu gelişmeler, elektronik kontrollü sistemlerin gelişimi ve daha etkin kullanımı ile ortaya çıkmaktadır. Örneğin gelecekte içten yanmalı motora sahip vasıtaların yerini elektrikli motora sahip araçların alacağı öngörülmektedir. Bu değişimde dahi birçok elektronik kontrollü (motor sürücüleri, elektronik diferansiyel vb.) sistemler devreye girecektir. Sistemlerin sorunsuz çalışabilmeleri için hem kendi içinde doğru hem de diğer bileşenler ile uyumlu çalışmaları gerekmektedir. Bu nedenle elektronik kontrollü sistemlerde elektromanyetik uyumluluk konusu ön plana çıkmaktadır.

Nisan 2015

Ensar Salihoğlu
Mekatronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tanımlamalar	1
2. STANDARTLAR	3
2.1 Askeri Standartlar	3
2.2 Ticari Standartlar	4
3. GİRİŞİM PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜMLERİ	5
3.1 Güç ve Toprak	5
3.1.1 Güç Kaynakları	5
3.1.1.1 Bypass	6
3.1.1.2 Decoupling	6
3.1.1.3 Bypass ve Decoupling Kondansatörleri Tipik Yerleşim Bölgesi	7
3.1.1.4 Flyback dönüştürücü	8
3.1.2 Toprak Bağlantıları	11
3.1.2.1 Ground Bounce	12
3.1.2.2 Ground Loop	13
3.1.2.3 Mutual coupling	13
3.1.2.4 Karışık Sinyal Barındıran Devre Yapıları.....	14
3.1.2.5 Ayrık mod	16
3.1.2.6 Ortak mod	16
3.2 Baskı Devre Genel Özellikleri	18
3.2.1 Galvanik izolasyon.....	19
3.2.2 Mikroşerit hat	20
3.2.3 Şerit hat	21
3.2.4 Çapraz etkileşim.....	22
3.2.5 20-H kuralı	22
3.2.6 Aspect Ratio	23
3.2.7 Genel Bilgiler	23
3.2.8 Deri etkisi	23
4. DENEY VE SONUÇLAR.....	25
4.1 Kullanılan Devre Yapısı	25
4.2 Test Ortamı.....	26
4.3 Sonuçlar	27
KAYNAKLAR	31
ÖZGEÇMİŞ.....	33

KISALTMALAR

EMI	: Elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference)
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility)
EMR	: Elektromanyetik ışınlım (Electromagnetic Radiation)
RF	: Radio frequency
EMP	: Elektromanyetik darbe (ElectroMagnetic Pulse)
ESD	: Elektrostatik deşarj (Electrostatic Discharge)
ANSI	: Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü (American National Standards Institute)
GHz	: Gigahertz
MHz	: Megahertz
Hz	: Hertz
HF	: Yüksek frekans (High Frequency)
MF	: Orta frekans (Medium Frequency)
LF	: Düşük frekans (Low Frequency)
IC	: Tümüleşik devre (Integrated Circuit)
MIL-STD	: Askeri standart (Military Standard)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Cihaz [11].	3
Şekil 2.2 : Sistem [11].	3
Şekil 3.1 : Baskı devre güç kaynağı tipik bileşenleri [11].	5
Şekil 3.2 : Bypass örnek uygulama gösterimi [11].	6
Şekil 3.3 : Decoupling örnek uygulama gösterimi [11].	7
Şekil 3.4 : Decoupling, bypass ve izolasyon birlikte örnek kullanımı [11].	7
Şekil 3.5 : Bypass veya Decoupling kapasitörü tipik yerleşimi [11].	8
Şekil 3.6 : Flyback dönüştürücü genel yapısı [10].	8
Şekil 3.7 : Tipik bir boost dönüştürücü üzerindeki kritik noktalar [10].	9
Şekil 3.8 : Yayılım yapan alanların burgulu akım yolu ile azaltılması, a) toroidal ekdüktör, b) devre üzerinde [10].	10
Şekil 3.9 : Devre üzerinden akan akım ve toprak düzlemi üzerinden dönüşü [12].	11
Şekil 3.10 : İdeal tel ve gerçek tel modelleri [12].	12
Şekil 3.11 : Grounding bounce devre modeli [12].	12
Şekil 3.12 : Solda doğru bağlantı gösterimi, sağda yanlış bağlantı gösterimi [11].	13
Şekil 3.13 : Karşılıklı akuple ile induktans etkisinin yok olması [11].	13
Şekil 3.14 : Dijital ve Analog devre toprak düzlemleri [1].	14
Şekil 3.15 : Dijital devre için tipik bir yerleşim gösterimi [1].	15
Şekil 3.16 : Ayrık mod gürültüsü ve bastırma yöntemi [11].	16
Şekil 3.17 : Ortak mod gürültüsü ve bastırma yöntemleri [11].	16
Şekil 3.18 : DC devrelerde gürültüleri bastırma örnekleri [11].	17
Şekil 3.19 : AC güç kaynağındaki gürültüleri bastırma örnekleri [11].	17
Şekil 3.20 : Bağlantı yolların çizimi [12].	18
Şekil 3.21 : 4, 6 ve 8 katmanlı devreler için konfigürasyon tavsiyeleri [12].	19
Şekil 3.22 : Sıralı koruma gösterimi [12].	20
Şekil 3.23 : Mikroşerit hat gösterimi [12].	20
Şekil 3.24 : Mikroşerit hat empedans hesaplaması [12].	21
Şekil 3.25 : Şerit hat gösterimi [12].	21
Şekil 3.26 : Şerit hat empedans hesaplaması [12].	21
Şekil 3.27 : Çapraz etkileşim gösterimi ve su yolları arası mesafeler [12].	22
Şekil 3.28 : 20-H kuralı gösterimi [12].	22
Şekil 3.29 : Deri etkisi hesaplaması [12].	23
Şekil 4.1 : Led Sürücü Devre Şeması ve Baskı Devre.	25
Şekil 4.2 : İletimle yayınım ve iletimle bağışıklık test düzeneği	26
Şekil 4.3 : Işınım ile yayınım ve ışınım ile bağışıklık test düzeneği.	26
Şekil 4.4 : İlk durum iletimle yayınım test sonucu.	27
Şekil 4.5 : Kondansatör iki katına çıktığında iletimle yayınım test sonucu.	27
Şekil 4.6 : Giriş faz ve nötr hattına 2mH bobin eklenmesi sonucu.	28
Şekil 4.7 : Çıkışa ortak mod filtresi eklenmesi sonucu.	28
Şekil 4.8 : Giriş ve çıkışa filtre eklenmesi sonucu.	29

Şekil 4.9 : İlk durum ışınımla yayılım test sonucu.	29
Şekil 4.10 : Giriş filtresi eklenmesi sonucu.	30
Şekil 4.11 : Giriş ve çıkış filtresi eklenmesi sonucu.	30

ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK YÖNÜNDEN TEMEL DEVRE YAPILARININ İNCELENMESİ

ÖZET

1900'lü yıllarda endüstriyel ve askeri alanlarda birçok teknolojik gelişim yaşanmıştır. 2000'li yıllarda ise bu gelişmenin hızı önemli derecede artmıştır. Örneğin ilk üretilen bilgisayar büyük bir alan kaplarken, günümüzde ise çok daha üstün özelliklere sahip cep bilgisayarları üretilmektedir. Yaşanan bu hızlı gelişim ile üretimin bu derecede büyümesi ve ortaya çok çeşitli ürünlerin çıkması sonucu karmaşanın engellenmesi için düzenleme yapılması gerekmektedir. Pek çok açıdan olduğu gibi elektromanyetik olarak da ürünlerin belli ölçülerde üretilmesi gerekmektedir.

1800'lü yılların sonunda ve 1900'lü yılların başlarında kablosuz veri iletimi, elektromanyetik radyasyon yani radyo dalgaları üretimi ve kablosuz haberleşme konularında çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak elektromanyetik yayılım kavramları bu dönemlerde kullanılmıştır. Geçmiş dönemde çok önemsenmeyen elektromanyetik uyumluluk konusu, teknolojinin hızla gelişmesi ve bir çok sistemin elektronik kontrollü hale gelmesi ile ön plana çıkmıştır. 1930'lu yıllarda elektrikli motorların kullanımının yaygınlaşması, demiryolu hatlarında elektrikli trenlere geçilmesi ve yüksek güçte elektrikli motorların kullanımı, radyo kanallarının ve vericilerinin artması ve daha güçlü radyo sinyalleri elektromanyetik gürültü ve sorunlarını ortaya çıkarmaya başlamıştır. İlerleyen dönemlerde 1950'li yıllarda yarıiletken malzeme kullanımı ile icad edilen transistör vb anahtarlamalı devre elemanları, sonrasında tümleşik devre sistemlerinin oluşturulması ardından mikroişlemcilerin icadi ve yaygın kullanımı ile elektromanyetik girişim konusu çok daha ön plana çıkmıştır.

Önceleri askeri sistemlerde daha çok göz önüne alınan elektromanyetik uyumluluk konusu günümüzde ise endüstriyel alanda ve ticari ürünlerde de birer zorunluluk haline gelmiştir. Elektromanyetik uyumluluk konusunun öneminin anlaşılmasıyla hem askeri hem de ticari ürünler için standartlar oluşturulmuştur. Askeri, havacılık ve medikal alanlardaki kriterler her konuda olduğu gibi elektromanyetik uyumluluk konusunda da ticari ve endüstriyel ürünlere oranla daha yukarıdadır. Askeri, havacılık ve medikal alanındaki standartların isterleri daha zorlu şartlara göre belirlenmektedir. Bu nedenle standartlarda yer alan kriterler de daha yüksek seviyededir.

Bir ürünün elektromanyetik uyumlu olabilmesi için öncelikli olarak kendi içinde uyumlu olarak doğru çalışması gerekmektedir. Uyumluluğun sağlanabilmesi için sadece kendi içinde doğru çalışması da yetmemektedir. Sistem bazında bakıldığında bir ürün başka bir ürüne bağlı çalışırken diğer bağlı bulunduğu ürünü etkilememeli ayrıca bağlı bulunduğu ürünlerden de etkilenmemelidir. Yani kendi içinde uyumlu çalışan bir ürünün çevre birimleri ile de uyumlu çalışması gerekmektedir ve çevre etkilere karşı da bağışık olması gerekmektedir.

Bir ürünün elektromanyetik uyumluluğu standartlarda belirtilen kriterler doğrultusunda yapılan testler ile ortaya çıkmaktadır. Bu testlerde hem cihazın ürettiği yayılımlar ölçülmektedir hem de cihaza bozucu etki sinyaller gönderilerek bağışıklık kontrolü yapılmaktadır. Bu testler özel ortamlarda gerçekleştirilmektedir ve maliyetleri yüksektir. Bu nedenle elektromanyetik uyumluluğun sağlanabilmesi için tasarım aşamasında çok dikkatli olunması gerekmektedir. Testlerde alınabilecek olumsuz sonuçlar tasarımın gözden geçirilmesine neden olacaktır. Bu nedenle işin en başında elektromanyetik uyumluluk gerçekleri göz önüne alınarak tasarımların yapılması gerekmektedir.

Bir çok sistem elektronik kontrollü hale geldiğinden elektromanyetik uyumluluk konusu temel devre aşamasından başlamaktadır. Genellikle sistemler içinde ana güç bileşeni ve kontrol bileşeni bulunmaktadır. İlk olarak güç sisteminin tasarımı yapılmaktadır. Bahsettiğimiz transistör, mosfet, IGBT vb. anahtarlama elemanları güç sistemlerinin vazgeçilmez bileşenleri arasındadır. Temel yapıya göz attığımızda bu yapı içerisindeki en önemli elektromanyetik gürültü kaynakları bu anahtarlama elemanlarında oluşmaktadır. Bunun dışında devre tasarımı konusunda da dikkat edilmesi gereken yönler bulunmaktadır. Güç sistemi tasarımı ile beraber kontrol sistemi tasarımında da elektromanyetik etkiler göz önüne alınarak tasarım yapmak gerekmektedir. Ayrıca güç ve kontrol sistemleri entegre çalışacağından bu entegrasyonun da elektromanyetik uyumluluk yönünden tasarıma dikkat edilerek gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmamızda temel devre seviyesinde yaşanan problemleri, alınması gereken önlemleri belirtmeye çalışacağız ve bu doğrultuda bazı deneysel çalışmalar yapacağız.

BASIC CIRCUIT STRUCTURE ANALYSIS TERMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

SUMMARY

Electromagnetic compatibility (EMC) is the branch of electrical sciences which studies the unintentional generation of electromagnetic energy with reference to the unwanted effects (Electromagnetic interference EMI) that such energy may induce. The goal of EMC is the correct operation, in the same electromagnetic environment, of different equipment which use electromagnetic phenomena, and the avoidance of any interference effects [9].

In order to achieve this, EMC pursues two different kinds of issues. Emission issues are related to the unwanted generation of electromagnetic energy by some source, and to the countermeasures which should be taken in order to reduce such generation and to avoid the escape of any remaining energies into the external environment. Susceptibility or immunity issues, in contrast, refer to the correct operation of electrical equipment, referred to as the victim, in the presence of unplanned electromagnetic disturbances [9].

While electromagnetic interference (EMI) is a phenomenon as the radiation emitted and its effects, electromagnetic compatibility (EMC) is an equipment characteristic or property to not behave unacceptably in the EMI environment [9].

Until approximately 1970, radio frequency (RF) requirements were driven by military usage, and electromagnetic compatibility (EMC) efforts were conducted by the military and a few select industries. This was largely due to the fact that limited applications and high costs had kept the use of consumer electronics to a minimum.

The past three decades, however, have seen a fundamental shift in this status quo. Starting with the emergence of the microprocessor in the mid-70s, commercial applications began to take the lead of technology development and the consumer market has grown exponentially [8].

Widespread use of electronics in both the military and private sectors has impacted the available use of the RF spectrum. As the demands for “connectivity” continue to grow, wireless capabilities are competing for the bandwidth necessary to handle the expanding flow of information society has come to expect. As consumer usage has come to drive electronic development, the military also finds itself in the position of adopting and adapting commercial technology [8].

Because of many systems that have become electronically controlled, electromagnetic compatibility issue is beginning stage of the basic circuit. Usually there is a main power component and control component in the system. Firstly, it is possible to design the power system. The switching components as transistors, MOSFETs, IGBTs and etc. are indispensable components of the power system. The most important source of electromagnetic noise consists of this switching elements in basic structure. Apart from that, there are important points about circuit design that need to be considered. Designing control system together with the power system is necessary to make design considering the electromagnetic effects. In addition, the power and control system integration must be carried out in terms of electromagnetic compatibility.

In this study, we will try to describe electromagnetic noise problems and to specify precautions to be taken in basic level integrated circuits and we will do some experimental works in this direction.

1. GİRİŞ

Bu çalışma içerisinde başarılı bir baskı devre tasarımı gerçekleştirebilmek için bazı ipuçları ve teknikler anlatılmaktadır. Tasarımlarda genellikle gürültü, analog ölçüm bozulmaları, dijital haberleşme sorunları, elektromanyetik girişim vb. diğer tahmin edilemeyen sorunlar ile karşılaşmaktadır.

Bu doküman içerisinde güç ve toprak bağlantıları, analog ve dijital devre tasarımları, elektromanyetik gürültülü ortamlarda sistem tasarımı ve çok katmanlı devre tasarımları için tavsiyeler bulunmaktadır. Burada belirtilen tavsiyeler genel kurallar niteliğindedir ve tüm devre tasarımları için gerekli olduğu söylenemez.

Genel yerleşim planı olarak güç kaynağı bölümü kapalı ayrı bir alanda, analog devreler ayrı bir alanda ve dijital devreler başka bir bölümde yerleştirilmelidir. Devre elemanları ulaşılabilir test noktalarına sahip olmalıdır. Test noktaları devrenin aynı yüzüne yerleştirilmelidir. Yüksek maliyetli malzemeler soketleri ile monte edilmelidir.

1.1 Tanımlamalar

Elektromanyetik girişim (EMI), Elektrik-elektronik ve elektromekanik sistemlerin çalışırken açığa çıkardıkları elektromanyetik enerji ile veya ortamda mevcut bulunan elektromanyetik enerji ile karşılıklı olarak birbirlerini etkilemeleri ve bu etkileşim sonucunda sistemlerin çalışma performanslarında bozulma veya tamamen çalışamaz hale gelmeleri elektromanyetik girişim olarak adlandırılır.

Girişim, elektrik ve elektronik cihazların performansında bozulmaya, istenmeyen tepkiler vermesine veya hatalı işlemesine yol açan radyo frekanslarında doğal veya insan kaynaklı her türlü bozucu etki, işaret ve emisyonudur.

Burada üç ana unsur vardır. Kaynak, kuplaj yolu ve etkilenen sistem. Kaynak girişim enerjisini yayan, kuplaj yolu girişim enerjisini taşıyan ve etkilenen sistem girişim enerjisinden etkilenen bileşenlerdir.

Elektromanyetik uyumluluk (EMC), bir bileşenin kendi içinde doğru çalışır iken diğer sistemlerin çalışmasında bir bozucu etki oluşturmaması ve diğer sistemlerden gelebilecek bozucu girişimlerden etkilenmemesidir.

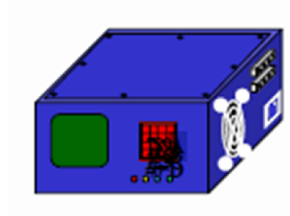
2. STANDARTLAR

Standartlar ürünlerin kalitesini belirleyen temel unsurlardır. Standartlarda iki önemli unsur yer alır. Test sınır değerleri ve test yöntemleri standartlarda tanımlanan iki önemli unsurdur. Standartları genel olarak askeri ve ticari standartlar olarak iki ana başlık altında değerlendirebiliriz.

2.1 Askeri Standartlar

Askeri standartlar ABD Savunma Bakanlığı kaynaklıdır. Temel iki standart vardır. Cihaz seviyesinde MIL-STD-461 ve sistem seviyesinde MIL-STD-464 standartları mevcuttur [5], [6].

Cihaz olarak güç kaynağı, ataletsel ölçüm ünitesi veya kontrol bilgisayarı gibi birimleri düşünebiliriz. Şekil 2.1’de örnek bir cihaz gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.1 : Cihaz [11].

Sistem olarak ise tüm bu cihazların bir arada bulunduğu ana yapı, örneğin bir helikopter düşünebiliriz. Şekil 2.2’de örnek bir sistem gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 2.2 : Sistem [11].

2.2 Ticari Standartlar

Sivil standartlar hem uluslararası hem de ülkelerin ulusal otoriteleri tarafından geliştirilmiştir.

Uluslararası kuruluşlar:

- CISPR (International Special Committee on RFI)
- IEC (International Electrotechnical Commission)
- ISO (International Organization for Standardization)

Ulusal kuruluşlar:

- FCC (ABD)
- ANSI (ABD)
- SAE (ABD)
- VDE (Almanya)

Ticari alanda kullanılan temel elektromanyetik uyumluluk standartları aşağıdaki gibidir:

IEC61000-3-2 (Harmonik)

IEC61000-3-3 (Flicker)

IEC61000-4-2 (ESD)

IEC61000-4-3 (RI)

IEC61000-4-4 (EFT)

IEC61000-4-5 (SURGE)

IEC61000-4-6 (CI)

IEC61000-4-8 (Manyetik RI)

IEC61000-4-11 (Voltage Dips/Interruptions)

3. GİRİŞİM PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜMLERİ

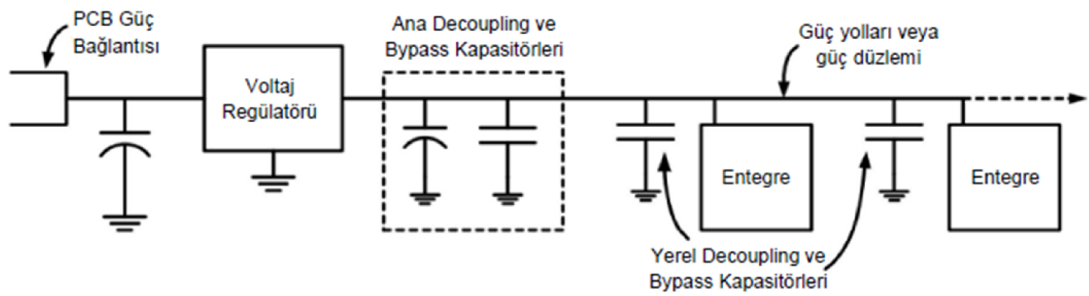
Bu bölümde karşılaşılan çeşitli gürültü problemleri ve bu problemler ile ilgili alınabilecek önlemleri açıklayacağız. Öncelikli olarak temel olarak her yapıca bulunan güç kaynaklarından başlayacağız.

3.1 Güç ve Toprak

Tüm gömülü sistemler bir güç kaynağı ve akımın döndüğü toprak döngüsü üzerine yerleştirilen devre elemanlarının bulunduğu devrelerden oluşmaktadır. Aynı güç kaynağını ve toprak bağlantısını kullanan bileşenler çalışırken birbirlerini etkileyebilirler. Bu etkiler tamamen yok edilemese de kabul edilebilecek, devrenin doğru çalışmasını etkilemeyecek seviyeler indirilmesi gerekmektedir.

3.1.1 Güç Kaynakları

Güç kaynakları; hem kaynak tarafını hem de yük tarafının ihtiyacını karşılayacak şekilde belirlen seviyede voltaj ve akım sağlayan birimlerdir. İdeal bir güç kaynağı ani akım değişimlerinde belirlenen voltajı olduğu gibi sağlamaktadır. Fakat gerçekte ise ideal olmayan davranışlar sergilemektedir. Ani bir akım değişikliği ve bunun sonucunda oluşan gürültü; bu güç hattına bağlı cihazları, güç hattındaki voltaj seviyesini etkilemektedir. Şekil 3.1’de güç kaynağında yer alan tipik bileşenler görülmektedir.

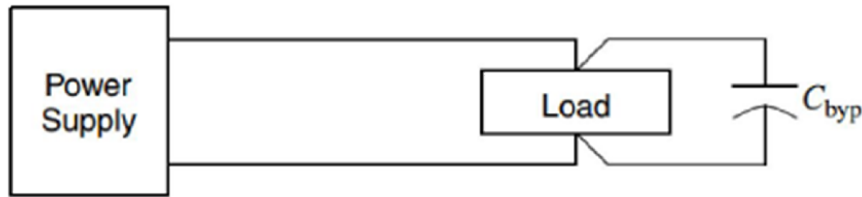


Şekil 3.1 : Baskı devre güç kaynağı tipik bileşenleri [11].

Devre üzerinde genellikle voltaj regülatörü olarak anahtarlamalı DC-DC dönüştürücü veya lineer (Low Dropout Regulators, LDOs) bulunmaktadır. Anahtarlamalı regülatörler lineer regülatörlere göre daha verimli çalışmaktadır. Bu yüzden güç dönüşümlerinde öncelikli olarak anahtarlamalı regülatör yapısı kullanılmaktadır. Fakat anahtarlamalı güç kaynakları yüksek frekanslı gürültüler oluşturmaktadır. Lineer tipte LDO regülatörlerin oluşturduğu gürültüler daha azdır. Bu gürültüler filtrelerle ve bypass kondansatörleri ile azaltılabilir. Kondansatörler stabilizasyonun sağlanması için önemli rol oynamaktadır. Bulunduğu bölgelerde yerel enerji deposu gibi kullanılmaktadır.

3.1.1.1 Bypass

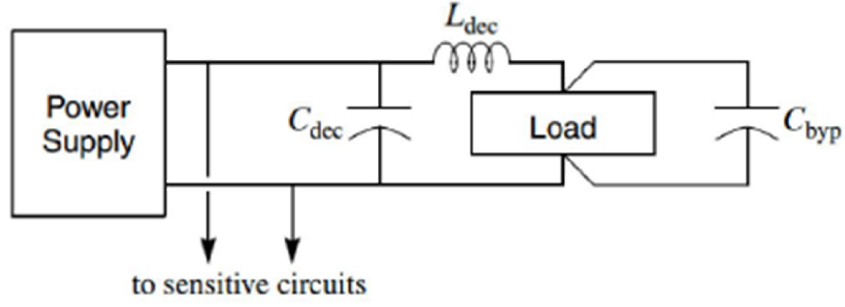
Genellikle bir kondansatör ile yüksek empedanslı bir yol üzerinden yüksek frekanslı akımların bypass ile yönü değiştirilerek azaltılması işlemidir. Diğer bir şekli ile anlık akım yükselmeleri yerel olarak yerleştirilmiş olan kondansatörlerden sağlanır ve ana besleme hattının etkilenmesi engellenir. Şekil 3.2’de bypass kondansatörü tipik kullanımını görülebilir.



Şekil 3.2 : Bypass örnek uygulama gösterimi [11].

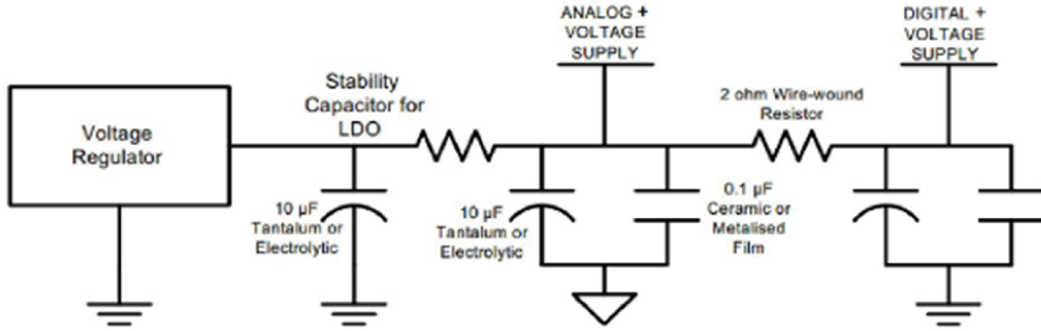
3.1.1.2 Decoupling

Voltaj regülatörleri çıkışında bulunur ve büyüklüğü bypass kondansatörlere göre tipik olarak 10 kat daha fazladır. Kaynak birden çok devreye gittiğinden dolayı anlık yükselmeleri karşılayabilmesi için değeri daha büyük seçilmektedir. Regülatör kataloglarında kullanılması tavsiye edilen kapasitörün özellikleri genellikle belirtilmektedir. Aşağıdaki şekilde tipik kullanım gösterilmektedir. Ayrıca ortak bir hat üzerindeki iki devreyi izole etmek içindir. Bir devreden başka bir devreye gürültü aktarımını önlemek için kullanılır. Şekil 3.3’de farklı devreler ile olan bağlantı ve decoupling kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Decoupling örnek uygulama gösterimi [11].

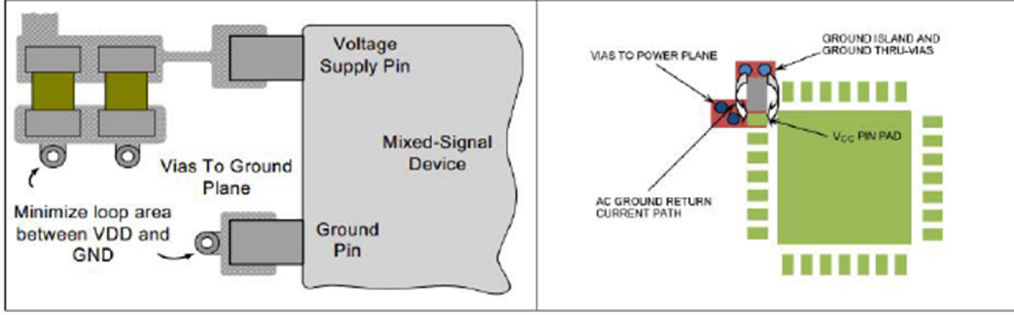
İyi bir güç kaynağında hem bypass hem de decoupling kondansatörleri gerekli yerlerde kullanılarak tasarım yapılır. Şekil 3.4’de bütün tipik karma kullanım örneği görülmektedir.



Şekil 3.4 : Decoupling, bypass ve izolasyon birlikte örnek kullanımı [11].

3.1.1.3 Bypass ve Decoupling Kondansatörleri Tipik Yerleşim Bölgesi

Bypass kapasitörleri ilgili devre elemanının besleme bağlantısı ile toprak bağlantısı arasında devre elemanına en yakın olacak şekilde yerleştirilmelidir. Aynı şekilde decoupling kapasitörleri ilgili regülatör elemanlarının bacak bağlantılarına en yakın şekilde yerleştirilmelidir. Decoupling kapasitörü olarak genellikle tantal veya elektrolitik tipte kondansatörler kullanılmaktadır. Entegre ve diğer devre elemanlarında kullanılacak bypass görevi için genellikle seramik kondansatörler kullanılmaktadır. Şekil 3.5’de bypass ve decoupling kondansatörlerinin devre üzerinde kullanıldıklarında tasarımda yerleştirilmesi tavsiye edilen bölgeler görülmektedir.

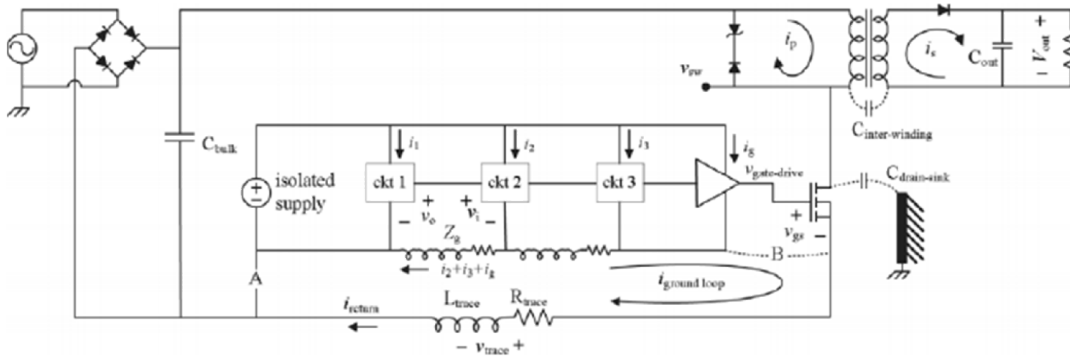


Şekil 3.5 : Bypass veya Decoupling kapasitörü tipik yerleşimi [11].

Güç kaynağı devre üzerinde ilgili bileşenlere ulaştırılmak istendiğinde; ayrı ayrı veya uzatılmış yollar ile bağlanması yerine devrede güç düzlemi oluşturarak bu bağlantıların gerçekleştirilmesi daha uygundur. Bu sayede akım döngüsü en kısa yol üzerinden gerçekleşebilmektedir.

3.1.1.4 Flyback dönüştürücü

Flyback dönüştürücü uygulamalarında trafoda sargılar arasında “inter-winding capacitance” olarak isimlendirilen bir kapasite değeri oluşmaktadır. Aşağıdaki şekilde flyback dönüştürücü genel yapısı gösterilmektedir. Devre üzerindeki anahtarlama elemanı kapatıldığı zaman depolanan enerjinin bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Bunun için anahtarlama elemanı üzerine “snubber” veya primer sargısı üzerine “diode-clamp” bağlantısı gerçekleştirilebilir. Şekil 3.6’da tipik bir flyback dönüştürücü yapısı görülmektedir.

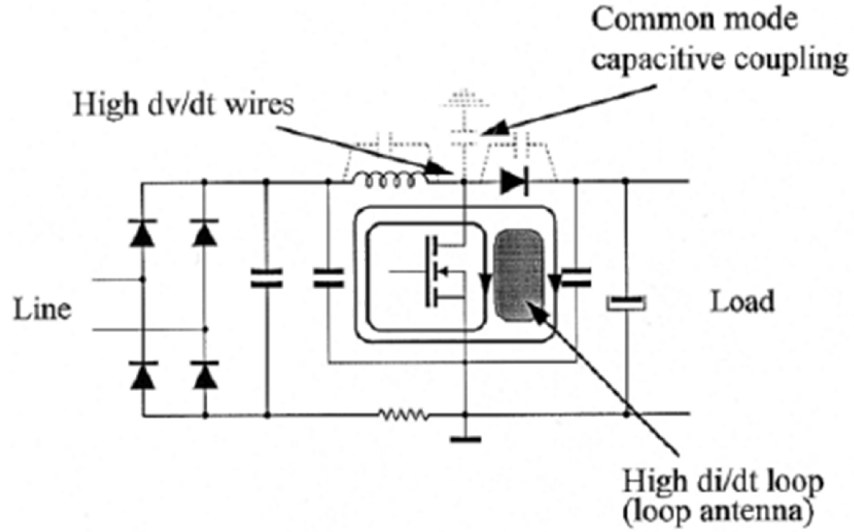


Şekil 3.6 : Flyback dönüştürücü genel yapısı [10].

Trafodan akan akım birden kesildiğinde anahtarlama elemanının (mosfetin) drain ucunda yüksek dV/dt oluşmaktadır. Drain ucunda anahtarlama elemanı ile soğutucu arasında istenmeden oluşan kapasite vardır. Yüksek dV/dt yüzünden C_{drain_sink} kapasitörü üzerinden toprağa doğru ortak mod (common mode) akımı akmaktadır.

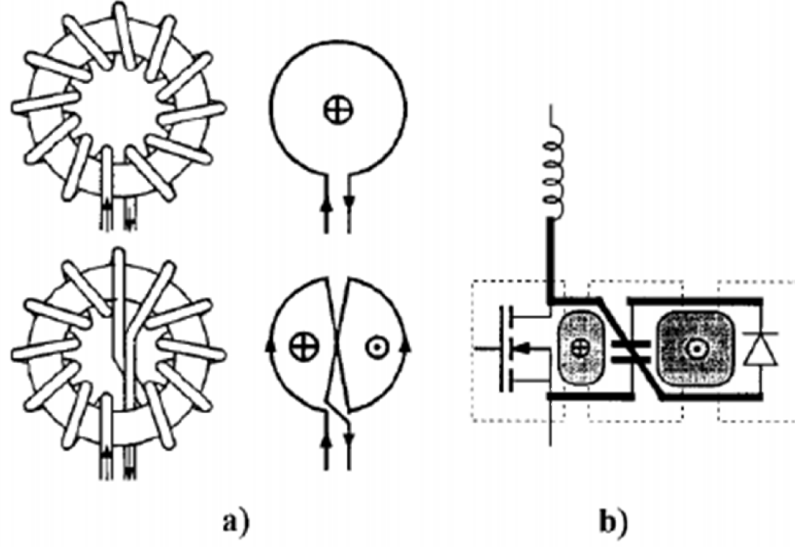
Ayrıca burada oluşan yüksek dV/dt yüzünden Cinter_winding kapasitörü üzerinden indüklenen ek bir ortak mod akımı oluşmaktadır.

Güç elektroniğinde elektromanyetik girişim kaynakları; zamanla değişen gerilim ve akımlardır. Bu girişimlerin kuplaj yolları ise parazitik ve modellenmemiş empedanslar boyuncadır. Bu kuplajları engelleyebilmek için yüksek gerilim değişimlerinin (yüksek dV/dt) bulunduğu düğümler (noktalar) ve yüksek akım değişimlerinin (yüksek di/dt) bulunduğu döngüler belirlenir. Burada bulunan devre elemanları mümkün olduğunca yakın yerleştirilir ve akım döngüleri mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Şekil 3.7’de yüksek akım değişimleri ve yüksek voltaj değişimlerinin yaşandığı durumlar gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Tipik bir boost dönüştürücü üzerindeki kritik noktalar [10].

Bypass kapasitörleri üzerinden yüksek di/dt akım döngüleri oluşuyor. Bu alan küçük tutularak eşdeğer “loop anten” etkisi azaltılabilir. Buradaki amaç iletimle ve yayılımla oluşan elektromanyetik etkiyi azaltmaktır. Bu etkiyi diğer bir şekilde azaltabilmek için güç dönüştürücüde kritik devre yollar mümkünse burgulu (twist) şekilde bağlanabilir, ayrıca toroidal endüktör sarımı kullanılabilir. Böylelikle yayılım yapan alanlar oldukça küçültülmüş olmaktadır. Şekil 3.8’de bu yapıların dösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.8 : Yayılım yapan alanların burgulu akım yolu ile azaltılması, a) toroidal ekdüktör, b) devre üzerinde [10].

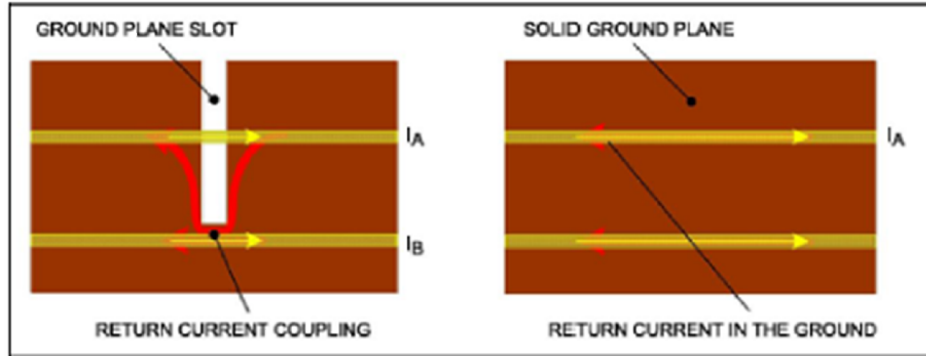
EMI yayılım gerçekleştiren bu tarz devrelerde bileşenlerin yerleşimi ve yolların çizimi gerçekleştirilirken; EMI duyarlı voltaj referans elemanları, geri besleme devreleri, akım vb. ölçüm devreleri, PWM kontrol devreleri, saat (clock) sinyalleri göz önüne alarak gerçekleştirilmelidir.

Ayrıca kapı sürücü devrelerinde de yüksek tepe değerli akımlar oluşmaktadır. Devreyi mümkün olduğunca küçük alanda yapmak gerekiyor. Snubber devresi eklendiği zaman yakınlık faktörü daha da önem kazanıyor. Snubber devresi anahtarlama elemanının açılma süresini yavaşlatmaktadır. Böylelikle güç diyodundaki toparlanma akımı azalmaktadır. Ayrıca VGS gerilimindeki dalgalanmalı düzeltmekte ve oluşan yüksek frekanslı gürültüleri azaltmaktadır.

3.1.2 Toprak Bağlantıları

Toprak bağlantıları da devreler için gürültü kaynağı olabilir ve devre elemanlarını etkileyebilir. İdeal toprak bağlantıları eş potansiyele sahiptir ve devrenin gerilim değeri akıma bağlı olarak değişmemektedir. Fakat gerçekte toprak bağlantılar karakteristik empedansa sahiptir ve gerilim değeri akım değeri ile değişmektedir. Bu ideal dışı davranışı minimize etmek için dikkatli tasarım gerekmektedir.

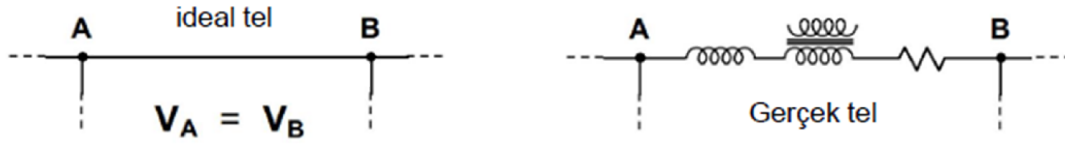
Bazı devrelerde toprak bağlantıları bir yol veya tel üzerinden yapılırken genellikle toprak bağlantısı için bir toprak düzlemi oluşturulmaktadır. Böylelikle devre üzerinde akan akımın dönüş yolu en kısa ve en yakın yerden gerçekleşmektedir. Toprak düzlemi düşük empedans karakteristiği sergiliyor ve böylelikle düzlemin her yerinde neredeyse aynı referansa sahip noktalar oluşuyor. Devre üzerinde akan akımın dönüşü toprak düzlemi üzerinden olacağından, devre üzerinden çizilecek yol toprak düzlemindeki bir boşluğun üzerinden geçirilmemeli veya toprak düzleminde o yolun altında boşluk olmamalıdır. Şekil 3.9'da akımın gidiş yolları (sarı renkli yollar) ve dönüş yolları (kahverengi toprak düzlemi üzerinden kırmızı yollar) gösterilmiştir. Görüldüğü gibi toprak düzlemi üzerinde bırakılan boşluk dönen akımın yönünün değişmesine ve başka yollara akuple olmasına neden olabilmektedir. Şekil 3.9'da bu duruma ait bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 3.9 : Devre üzerinden akan akım ve toprak düzlemi üzerinden dönüşü [12].

Toprak düzlemi devre üzerinde veya iç katmanda mümkün olabildiğince büyük yapılmalıdır. Mümkünse devre üzerinde yer alan boşluklarda toprak düzlemleri ile doldurulmalıdır. Hiçbir bakır düzlemi boşta bırakılmayıp toprak ile bağlantısı yapılmalıdır. Bu şekildeki bir yapı gürültünün dağılmasına yarayacak ve ayrıca devre üzerinde bulunan bağlantılar için bir nevi gürültü kalkanı olacaktır.

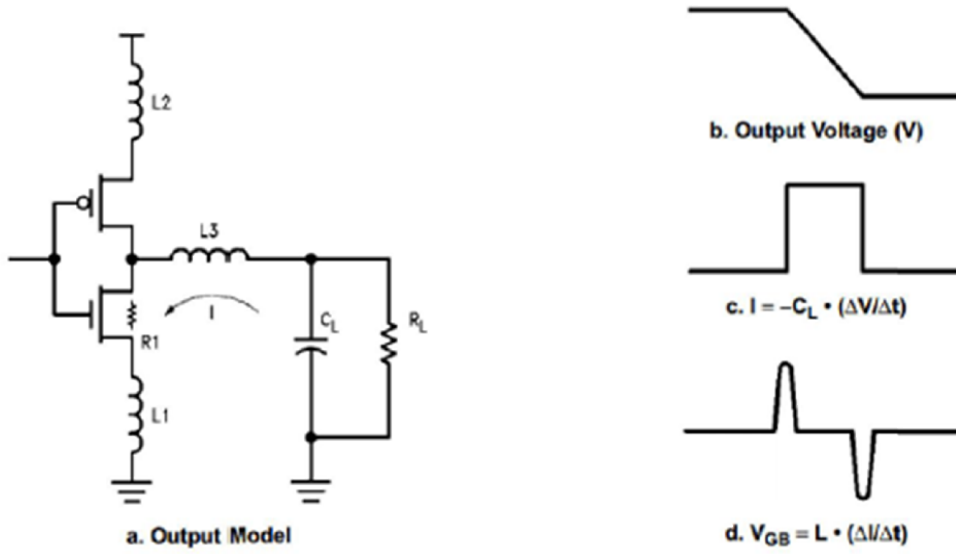
İdeal bir telin iki ucundaki seviyeler eşittir. Gerçekte ise telin bir endüktans ve direnç değeri vardır. Şekil 3.10'da ideal ve gerçek tel modelleri gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : İdeal tel ve gerçek tel modelleri [12].

3.1.2.1 Ground Bounce

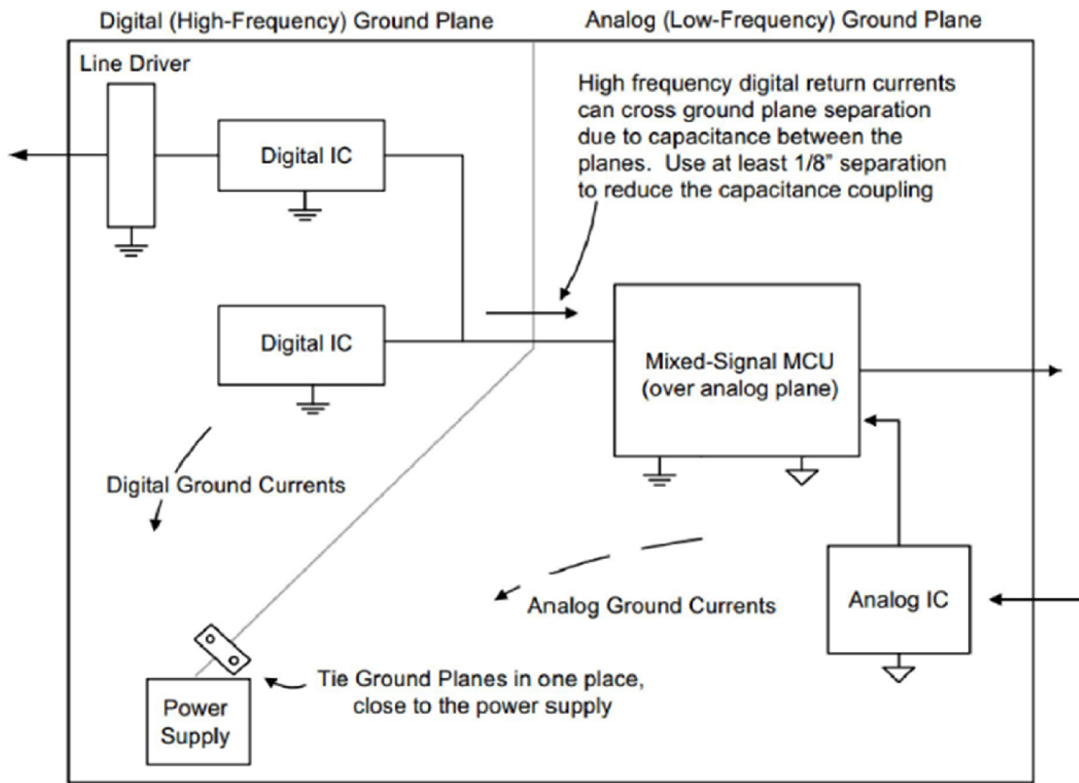
Referansın endüktif etkilerden dolayı değişmesidir. Şekil 3.11'de bu etkinin incelenebileceği tipik yapı görülebilir (a). Yük tarafındaki çıkış değeri yüksek seviyeden düşük seviyeye (b) indiğinde CL kapasitörü boşalmaya başlayacak ve I akımı oluşacak (c). Bu akımın L indüktansını indüklemesi ile (d) grafiğinde gösterilen gerilim farkları oluşacak.



Şekil 3.11 : Grounding bounce devre modeli [12].

3.1.2.4 Karışık Sinyal Barındıran Devre Yapıları

Karışık sinyal barındıran yani dijital ve analog sinyal barındıran devrelerde analog devre akım dönüş yolları ile gürültülü dijital devre akım dönüş yolları ayrılmalıdır. Bu yöntem analog ölçüm performansını arttıracaktır. Analog ve dijital devre toprak bağlantısı tek noktadan güç kaynağına yakın bir yerden yapılmalıdır. Şekil 3.14’de analog ve dijital devreler için tipik bağlantı şekli gösterilmiştir. Analog ve dijital sinyallerin bir arada bulunduğu işlemci (MCU) birimi tamamıyla analog kısımda veya dijital bağlantıları kısmı dijital toprak düzlemi üstüne gelecek şekilde yerleştirilebilir.



Şekil 3.14 : Dijital ve Analog devre toprak düzlemleri [1].

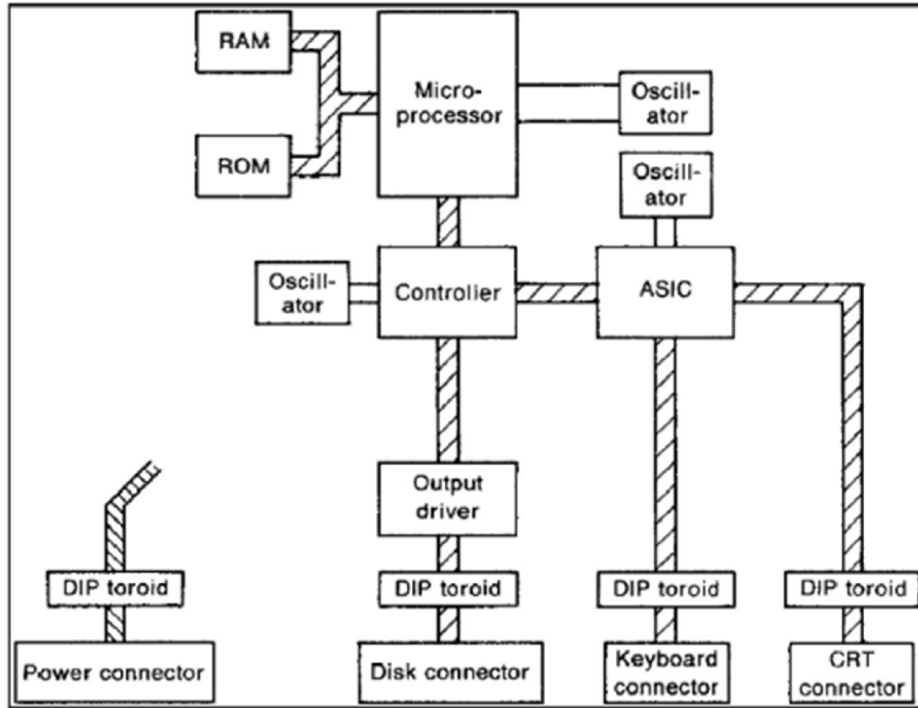
Dijital ve analog devreleri tek bir toprak düzlemine yerleştirmek durumunda kalındığında analog ve dijital akım dönüşleri birbirlerini minimum etkilemelidir. Bu doğrultuda analog bir devre elemanı dijital bir devre elemanı ile onun güç kaynağı arasına yerleştirilmemelidir. Dijital elemanların akım dönüşleri analog elemanların toprağını bozabilir. Genellikle yüksek frekanslı elemanlar, düşük frekanslı elemanlara göre güç kaynağına daha yakın yerleştirilirler. Mümkünse her bir elemanın toprak düzlemi üzerindeki akım dönüş yolları düz çizilmeye çalışılmalıdır.

Analog dijital dönüştürücünün (ADC) voltaj referansının toprağı ile analog girişlerin toprağı aynı seviyede olduğunda ADC ölçümleri daha kesin olabilir. Bu iki toprak arasındaki seviye farkı toprak düzleminde analog ölçüm devrelerinden geçecek şekilde asimetrik akım akmasına neden olur. Bu nedenle bir çok gömülü sisteme analog devre toprağı ile dijital devre toprağı güç kaynağına yakın bir bölgede bağlanır.

Anahtarlama güç kaynağı bulunan devrelerde analog-dijital dönüştürücünün (ADC) örnekleme zamanı ile güç kaynağı anahtarlama süresi senkronize edildiğinde, ADC performansı güç kaynağı gürültülerinden en az şekilde etkilenir.

Devre bağlantıları oluşturulurken genellikle öncelikli olarak analog tasarım ve sinyaller, sonrasında dijital devre ve sinyaller son olarak da toprak düzlemi ve kalan yollar düşünülerek tasarım gerçekleştirilir. Dijital devrelerde ise öncelikli olarak "bus" bağlantıları ve kritik "clock" bağlantıları yapılır. Dijital devrelerde empedans kontrolü ile aynı şekilde yayılım gecikmesi (propagation delay) düşünülerek tasarım gerçekleştirilir.

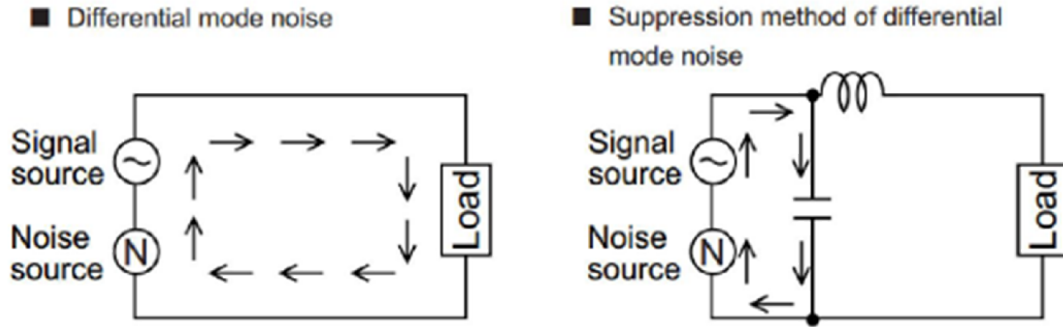
Bir dijital devre tipik olarak işlemci, saat devresi (clock, osilatör), hafıza birimi, giriş çıkış sürücü devreleri ve giriş çıkış bağlantı konektörlerinden oluşmaktadır. Şekil 3.15'de dijital devreler için tipik bir yerleşim şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Dijital devre için tipik bir yerleşim gösterimi [1].

3.1.2.5 Ayrık mod

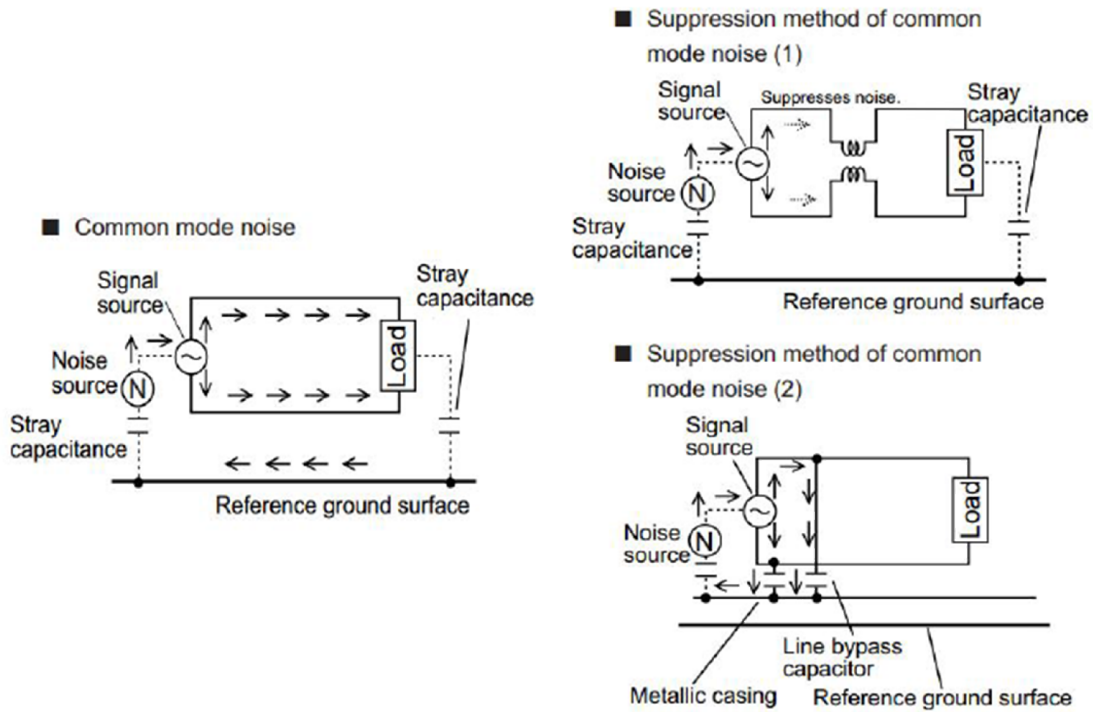
Ayrık mod (Differential Mode) gürültüsü; gürültünün besleme hattından ilerleyip toprak hattından geri dönen gürültüdür. Bu tip gürültü sinyal hattına veya besleme hattına filtre koyularak sönmülenebilir. Şekil 3.16’da bu durum gösterilmektedir.



Şekil 3.16 : Ayrık mod gürültüsü ve bastırma yöntemi [11].

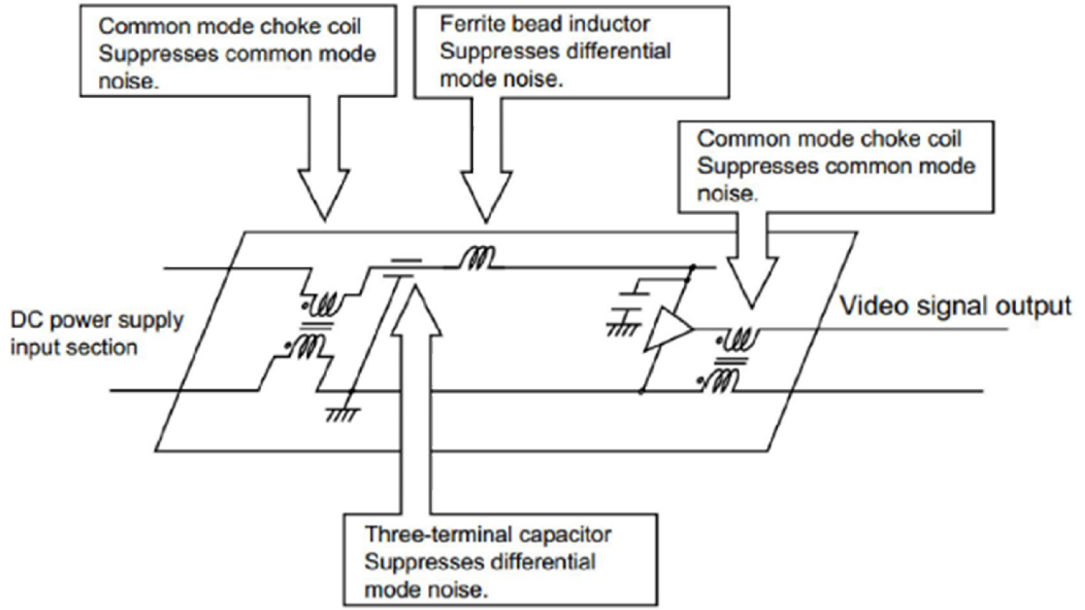
3.1.2.6 Ortak mod

Ortak mod (Common Mode) gürültüsü; besleme veya sinyal hattı ile toprak hattı ile aynı yönde ilerleyen gürültüdür. Buradaki gürültü her bir hatta filtre yerleştirilerek sönmülenebilir. Şekil 3.17’de bu durum gösterilmektedir.



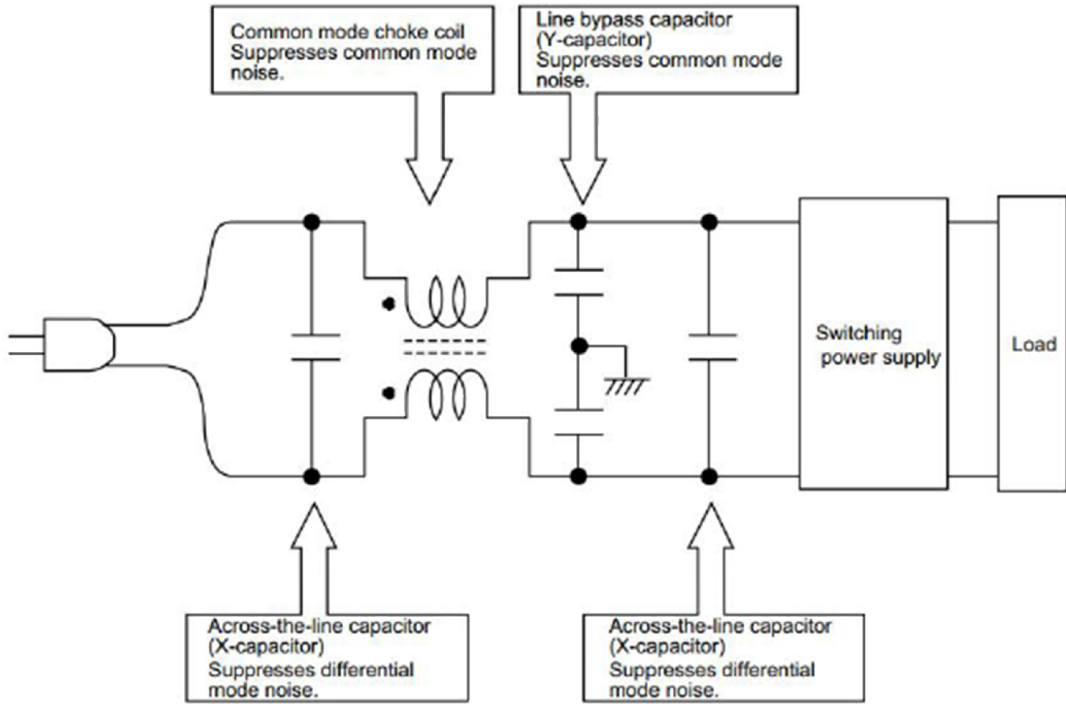
Şekil 3.17 : Ortak mod gürültüsü ve bastırma yöntemleri [11].

DC devrelerde gürültüleri bastırma için şekil 3.18’de gösterilen filtre yapıları ve yöntemler kullanılabilir.



Şekil 3.18 : DC devrelerde gürültüleri bastırma örnekleri [11].

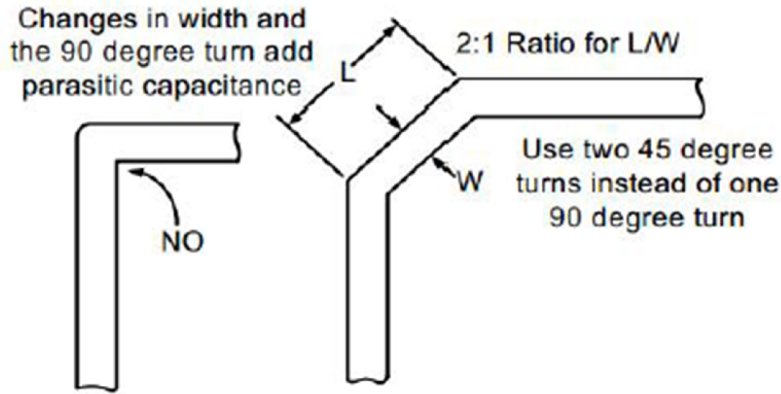
AC güç kaynağı bağlantılarındaki gürültüleri bastırma için şekil 3.19’da gösterilen filtre yapıları ve yöntemler kullanılabilir.



Şekil 3.19 : AC güç kaynağındaki gürültüleri bastırma örnekleri [11].

3.2 Baskı Devre Genel Özellikleri

Baskı devreyi oluştururken en önemli özelliklerden birisi devre elemanlarının yerleşimidir. Bu yerleşimin ardından devre elemanları bağlantıları gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada bağlantı yollarının özellikleri önem kazanmaktadır. Bağlantı yolları çizilirken doksan derece eğimli yollardan kaçınılmalıdır. Akımın iletken üzerindeki ilerleyişi bir ırmak yolundaki suyun akışına benzetilebilir. Bu yüzden keskin dönüşlerde akım yığılmaları yaşanacaktır ve yüksek elektrik alan oluşacaktır. Keskin köşeler yerine 45 derecelik köşe veya yuvarlatılmış yumuşak geçişler kullanılmalıdır. Şekil 3.20’de dikkat edilmesi gereken çizim gösterilmiştir.



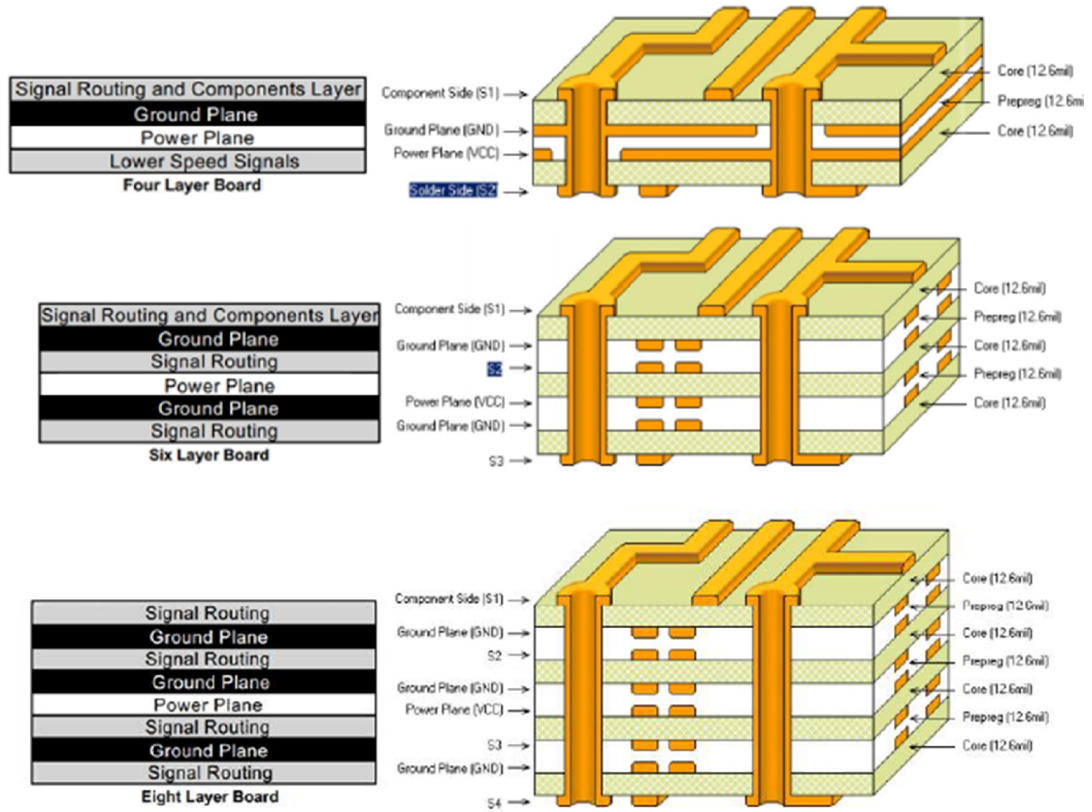
Şekil 3.20 : Bağlantı yollarının çizimi [12].

Bağlantı yolları gerçekte bir iç dirence ve endüktansa sahiptir. Bu yüzden bağlantı yollarını mümkün olduğunca kısa tutmak gerekmektedir.

Bağlantı delikleri (via); bir sinyali bir katmandan başka bir katma taşıırken “via” bağlantısı kullanılmaktadır. Via bağlantıları iletim hatları üzerinde ek bir indüktans ve kapasite oluşturmaktadır. Buradaki indüktans gürültü, yansımalar ve EMI oluşturmaktadır. Bu yüzden via adetlerini mümkün olduğunca az tutmak gerekmektedir.

Çok katmanlı devre tasarımı; genellikle çok katlı devreler 2,4,6 veya 8 katmanlı olarak üretilmektedir. Çok katmanlı devrelerde güç ve toprak düzlemi oluşturma imkanı bulunmaktadır. Bu yüzden tasarlanan devreleri en az 4 katmanlı düşünüp güç ve toprak düzlemleri oluşturmada fayda vardır. Böylelikle gürültüler ve EMI yayılımları azalacaktır. 4, 6 ve 8 katmanlı devreler örnek olarak katmanların

ayarlanması gereken özelliklere göre konfigürasyon tavsiyeleri şekil 3.21’de görülebilir.



Şekil 3.21 : 4, 6 ve 8 katmanlı devreler için konfigürasyon tavsiyeleri [12].

Prototip devrelerde kolaylık sağlaması için test noktaları yerleştirmekte fayda vardır.

İşlemcilerin reset bağlantıları serbest olarak bırakılmamalıdır.

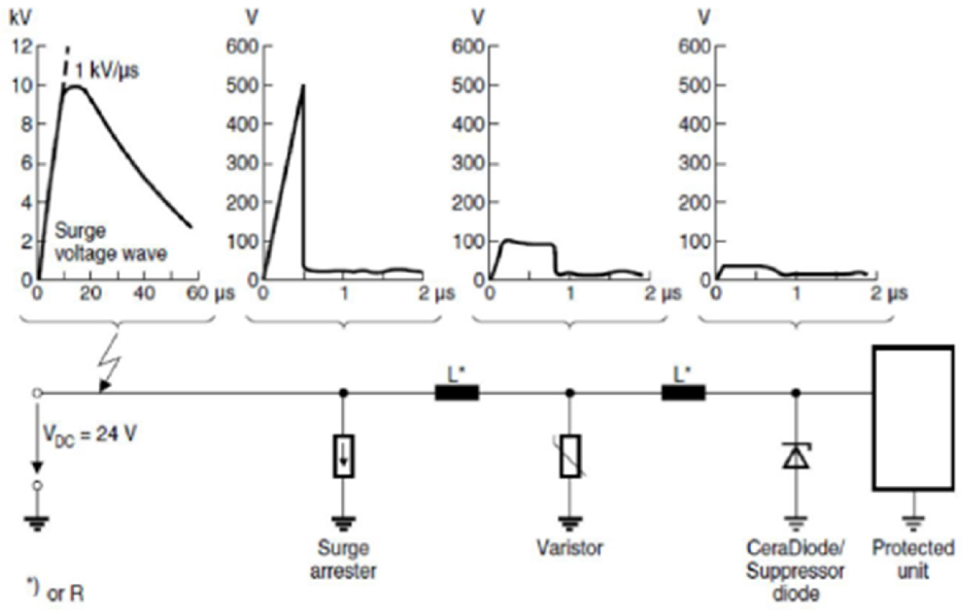
Devreler harici bağlantılardan izole edilmeli veya filtrelenmeli ya da koruma altına alınmalı.

3.2.1 Galvanik izolasyon

Devrelerin fiziksel olarak ayrılması anlamına gelir. Genellikle optik izolasyon olarak veya trafolar ile yapılmaktadır. Bu izolasyonlar Ground Loop ve ESD problemlerini önlemektedir.

Seri bir direnç veya indüktör ile ESD ile yüklenen akım sınırlanabilir. Transorb, TVS diyotlar, varistörler veya gazlı desarj tüpleri gibi koruyucu elemanlar, harici bağlantıların devreye ilk bağlandığı noktalara yerleştirilerek ani gerilim

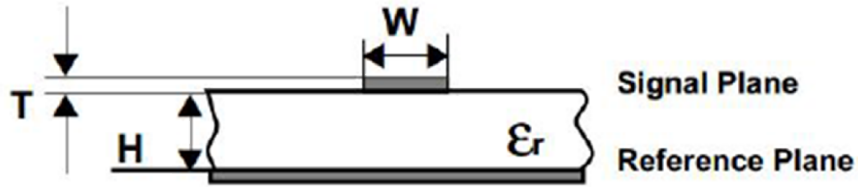
yükselmelerine karşı koruma sağlayabilir. Şekil 3.22’de aşırı gerilim koruyucuların sıralı kullanımına yönelik gösterim bulunmaktadır.



Şekil 3.22 : Sıralı koruma gösterimi [12].

3.2.2 Mikroşerit hat

Mikroşerit hat (microstrip line); referans toprak düzlemi üzerinde, genellikle FR4 malzeme ile hava arasında bulunan dörtgen şeklinde iletken hatlardır. Hattın üç tarafı düşük ϵ_r ($\epsilon_r = 1$) malzeme ile kaplı, kalan bir tarafı ise yüksek ϵ_r ($\epsilon_r > 1$) değerinde malzeme ile kaplıdır. Şekil 3.23’de mikroşerit hat örneği gösterilmektedir.



Şekil 3.23 : Mikroşerit hat gösterimi [12].

Çok katmanlı devreler mikroşerit hatların çizilmesine olanak tanır. Mikro şerit hatların empedansları kontrol edilebilir. Empedans hesabı şekil 3.24'de gösterilmiştir. Burada Z_0 empedans değeri, T_{pd} yayılım gecikmesi, C_0 hat kapasitesini göstermektedir.

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left[\frac{5.98h}{0.8w + t} \right] \text{ in ohms}$$

$$T_{pd} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \text{ in psec/inch}$$

$$C_0 = \frac{T_{pd}}{Z_0} \text{ in pF/inch}$$

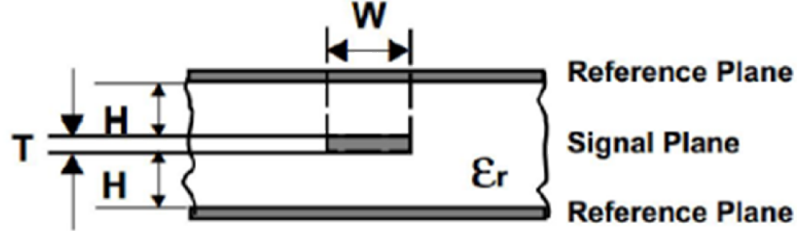
For $\frac{w}{h} < 1$

c = Speed of light in vacuum (3.0×10^8 m/s)
 h = Dielectric thickness, inches
 w = Line width, inches
 t = Line thickness, inches
 ϵ_r = Relative permittivity (dielectric constant) of substrate

Şekil 3.24 : Mikroşerit hat empedans hesaplaması [12].

3.2.3 Şerit hat

Şerit hat (stripline); İki referans toprak düzlemi arasında, etrafında homojen dağılmış yalıtkan malzeme bulunan su yollarıdır. Şekil 3.25'de şerit hat gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.25 : Şerit hat gösterimi [12].

Şekil 3.26'da şerit hat empedans hesaplaması gösterilmektedir.

$$Z_0 = \frac{60 \ln \left[\frac{1.9(2H + T)}{(0.8W + T)} \right]}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ in ohms}$$

$$C_0 = \frac{1.41 (\epsilon_r)}{\ln \left[\frac{3.81H}{(0.8W + T)} \right]} \text{ in pF/in}$$

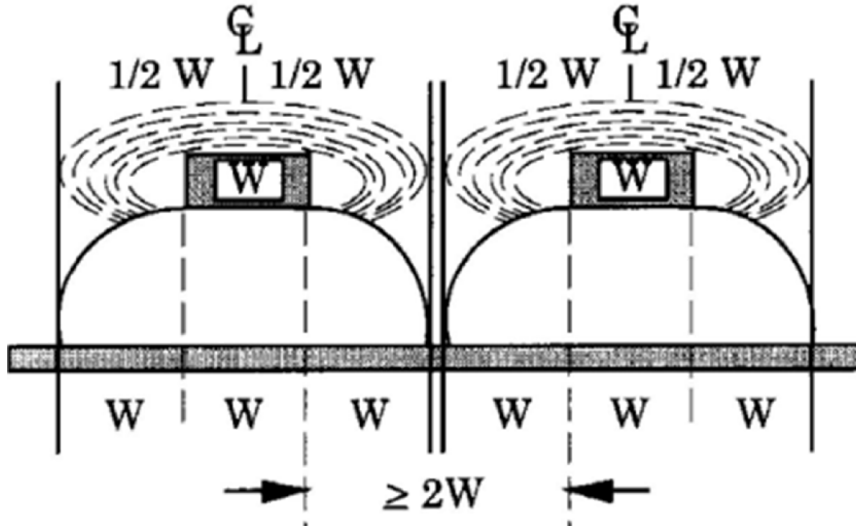
For $\frac{W}{H} < 2$

H = Distance between line and one ground plane
 T = Line thickness inches
 W = Line width inches
 ϵ_r = Relative permittivity of substrate
 pF = Picofarads

Şekil 3.26 : Şerit hat empedans hesaplaması [12].

3.2.4 Çapraz etkileşim

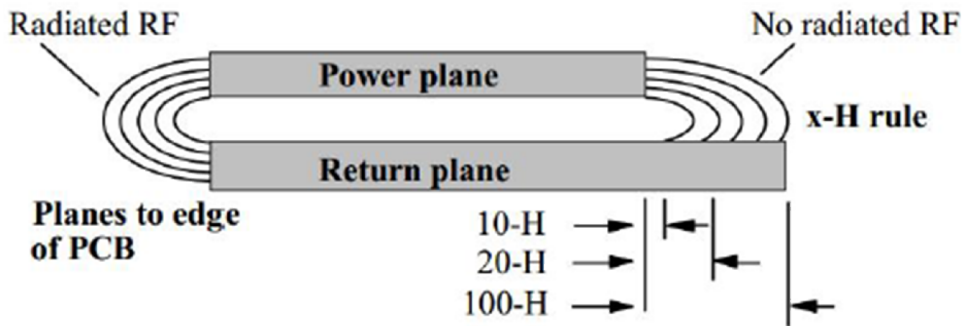
Çapraz etkileşim (Crosstalk); iki hat arasındaki çapraz etkileşimi azaltmak için su yollarının en az 3 katı genişlikte aralık bırakılmalıdır. Şekil 3.27’de bu durum gösterilmektedir.



Şekil 3.27 : Çapraz etkileşim gösterimi ve su yolları arası mesafeler [12].

3.2.5 20-H kuralı

Devrenin kenarında oluşan yayımları azaltmak için belirlenmiş bir kuraldır. Aşağıdaki şekilde kenarlarda oluşan yayılım gösterilmiştir. Devre içerisinde oluşturulan güç düzlemi referans toprak düzleminden, iki düzlem arası mesafenin (H) 20 katı kadar mesafe içeriden oluşturulur. Şekil 3.28’de bu durum gösterilmiştir.



At 10-H, impedance change of the planes is first observed.
At 20-H, we reach the 70% flux boundary.
At 100-H, we approach the 98% flux boundary.

Şekil 3.28 : 20-H kuralı gösterimi [12].

3.2.6 Aspect Ratio

Aspect Ratio; üretilebilirlik ile ilgili bir orandır. Baskı devre kalınlığına bağlı olarak baskı devre üzerinde açılacak minimum delik çapı ölçüsünü belirleyen orandır.

Aspect Ratio = Devre kalınlığı / Delik çapı

6:1 oranı her üretici tarafından gerçekleştirilebilir bir orandır.

8:1 oranı genellikle uyulan ortalama bir orandır.

10:1 oranı yüksek maliyet çıkarabilecek bir orandır.

3.2.7 Genel Bilgiler

Devre üzerindeki termal kaynaklar; regülatörler, transistörler, trafolar, güç dirençleri vb. elemanlardır. Termal etkilenenler; analog entegreler, MOV (metal oksit varistör), transorb, zener diyot, elektrolitik kapasitör vb. elemanlardır.

Bir entegre için genellikle bir tane bypass kapasitörü kullanılır. Tipik değer 100nF'tır. Yüksek frekanslarda 10nF, 1nF gibi değerler kullanılabilir. Düşük frekanslarda ise 1uF, 10uF gibi değerler kullanılabilir.

Bazı uygulamalarda elektrolitik ve seramik kondansatör paralel olarak kullanılabilir. Elektrolitik kondansatör enerji depolaması ihtiyacını ve düşük frekanslardaki gereklilikleri karşılar, seramik kondansatör ise yüksek frekanslar için düşük empedanslı bir yol sağlar.

Film veya mika kondansatörlerin eşdeğer seri direnç değerleri çok düşüktür. Bu tip kondansatörler RC veya RCD snubber devreleri için uygundur.

Bir sinyal FR4 malzemedan üretilmiş bir devrede bakır bir hat üzerinde saniyede yaklaşık 6 inç (yaklaşık 15cm) ilerlemektedir.

3.2.8 Deri etkisi

Deri etkisi (Skin depth);Yüksek frekanslarda akım iletkenin yüzeyinden ilerlemektedir ve bu yüzden daha yüksek empedans ile karşılaşmaktadır. Şekil 3.29'da deri etkisi hesaplaması gösterilmektedir.

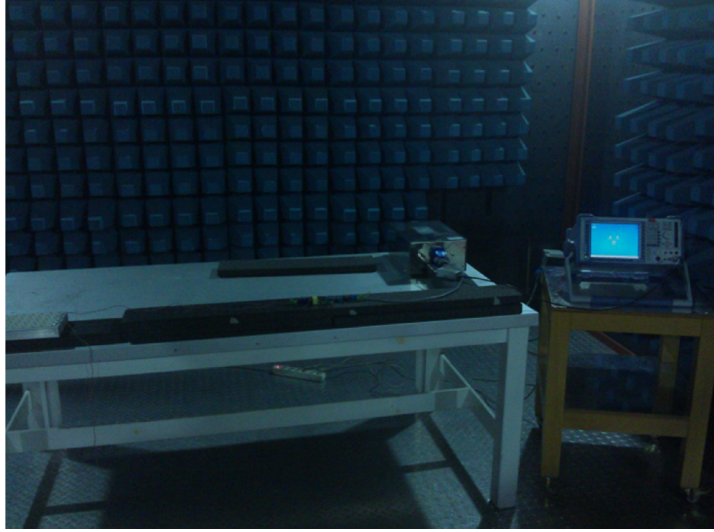
$$\text{Skin depth; } \delta = \frac{6,61}{\sqrt{f}} \quad [cm] = 6,61/\sqrt{Hz}$$

Şekil 3.29 : Deri etkisi hesaplaması [12].

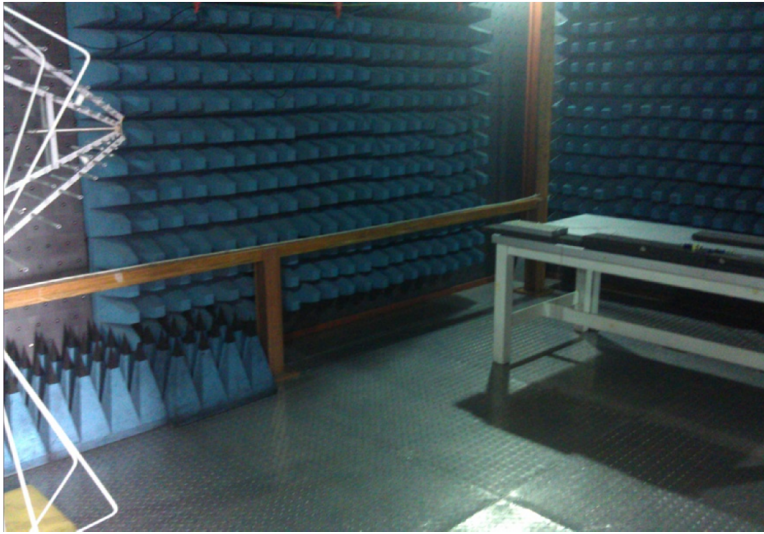
Deri etkisi değeri; iletken yüzeyinden içeriye doğru akım yoğunluğunun %37 azaldığı mesafeyi göstermektedir. Örneğin yüksek frekanslı anahtarlama yapılan bir güç kaynağı trafosu içinde yer alan sargıların kablo kesitleri taşıyacağı akıma göre seçilmektedir. Fakat deri etkisi göz önüne alındığında kablo ne kadar kalınlaşırsa kalınlaşsın akım tüm kesiti kullanmayacağından kalın kablo kullanılması yeterli olmayacaktır. Bu nedenle buradan yapılacak bir hesap ile çalıştığımız frekans değerine göre akımın ilerleyeceği maksimum kablo kalınlığı bulunabilir ve bu kablo kalınlığı çalıştığımız akım için yeterli değil ise kablo sayısı çoğaltılır. Bu tip durumlara özel olarak ‐Litz Wire‐ isminde kablo türü bulunmaktadır.

4.2 Test Ortamı

EMI/EMC testlerinin gerçekleştirilebilmesi için özel ortamlar gerekmektedir. EMC deneyleri; öngörülen askeri ve ticari standartlar uyarınca “tam yansız oda”, “yarı yansız oda”, “açık saha deney alanı” ve “ekranlı odalar” içerisinde gerçekleştirilmektedir. Tam / yarı yansız odalar; harici elektromanyetik girişimlerden izole edilmiş ve içleri elektromanyetik soğurucu malzemelerle kaplanmış özel ortamlardır. Ekranlı odalar ise sadece topraklanmış düz metal plakalardan oluşan harici elektromanyetik girişimlerden izole edilmiş yapıya sahip odalardır [13]. Şekil 4.2’de ve Şekil 4.3’de test ortamları görünümü yer almaktadır.



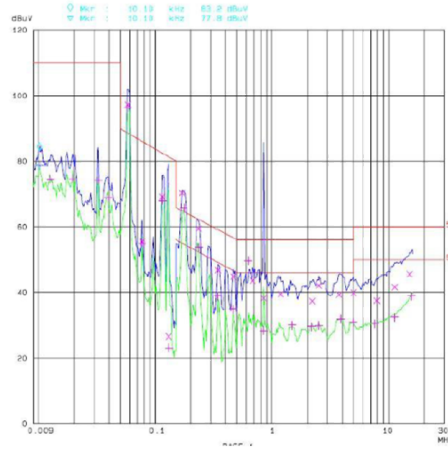
Şekil 4.2 : İletimle yayılım ve iletimle bağımsızlık test düzeni .



Şekil 4.3 : Işınım ile yayılım ve ışınım ile bağımsızlık test düzeni.

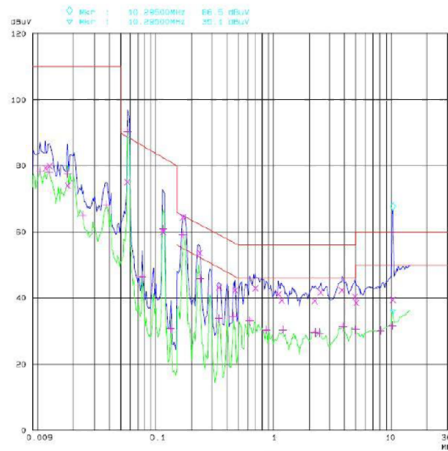
4.3 Sonuçlar

Devre ilk durumda filtreleri monte edilmeyerek nasıl bir sonuç elde edileceği görölmek için test edilmiştir. şekil 4.4’de görölen grafikte üstte yer alan kırmızı çizginin altında değerler elde etmek gerekmektedir. Kırmızı çizgi üstünde bir değer olur ise ürün elektromanyetik uyumlu değil şeklinde değerlendirilecektir. İlk durumda göröldüğu gibi limit üstü birçok değer yer almaktadır ve ilk durumda kötü bir sonuç alınmıştır.



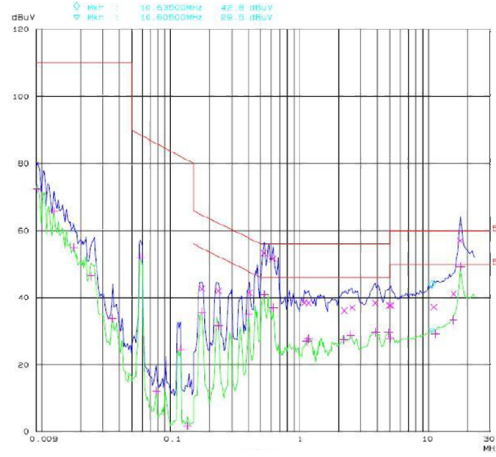
şekil 4.4 : İlk durum iletimle yayınım test sonucu.

İkinci durumda filtrelere geçmeden önce girişte yer alan ana kondansatör kapasitesi iki katına çıkarılarak tekrar bir deney yapılmıştır. Bu durumda ise genel anlamda bir iyileşme yer almamaktadır. şekil 4.5’de göröldüğu gibi bazı frekanslarda azalma, bazı bölümlerde ise artma yaşanmıştır. Giriş ana kondansatörü büyötmek işe yaramamıştır.



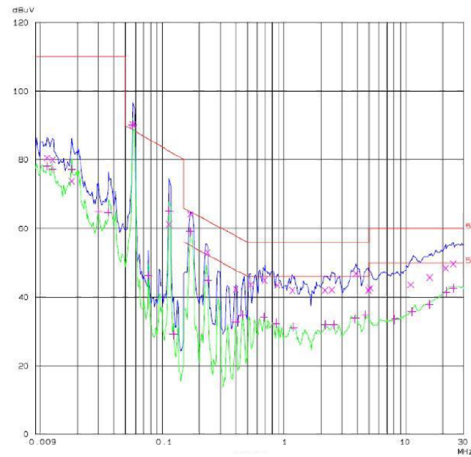
şekil 4.5 : Kondansatör iki katına çıktığında iletimle yayınım test sonucu.

Yeni durumda devrenin girişine hem faz hem de nötr hattına 2mH değerinde bobin bağlanmıştır. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi bobin eklentisinden sonra düşük frekanslardaki değerlerde düşüş yaşanmıştır. Fakat yüksek frekanslarda pek değişiklik olmamakla beraber üst limitin üzerinde hala değerler görülmektedir ve bu da devremizin hala yeteri kadar iyi olmadığını göstermektedir.



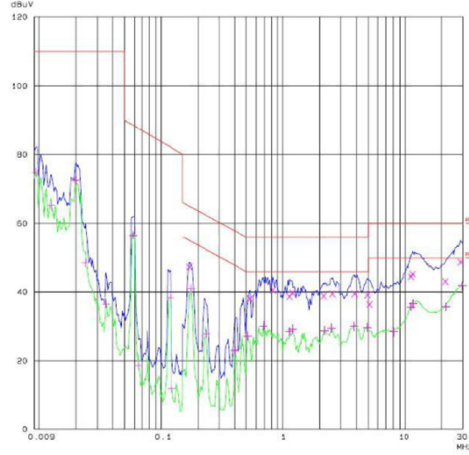
Şekil 4.6 : Giriş faz ve nötr hattına 2mH bobin eklenmesi sonucu.

Diğer bir durumda ise sadece devre çıkışına ortak mod filtresi eklenmiştir ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi bu ekleme ile beraber yüksek frekanstaki değerlerde bir azalma görülmektedir. Düşük frekanslardaki değerler ise ilk durumdaki ile aynıdır bir değişiklik görülmemiştir.



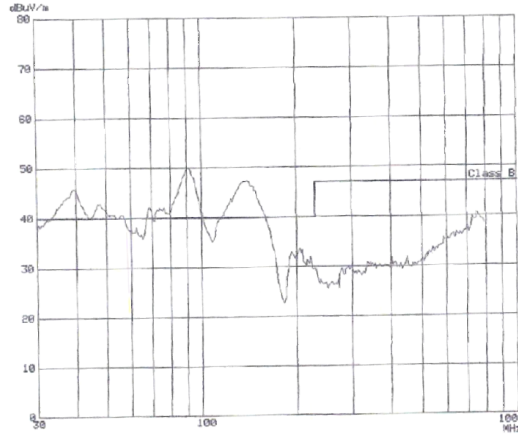
Şekil 4.7 : Çıkışa ortak mod filtresi eklenmesi sonucu.

Şu ana kadar yapılan demelere baktığımızda girişe ve çıkışa ayrı ayrı filtreler koyup sonuçları gözlemledik. Bu durumlar yeterli olmadı ve son durumda hem girişe hem de çıkışa filtrelerimizi ekleyerek deney yaptık. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi hem düşük hem de yüksek frekanstaki limit üstü değerler limit altına indiler ve testi başarı ile geçmiş olduk.



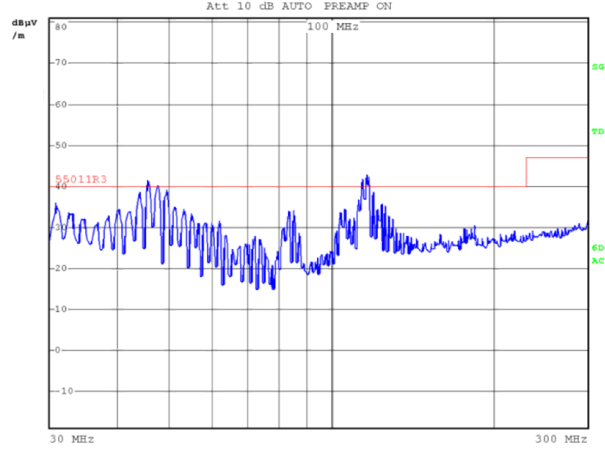
Şekil 4.8 : Giriş ve çıkışa filtre eklenmesi sonucu.

Diğer taraftan ışınlama yayınımla test sonuçları için ilk durum yani hiç filtre bağlanmayan durumdaki sonuç Şekil 4.9’da görülmektedir. Burada görüldüğü gibi düşük frekanslarda limit üstü değerler yer görülmektedir.



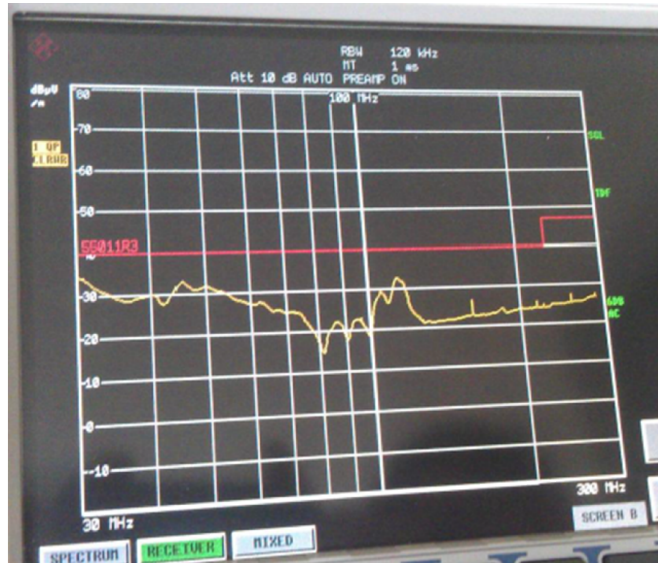
Şekil 4.9 : İlk durum ışınlama yayınımla test sonucu.

İkinci durumda ise sadece giriş eklediğimiz filtremiz ile testimizi yaptık. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi bazı değerler limit üstünde yer almaktadır.



Şekil 4.10 : Giriş filtresi eklenmesi sonucu.

Son olarak yine hem girişe hem de çıkışa filtre eklendikten sonra ışınımla yayınım test sonuçlarına bakıldı. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi değerlerimiz limit altına kalarak sonuç başarılı olmuştur.



Şekil 4.11 : Giriş ve çıkış filtresi eklenmesi sonucu.

Burada değişik kombinasyonlar deneyerek devre girişi ve çıkışına eklediğimiz filtreler ile elde ettiğimiz sonuçları görüş olduk ve sonuç olarak devremizin standartlara uygun hale gelmesini sağladık.

KAYNAKLAR

- [1] **Changlin, Z., Mingxin, H., Xin, L., Liming, D., Tianchi, Y.** (2010) "Electromagnetic compatibility analysis and design for digital signal controllers," *Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on*, vol., no., pp.668,671, 12-16 April 2010
- [2] **Hubing, T ve Orlandi, A.** (2005). "A Brief History of EMC Education," *16th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC*, 2005, pp. 95–98.
- [3] **Ott, H.** (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*, Wiley, 2009.
- [4] **Paul, C.R.** (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Wiley-Interscience, New York, 2006.
- [5] **ANSI C63.12-1999** American National Standard Recommended Practice for Electromagnetic Compatibility Limits, March 2000.
- [6] **MIL-STD-461F (2007)**. Department of Defense Interface Standard Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, December 2007.
- [7] **Caro, A. L.** (2011). Modelling of textile reinforced composite barriers against electromagnetic radiations (yüksek lisans tezi).
- [8] **Pierce, James D.** (2009) **ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) REQUIREMENTS FOR MILITARY AND COMMERCIAL EQUIPMENT** (yüksek lisans tezi)
- [9] **Electromagnetic compatibility** (t.y.) *Wikipedia*. Alındığı tarih: 07.10.2014, adres http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_compatibility
- [10] **Hava, A.** (2013) Elektrikli Motor Sürücüleri Eğitim Notları
- [11] **Üstüner , F.** (2012) EMI/EMC EĞİTİMİ Notları
- [12] **Üstüner , F.** (2012) EMC TASARIMI Notları
- [13] **Elektromanyetik Laboratuvarı** *UME* Alındığı tarih: 06.11.2014 <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarimiz/elektromanyetik-laboratuvari>

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ensar SALİHOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi : TRABZON - OF 21.09.1987

E-Posta : ensarsalihoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı

