

Elektronik Tasarımda Kapasitör Seçimi

İhsan T. Sezgin

www.voltqtech.com

Giriş

Elektronik sistem tasarımında kapasitörler şematik üzerinde çoğu zaman rutin olarak eklenen, değeri yazılıp geçilen pasif bileşenler gibi algılansa da; pratikte sistem kararlılığı, gürültü performansı, güç bütünlüğü ve uzun vadeli güvenilirlik üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Aynı nominal kapasite değerine sahip iki kapasitör; dielektrik tipi, polaritesi, voltaj ve sıcaklık altında sergilediği davranış, ESR ve ESL karakteristikleri ile frekans cevabı bakımından tamamen farklı sonuçlar doğurabilir. Bu farklılıklar göz ardı edildiğinde, kağıt üzerinde doğru görünen bir tasarım; beklenmeyen reset problemleri, aşırı gürültü, kararsız regülasyon veya erken komponent arızaları ile sonuçlanabilir.

Bu doküman, kapasitörlerin temel fiziksel çalışma prensiplerini yeniden anlatmayı amaçlamaz. Bunun yerine, tasarım sürecinde sıkça karşılaşılan “Bu noktada hangi kapasitörü kullanmalıyım?”, “X7R mi X5R mi?”, “Neden hem seramik hem elektrolitik kullanılıyor?”, “Yönlü bir kapasitör burada gerçekten gerekli mi?” gibi sorulara, uygulama bazlı ve mühendislik perspektifiyle cevap vermeyi hedefler. İçerik; şematik ve PCB tasarımı sırasında verilen kararların arkasındaki teknik gerekçeleri ortaya koyarak, kondansatör seçimini ezbere değil, bilinçli ve doğrulanabilir bir mühendislik adımı haline getirmeyi amaçlar.

Bu kapsamda doküman; kapasitör tiplerinin güçlü ve zayıf yönlerini, dielektrik seçiminin sistem davranışına etkilerini, DC bias ve ripple akımı gibi pratikte sıklıkla gözden kaçan parametreleri ve yerleşim kaynaklı riskleri ele alır. Amaç, okuyucuya tek bir “doğru” çözüm sunmak değil; farklı uygulamalar için doğru soruları sorabilen ve doğru bileşeni seçebilen bir tasarım yaklaşımı kazandırmaktır.

Kapasitör Tanımı ve Çalışma Prensibi

Kapasitör, iki iletken plaka arasında yer alan yalıtkan bir malzeme (dielektrik) aracılığıyla elektrik enerjisini elektrik alan formunda depolayan pasif bir elektronik bileşendir. Elektronik sistemlerde temel görevi; ani akım taleplerini karşılamak, gerilim dalgalanmalarını bastırmak ve istenmeyen frekans bileşenlerini filtrelemektir. Bu özellikleri sayesinde kapasitörler; güç dağıtımı, sinyal işleme, zamanlama ve gürültü bastırma gibi pek çok kritik noktada kullanılır. Bir kapasitörün uçları arasına gerilim uygulandığında, plakalarda eşit büyüklükte ancak zıt işaretli elektrik yükleri birikir. Bu yük birikimi, plakalar arasında bir elektrik alan oluşmasına neden olur ve enerji bu alan içerisinde depolanır. Kapasitör doğrudan DC akımı sürekli olarak iletmez; ancak gerilimdeki değişimlere karşılık olarak akım geçişine izin verir. Bu davranış, kapasitörler ani gerilim değişimlerine hızlı tepki vermesini ve yüksek frekanslı bileşenleri etkin şekilde bastırmasını sağlar.

Bu ilişki matematiksel olarak, depolanan yük ile gerilim arasındaki bağlantı üzerinden tanımlanır. İdeal bir kapasitörde depolanan yük miktarı, kapasite değeri ile gerilim arasındaki çarpıma eşittir .

$$Q = C \cdot V$$

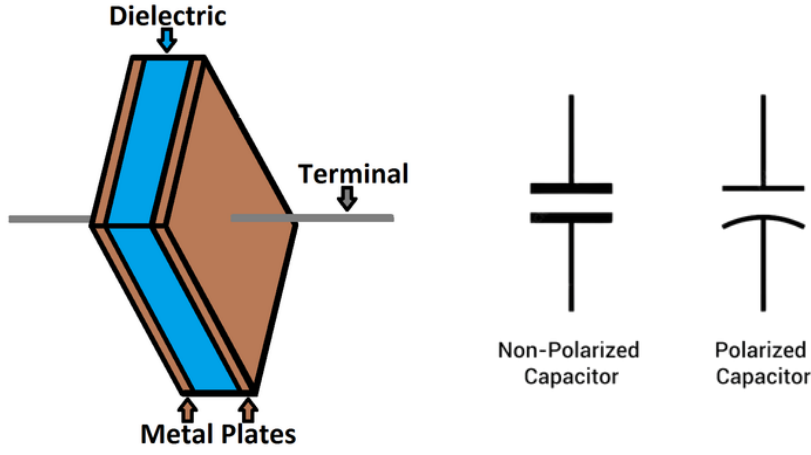
Bu ifade, kapasitenin tek başına mutlak bir büyüklük olmadığını; belirli bir gerilim altında ne kadar yük depolanabildiğini tanımladığını gösterir. Gerilimin zamana bağlı olarak değiştiği durumlarda ise kapasitörden geçen akım, gerilimin değişim hızı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle kapasitörler, sabit DC gerilim altında yalnızca ilk anda akım çekerken; dalgalı veya gürültülü gerilimlerde aktif bir rol üstlenir.

Gerilimin zamana bağlı olarak değiştiği durumlarda kapasitör davranışı akım üzerinden tanımlanır. İdeal bir kapasitörde akım, gerilimin değişim hızı ile doğru orantılıdır:

$$i(t) = C \times \frac{dV}{dt}$$

Kapasitörde depolanan enerji, kapasite ve gerilimle birlikte artar ve bu enerji gerilimin karesi ile orantılıdır. Bu durum, özellikle yüksek voltaj altında çalışan kapasitörlerde voltaj dayanımı, derating ve güvenlik paylarının neden kritik olduğunu açıklar. Pratikte, kullanılan dielektrik malzeme ve üretim teknolojisi; kapasitörün kapasite kararlılığını, frekans davranışını ve güvenilirliğini belirleyen temel unsurlardır.

Bu doküman boyunca kapasitörler, ideal devre elemanları olarak değil; gerçek çalışma koşullarında sınırlamaları olan bileşenler olarak ele alınacaktır. Amaç, çalışma prensibini teorik düzeyde anlatmak değil; bu prensibin tasarım kararlarına nasıl yansıdığını ortaya koyarak doğru kapasitör seçimini mümkün kılmaktır.



Şekil 1. Kapasitör yapısı ve sembolleri

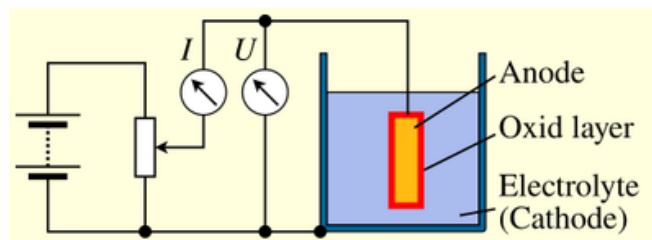
Dielektrik Malzemeler ve Kapasitör Teknolojileri

Kapasitörler çoğu zaman “seramik”, “elektrolitik” veya “tantal” gibi basit tanımlarla ifade edilse de, bu tanımlar tek başına kapasitörlerin elektriksel davranışını açıklamak için yeterli değildir. Bir kapasitörün devre içindeki gerçek performansı; kullanılan dielektrik malzeme, bu malzemenin fiziksel uygulanma biçimi ve kondansatörün üretim teknolojisi ile belirlenir. Bu nedenle kapasitörleri değerlendirirken, yalnızca malzeme adına değil, bu malzemenin hangi teknolojiyle kullanıldığına da bakmak gerekir.

Elektrolitik Kapasitörler

Elektrolitik kapasitörler, dielektriğin elektrokimyasal bir süreçle oluşturulmuş oksit tabakası olduğu kapasitör ailesidir. Bu tanım, hem alüminyum hem de tantal kapasitörleri kapsar. Elektrolitik kapasitörlerin temel avantajı, dielektrik tabakanın son derece ince olması sayesinde küçük hacimde çok yüksek kapasitans değerlerine ulaşabilmeleridir. Bu özellikleri onları özellikle enerji depolama ve düşük frekanslı filtreleme uygulamalarında vazgeçilmez kılar.

Bu ailedeki tüm kapasitörler doğaları gereği polardır. Bunun nedeni, oksit dielektriğin yalnızca doğru polarite altında kararlı kalabilmesidir. Ters gerilim uygulandığında dielektrik bozulur ve kapasitör kalıcı hasar görür. Bu nedenle elektrolitik kapasitörlerin yönlü olduğu bilgisi bir tercih değil, fiziksel bir zorunluluktur.



Şekil 2. Anot Oksidasyonu

A)Alüminyum Kapasitörler

Alüminyum elektrolitik kapasitörlerde anot olarak alüminyum folyo kullanılır ve dielektrik, bu folyonun yüzeyinde oluşturulan alüminyum oksit tabakasıdır. Katot ise sıvı elektrolit veya daha modern tasarımlarda iletken polimer olabilir. Elektrolit sıvı olduğunda kapasitörün ömrü büyük ölçüde sıcaklığa bağlı hale gelir. Zamanla elektrolitin buharlaşması veya kimyasal yapısının bozulması ESR'nin artmasına ve kapasitansın düşmesine yol açar.

Bu kapasitörler yüksek ripple akımına dayanabilir ve DC bias altında kapasitans kaybı göstermez. Ancak ESR ve ESL değerleri seramik ve film kapasitörlere kıyasla yüksektir. Bu nedenle yüksek frekanslı uygulamalarda tek başına yeterli değildirler. Tipik olarak güç kaynaklarının giriş ve çıkışlarında bulk kapasitör olarak, yani düşük frekanslı enerji depolama amacıyla kullanılırlar.



Şekil 3. SMD ve THT Al.Elektrolitik Kapasitör Örnekleri

B)Tantalyum Kapasitörler

Tantal kapasitörler de elektrolitik kapasitör ailesine aittir. Anot olarak sinterlenmiş tantal kullanılır ve dielektrik, tantal yüzeyinde oluşturulan tantal oksit tabakasıdır. Katot malzemesi olarak geleneksel tiplerde mangan dioksit, modern tiplerde ise iletken polimer kullanılır. Elektrolit sıvı olmasa bile, katot yapısı elektrolitik karakter taşıdığı için bu kapasitörler elektrolitik olarak sınıflandırılır.

Tantal kapasitörler, alüminyum elektrolitliklere kıyasla aynı hacimde daha yüksek kapasitans sunar ve ESR değerleri genellikle daha düşüktür. Ayrıca sıvı elektrolit içermedikleri için uzun dönem stabiliteleri daha iyidir. Ancak bu avantajların karşılığında ciddi bir dezavantaj söz konusudur: tantal kapasitörler aşırı gerilime ve ters polariteye son derece hassastır. Arıza durumunda genellikle kısa devreye giderler ve bu durum devre güvenliği açısından risk oluşturur. Bu nedenle tantal kapasitörler mutlaka ciddi voltaj derating uygulanarak kullanılır.



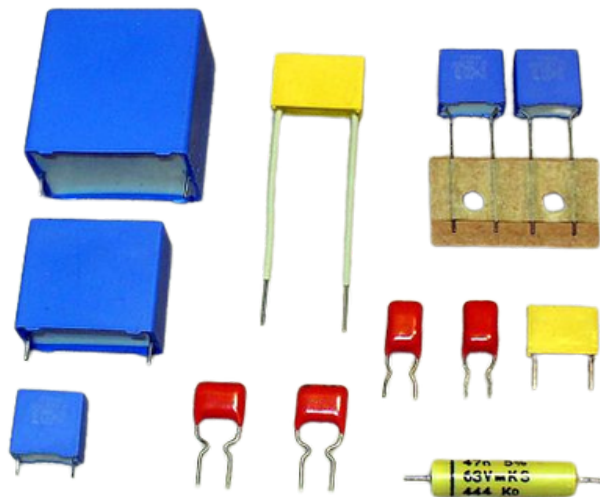
Şekil 4. SMD ve THT Tant.Elektrolitik Kapasitör Örnekleri

Film Kapasitörler

Film kapasitörlerde dielektrik olarak plastik film kullanılır. Polypropylene, polyester, PPS veya PTFE gibi malzemeler dielektrik görevini üstlenir. Bu yapı elektrolitik değildir ve kapasitörler yönsüzdür. Dielektrik kalınlığı elektrolitik kapasitörlere kıyasla daha fazla olduğu için kapasitans değerleri genellikle daha düşüktür; ancak bunun karşılığında son derece kararlı ve öngörülebilir bir elektriksel davranış elde edilir.

Film kapasitörlerin en önemli özelliklerinden biri DC bias altında kapasitans kaybı göstermemeleridir. Ayrıca sıcaklık değişimleri kapasitans üzerinde çok sınırlı etki yaratır ve zamanla yaşlanma etkisi ihmal edilebilecek seviyededir. ESR değerleri düşüktür ve dielektrik kayıpları özellikle polypropylene film kapasitörlerde çok azdır.

Bu nedenlerle film kapasitörler AC sinyal taşıma, kuplaj, snubber devreleri, rezonans yapıları ve EMI bastırma uygulamalarında tercih edilir. Elektrolitik kapasitörlerin “güçlü ama kararsız”, seramik kapasitörlerin ise “hızlı ama değişken” olduğu düşünüldüğünde, film kapasitörler lineerlik ve güvenilirlik açısından orta noktada konumlanır.



Şekil 5. THT Film Kapasitör Örnekleri

Seramik Kapasitörler

Seramik kapasitörler, dielektrik olarak seramik esaslı malzemelerin kullanıldığı ve günümüz elektronik tasarımlarında en yaygın şekilde karşılaşılan kapasitör ailesidir. Küçük boyutları, düşük parazitik değerleri ve yüksek frekans performansları sayesinde özellikle dijital ve gömülü sistemlerin vazgeçilmez bileşenleri haline gelmişlerdir. Ancak bu yaygın kullanım, seramik kapasitörlerin her koşulda ideal olduğu anlamına gelmez. Elektriksel davranışları büyük ölçüde kullanılan seramiğin fiziksel özelliklerine bağlıdır ve bu davranış çoğu zaman sezgisel değildir.

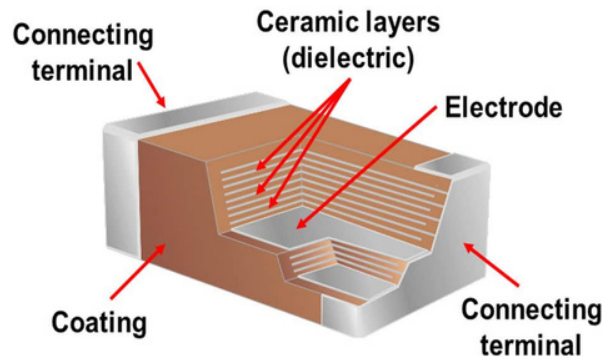
Seramik kapasitörlerin en önemli ayırt edici özelliği, dielektrik malzemenin ferroelektrik veya lineer karakterde olabilmesidir. Bu fark, kapasitörün sıcaklık, gerilim ve zaman karşısındaki davranışını kökten değiştirir. Bu nedenle seramik kapasitörler Class 1, Class 2 ve Class 3 olmak üzere üç ana dielektrik sınıfına ayrılır.

Seramik Kapasitörlerde MLCC Yapısı

Modern seramik kapasitörlerin büyük çoğunluğu MLCC (Multi-Layer Ceramic Capacitor) yapısındadır. Bu yapıda, seramik dielektrik ve metal elektrotlar mikrometre mertebesinde çok sayıda ince katman halinde üst üste yerleştirilir. Katman sayısı arttıkça efektif elektrot alanı büyür ve aynı hacimde daha yüksek kapasitans elde edilir.

MLCC yapının en önemli sonucu, çok düşük eşdeğer seri endüktans (ESL) değeridir. Bu sayede seramik kapasitörler yüksek frekanslı akım değişimlerine çok hızlı cevap verebilir. Bu özellik, onları dijital entegrelerin besleme pinlerine yakın konumlandırılan decoupling kapasitörler için ideal kılar.

Ancak MLCC yapının mekanik açıdan hassas olduğu unutulmamalıdır. PCB bükülmesi, termal genleşme veya lehimleme stresi seramik gövdede mikroskobik çatlaklara yol açabilir. Bu çatlaklar zamanla kapasitörün kısa devre arızasına gitmesine neden olabilir. Bu nedenle özellikle büyük kasa MLCC'lerde PCB yerleşimi ve lehimleme profili kritik öneme sahiptir.



Şekil 6. MLCC Yapısı

Class 1 Seramik Kapasitörler (C0G / NP0).

Class 1 seramik kapasitörler, lineer dielektrik davranış gösteren malzemelerden üretilir. Bu kapasitörlerde dielektrik sabiti düşüktür ancak elektrik alan uygulandığında dielektrik özellikler değişmez. Bunun sonucu olarak kapasitans değeri sıcaklık, DC gerilim ve zamanla neredeyse sabit kalır.

Bu sınıfın en bilinen temsilcisi C0G (NP0) dielektriktir. C0G seramik kapasitörlerde DC bias etkisi yoktur, yaşlanma gözlenmez ve dielektrik kayıplar son derece düşüktür. Bu nedenle sinyal genliğiyle kapasitans arasında doğrusal bir ilişki vardır. Ancak düşük dielektrik sabiti nedeniyle elde edilebilecek kapasitans değerleri sınırlıdır.

Class 1 seramikler genellikle RF devrelerinde, osilatörlerde, hassas filtrelerde ve analog sinyal yollarında kullanılır. Bu uygulamalarda kapasitörün değeri kadar, o değerin kararlılığı da kritik öneme sahiptir.

Class 2 Seramik Kapasitörler (X7R / X5R).

Class 2 seramik kapasitörler ferroelektrik malzemeler kullanılarak üretilir. Bu malzemeler yüksek dielektrik sabitine sahiptir ve bu sayede küçük hacimde yüksek kapasitans elde edilir. X7R ve X5R, bu sınıfın en yaygın dielektrikleridir.

Ferroelektrik yapı, kapasitörün elektrik alan altında iç yapısının değişmesine neden olur. Bu durum DC bias etkisi olarak bilinir. Uygulanan DC gerilim arttıkça, kapasitörün efektif kapasitans değeri ciddi oranda düşer. Pratikte, nominal değerin %30 ila %70'ine kadar düşüşler görülebilir. Bu düşüş, kapasitörün arızalı olduğu anlamına gelmez; dielektriğin fiziksel bir sonucudur.

Buna ek olarak Class 2 seramiklerde zamanla logaritmik bir yaşlanma etkisi görülür. Kapasitans değeri üretimden sonra yavaş yavaş azalır. Bu etki sıcaklıkla hızlanır ancak geri dönüşlü değildir. Bu nedenle hassas zamanlama veya referans devrelerinde Class 2 seramikler tercih edilmez.

Tüm bu dezavantajlara rağmen X7R ve X5R seramikler, sundukları hacim avantajı sayesinde decoupling ve bypass uygulamalarında endüstri standardı haline gelmiştir. Buradaki temel yaklaşım, mutlak kapasitans değerinden ziyade yüksek frekanslı empedansın düşürülmesidir.

Class 3 Seramik Kapasitörler (Y5V / Z5U).

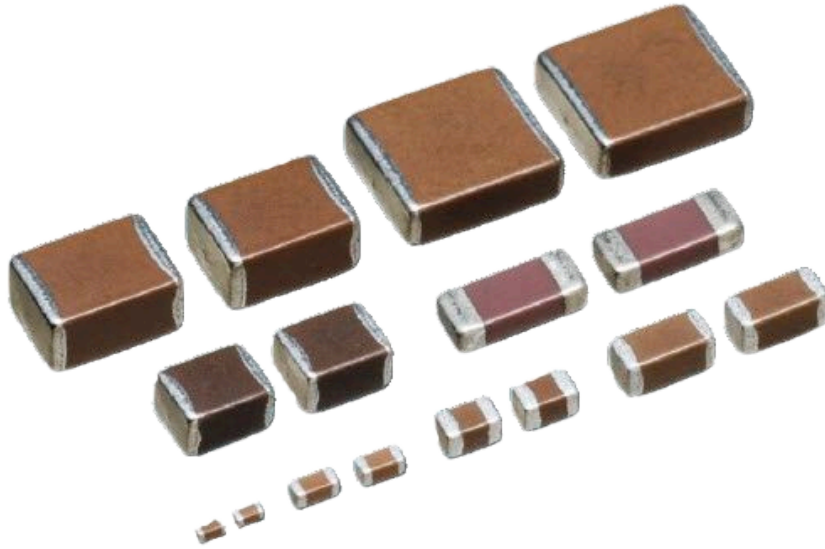
Class 3 seramik kapasitörler, en yüksek dielektrik sabitine sahip seramik malzemelerle üretilir. Bu sayede çok küçük boyutlarda çok yüksek nominal kapasitans değerleri elde edilebilir. Ancak bu kapasitans değeri yalnızca belirli bir sıcaklık ve gerilim aralığında geçerlidir.

Bu sınıfta sıcaklık değişimiyle kapasitans %50'den fazla sapma gösterebilir. DC bias etkisi son derece yüksektir ve yaşlanma belirgindir. Bu nedenle Class 3 seramikler kararlılık gerektiren hiçbir uygulama için uygun değildir. Günümüzde çoğunlukla düşük maliyetli ve kritik olmayan tüketici elektroniği ürünlerinde kullanılır.

Seramik Kapasitörlerde “Nominal Değer” Kavramı

Seramik kapasitörler söz konusu olduğunda, datasheet üzerinde yazan kapasitans değeri çoğu zaman çalışma koşullarındaki gerçek değer değildir. Özellikle Class 2 ve Class 3 seramiklerde, bu değer yalnızca referans ölçüm koşullarında geçerlidir. Gerçek devrede görülen kapasitans; DC gerilim, sıcaklık, frekans ve yaşlanma etkilerinin birleşimiyle belirlenir.

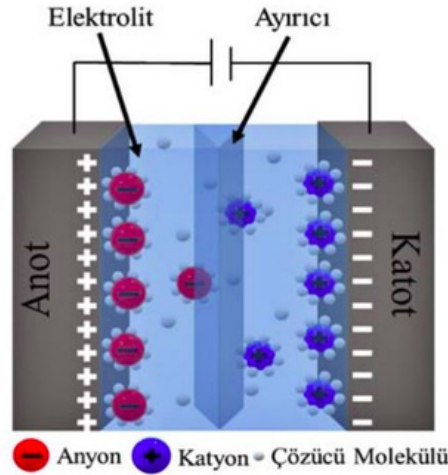
Bu nedenle seramik kapasitör seçimi yapılırken, “kaç mikrofaraht gerekli” sorusundan önce “bu kapasitör hangi koşullarda çalışacak” sorusu sorulmalıdır.



Şekil 7.SMD Seramik Kapasitör Örnekleri

Süper Kapasitörler (Ultrakapasitörler)

Süper kapasitörler (ultrakapasitörler), klasik dielektrik temelli kapasitörlerden farklı bir enerji depolama mekanizmasına sahiptir. Geleneksel kapasitörlerde enerji, iki iletken plaka arasında bulunan katı bir dielektrik malzeme üzerinden depolanırken; süper kapasitörlerde enerji depolama, elektrot–elektrolit arayüzünde oluşan elektrik çift tabaka (Electric Double Layer – EDLC) etkisi ile gerçekleşir. Bu nedenle fiziksel anlamda “katı dielektrik” içermezler ve kapasitans değerleri mikrofaraat seviyesinden farat seviyesine çıkar.



Şekil 8.EDLC Çalışma Prensibi

Çalışma prensibi, yüksek yüzey alanına sahip (genellikle aktif karbon bazlı) gözenekli elektrotların elektrolit ile temasında iyonların yüzeyde birikmesi esasına dayanır. Elektrot yüzeyinde nanometre mertebesinde çok ince bir yük ayrımı oluşur. Kapasitansın temel bağıntısı olan;

$$C = \epsilon \times \frac{A}{d}$$

denkleminde etkin yüzey alanının (A) çok büyük, yük ayrım mesafesinin (d) ise son derece küçük olması nedeniyle oldukça yüksek kapasitans elde edilir.

Süper kapasitörler genel olarak üç ana gruba ayrılır. En yaygın tip olan EDLC'lerde enerji depolama tamamen elektrostatik çift tabaka etkisiyle gerçekleşir ve kimyasal reaksiyon minimaldir. Pseudocapacitor (psödokapasitör) tiplerinde ise yüzeyde sınırlı faradaik reaksiyon katkısı bulunur; bu yapı daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilir ancak çevrim kararlılığı EDLC'ye kıyasla değişkenlik gösterebilir. Hibrit süper kapasitörlerde ise elektrotlardan biri batarya benzeri davranış gösterirken diğeri çift tabaka mekanizması ile çalışır.

Elektriksel açıdan değerlendirildiğinde süper kapasitörlerin en belirgin özelliği çok yüksek kapasitans değerleridir. Tek hücre başına tipik nominal gerilim 2.5–3 V aralığındadır. Bu düşük hücre gerilimi nedeniyle daha yüksek voltaj gerektiren uygulamalarda seri bağlama zorunludur. Seri bağlama yapıldığında hücreler arası gerilim dengesizliği oluşabileceğinden pasif (dirençli) veya aktif balans devreleri kullanılır. ESR değerleri klasik elektrolitik kapasitörlere göre genellikle düşüktür, ancak çok katmanlı seramik kapasitörler (MLCC) kadar düşük değildir. Ayrıca kaçak akım ve kendiliğinden deşarj oranı, klasik kapasitörlere kıyasla daha yüksektir.

Enerji yoğunluğu açısından süper kapasitörler, geleneksel kapasitörlerden çok daha yüksek; ancak lityum iyon bataryalardan belirgin şekilde düşüktür. Buna karşılık güç yoğunlukları oldukça yüksektir ve çok hızlı şarj/deşarj edilebilirler. Çevrim ömürleri yüz binlerce hatta milyonlarca döngüye ulaşabilir; bu yönüyle bataryalara kıyasla büyük avantaj sağlarlar.

Tasarım perspektifinden bakıldığında süper kapasitörler klasik decoupling veya bypass kapasitörü değildir. Yüksek frekanslı güç dağıtım ağı (PDN) davranışı için uygun değildirler ve SMPS çıkışındaki yüksek frekans ripple bastırma görevini üstlenmezler. Bunun yerine, kısa süreli enerji tamponu olarak kullanılırlar. Tipik uygulamalar arasında gerçek zaman saatleri (RTC) için yedekleme, ani güç çekişlerinin bataryaya yük bindirmeden karşılanması, enerji hasadı sistemlerinde tampon depolama ve kısa süreli veri koruma senaryoları yer alır.

Gerilim derating konusu süper kapasitörlerde kritik öneme sahiptir. Hücre başına maksimum gerilim değeri aşılsa elektrolit bozunumu hızlanır ve ömür dramatik şekilde azalır. Bu nedenle genellikle nominal gerilimin altında çalıştırma ve güvenli tasarım marjı bırakma önerilir. Seri bağlı hücrelerde eşit gerilim dağılımı sağlanmadığında tek bir hücrenin aşırı gerilime maruz kalması tüm modülün arızalanmasına neden olabilir.

Sonuç olarak süper kapasitörler, kapasitör ailesinin bir üyesi olmakla birlikte kullanım amacı açısından klasik dielektrik kapasitörlerden ayrılır. Kısa süreli enerji depolama ve güç tamponlama gereksinimlerinde tercih edilirler. Bu nedenle tasarım sürecinde, onları “yüksek kapasitanslı bir kapasitör” olarak değil, “hızlı şarj edilebilen düşük voltajlı bir enerji depolama elemanı” olarak konumlandırmak daha doğru bir mühendislik yaklaşımıdır.



Şekil 9. Süper Kapasitör Örnekleri

Kapasitör Seçim Parametreleri

Bir kapasitörün devrede doğru çalışması yalnızca nominal kapasitans değerine bağlı değildir. Gerçek devre davranışı; iç direnç, parazitik endüktans, sıcaklık katsayısı, DC gerilim etkisi, akım taşıma kapasitesi ve yaşlanma gibi birçok parametrenin birleşimiyle belirlenir. Bu bölümde, mühendislik açısından kritik olan seçim parametreleri sistematik biçimde ele alınacaktır.

A)ESR(Equivalent Series Resistance)

ESR, kapasitörün ideal kapasite elemanına seri bağlı eşdeğer iç direncidir. Fiziksel olarak elektrot direnci, bağlantı direnci, dielektrik kayıpları ve elektrolit direncinden oluşur.

ESR'nin etkileri:

- AC ripple akımı altında ısınma oluşturur.
- Çıkış filtrelerinde gerilim dalgalanmasını artırır.
- SMPS kararlılığını doğrudan etkiler.
- Güç kaybına sebep olur.

Ripple akımı altında oluşan güç kaybı;

$$P_{loss} = I^2_{ripple} \times ESR$$

Düşük ESR:

- SMPS çıkışında tercih edilir.
- Yüksek akım uygulamalarında gereklidir.
-

Ancak bazı lineer regülatörlerde veya kontrol döngülerinde çok düşük ESR kararsızlığa yol açabilir. Bu nedenle “en düşük ESR” her zaman en doğru seçim değildir; sistem gereksinimine uygun ESR seçilmelidir.

B)ESL(Equivalent Series Inductance)

ESL, kapasitörün iç yapısından ve bağlantılarından kaynaklanan eşdeğer seri endüktanstır.

Yüksek frekanslarda kapasitör empedansı:

$$Z(f) = ESR + j\omega L - \frac{1}{\omega C}$$

Belirli bir frekanstan sonra endüktif davranış baskın hale gelir. Bu frekans:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Bu noktaya self-resonant frequency (SRF) denir.

Özellikle:

- MLCC'ler düşük ESL'ye sahiptir.
- Büyük boyutlu elektrolitikler yüksek ESL gösterir.
- PCB yerleşimi ESL'yi ciddi biçimde etkiler.

Yüksek frekans decoupling için düşük ESL kritik öneme sahiptir.

C)DC Bias Etkisi

DC bias etkisi özellikle Class 2 ve Class 3 seramik kapasitörlerde görülür. Uygulanan DC gerilim arttıkça efektif kapasitans düşer.

Bazı X7R kapasitörlerde nominal değerin %40–60'ı kaybolabilir.

Bu nedenle:

- Nominal kapasiteye güvenilmemelidir.
- Üretici DC bias eğrileri incelenmelidir.
- Gerektiğinde daha yüksek voltaj sınıfı seçilmelidir.

Class 1 seramiklerde (C0G/NP0) DC bias etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

D)Ripple Akımı

Ripple akımı, kapasitör üzerinden geçen AC bileşenli akımdır. Özellikle SMPS çıkış ve giriş filtrelerinde kritik parametredir.

Ripple akımı sınırı aşırsa:

- İç ısınma artar.
- Elektrolitiklerde elektrolit buharlaşması hızlanır.
- Ömür kısalır.

Elektrolitik ve tantal kapasitörlerde ripple rating mutlaka kontrol edilmelidir. MLCC'lerde genellikle ESR düşük olduğundan ısınma problemi daha azdır, ancak mekanik stres oluşabilir.

E)Derating_(Gerilim Güvenlik Payı)

Hiçbir kapasitör nominal voltajında sürekli çalıştırılmamalıdır.

Genel Uygulamalar

- Alüminyum elektrolitik: %20–30 derating
- Tantal: %30–50 derating (kritik)
- Seramik: Özellikle Class 2 → DC bias nedeniyle derating + kapasite çarpanı
- Film: Genelde %10–20

Derating yalnızca güvenlik için değil, ömür ve stabilite için gereklidir.

F) Frekans Bağımlı Empedans

Gerçek tasarımda önemli olan “kaç μF ” değil, belirli frekansta empedansın ne olduğudur.

Bir güç hattında hedef şudur:

$$Z(f) \approx low$$

Bu nedenle:

- Elektrolitik → düşük frekans
- Tantal → orta frekans
- MLCC → yüksek frekans

Birlikte paralel kullanılırlar. Bu yapı geniş bantlı düşük empedans sağlar.

G) Sıcaklık Davranışı

Sıcaklık:

- Elektrolitiklerde ömrü belirler (Arrhenius kuralı)
- Class 2 seramikte kapasitansı değiştirir
- Film kapasitörde nispeten stabil kalır

Genel kural:

Her 10°C artış ömrü yaklaşık yarıya indirebilir (elektrolitiklerde).

H) Frekans Bağımlılığı

Gerçek kapasitörler frekansa bağlı empedans gösterir.

Düşük frekansta:

- Kapasitif davranış baskındır.

SRF sonrasında:

- Endüktif davranış başlar.

Bu nedenle güç dağıtım ağlarında tek büyük kapasitör yerine farklı değerlerde paralel kombinasyon kullanılır.

I) Yaşlanma (Aging)

Özellikle Class 2 seramik kapasitörlerde kapasitans zamanla azalır.

Logaritmik azalma gösterir:

- İlk 1000 saatte belirgin düşüş.
- Sonrasında yavaşlama.

Class 1 seramiklerde yaşlanma ihmal edilebilir düzeydedir.

Devrelerde Kapasitör Kullanım Tipleri

Kondansatörler, elektronik devrelerde tek bir amaç için kullanılan evrensel bileşenler değildir. Aynı kondansatör, devre içerisindeki konumuna ve üstlendiği role bağlı olarak; bir noktada enerji deposu, başka bir noktada gürültü bastırıcı, bir başka noktada ise sinyal şekillendirici bir eleman haline gelebilir. Bu nedenle kondansatör seçimi, yalnızca kapasite değerine bakılarak değil, devrede hangi fonksiyonu yerine getirdiği net olarak tanımlanarak yapılmalıdır.

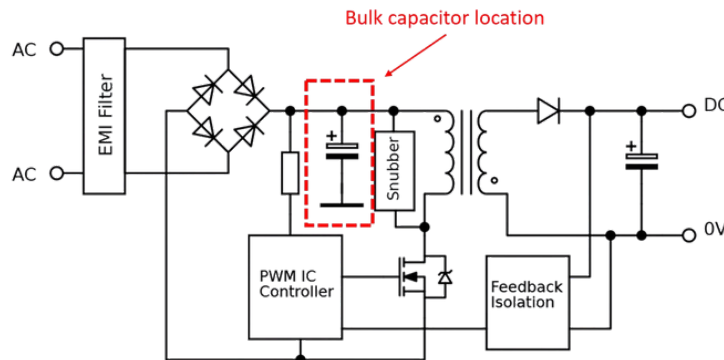
Bu bölüm, kondansatörleri fiziksel yapılarına veya dielektrik türlerine göre sınıflandırmak yerine, devre içerisindeki kullanım rollerine göre ele alır. “Bulk”, “decoupling”, “bypass” veya “coupling” gibi terimler, birer kondansatör tipi değil; kondansatörün devreye hangi problemi çözmek için eklendiğini ifade eden fonksiyonel tanımlardır. Aynı şekilde bootstrap, snubber, timing veya EMI bastırma gibi kullanım şekilleri de, kondansatörün elektriksel davranışından faydalanan farklı mühendislik yaklaşımlarını temsil eder.

Bulk Kapasitörler

Devrede kullanılan bulk kapasitörler, besleme hattının düşük frekanslı kararlılığını sağlamak amacıyla kullanılır. Bu kapasitörler, güç kaynağından gelen gerilim üzerindeki yavaş değişimleri ve dalgalanmaları sönmüleyerek sistemin anlık akım taleplerine cevap verir. Yük akımının ani arttığı durumlarda regülatör veya harici güç kaynağı bu akımı anında sağlayamayabileceğinden, bulk kapasitörler enerji deposu gibi davranarak besleme hattının çökmesini engeller. Özellikle DC-DC dönüştürücü girişlerinde, uzun kablolarla beslenen kartlarda ve yüksek akım çeken yüklerin bulunduğu tasarımlarda kritik öneme sahiptir. Yanlış veya yetersiz bulk kapasitör seçimi, besleme geriliminde dalgalanmalara, regülatör kararsızlığına ve sistem resetlerine neden olabilir. Alüminyum elektrolitik kapasitörler bu amaçla yaygın şekilde kullanılır. Yüksek kapasitans/hacim oranı ve maliyet avantajı sağlarlar. Ancak seçim sürecinde aşağıdaki parametreler dikkatle incelenmelidir:

- Ripple akımı kapasitesi
- ESR değeri
- Sıcaklık sınıfı
- Ömür

Yüksek performanslı uygulamalarda düşük ESR’li polimer elektrolitik kapasitörler tercih edilebilir. Pratik tasarımlarda bulk elektrolitik kapasitörler genellikle paralel MLCC’lerle desteklenir; böylece geniş bantta düşük empedans elde edilir.



Şekil 10. Örnek bir bulk kapasitör kullanımı

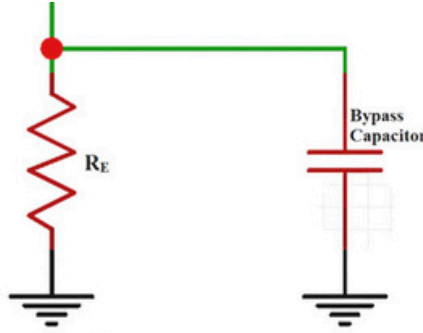
Bypass Kapasitörler

Bypass kapasitörler, entegre devrelerin besleme pinlerinde oluşan yüksek frekanslı gürültüleri bastırmak için kullanılır. Bu kapasitörler, besleme hattı ile toprak arasında düşük empedanslı bir yol oluşturarak yüksek frekanslı bileşenleri toprağa yönlendirir. Bypass kapasitörlerin temel özelliği, DC çalışma noktasını etkilemeden AC bileşenleri süzmesidir. En önemli tasarım kriteri, bu kapasitörlerin entegre devrenin besleme pinlerine fiziksel olarak çok yakın yerleştirilmesidir; aksi halde PCB izlerinin parazitik endüktansı nedeniyle kapasitör işlevini yeterince yerine getiremez. Özellikle mikrodenetleyici, FPGA ve yüksek hızlı dijital entegrelerde bypass kapasitör eksikliği, veri hatalarında ve rastgele reset problemlerinde kendini gösterir.

Elektriksel gereksinimler:

- Elektriksel gereksinimler:
- Hedef frekans bandında düşük empedans
- Düşük ESR
- Uygulamanın doğruluk gereksinimine uygun dielektrik

Analog referans veya hassas ölçüm noktalarında Class 1 seramik veya film kapasitör tercih edilir. Genel besleme hattı bypass uygulamalarında ise X7R seramik kapasitör yeterlidir.



Şekil 11. Örnek bir bypass kapasitör kullanımı

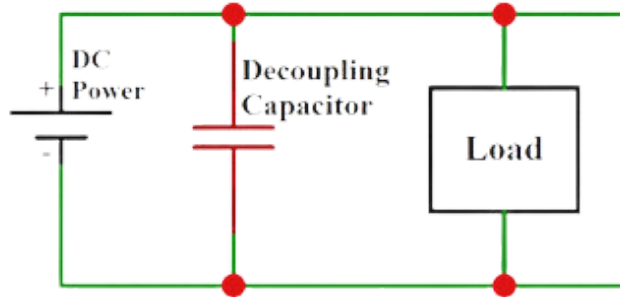
Decoupling Kapasitörler

Decoupling kapasitörler, bir devre bloğunun besleme hattında oluşturduğu akım değişimlerinin, aynı beslemeyi kullanan diğer blokları etkilemesini önlemek amacıyla kullanılır. Bu kapasitörler, yükün ani akım taleplerini lokal olarak karşılayarak besleme hattı üzerinde oluşabilecek gerilim sıçramalarını sınırlar. Decoupling kapasitörler genellikle bypass kapasitörlere göre daha büyük değerlidir ve birden fazla entegreyi veya fonksiyonel bloğu besleyen hatların girişine konumlandırılır. Özellikle analog ve dijital devrelerin aynı kart üzerinde bulunduğu sistemlerde, decoupling kapasitörler gürültü izolasyonu açısından kritik rol oynar. Yetersiz decoupling, ADC ölçümlerinde kararsızlığa ve analog sinyal kalitesinde bozulmaya yol açar.

Elektriksel gereksinimler:

- Düşük ESR
- Düşük ESL
- Yüksek self-resonant frequency
- PCB üzerinde minimum akım döngü alanı

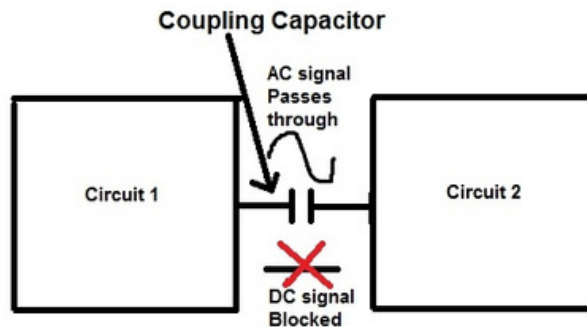
Bu amaçla en yaygın kullanılan teknoloji çok katmanlı seramik kapasitörlerdir (MLCC). Genellikle X7R dielektrik tercih edilir; hassas analog uygulamalarda C0G/NP0 seçilebilir. Decoupling tasarımında tek bir büyük kapasitör yerine, farklı değerlerde birden fazla kapasitör paralel kullanılarak geniş bantta düşük empedans elde edilir. Bu yaklaşım “empedans şekillendirme” stratejisinin temelidir.



Şekil 12. Örnek bir decoupling kapasitör kullanımı

Coupling Kapasitörler

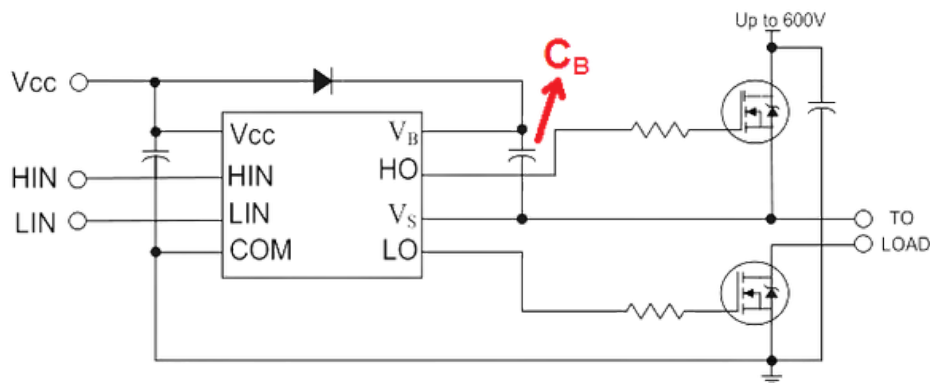
Coupling kapasitörler, sinyal yollarında DC bileşeni engelleyip AC bileşeni iletmek amacıyla kullanılır. Bu kapasitörler sayesinde bir devrenin DC çalışma noktası, bir sonraki devrenin bias seviyesini etkilemeden sinyal aktarımı sağlanır. Audio, sensör sinyalleri ve op-amp katları arasında sıkça kullanılan coupling kapasitörlerin değeri, sistemin alt kesim frekansını doğrudan belirler. Kapasitör değeri çok küçük seçildiğinde düşük frekanslı sinyal bileşenleri zayıflar; çok büyük seçildiğinde ise fiziksel boyut, kaçak akım ve maliyet gibi problemler ortaya çıkar. Bu nedenle coupling kapasitör seçimi, hem elektriksel hem de sistem seviyesi gereksinimler dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu tür uygulamalarda film kapasitörler, özellikle polypropylene (PP) tipleri tercih edilir. Düşük kayıp faktörü ve yüksek lineerlik sağlarlar. Alternatif olarak düşük değer gerektiren uygulamalarda C0G/NP0 seramik kapasitörler kullanılabilir. Class 2 (X7R vb.) seramik kapasitörler gerilim bağımlı kapasitans değişimi nedeniyle distorsiyona yol açabileceğinden yüksek doğruluk gerektiren analog uygulamalarda önerilmez.



Şekil 13. Örnek bir coupling kapasitör kullanımı

Bootstrap Kapasitörleri

Anahtarlamalı güç kaynaklarında kullanılan bootstrap kapasitörler, high-side MOSFET'in gate sürülmesi için gerekli olan gerilimi üretmek amacıyla kullanılır. High-side MOSFET'in tam iletime geçebilmesi için gate geriliminin source geriliminin belirli bir miktar üzerine çıkması gerekir ve bu gerilim, bootstrap kapasitör üzerinden sağlanır. Bootstrap kapasitör, anahtarlama periyodu boyunca şarj olup deşarj olarak gate sürücü devresine enerji sağlar. Bu kapasitörün değeri veya yerleşimi uygun değilse MOSFET tam iletime geçemez, anahtarlama kayıpları artar ve dönüştürücünün verimi ciddi şekilde düşer. Bu nedenle bootstrap kapasitörler düşük ESR'li seramik tipte seçilmeli ve ilgili pinlere mümkün olan en kısa izlerle bağlanmalıdır.



Şekil 14. Örnek bir bootstrap kapasitör kullanımı

Snubber / EMI Bastırma Kapasitörleri

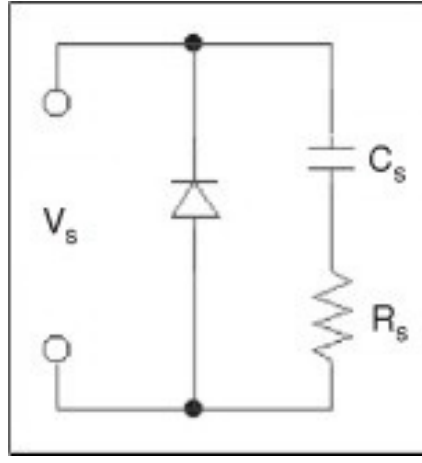
Snubber ve EMI bastırma amaçlı kullanılan kapasitörler, anahtarlama elemanlarında oluşan gerilim aşmalarını ve salınımları bastırmak için kullanılır. Özellikle MOSFET ve diyotların anahtarlama anında parazitik endüktans ve kapasitanslar nedeniyle oluşan ringing, hem bileşenlere zarar verebilir hem de elektromanyetik girişim seviyesini artırır. Snubber kapasitörler genellikle direnç ile birlikte kullanılarak bu enerjiyi kontrollü bir şekilde sönmürlür. Yanlış boyutlandırılmış snubber devreleri gereksiz güç kaybına ve ısınmaya neden olabileceğinden, bu kapasitörler genellikle ölçüm ve test sonuçlarına göre optimize edilir.

Snubber uygulamasında kapasitörün taşıması gereken karakteristikler, klasik filtreleme uygulamalarından farklıdır:

- Yüksek gerilim dayanımı
- Düşük ESR
- Düşük dielektrik kaybı
- Yüksek dv/dt dayanımı
- Kararlı kapasitans

Bu gereksinimler doğrultusunda en uygun teknoloji film kapasitörlerdir.

Seramik kapasitörler yüksek gerilim ve mekanik stres altında çatlama riski taşıyabilir. Elektrolitik kapasitörler ise yüksek frekans ve pik akım uygulamalarına uygun değildir.



Şekil 15. Örnek bir snubber kapasitör kullanımı

Bu bölümde ele alınan kapasitör kullanım tipleri, elektronik tasarımlarda en yaygın ve temel işlevleri temsil etmektedir. Pratikte kapasitörler; devrenin topolojisine, çalışma frekansına, güç seviyesine, çevresel koşullara ve hedeflenen performans kriterlerine bağlı olarak çok daha özelleşmiş ve uygulamaya özgü görevler üstlenebilir. Özellikle yüksek hızlı dijital sistemler, RF devreleri, güç elektroniği ve hassas analog uygulamalarda kapasitörlerin kullanım şekli, standart tanımların ötesine geçerek tasarıma özel çözümler gerektirebilir. Bu nedenle burada sunulan kullanım örnekleri, tüm olası senaryoları kapsama iddiası taşımaz; bunun yerine, kondansatör seçimi ve konumlandırması konusunda sağlam bir temel referans oluşturmayı amaçlar. İlerleyen bölümlerde dielektrik malzeme, elektriksel karakteristikler ve seçim kriterleri detaylandırıldıkça, bu temel kullanım tiplerinin nasıl ve ne ölçüde özelleştirilebileceği daha net şekilde ortaya konacaktır.

PCB Yerleşimi ve Uygulama Tavsiyeleri

Kapasitör seçimi kadar kritik olan bir diğer konu, seçilen bileşenin PCB üzerindeki fiziksel yerleşimidir. Gerçek devre performansı çoğu zaman komponent değerlerinden ziyade yerleşim kalitesi tarafından belirlenir. Özellikle yüksek frekanslı ve anahtarlama sistemlerinde, PCB üzerindeki parazitik endüktans ve dirençler kapasitörün teorik performansını önemli ölçüde sınırlar.

Bu bölümde kapasitörlerin PCB üzerindeki konumlandırılması ve bağlantı topolojisine ilişkin temel mühendislik prensipleri ele alınmaktadır.

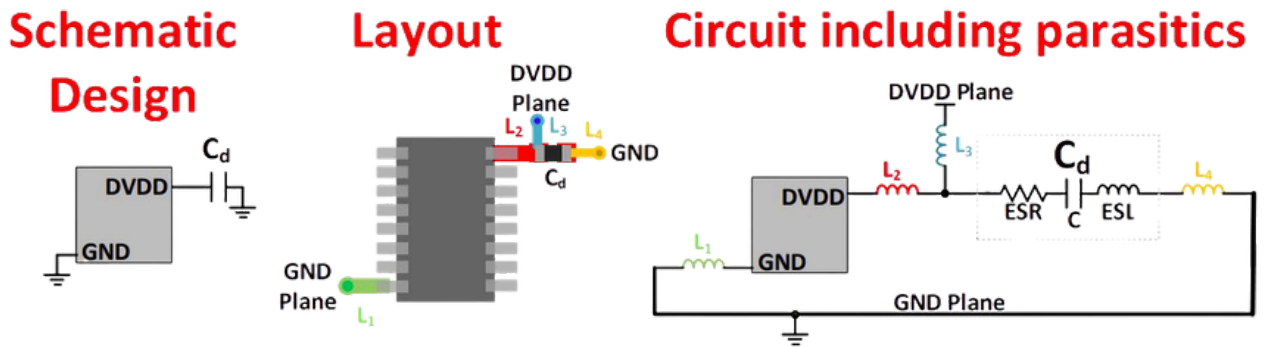
Decoupling Kapasitör Yerleşimi

Decoupling kapasitörlerinin etkinliği doğrudan akım döngüsünün alanına bağlıdır. Amaç, entegre devrenin besleme pini ile toprak arasındaki akım yolunu mümkün olan en kısa ve en düşük endüktanslı hale getirmektir.

Temel kurallar:

- Kapasitör, ilgili besleme pinine mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir.
- VCC ve GND bağlantıları geniş ve kısa izlerle yapılmalıdır.
- Via sayısı minimize edilmeli, gerekiyorsa paralel via kullanılmalıdır.
- Toprak düzlemi (ground plane) kesintisiz olmalıdır.
-

Uzun izler ve dar yollar, ESL'yi artırarak kapasitörün yüksek frekanstaki etkinliğini düşürür. Bu durumda kapasitör nominal olarak doğru seçilmiş olsa bile PDN empedansı hedeflenen seviyeye ulaşmaz.



Şekil 16. Decoupling kapasitörlerin şematik ve layout yerleşimi

Çoklu Kapasitör Kullanımı ve Yerleşim Stratejisi

Farklı değerlerde kapasitörlerin paralel kullanımı, geniş bantta düşük empedans sağlamak amacıyla yapılır. Ancak bu yaklaşımda fiziksel yerleşim kritik önemdedir.

- Küçük değerli (yüksek frekans) kapasitörler yük noktasına en yakın konumlandırılmalıdır.
- Daha büyük değerli bulk kapasitörler daha uzak konumlandırılabilir.
- Paralel kapasitörler aynı iz üzerinden zincirleme bağlanmamalı, yıldız bağlantı tercih edilmelidir.

Yanlış yerleşim durumunda kapasitörler arası etkileşim ve rezonans oluşabilir. Bu nedenle yalnızca elektriksel değer değil, fiziksel konfigürasyon da tasarımın bir parçasıdır.

Bulk ve Güç Kapasitörleri Yerleşimi

Elektrolitik veya film bulk kapasitörler, güç girişine veya anahtarlama düğümüne yakın konumlandırılmalıdır.

Dikkat edilmesi gerekenler:

- Yüksek akım yolları kısa ve geniş olmalıdır.
- Akım döngüsü alanı minimize edilmelidir.
- Güç ve toprak dönüş yolu birbirine paralel ilerlemelidir.
- Termal yayılım dikkate alınmalıdır.

Yüksek ripple akımı taşıyan kapasitörlerin çevresinde yeterli bakır alanı bırakılmalı ve ısı birikimi önlenmelidir.

Snubber Kapasitör Yerleşimi

Snubber kapasitörleri, anahtarlama elemanına mümkün olan en kısa mesafede yerleştirilmelidir. Snubber devresinin etkinliği, parazitik endüktansın minimize edilmesine bağlıdır.

- MOSFET drain-source veya IGBT uçlarına doğrudan yakın yerleştirme yapılmalıdır.
- Uzun izler snubber etkinliğini ciddi şekilde azaltır.
- Yüksek dv/dt bölgelerinde loop alanı en küçük olacak şekilde tasarım yapılmalıdır.

Snubber devresi PCB üzerinde geniş bir döngü oluşturuyorsa, hedeflenen sönümleme performansı elde edilemez.

Topraklama ve Referans Düzlemi

Kapasitörlerin etkin çalışabilmesi için düşük empedanslı bir referans düzlemi gereklidir. Özellikle yüksek frekanslı decoupling uygulamalarında kesintisiz bir ground plane kritik önemdedir.

- Çok katmanlı PCB tercih edilmelidir.
- Güç ve toprak düzlemleri karşılıklı katmanlarda konumlandırılmalıdır.
- Bölünmüş ground yapılarından kaçınılmalıdır (gerekmiyorsa).

Yetersiz topraklama, kapasitör performansını sınırlayan en yaygın tasarım hatalarından biridir.

Mekanik Güvenilirlik

Seramik kapasitörler mekanik strese karşı hassastır. PCB bükülmesi veya lehimleme sırasında oluşan gerilimler çatlaklara neden olabilir.

Öneriler:

- Büyük MLCC'leri kart kenarına çok yakın yerleştirmemek
- Panel ayırım bölgelerinde dikkatli olmak
- Gerekirse esnek terminasyonlu (flexible termination) kapasitör tercih etmek
- Uzun ve dar PCB'lerde mekanik destek sağlamak

Güç uygulamalarında oluşabilecek titreşim ve termal genleşme farkları da göz önünde bulundurulmalıdır.

EMI ve Döngü Alanı Kontrolü

Kapasitör yerleşimi EMI performansını doğrudan etkiler. Yüksek frekanslı akım döngüsü alanı büyüdükçe yayılan elektromanyetik alan artar.

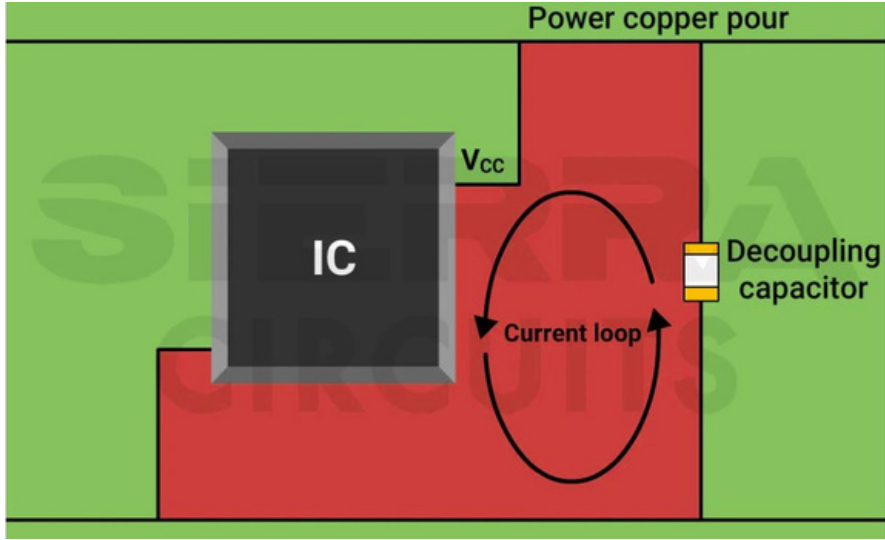
Temel prensip:

Yüksek frekanslı akım döngüsü alanı ne kadar küçükse, EMI o kadar düşüktür.

Bu nedenle:

- Decoupling kapasitörleri yük noktasına yakın
- Snubber kapasitörleri anahtarlama düğümüne yakın
- Güç dönüş yolları kompakt

olacak şekilde tasarım yapılmalıdır.



Şekil 17. Akım döngüsü

Sonuç

Bu doküman boyunca kapasitör teknolojileri, dielektrik temelleri, elektriksel parametreleri, uygulama senaryoları ve PCB yerleşim prensipleri sistematik bir çerçevede ele alınmıştır. Amaç, kapasitörü yalnızca bir “ μF değeri” olarak değil; frekans, sıcaklık, gerilim ve zaman ekseninde davranış gösteren gerçek bir fiziksel bileşen olarak değerlendirmektir.

Görüldüğü üzere kapasitör seçimi; nominal kapasitans değerinin belirlenmesinden ibaret değildir. ESR, ESL, DC bias etkisi, ripple akımı kapasitesi, gerilim derating gereksinimi, sıcaklık dayanımı ve yaşlanma davranışı gibi parametreler, devrenin kararlılığı ve güvenilirliği üzerinde doğrudan etkilidir. Aynı şekilde, bypass, decoupling, bulk filtreleme, snubber ve analog kuplaj gibi farklı uygulamalar farklı kapasitör teknolojilerini gerektirir. Her teknoloji kendi fiziksel sınırları ve avantajları ile değerlendirilmelidir.

Ayrıca teorik olarak doğru seçilmiş bir kapasitör, uygun PCB yerleşimi yapılmadığı takdirde beklenen performansı sağlayamaz. Parazitik endüktans, akım döngü alanı ve topraklama stratejisi, özellikle yüksek frekanslı ve anahtarlama sistemlerde belirleyici rol oynar. Bu nedenle kapasitör seçimi ve PCB tasarımı birbirinden bağımsız değil, bütünleşik bir mühendislik süreci olarak ele alınmalıdır.

Profesyonel tasarım yaklaşımında temel prensip şudur:

Kapasitör seçimi bir değer optimizasyonu değil, empedans eğrisi ve enerji akışı mühendisliğidir.

Doğru teknoloji seçimi, doğru elektriksel analiz ve doğru fiziksel yerleşim ile desteklendiğinde; sistem kararlılığı, EMI performansı, verim ve uzun dönem güvenilirlik anlamlı biçimde iyileştirilir.

Bu çerçevede ele alınan bilgiler, hem temel seviye tasarımlar hem de yüksek performanslı güç ve sinyal uygulamaları için referans niteliğinde bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır.

Kaynakça

1. Understanding Capacitors and Their Symbols in Circuit Diagrams - Allelcoelec
2. Capacitors - Sparkfun
3. Bulk Capacitor for Full Wave Rectification - Electronics.stackexchange.com
4. Decoupling Capacitors and Bypass Capacitors – Working, Applications and Differences- Components101
5. What is a Coupling Capacitor? - Learningelectronics.com
6. Snubber Circuits -Scince Direct
7. Electrolytic Capacitor - Wikipedia
8. Elektrik Devreleri 1 - Ali Bekir Yıldız
9. Elektrik Devreleri 2 - Ali Bekir Yıldız
10. What are Tantalum Capacitors - Kynix
11. Film Capacitors - Wikipedia
12. Supercapacitor: Fundamentals and materials - Çağatay Özada, Merve Ünal , Murat Yazıcı
13. Supercapacitors - Passive Copmponents
14. Decoupling Capacitors - Texas Instruments
15. Decoupling Capacitors Placement - Sierra Circuits