

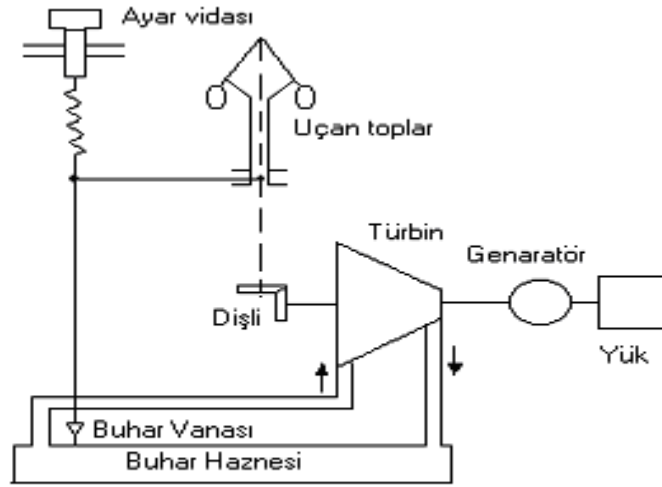
3 OTOMATİK KONTROL SİSTEMLERİ

3.1.Giriş

Bilim ve teknoloji ilerledikçe insan kas gücünün üretimdeki payı azaltılmaktadır. Üretimi, makine ile veya insan gücüyle diye ayırsak, sürekli makine tarafı artma eğilimindedir. Makinelerin kullanımı da yine insan denetimi yerine başka makineler veya teçhizatlar yardımıyla yapılmaya çalışılmaktadır. Bilgisayarlı takım tezgahlarında (CNC) nerdeyse çalışan sistem üzerinde insan denetimi yok denecek düzeydedir. Üretilmek istenen ürünün şekli bilgisayar ile çizilerek, elde edilen şekil bilgisayar programına dönüştürülerek üretim yapılmaktadır.

Otomatik kontrol sistemleri, çalışan sistemlerin insan gücüne gerek kalmadan denetlenmesini, kontrol edilmesini konu olarak alır. Dünyada emek yoğun üretim pahalı bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Otomasyon sistemi ile üretim, daha ekonomik olmaktadır. Üretimin her aşamasına hızlı bir şekilde girmeye devam ediyor. Böylece daha ucuz ve standardı önceden belirtilen ölçülerde üretim yapılabiliyor. İyi yetişmiş bir kalifiye elemanın manuel tezgahlarda 4 saatte ürettiği bir ürün, otomatik sistemlerde 7 dakika gibi kısa sürede üretiliyor. Arada 34 kat gibi bir fark var. Bu fark maliyet açısından kapatılmaz büyüklüktedir. Sağlık ve çevre koşulları dikkate alındığında bazı iş alanlarında insan çalıştırmak mümkün değildir. (Çok sıcak yerler, zehirli yerler, tehlikeli yerler gibi)

Otomatik kontrol sistemlerinin tarihi gelişmesine baktığımızda ilk olarak buhar makinelerini görürüz. Burada buhar makinesinin hızı otomatik olarak denetlenmektedir. Buhar makinesinin hızı arttıkça makinenin miline bağlı uçar toplar merkez kaç kuvvetinden dolayı yukarı çıkar. Uçar topların hareketi mil üzerine yerleştirilmiş kaygan mekanizmayı harekete geçirerek yukarı kaymasını sağlar. Bunun yukarı kayması buhar kanalını kontrol ederek buhar makinesine giden buhar miktarını azaltarak hız artışını engeller. Aynı şekilde buhar makinesinin devri azalınca uçar toplar aşağıya doğru inmek ister. Buna bağlı mekanizma aşağı kayar, bu da buhar valfini kontrol ederek buhar girişini artırır. Böylece buhar makinesinin hızı insan denetimine gerek kalmadan yapılmıştır.



Şekil 3.1 Bir türbinin hız regülatörü

İkinci dünya savaşı esnasında insanlar için tehlikeli olan görevler, otomatik sistemlerle yapılmak istenmiştir. Pilotsuz keşif uçakları üzerindeki çalışmalar otomatik kontrol sistemlerinin alanına girdiğinden bu dönemde çok büyük gelişmeler sağlanmıştır. Savaş sonrası, bu teknoloji üretime kaymış, iş gücü sıkıntısı çekilen alanlar ve emeğin pahalı olduğu alanlarda otomatik sistemler geliştirilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda olumlu gelişmeler sağlanmıştır. Otomasyon sistemleri düşüncesi devamlı olarak üretimin her alanına artarak girmeye devam etmiştir. Üretim miktarında önemli artışlar sağlanmıştır. Bu gün gelişmiş ülkelere baktığımızda gelişmişliğin temelinde, üretimi arttıran otomasyon sistemleri olduğu kolaylıkla anlaşılabilir. Dünya pazarında rekabet için, kalite ve fiyatın en önemli etken olduğu açıktır.

Servo-senkro sistemler olarak bilinen ya da servo mekanizmalar olarak da adlandırılan kontrol sistemi, mekanik bir hareketin pozisyonunu, konumunu ayarlama, kontrol etme işlemi olarak bilinir. Servo- senkro sistemlerin teorisi de yine otomatik kontrol sistemleri içerisinde yer alır. Servo sistemlerin anlaşılması için otomatik kontrol sistemlerinin temel prensipleri bilinmelidir.

Otomatik kontrol sistemleri içerisinde regülatörler, pozisyon kontrolleri, devir kontrolü, basınç,---gibi diğer fiziksel büyüklükler de vardır. Ancak, otomatik kontrol sistemleri içerisinde yer alan lineer diferansiyel denklemler ile açıklanan servo sistemler ile regülatörler arasında oldukça benzerlikler vardır.

3.2 GENEL TANIMLAR

Bu derste kullanılacak terimlerin iyi bilinmesi, konuların daha anlaşılır olması için gereklidir.

Sistem : Belirli bir iş veya işlem için bir araya getirilmiş, birbirleri ile doğrudan ya da dolaylı etkileşimli elemanlar topluluğudur.

Bilgisayar denilince aklımıza klavye, fare, ekran, sistem ünitesi, yazıcı gibi fiziksel parçalar gelmektedir. İşte bu elemanların topluluğu sistemi oluşturmaktadır.

Otomatik kontrol, bir sistematik kavramdır. İçerisinde birden fazla bileşeni vardır.

Kontrol sistemi : Herhangi bir iş yapan birimin denetlenmesi amacıyla geliştirilen devrelerdir.

Giriş: Sistem içerisine akan, sistem tarafından işlenen işaretler, büyüklükler.

Çıkış: Sistem dışına çıkan, işlem görmüş işaretler, büyüklükler.

Örneğin, bir hidroelektrik santralında sisteme giriş olan büyüklükler su ise çıkış elektrik enerjisidir. Veya bir elektrik motorunun girişine uygulanan elektrik enerjisi sistemin girişi ise motor milinden elde edilen mekanik enerji sistemin çıkışıdır.

Bazen sistemlerin bir girişi yerine bir çok girişi olabilir. Bu tür sistemlere çok girişli sistemler denir. Yine aynı şekilde, sistemlerde birden fazla çıkış olursa o tür sistemlere çok çıkışlı sistemler denir. Otomatik kontrolün amacı , bir sistemde üretilen değişkenler üzerinde ayar yapmak , sistemin istenilen şekilde çalışmasını sağlamaktır.

Bir elektrik motorunu ele alalım. Motor sargıların gerekli olan elektrik enerjisini uyguladığınızda motor da bir mekanik dönme hareketi oluşur. Bu dönme hareketinin birimi devir/dakika 'dır. Motor boşta çalışırken, milin dönüşünü zorlaştıran hiçbir etki yoktur. Motor belirli bir devirle döner. Motora yük bağlanırsa, milin dönmesi zorlaşacaktır. Bu durumda motorun dönme hızında bir yavaşlama olur. Örneğin 1000 devir/ dakika ile dönen motorun devri yük miktarına göre 800 devir / dakikaya kadar düşer. Devirdeki bu değişme bazı iş kollarında sakıncalar yaratabilir. Makine boşta da çalışsa , yarı yükte veya tam yükünde de çalışsa hızında değişiklik istenmiyorsa bu motorun devrini sabit tutacak bir kontrol sistemine ihtiyaç var demektir. Bu örneğimize göre kontrol edilmek istenen büyüklük motorun dakikadaki dönüş sayısıdır.

Böyle bir kontrol sistemini geliştirmek için, kontrol edeceğimiz makinenin teknik özelliklerini bilmemiz gerekir. Örneğin makinenin azalan veya artan devir sayısı hangi giriş parametrelerine bağlıdır. Ya da hangi değerlere etki edilmelidir ki motorun yüklendikçe ,düşme eğilimine giren devir sabit kalsın.

Başka bir örnek ise elektrik şebekemizde kullandığımız gerilimin değeri 220 Volt'tur. Alıcılarımızın normal çalışabilmesi için gerilimin sabit 220 voltta olması şarttır. Biliyoruz ki bütün üreteçlerin ortak özelliği, üzerinden çekilen elektrik enerjisi arttıkça çıkış gerilimleri azalır. Yük kalktıkça çıkış gerilimleri de artar. Elektrik şebekesinde çok büyük ve karmaşık enerji hareketleri olmaktadır. Her saniye içerisinde, elektrik kullanan aboneler alıcılarını rastgele bir şekilde çalıştırıp durdururlar. Bunun sonucunda 220 volt olarak istenen voltaj seviyesi, yük arttıkça azalır. Yük azaldıkça gerilim artar. Elektrik aboneleri arasında bir koordinasyon sağlanamayacağı açıktır. Her isteyen evindeki veya iş yerindeki elektriği istediği an kullanabilir. Bu durum, trafiğe bir sürü araç çıkmış ancak hiçbir kural olmadan herkes aracını istediği gibi kullanmak istediği ortama benzetebiliriz. Çok büyük kaoslar olacağı hiç şüphesizdir. Aynı kaos elektrik enerjisinin başına gelmektedir. Eğer gerilim regülatörleri kullanılmamış olsa idi, 220 volt istenen gerilim belki de 100 volt ile 500 volt arasında salınım yapacaktı. 100 volt ile 500 volt arasında sürekli değişen enerjiyi kullanmamız mümkün değildir. Kullandığımız bütün cihazlar hemen bozulur.

Bu örneğe göre kullandığımız elektrik enerjisinin istenen değeri, 220 volt'ta sabit olmasıdır. O halde kontrol etmek istediğimiz değişken gerilimdir. Burada bir kontrol sistemi geliştirmek için, elektrik enerjisi üreten üreteçlerin ve aradaki aktarma elemanlarının karakteristik özellikleri bilinmelidir. Hangi parametreleri kullanarak gerilim değişimini önleyebiliriz. Bu parametreler nasıl kontrol altına alınır. İşte otomatik kontrolün çalışma alanı budur. Otomatik kontrol sistemi bir devrede bir veya bir çok fiziksel büyüklüğün değişimini kontrol etmek amacıyla geliştirildiğine göre, iyi bir kontrol sisteminden beklenen çalışma aşağıdaki özellikleri yerine getirmelidir.

- 1)** Sistem de meydana gelen herhangi bir bozucu etkiden sonra bile değişkenin değeri set değerinden minimum şekilde sapma olmalıdır. Çalışan sistemler, sürekli bozucu etkiler altındadır. Örnek elektrik motorunun aniden yüklenmesi veya aniden üzerindeki yükün kalkması gibi. Yine elektrik motorunun sargılarına uygulanan gerilimin ani değer değiştirmesi bozucu etki olarak ifade edilir.
- 2)** Bozulma sonunda , normal çalışmaya en kısa zamanda dönebilmelidir. Örneğin elektrik motoru ani bir bozucu etki ile karşılaşmışsa, buradaki devir regülatörü, bu değişimi hemen hissetmelidir ve hemen düzeltici önlemi almalıdır. Burada istenen, bozulma ile normale dönme arasındaki zaman çok kısa olmalıdır.
- 3)** Çalışma şartlarında meydana gelen değişimlerden ötürü olacak sapma set değerinden minimum seviyede olmalıdır. Yine örneğimizi elektrik motoru ile sürdüreceğ olursak, motorun yükündeki değişme veya giriş gerilimindeki değişimler bir devir değişikliği yaratacaktır. Ancak bu durum da istenen, her ne kadar değişim olsa da istenen değerden çok uzak olmamalıdır. Yani set değerine yakın olmalıdır.

3.3 KONTROL SİSTEMİNİN TÜRLERİ :

Sistemlerin çalışmasına göre iki tip kontrol sistemi vardır.

- 1) Açık çevrim kontrol sistemi
- 2) Kapalı çevrim kontrol sistemi

3.3.1 AÇIK ÇEVİRİM KONTROL SİSTEMİ :



Şekil: 3.2 Açık çevrim kontrol sistemi

Açık çevrim kontrol sisteminde giriş bağımsız bir değişkendir. Çıkışın, giriş üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Çıkış, girişin bir fonksiyonudur. Örneğin bir elektrik motoruna elektrik enerjisini bir şalter üzerinden uygulandığını düşünelim. Motorun dönme hızı ile şalterin çalışması arasında hiçbir denetim yoktur. Bu durum da şalter motoru durdurup çalıştırma görevi yapar. Elektrik motorunu yüklendiğinde devri düşer, şalter burada devrin düşmesini önleyici bir tedbir almaz. Böyle bir görevi yoktur. Ancak piyasada kullanılan değişik tiplerde şalterler vardır. Bunlar motorun aşırı yüklenmesinden dolayı koruyucu özelliği olan şalterler vardır. Bu tip şalterler, aşırı akım röleleri ile birleştirilmiş şalterlerdir. Tabi ki istenirse giriş gerilimine göre de motoru durdurup çalıştıran şalterler yapılabilir.

Başka bir örnek ise, bir trafik kavşağında trafiğin denetlenmesi açık kontrol sistemine göre yapıldığında, kavşaktaki trafik sinyali hep aynı periyotlarda çalışacaktır. Kırmızı 40 saniye yanıyor, yeşilde 40 saniye yanıyorsa, günün her saatinde aynı çevrim sürüp gidecektir. Kavşaktaki trafik yoğunluğu ile ilgili hiçbir denetim yoktur.

Kuruluşu ucuz bir kontrol yöntemidir fazla bilgi gerektirmez. Ancak işletilmesi her zaman ucuz değildir. Örneğin trafik sinyalizasyonu örneğini ele alalım. Açık çevrim kontrol sistemi ile iyi bir trafik sinyalizasyonu yapmanın imkanı yoktur. Kötü bir sinyalizasyon ise, yolların verimli kullanılmamasına, yakıt masrafının fazla olmasına, gürültü kirliliğinin artmasına, zaman kaybına, strese ve trafik kazalarına neden olduğu düşünülmürse ilk kuruluş masrafının ucuz olmasının hiçbir anlamı kalmaz.

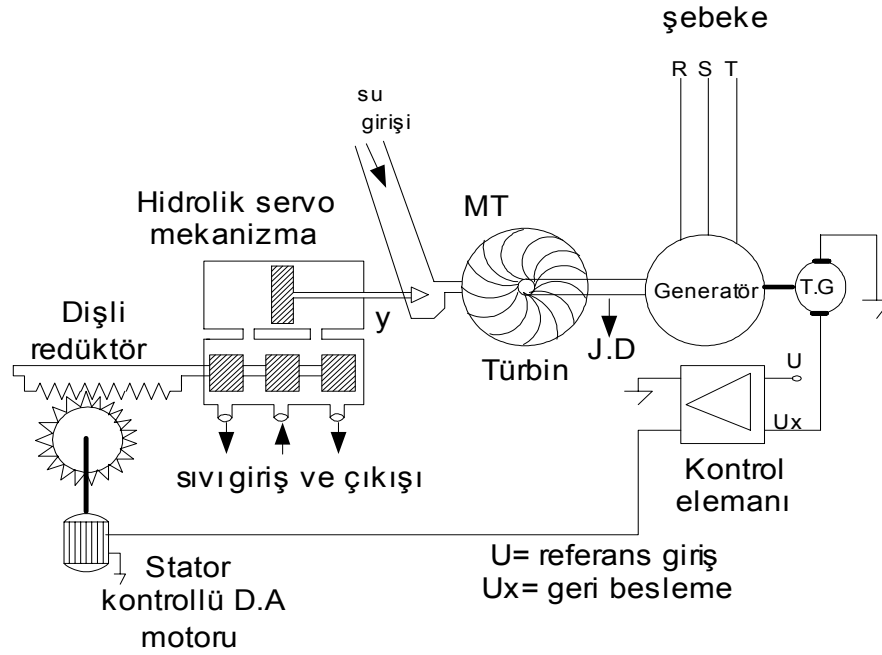
3.3.2 KAPALI ÇEVİRİM KONTROL SİSTEMİ :

Bu tip kontrol sisteminde çıkış, yalnızca girişin bir fonksiyonu değildir. Çıkıştan alınan bir geri besleme ile giriş her zaman kontrol altına alınır. Çıkış, giriş ile geri beslemenin toplamının bir fonksiyonudur. Diğer bir deyişle bu tip sistemlerde çıkış girişi denetlenmektedir, geri besleme işlemi vardır.

Trafik sinyalizasyonu örneğini tekrar ele alalım. Kapalı çevrim kontrol sistemi uygulanırsa trafik akışı nasıl olur. Trafiğin denetlenmesi yine ışıklarla olacak ama, yoldaki trafik yoğunluğu da her zaman sensörler yardımı ile ölçülecektir. Sensörler den alınan ölçüm sonucuna göre trafiğin yoğun olduğu tarafa daha fazla yeşil yakarak trafik sıkışıklığı önlenabilir. Ayrıca, hep aynı güzargah üzerinde seyreden taşıtlar, şehir içi hız limitlerinde gittiği zaman tekrar tekrar kırmızı ışığa yakalanma ihtimali azaltılır. Bu örnekte sinyalizasyonun çalışma zamanlaması sistemin girişi ise, taşıtların durumu da çıkıştır. O halde iyi bir çıkış için yolun doluluk ve boşluk oranları dikkate alınarak zamanlama değiştirilebilmelidir.

Başka bir örnek olarak bir hidroelektrik santralini bir sistem olarak düşünelim. Sistemin girişi su, çıkışı ise elektrik enerjisidir. Örneğimizi biraz daha somutlaştırmak için sayısal değerler verelim. 100MW'lık bir generatörü döndüren türbine akan su miktarının debisi de 100 birim ile ifade edelim. Günün her saatinde türbin aynı güç talebiyle karşılaşmayacaktır. Bazen talep 100 MW ise bazen 50 MW'ta düşecektir. Türbine giren su miktarı her zaman 100 birim olmamalıdır. Talep 50 MW ise su girişi de 50 birime düşmelidir. Aksi halde su kullanımı açısından ekonomik olmadığı gibi türbin devri de sabit kalmaz. Gerçekte, talep normal sınırlar içinde iken türbin devri hep sabit kalmaktadır. Eğer türbin devri sabit kalmazsa üretilen enerjinin frekansını 50 Hz' de sabit tutulamaz. Şebeke frekansı türbin devrine bağlıdır.

Elektrik abonelerinin kullandığı elektrik miktarına göre üretim sürekli değişim içerisinde olmaktadır. Abonelerin elektrik yük talebi, generatörü döndüren türbine yük olarak binmektedir. Talep arttıkça, türbine binen yük miktarı artmaktadır. Türbin hep aynı devirde dönmesi için, su girişi de artmalıdır. Talep azaldıkça, türbinden yük kalkıyor, dolayısıyla hız yükselmemesi için su girişi azalmalıdır. Burada, yükün değişimine göre, türbine giren su miktarı da değişmektedir.



Şekil 3.3 Tübin devir regülatörü

Türbinin hızı tako genaratör yardımıyla sürekli ölçülmektedir. Ölçülen hız gerilime dönüştürülerek geri beleme olarak uygulanmaktadır. Devir yükselme eğilimine girdiğinde tako genaratörde üretilen gerilim de yükselir. Devir düşüncü tako genaratördeki gerilim de düşer.

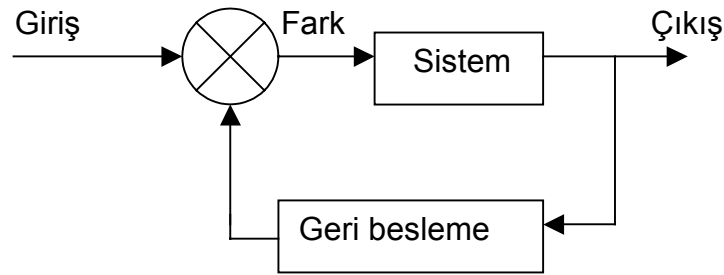
Şekildeki devrede, tako genaratörde elde edilen geri besleme gerilimi kontrol elemanına uygulanmıştır. Kontrol elemanının iki girişi bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi referans girişi diğeri ise geri belseme girişidir. Geri besleme sinyali referans girişini azaltır yöndedir. Türbinin hızı su giriş miktarına bağlıdır. Çok su girişi olursa devir yükselir, su azalırsa devir azalır. Devri etkileyen diğr faktör ise genaratörden çekilen elektrik akımıdır. Çekilen akım arttıkça türbinin devri azalır, akım azaldıkça türbin devri yükselir.

Devremizde bilmemiz gereken diğr elemanların çalışması ise, stator kontrollü doğru akım motoru, buna bağlı olarak çalışan hidrolik servo sistemdir. Stator kontrollü d.a. motorunun statoruna gerilim uygulandığında bir dönme hareketi üretilir. Bu hareketin yönü ise doğru akımın yönüyle ilgilidir.

Hidrolik servo mekanizmanın çalışması: Motorun hareketi dişli sistemi ile doğrusal hale getirilir. Dişlinin hareketi bir sıvı valfini kontrol etmektedir. İleri geri hareketi ile sıvının silindir içersindeki hareketinin yönünü ve miktarını sağlar. Silindir içersinde bulunan pistonu hareket ettirir. Piston, su girişindeki vanayı kontrol ederek türbine giren su ayarlanır. (Su giriş kontrolü türbin üzerindeki kanatçıkların hareket açısı değiştirilerek de yapılabilir.)

Generatörden çekilen enerji azaldığında, türbin devri yükselecektir. Buna bağlı olarak tako generatörün ürettiği gerilim artacak ve referans geriliminde fazla olacağından kontrol elemanı motora enerji gönderecektir. Motor gelen enerji miktarı kadar hareket ederek dişliyi sağa doğru döndürecek. Buna bağlı olarak valf içersindeki sıvı, silindir içersine pistonu sağa itecek yönde bir hareket oluşturacaktır. Pistona bağlı savak su girişini azaltacaktır.

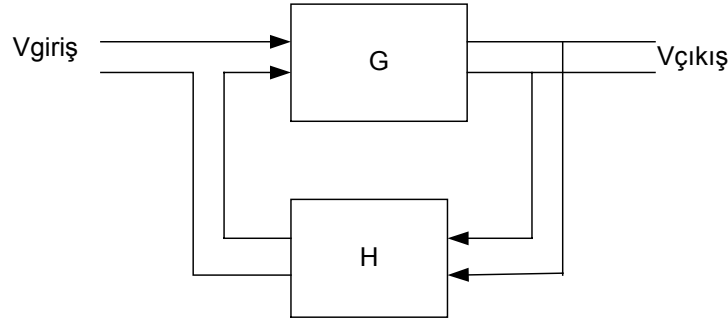
Generatörden çekilen akım arttığında, türbinin devri yavaşlayacak, geri belseme sistemi su girişini arttırarak devirdeki değişimi engelleyecektir. Böyle bir otomatik kontrol sistemi ile türbin devri denetlenir. Her yük değişiminde türbin devrinde de bir değişim yaratacak ancak bu değişim %3, %4 civarında olmaktadır. Bunun anlamı şebeke frekansı tam 50Hz yerine, 49-51Hz aralığında değişir demektir. Ancak açık çevirim kontrol sistemi uygulanırsa değişim %40 'lara çıkar buda 30Hz ile 70Hz arasında değişim anlamına gelir. Bu kadar geniş bir aralıkta frekansı değişen bir elektrik enerjisi kullanılamaz.



Şekil 3.4 Kapalı Çevrim kontrol sistemi

Bu tür kontrol sisteminde çıkış, giriş ile geri besleme sinyali farkının bir fonksiyonudur.

3.4 GERİ BESLEME ÇEŞİTLERİ



Şekil :3.5 Geri beslemeli bir yükselteç devresi

Çıkıştan alınan geri besleme sinyali girişi, arttıracak şekilde uygulanırsa buna pozitif geri besleme denir. Giriş sinyalini azaltacak yönde uygulanırsa negatif geri besleme adını alır. Otomatik kontrol sistemlerinde negatif geri besleme kullanılır. Çünkü otomatik kontrol sistemlerinde esas amaç her hangi bir fiziksel büyüklüğü kontrol altına almaktır.

Çıkıştan alınan sinyal girişi arttıracak şekilde uygulanacak olursa, giriş artınca çıkış artar, çıkıştan alınan geri besleme sinyali artarak sürekli girişi artırır. Dolayısıyla çıkışta sürekli artış içerisinde olacaktır. Bu artış bir süre sonra sistemin çıkışını sifıra götürüp, tekrar salınım yaparak devamlı karasız çalışacaktır.

Pozitif geri besleme osilatörlerde kullanılır. LC tank devresinde salınımlar esnasında kaybolan enerjiyi takviye amacıyla geri besleme yapılır. Sönümsüz osilasyon ancak pozitif geri besleme ile elde edilir.

Çıkıştan alınan sinyal girişi azaltacak yönde uygulanırsa bu tip geri beslemeye negatif geri besleme denir. Sistem girişi ve geri besleme oranı herhangi bir değere ayarlanır, ve bu değer sabit olması istenir. Sistemde bir değişme olmazsa çalışmasını ayarlandığı gibi sürdürür. Dışarıdan gelen bir bozucu etki sonunda çıkışta bir azalma olursa, bu azalma geri besleme sinyalini de azaltacaktır. Girişteki değer ile geri besleme arasındaki değer artacak ve yükseltici devresine daha büyük bir sinyal gireceğinden, çıkıştaki azalmayı önleyecektir. Çıkış yükselecek olursa, geri besleme sinyali de yükselecek, girişi daha fazla azaltarak çıkıştaki artışı önlemeye çalışacaktır.

Negatif geri beslemeli sistemlerde $TF = \frac{G3}{1 + G3H3}$ (aradaki işaret +)

Pozitif geri beslemeli sistemlerde $TF = \frac{G3}{1 - G3H3}$ (aradaki işaret -)

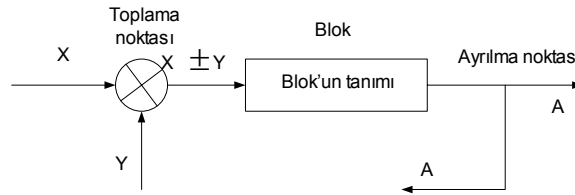
3.5 BLOK DİYAGRAMLARI

Bir kontrol sistemi bir çok elemanlardan oluşabilir. Sistemin türüne ve işlevine bağlı olarak eleman sayısı değişir. Kontrol sisteminde her bir eleman tarafından oluşturulan fonksiyonları göstermek için blok diyagramı olarak isimlendirilen bir diyagram kullanılır

Bir sistemin blok diyagramı, sistemin her bir eleman ya da eleman grubunun fonksiyonel veya sinyal akışının grafiksel gösterimidir. Blok diyagramı çeşitli elemanlar arasında varolan karşılıklı bağıntıyı tanımlar.

3.5.1 BLOK DİYAGRAMI ELEMANLARI:

Bir blok diyagramı bloklar,oklar,toplama noktaları ve ayrılma noktalarından (kol noktası)meydana gelmiştir. Blok diyagramında tüm sistem değişkenleri birbirine işlevsel (fonksiyonel) bloklar halinde bağlıdır.



Şekil 3.6 Blok Şema Elemanları

a. Oklar: bir blok diyagramının bloklarını ve diğer elemanları birbirine bağlayan ve sinyallerin akış yönünü gösteren işaretler olarak ele alınır. Okların yönü sinyallerin akış yönünü gösterir ve bir blok diyagramı içinde sinyaller yalnızca oklar yönünde olabilir.

b. Toplama Noktaları: Bir toplama noktası toplama işlemini belirten içi boş veya içine çapraz konmuş bir çemberle gösterilir. Toplama noktaları bir blok diyagramı içerisinde yerine getirdikleri işlevlere göre mukayese noktası veya hata sezici ve toplayıcı olmak üzere iki şekilde bulunurlar.

c. Ayrılma Noktaları Veya Kol Noktaları: Oklar ile temsil edilen sinyallerin kollara ayrıldığı ve bir bloktan ayrılan çıkış sinyalinin aynı zamanda diğer bloklara veya toplama noktalarına gittiği noktalardır.

3.5.2 BLOK DİYAGRAMININ TEMEL ÖZELLİKLERİ:

- a) Blok diyagramı gerçek sistemin sinyal akışını gösterir. Bu nedenle matematiksel yöntemle göre sistemi daha gerçekçi bir şekilde gösterir.
- b) Sistemin dinamik davranışı ile ilgili bilgiyi içermekte olup sistemin fiziksel yapısı ile ilgili herhangi bir bilgiyi içermez.
- c) Üzerinde enerjinin esas kaynağı açık bir şekilde gösterilmez.
- d) Ele alınan çözümlerin bakış açısına bağlı olarak bir sistem içinde farklı sayıda blok diyagramı çizilebilir.

3.5.3 BLOK DİYAGRAMLARININ İNDİRGENMESİ:

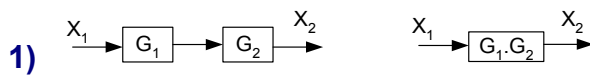
Blok diyagramı indirgenmesinde amaç tüm sisteme ait transfer fonksiyonunu bir blok içerisinde göstermek ve böylece sisteme ait giriş çıkış bağıntısını elde etmektedir.

Blok diyagramının indirgenmesinde:

- 1) Geri besleme yolu üzerinde transfer fonksiyonları çarpımı aynı kalmalı ,
- 2) Geri besleme döngüsü içerisindeki, transfer fonksiyonu aynı kalmalı.

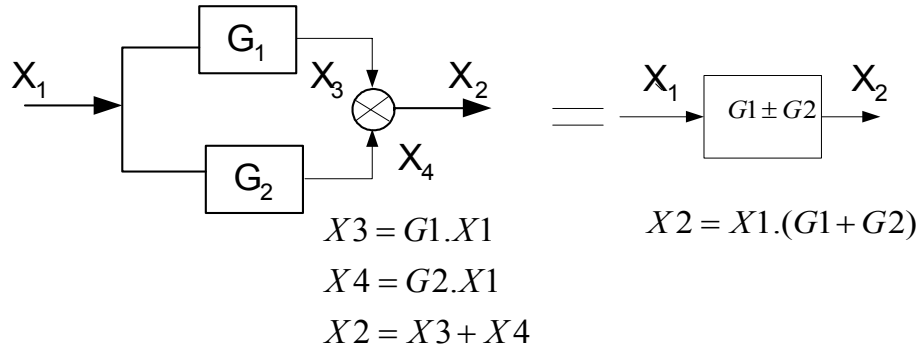
3.5.4 BLOK DİYAGRAMI İNDİRGEME KURALLARI

Karmaşık yapıdaki blok diyagramları aşağıda verilen basit indirgeme kuralları uygulanarak her giriş – çıkış arası tek bir blok'a indirgenebilir.

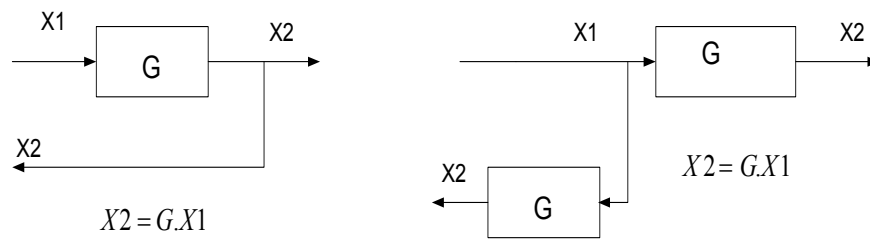


$$X_2 = G_1.G_2.X_1$$

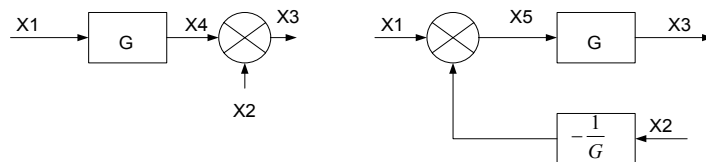
2)



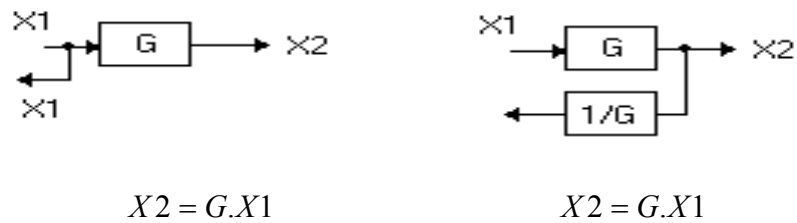
3)



4)



5)



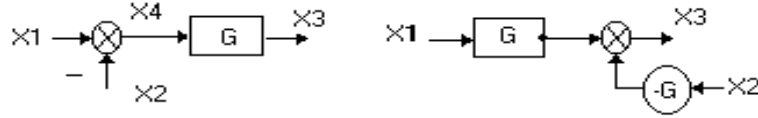
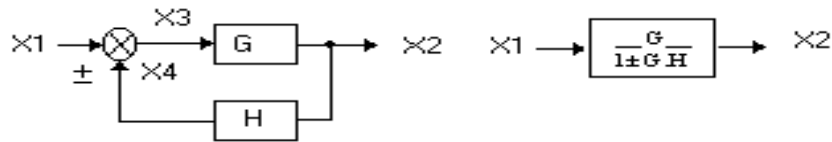
6)

$$X4 = G.X1$$

$$X3 = X4 - X2$$

$$X5 = X1 - \left(\frac{1}{G}\right).X2$$

$$X3 = G.X5$$


7)


$$X4 = X1 - X2$$

$$X3 = G.X1 - G.X2$$

$$X3 = G.X4$$

$$X2 = G.X3 = G.(X1 - X4)$$

$$X3 = X1 + X4$$

$$X2 = G.(X1 - H.X2) \dots\dots X4 = H.X2 \text{ idi}$$

$$X4 = H.X2$$

$$X2 = G.(X1 - H.X2)$$

$$X2 = G.X3$$

$$X2 = G.X1 - G.H.X2 \Rightarrow ..G.X1 - G.H.X2 - X2 = 0$$

$$G.X1 - X2.(1 + G.H)) \dots \text{Buradanda } X2' \text{ yi } \text{çeker sek}$$

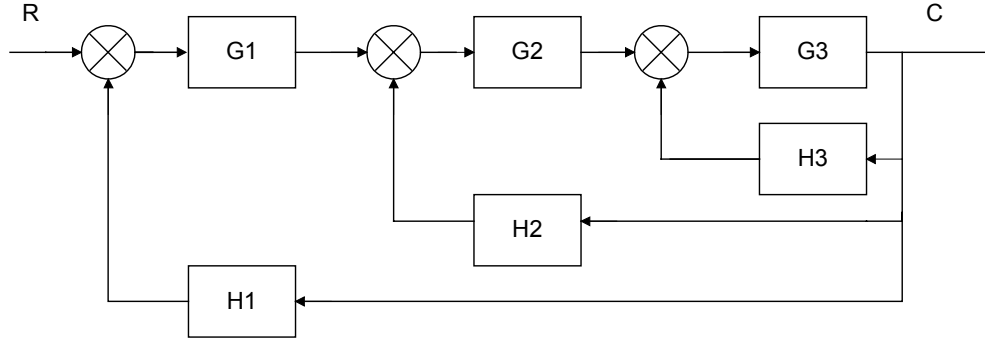
$$X2 = \left(\frac{G.X1}{1 + G.H} \right) = \frac{G}{1 + G.H} . X1 \text{ elde edilir.}$$

$$X2 = X1 . \frac{G}{1 + G.H}$$

3.5.5 KARMAŞIK BLOK DİYAGRAMLARININ İNDİRGENMESİ

Blok diyagramları bazen o kadar karmaşık bir hale gelir ki , sistemin tepkisini görebilmek veya inceleyebilmek açısından indirgemek gerekebilir. Sistemin eş değer transfer fonksiyonu bulunarak sistemin geneli hakkında bir yorum yapılabilir duruma getirilir Aşağıdaki örnekte karmaşık bir blok diyagramın indirgenmesi adım adım yapılacaktır.

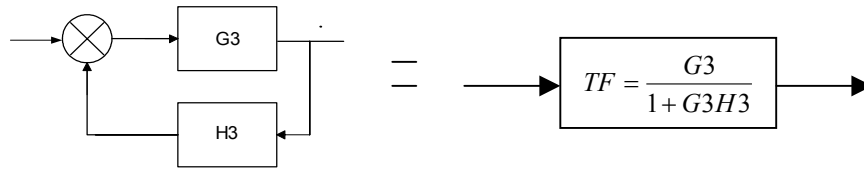
Örnek verilen blok diyagramı indirgeyerek transfer fonksiyonunu bulunuz.



Şekil 3.7 Karmaşık bir blok diyagram örneği

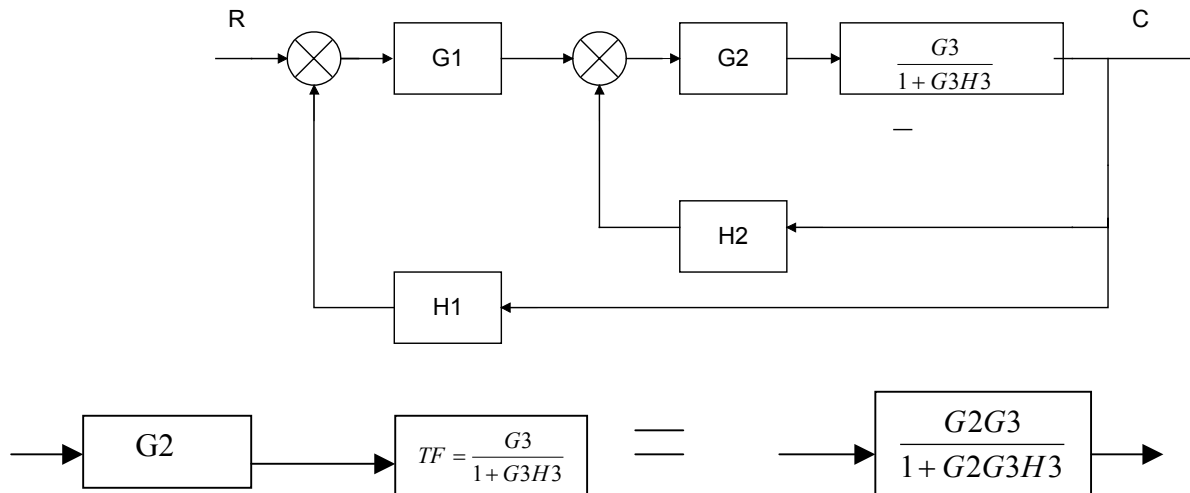
Çözüm için, blok diyagramında seri bağlı elemanlar, paralele elemanlar ve geri beslemeli bloklar aranır. Elektrik devrelerinde eşdeğer direncin bulunduğu gibi eşdeğer transfer fonksiyonun da bulunmasında işleme çıkış tarafında başlanarak girişe doğru ilerlenir.

Adım 1:

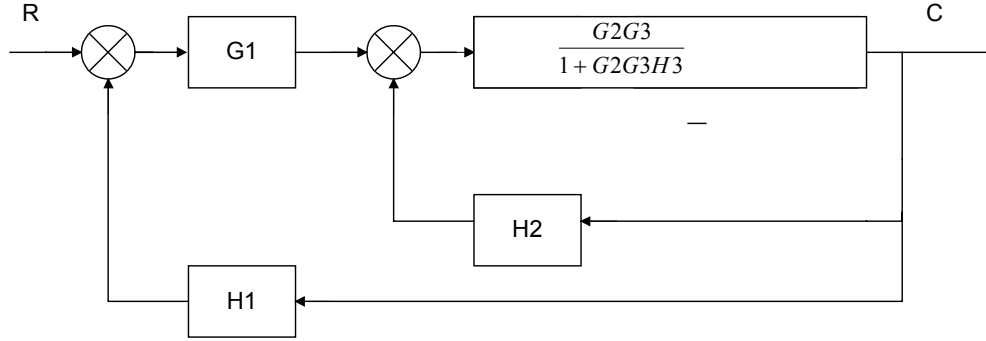


Bu tip geri beslemeli bir bloğun transfer fonksiyonu $TF = \frac{G3}{1 + G3H3}$ tür

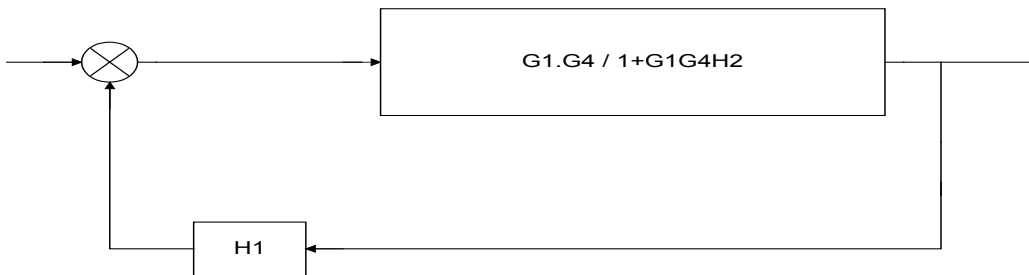
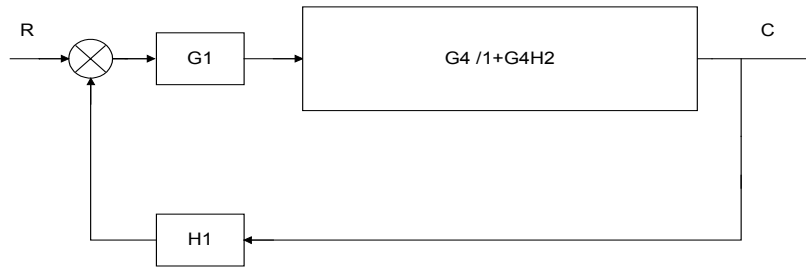
Blok diyagramımızı yeniden çizersek , blok diyagramı aşağıdaki gibi olur.



Seri hale gelen bloğun eşdeğeri alınır. Şimdi blok diyagramımızı yeniden çizelim.

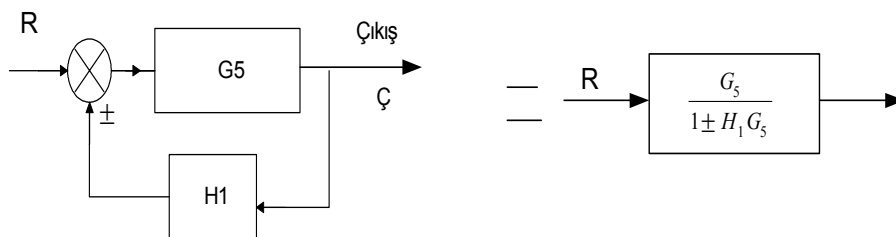


$$G_4 = \frac{G_2 G_3}{1 + G_2 G_3 H_3} \text{ dersek, } \frac{G_4}{1 + G_4 H_2}$$



$$G_5 = \frac{G_1 G_4}{1 + G_1 G_4 H_2}$$

dersek, o zaman blok diyagramını yeniden çizelim.

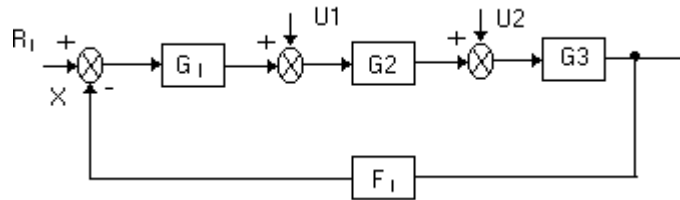


Devrenin eşdeğer transfer fonksiyonu = $\frac{G5}{1 + G5H1}$ olur.

3.5.6 ÇOK GİRİŞLİ TEK ÇIKIŞLI KONTROL SİSTEMİNE ÖRNEKLER

Örnek :

Verilen lineer devrenin eşdeğer transfer fonksiyonunu bulunuz.



Şekil 3.8 Çok girişli blok diyagram

Çözüm:

Devremiz lineer verildiğinden bir giriş haricinde tüm girişleri sıfır kabul ederiz. Aktif olan giriş için transfer fonksiyonunu bulunuz. Her bir giriş için transfer için aynı işlemi tekrarlayacağız.

ADIM I- U_1, U_2 girişleri sıfır kabul edilerek R girişi için transfer fonksiyonunu

$$CR = \frac{G2.G3}{1 + G1.G2.G3.F1}$$

ADIM II- $U_2 = R = 0$ kabul edilerek U_1 için transfer fonksiyonunu bulalım.

$$CU1 = \frac{G2.G3}{1 - G2.G3.F1}$$

ADIM III- $U_1 = R = 0$ kabul edilerek U_2 için transfer fonksiyonunu bulalım.

$$CU2 = \frac{G3}{1 - G1.G2.G3.F1}$$

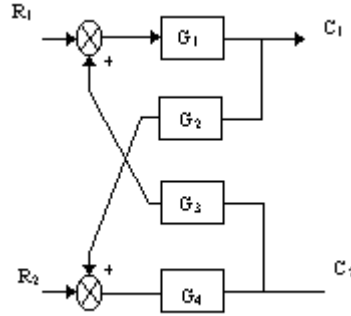
Eşdeğer transfer fonksiyonu hepsinin toplamına eşittir.

$$C = CR + CU1 + CU2$$

$$C = \frac{G1.G2.G3}{1 + G1.G2.G3.F1} + \frac{G2.G3}{1 - G1.G2.G3.F1} + \frac{G3}{1 - G1.G2.G3.F1} \text{ olarak bulunur.}$$

Örnek :

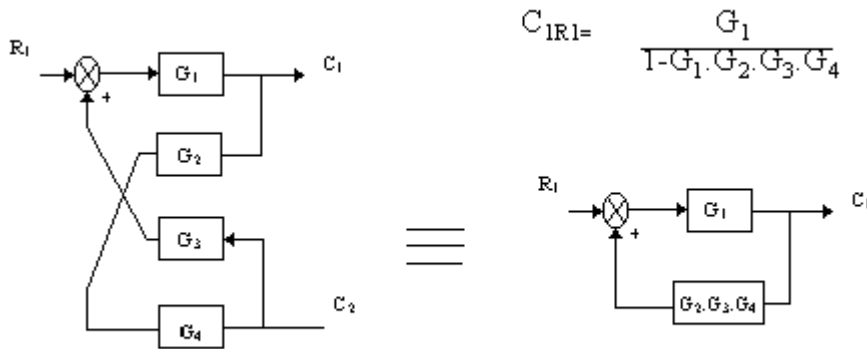
İki girişli iki çıkışlı kontrol sisteminin eşdeğer transfer fonksiyonunu bulunuz.



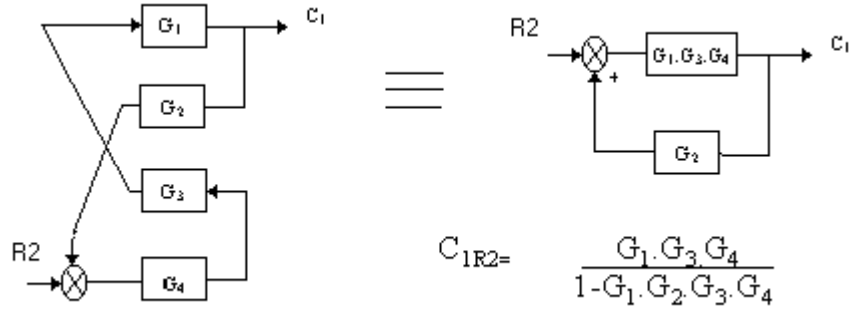
Şekil 3.9 İki giriş iki çıkışlı blok diyagram

Bu tip blok diyagramların eşdeğer transfer fonksiyonunu bulmak için ,her bir adımda bir giriş ve bir çıkış haricinde tüm giriş ve çıkışlar sıfır kabul edilerek her girişin .her bir çıkışa göre transfer fonksiyonu bulunur.Örneğin bu devre de 4 adet transfer fonksiyonu bulunacak ,eşdeğer transfer fonksiyonu ise iki adet olacaktır.Her çıkışa göre transfer fonksiyonu olacak .burada iki çıkış olduğuna göre iki adet transfer fonksiyonumuz olur.

ADIM I: $R_2 = 0$ kabul edilerek , R_1 'in C_1 çıkışına göre transfer fonksiyonunun bulunması devreyi R_2 ve C_2 göz ardı ederek yeniden çizersek;



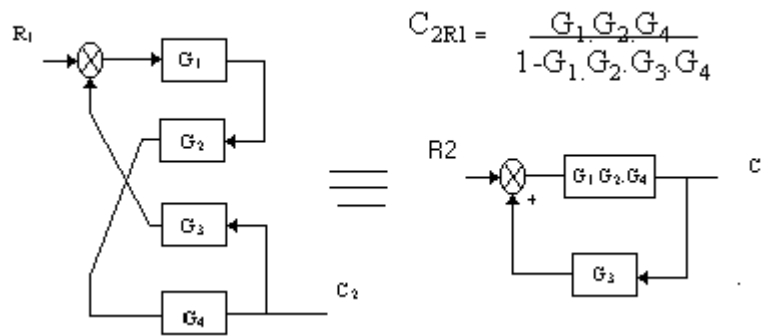
ADIM II: C_1 çıkışını R_2 girişine bulursak



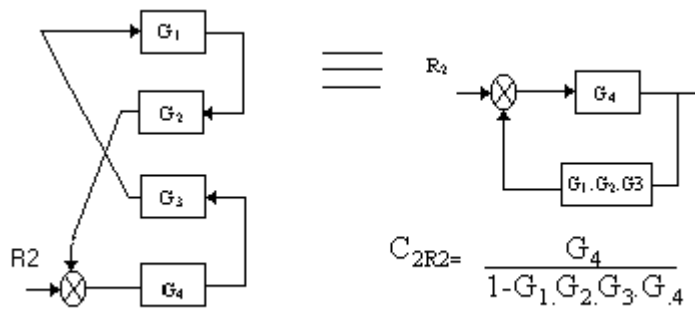
$$C_1 = C_{1R1} + C_{1R2} = \frac{G_1}{1 - G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4} + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3}{1 - G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4} \quad C_{2R1} = \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_4}{1 - G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4}$$

ADIM III;

C_2 çıkışına göre transfer fonksiyonunu bulalım.
Bu durumda, C_1 göz ardı edilerek, $R_2 = 0$ kabul edilir. Blok diyagramını çizersek;



ADIM IV-; R_2 girişine göre C_2 çıkışını bulalım .



$$C_2 = C_{2R1} + C_{2R2} = \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3}{1 - G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4} + \frac{G_4}{1 - G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4} \text{ olur..}$$

3.6 KONTROL SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLERİ:

Kontrol sistemlerinin analiz , tasarım ve boyutlandırılmasında tüm sistem dinamiğini tanımlayan , giriş ve çıkış bağıntıları ile durum değişkenlerini içeren diferansiyel ya da integro-diferansiyel denklemlerin elde edilmesi gerekir. Sistemin değişkenleri arasındaki bağıntılarını veren bu denklemlere otomatik kontrol sistemlerinin matematiksel modeli denir.

Elde edilen diferansiyel denklemler lineer ve sabit katsayılı ise çözümü Laplace transformu kullanılarak yapılabilir. Lineer olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü için genel ve doğrudan bir çözüm yoktur. Bu tür denklemlerin çözümü ise bilgisayar programları veya denklemleri lineerleştirilerek yapılabilir.

Kontrol sistemi problemlerinin çözümünde değişik türden mekanik , elektrik, pnömatik , hidrolik , optik ... vb bileşen sistemlerle karşılaşmak olağandır. Bu problemi çözecek kişinin iyi bir matematik bilgisinin yanında değişik türden olan bileşenlerin davranışlarını belirleyen kuralları ve kanunları bilmesi zorunludur.

Bu nedenle kontrol sistemlerinin tasarımını yapmak bir mühendislik işidir. Tekniker düzeyinde tasarım yapmak değil sistemi genel hatları ile kavramak önemlidir. Onun için matematiksel modelleme konusu basit örneklerle geçilecektir.

3.6.1 LAPLACE TRANSFORMASYONU

Lineer servo sistemlerin çözümünde en çok kullanılan bir matematiksel çözüm yöntemidir. Genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathcal{L} = \int_0^{\infty} e^{-st} \cdot dt$$

Laplace transformu operatörü herhangi bir $f(t)$ fonksiyonuna uygulanırsa ortaya yeni bir $F(s)$ fonksiyonu çıkar. $F(s)$ fonksiyonu frekans domeninde bir fonksiyondur, $f(t)$ ise zaman domenindedir.

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-st} dt [f(t)]$$

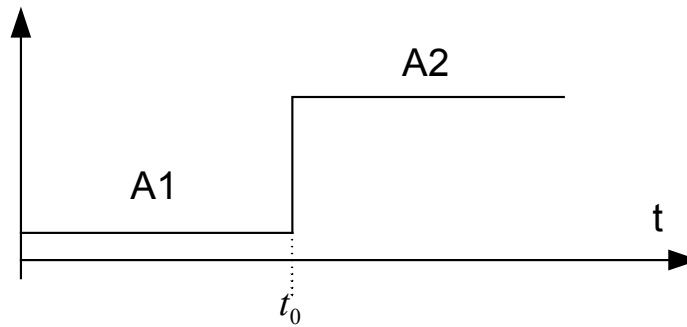
Bu denklemden anlaşılacağı üzere değişkeni t olan herhangi bir fonksiyonun Laplace transformu , sözü edilen fonksiyonu e^{-st} ile çarpıp, çarpımın $t = 0$ ve $t = \infty$

arasında integralinin alınması ile elde edilir. Burada $s = \sigma + j\omega$, kompleks bir değişkendir.

LAPLACE TRANSFORMU ÖRNEKLERİ

1 - Bir katsayının, $f(t) = A$ ise Laplace transformu $F(s) = \frac{A}{s}$ olur.

2 - Adım fonksiyonunun Laplace transformu



Bir değişken, sabit bir değerden ikinci bir sabit değere geçiş yaparsa bu değişime adım fonksiyonu denir. Örneğin lojik sinyaller bir adım fonksiyonudur. Adım fonksiyonunun Laplace transformu.

$t < 0$ için $f(t) = f(0)$ ve

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}(0) = 0$$

$t \geq 0$ için $f(t) = f(A_2)$

$$\mathcal{L}[f(t)] = \mathcal{L}(A_2) = \frac{A_2}{s}$$

$$e^{-at} \longrightarrow \frac{1}{s+a}, \quad e^{at} \longrightarrow \frac{1}{s-a}$$

Birinci dereceden bir türevin Laplace transformu

$$f'(t) \longrightarrow sF(s) - f(0)$$

İkinci dereceden bir türevin Laplace transformu

$$f''(t) \longrightarrow s^2 F(s) - sF(s) - f'(0)$$

n. inci dereceden bir türevin Laplace transformu

$$f^{(n)}(t) \longrightarrow s^n F(s) - [s^{n-1} f(0) + s^{n-2} f'(0) + \dots + f^{(n-1)}(0)]$$

Trigonometrik fonksiyonların Laplace dönüşümleri

$$F(t) = \sin bt$$

$$\mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} \sin bt \cdot e^{-st} \cdot dt$$

$$\sin bt = (e^{jbt} - e^{-jbt}) / 2j$$

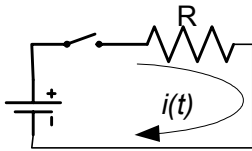
$$\mathcal{L}(\sin bt) = \frac{1}{2j} \int_0^{\infty} (e^{jbt} - e^{-jbt}) e^{-st} dt$$

$$\mathcal{L}(\sin bt) = \frac{1}{2j} \left[\frac{-1}{s-jb} e^{(-s+jb)t} + \frac{1}{s+jb} e^{(-s-jb)t} \right]_0^{\infty} = \frac{1}{2j} \left(\frac{1}{s-jb} - \frac{1}{s+jb} \right)$$

$$\mathcal{L}(\sin bt) = \frac{b}{s^2 + b^2}$$

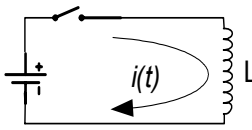
Diğer fonksiyonlar için matematik kitaplarına başvurunuz.

Elektriksel elemanların zaman domeninde gösterilişi



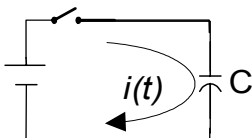
$$E = i(t) \cdot R \quad t \text{ domeninde}$$

$$\frac{E}{s} = I(s) \cdot R \quad S \text{ domeninde}$$



$$E = L \frac{di(t)}{dt} \quad t \text{ domeninde}$$

$$\frac{E}{s} = L(sI(s) - i(0)) \quad S \text{ domeninde}$$



$$E = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad t \text{ domeninde}$$

$$\frac{E}{s} = \frac{I(s)}{sC} + \frac{f^{-1}(0)}{sC} \quad S \text{ domeninde}$$

3.6.2 TERS LAPLACE DÖNÜŞÜMÜ

Laplace transformasyonu t domenindeki karmaşık denklemlerin çözümünde kolaylıklar sağlar. Ancak sonucun s domeninde değil, t domeninde olması gerekir. Bunun için elde edilen sonucun t domeninde gösterimi için ters Laplace dönüşüm gereklidir. Ters Laplace dönüşüm

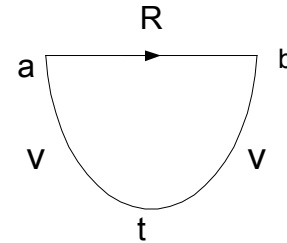
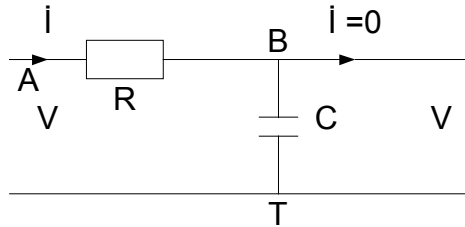
$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t)$ şeklinde ifade edilir.

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{A}{s}\right) = A$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{A}{s+a}\right) = Ae^{-at}$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{b}{s^2+b^2}\right) = \sin bt$$

Örnek:



$$V_1 = R_{i(t)} + V_c$$

$$V_1 = R_{i(t)} + V_c = V_2 = \frac{1}{C} \int I(t).dt$$

$$V_1 = R_{i(t)} + \frac{1}{C} \int I(t).dt$$

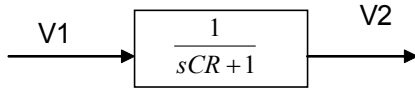
ifadeleri bulunur. Sabit katsayılı diferansiyel denklem olduğundan laplace transformu uygulanır.

$$V_1 = R.I(s) + \frac{Is}{sC} \quad V_2 = \frac{I(s)}{sC} \quad TF = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{I(s)}{sC}}{R.I(s) + \frac{Is}{sC}}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{I(s)}{sC}}{R.I(s) + \frac{I(s)}{sC}} \quad \text{Pay ve payda } sC \text{ ile çarpılırsa}$$

$$= \frac{Is}{sCR + 1} = I(s) \text{ler sadeleştirilirse}$$

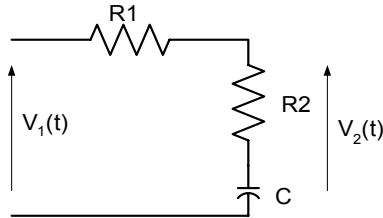
$$= \frac{1}{sCR + 1} \text{ olarak bulunur. Bu verilen devrenin transfer fonksiyonu olur.}$$



Şeklinde gösterilir.

Örnek :

Verilen devrenin transfer fonksiyonunu bulunuz.



$$V1(t) = R1I(t) + R2I(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) .dt$$

$$V2(t) = R2I(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) .dt$$

$$V1(s) = R1.I(s) + R2.I(s) + \frac{1}{sC}.I(s)$$

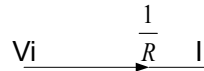
$$V2(s) = R2.I(s) + \frac{1}{sC.I(s)}$$

$$G(s) = \frac{V2(s)}{V1(s)} = \frac{R2.I(s) + \frac{1}{sC}.I(s)}{R1.I(s) + R2.I(s) + \frac{1}{sC}.I(s)}$$

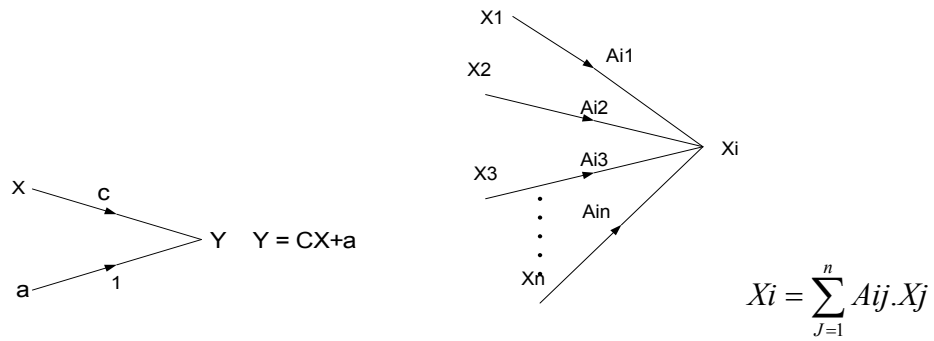
$$G(s) = \frac{V2(s)}{V1(s)} = \frac{R2.Cs + 1}{(R1 + R2).Cs + 1} \quad TF = \frac{R2.Cs + 1}{(R1 + R2).Cs + 1}$$

3.7 SİNYAL AKIŞ GRAFİKLERİ:

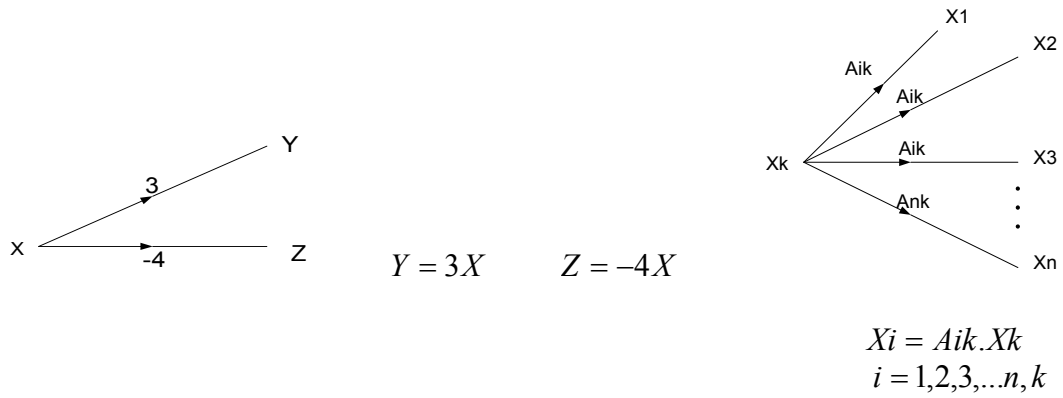
1) Ohm Kanunu



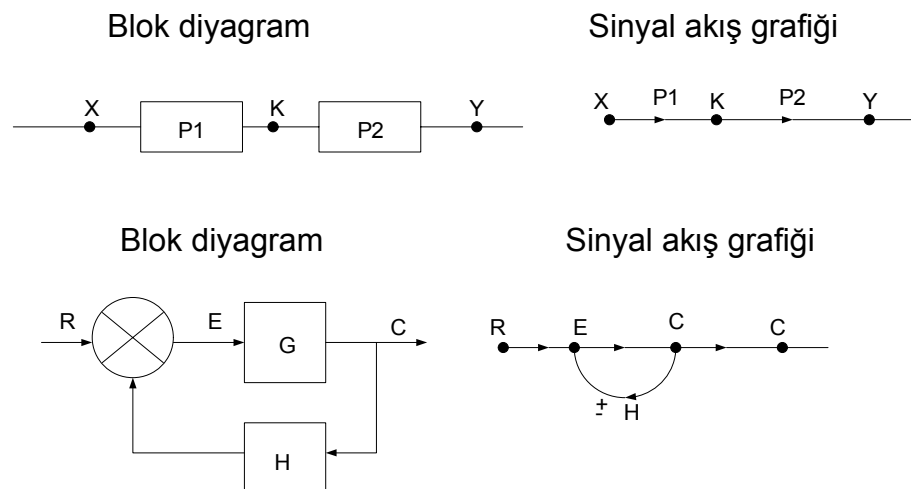
2) Bir düğüm noktasına gelen sinyallerin toplamı:



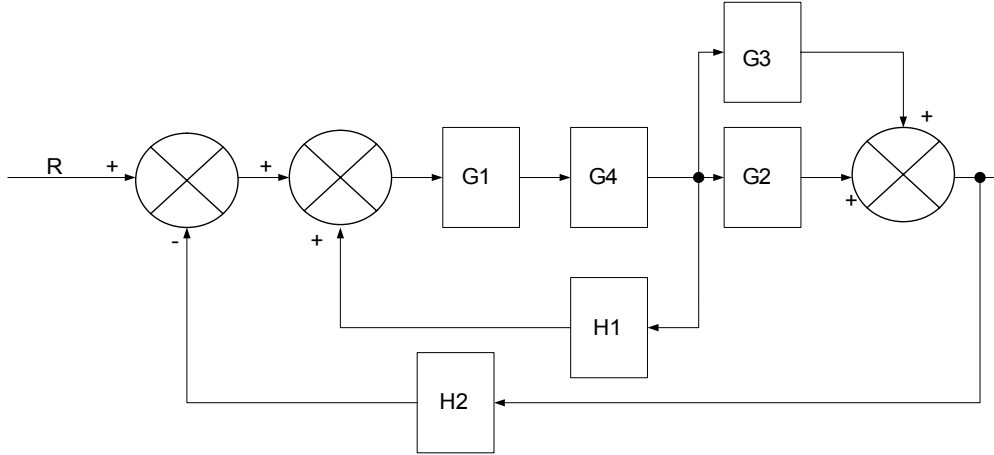
3) Bir düğüm noktasını terk eden sinyaller.



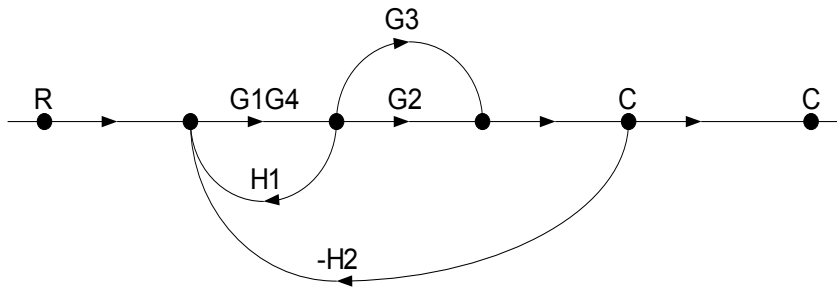
3.7.1 BLOK DİYAGRAMLARININ SİNYAL AKIŞ GRAFİKLERİ



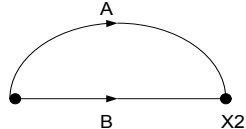
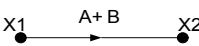
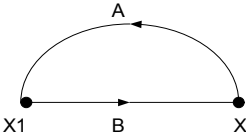
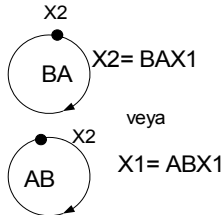
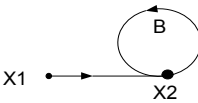
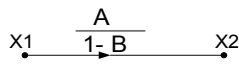
Blok diyagram



Sinyal akış grafiği



Sinyal Akış Profillerinin Matematiksel Tanıkları:

- 1)  $X_2 = AX_1 + BX_1$ 
- 2)  $X_2 = BX_1$
 $X_1 = AX_2$ 
- 3)  $X_2 = AX_1 + BX_2$
 $X_2 = \left(\frac{A}{1-B} \right) X_1$ 

4 OTOMATİK KONTROL

Otomatik kontrolün amacı , insan denetimi gerektirmeden bir sistemde üretilen değişkenler üzerinde ayar yapmak , sistemin istenilen şekilde çalışmasını sağlamaktır. Örneğin elektrik şebekemizde kullandığımız gerilimin değeri 220 Volt 'tur. Bu gerilim değerinin 220 voltta sabit kalması gerekir.

Otomatik kontrol işte burada devreye girer. Şebeke gerilimini etkileyen değişimlerin etkisini ortadan kaldırmak için sistemin analizi yapılır. Dışarıdan gelecek olumsuz etkiler belirlenir. Sistemin kendi içindeki parametrelerin durumları incelenir. Tüm sistemi kapsayacak matematiksel modellemeler geliştirilerek sabit tutulmak istenen çıkış büyüklüğünü denetime alacak sistemler tasarlanır.

O halde elektrik enerjisi üreten üreticin, çıkış değişkenlerinden biri gerilimdir. İşte üretilen bu değişkenin değeri bizim için önemli ve sabit bir değer de tutmak istiyorsak bir kontrol devresine ihtiyacımız var demektir. İyi bir kontrol sisteminde aranan özellikler aşağıdaki gibidir.

1) Sistem de meydana gelen herhangi bir bozucu etkiden sonra bile değişkenin değeri set değerinden minimum şekilde sapma olmalıdır.

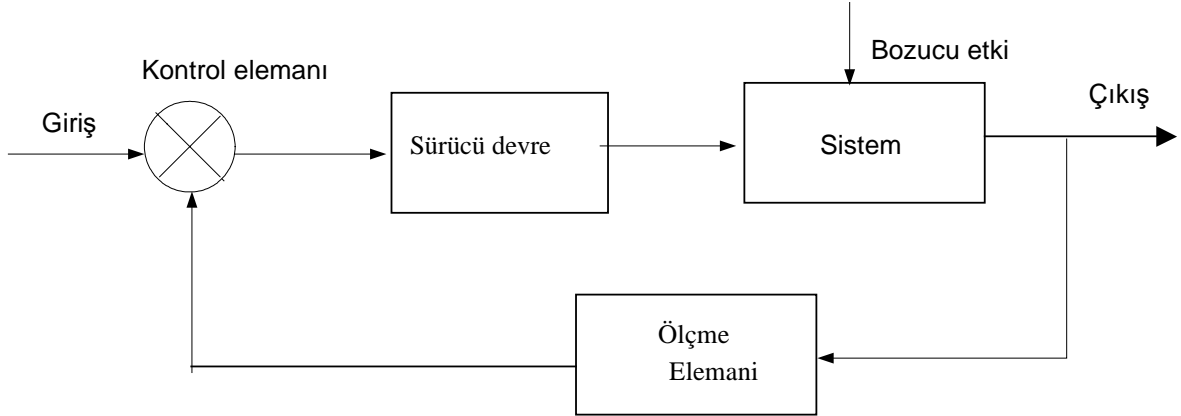
Örnek olarak bir elektrik motorunu ele alalım. Motor boşta çalışırken devir sayısı 1500 d/d ise yüklendiğinde de 1500 d/d olmalıdır. Ani yük kalkışlarında veya yüklenmelerinde bile devir 1500 d/d 'ya fazla uzak olmamalıdır. Değişim mümkünse hiç olmamalı veya en az olmalıdır.

2) Bozulma sonunda , normal çalışmaya en kısa zamanda dönebilmelidir. Motoru yine düşünecek olursak, ani yüklenmelerde ve yük boşalmalarında devrinde mutlaka bir değişiklik olacaktır. Ancak normal devrine dönme süresi ne kadar kısa olursa o kadar iyidir.

3) Çalışma şartlarında meydana gelen değişimlerden ötürü olacak sapma set değerinden minimum seviyede olmalıdır. Çalışma şartlarını belirleyen giriş değişkenleri veya ortam da oluşan olumsuzluklardan çok fazla etkilenmemelidir.

4.1 KONTROL SİSTEMİ ELEMANLARI

Kontrol sistemi elemanları bloklar şeklinde şekil 3.1 'deki gibi gösterilir.



Şekil 4.1 Kapalı çevrim otomatik Kontrol blok diyagramı

Bu blok diyagramındaki kısımların işlevi aşağıdaki gibi düşünülebilir.

4.1.1 KONTROL ELEMANI

Set değeri ile ölçme elemanından aldığı değerlere göre çıkış veren devredir. Devrenin çalışmasına karar verecek sinyali üretir.

4.1.2 ÖLÇME ELEMANI

Otomatik kontrol sisteminde , kontrol edilmek istenen değişken sürekli olarak ölçülmelidir. Çünkü sistem sürekli olarak bozucu etkilerin altındadır. Bozucu büyüklük geldiğinde ölçme elemanı , kontrol elemanına yeni değerle ilgili sinyal göndermelidir. Ölçme bir kontrol sistemi için çok önemlidir.

4.1.3 SÜRÜCÜ DEVRE

Sistemin çalışması için kontrol elemanından aldığı sinyale göre güç elemanına enerji akışını sağlayan elemanlardır.



4.1.4 SİSTEM

Kontrol edilmesi istenen değişkeni üreten elemanlardır. Kontrol etmek istediğimiz değişken bir motorun devri ise burada sistem diye adlandırılan eleman motordur.

4.2 - OTOMATİK KONTROL TÜRLERİ

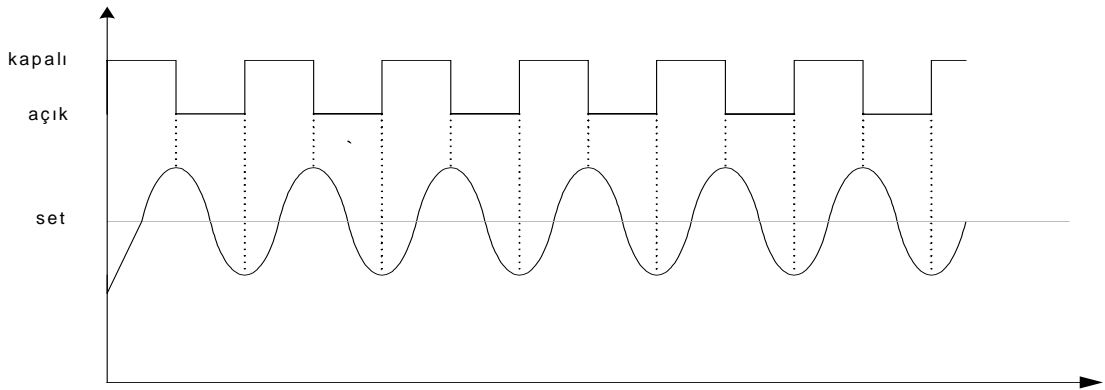
Otomatik kontrol sisteminde blok diyagram üzerindeki kontrol elemanı, sistemin herhangi bir çıkış değişkeni üzerinde istenilen set değeri etrafında çalışması gereken bir duyarlılıkla sistemi kontrol eder. Çıkış büyüklüğüne , duyarlılığa ve konuma göre çeşitli kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bunlar;

- 1) Açık – Kapalı (Off – On) kontrol
- 2) Oransal Kontrol (Proportional P)
- 3) Oransal + İntegral Kontrol (PI)
- 4) Oransal + Türevsel Kontrol (PD)
- 5) Oransal + İntegral + Türevsel (PID)
- 6) Zaman Oransal (Time Proportional)
- 7) Bulanık mantıkla kontrol

4.2.1 – AÇIK – KAPALI KONTROL (ON – OFF)

Bu tip kontrollerde sistemin enerjisi güç elemanına ya tam uygulanır, ya da tam kesilir. Güç elemanı iki durumda bulunabilir; ya çalışıyordur ya da duruyordur. Örnek olarak elektrikle çalışan bir ısıtıcıyı ele alalım. Bu ısıtıcı, bir odayı ısıtsın. Ancak oda sıcaklığı 22 santigrad dereceye ayarlansın.

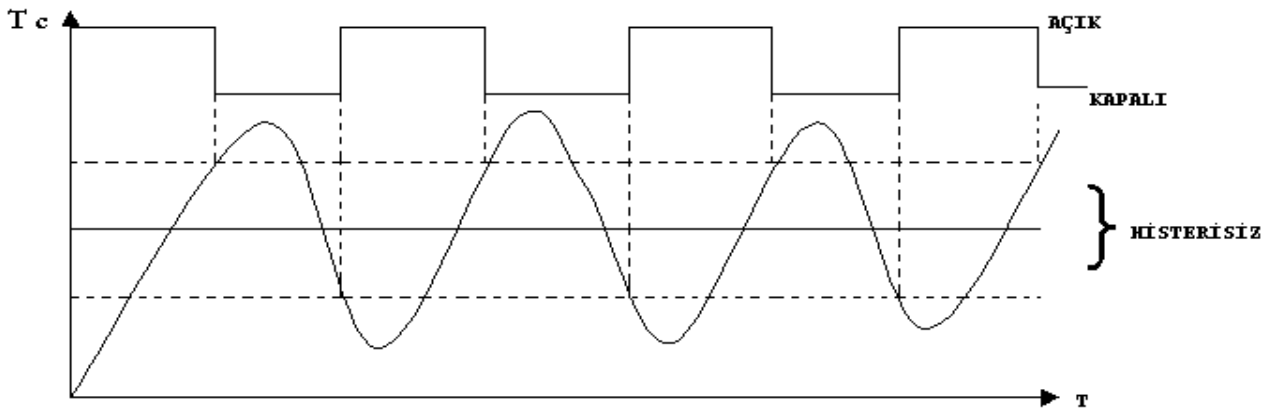
Oda sıcaklığı 22 C⁰ 'ye gelinceye kadar ısıtıcı çalışır. 22 C⁰ 'ye gelince ısıtıcı devreden çıkar. Aşağıda bu tip kontrole ait sıcaklık – zaman eğrisi ve transfer eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.2

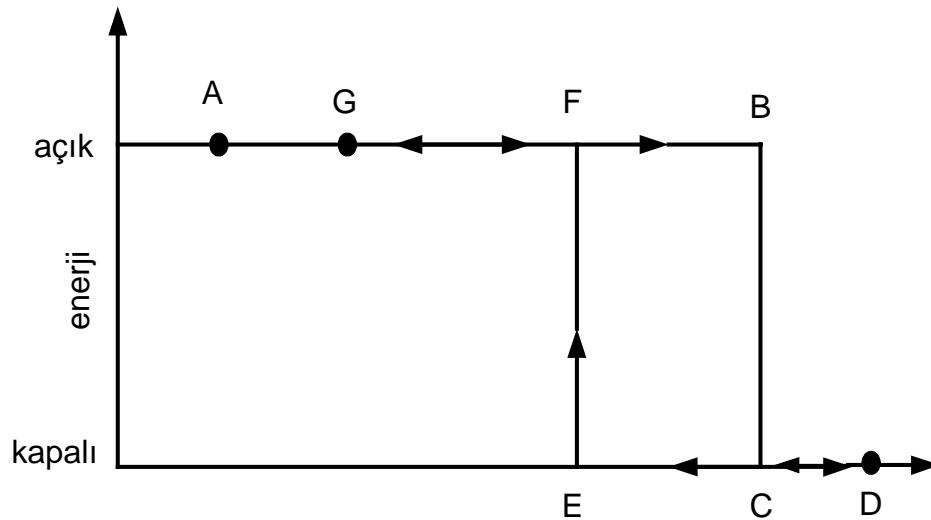
Bu tip açık – kapalı kontrol de kontrol değişkeni olan ortam sıcaklığı sürekli değişim halindedir. Isıtıcı 22 C^0 'de durur durmaz sıcaklık, biraz sonra bu değerin altına düşecektir, örneğin $21,9\text{ C}^0$ gibi. Ortam sıcaklığı set değerinin altına düşer düşmez ısıtıcı yeniden çalışmaya başlayacaktır. $21,9\text{ C}^0$ den 22 C^0 'ye çıkınca tekrar duracaktır. Isıtıcı $0,1\text{ C}^0$ 'lik bir aralıkta çalışıp - duracaktır. Yani bir osilasyona girecektir. Böyle bir osilasyon güç elemanını çalıştırıp durduran sürücü devrenin çabuk bozulmasına neden olur. Sistemin verimini düşürür.

Devrenin böyle bir osilasyona girmesini önlemek için sabit bir band oluşturulur. Örneğin sıcaklık 22 C^0 'ye set edilir. Ancak ısıtıcı 24 C^0 'ye kadar çalışmasını sürdürür. 24 C^0 'ye gelince durur. Ortam sıcaklığı 20 C^0 'nin altına düşmeden ısıtıcı devreye girmez. Ortam sıcaklığı 20 C^0 'nin altına düşünce ısıtıcı devreye girer. Böylece ısıtıcının devreye girip çıkması için 4 C^0 'lik sabit bir band oluşturularak sistemin sürekli çalışıp durma durumu önlenmiş olur. Şekil 3.3 de sabit band'lı bir açık-kapalı kontrol eğrisi görülmektedir. Bu sabit banda histerisiz bandı da denir.



Şekil 4.3 Histerisizli açık – kapalı kontrol eğrisi

Bu eğriden anlaşılabacağı üzere, ısıtıcı set değerini geçtiği anda enerji kesilmez, belirli bir değere kadar yükselir, daha sonra kapanır. Enerji kesildikten sonra sıcaklık düşmeye başlar. Yine sıcaklık set değerinin altına iner inmez ısıtıcı devreye girmez. Set değerinin altındaki değere kadar düşünce ısıtıcı tekrar çalışmaya başlar. Set değerinin altında ve üstündeki çalışma –durma noktaları arasındaki bu bandın darlığı veya genişliği kontrol edilen prosesin gerektiği kadar olmalıdır. Şekil 4.4’ histerisizli açık – kapalı kontrol türü transfer eğrisi görülmektedir.



Isıtıcıya enerji verildiğinde sıcaklık B noktasına gelinceye kadar ısıtıcı çalışır. B noktasına gelince ısıtıcının enerjisi kesilir. Isıtıcının enerjisi kesildiği halde sıcaklık C noktasından D noktasına doğru biraz daha yükselir.

Bura da set değeri C-E noktalarının ortasındadır. E noktası ısıtıcının tekrar çalışmaya başlayacağı alt noktadır.

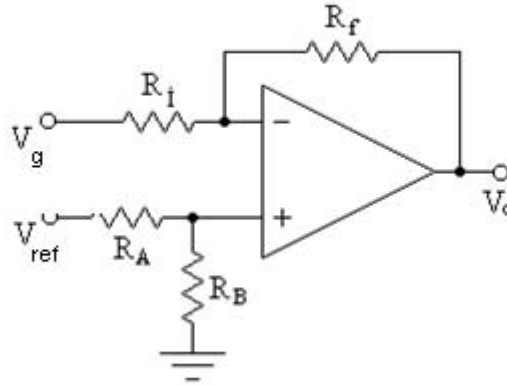
Sıcaklık E noktasının altına düşeceği anda ısıtıcı çalışmaya başlar, ancak ısıtıcının çalışmaya başlamasına rağmen sıcaklık G noktasına doğru düşmeye devam eder, sonra tekrara yükselmeye geçerek B noktasına doğru yükselmeye başlar. Isıtıcının enerjisi kesilir. Sıcaklık yine C noktasından D noktasına kadar yükselmeye devam eder. Bundan sonra sıcaklık düşmeye başlar ve sistem bu şekilde çalışmasını sürdürür. Buradaki anlatım da sıcaklık değişkeni örnek olarak alındıysa da sıcaklık değişkeni yerine basınç, sıvı seviye, debi gibi değişkenlerle de düşünülebilir. Yaygın olarak kullanılan açık – kapalı kontrol formunun yeterli olmadığı yerlerde bir üst form olan oransal kontrol kullanılır.

4.3 ORANSAL (PROPORTIONAL) KONTROL

Oransal kontrolde , çalışma devamlıdır. Ancak sistemin enerji ihtiyacı her an değişim gösterir. Kontrol cihazı, ölçme elemanından aldığı ölçme bilgisine göre sürücü elemanı uyarır. Sürücü eleman da güç elemanına giren enerjiyi kontrol eder. Ölçme elemanı kontrol edilen değişkeni sürekli ölçer ve kontrol elemanına sürekli olarak sinyal gönderir.

Sistemin set değerinde bir sapma olduğu anda ölçme elemanı bunun karşılığı olan elektrik sinyalini kontrol elemanına gönderir. Kontrol elemanı bu bilgiyi referans değer ile karşılaştırarak sürücü elemanı uyarır.

İşlemsel yükselteçlerin oransal kontrol elemanı olarak kullanılması



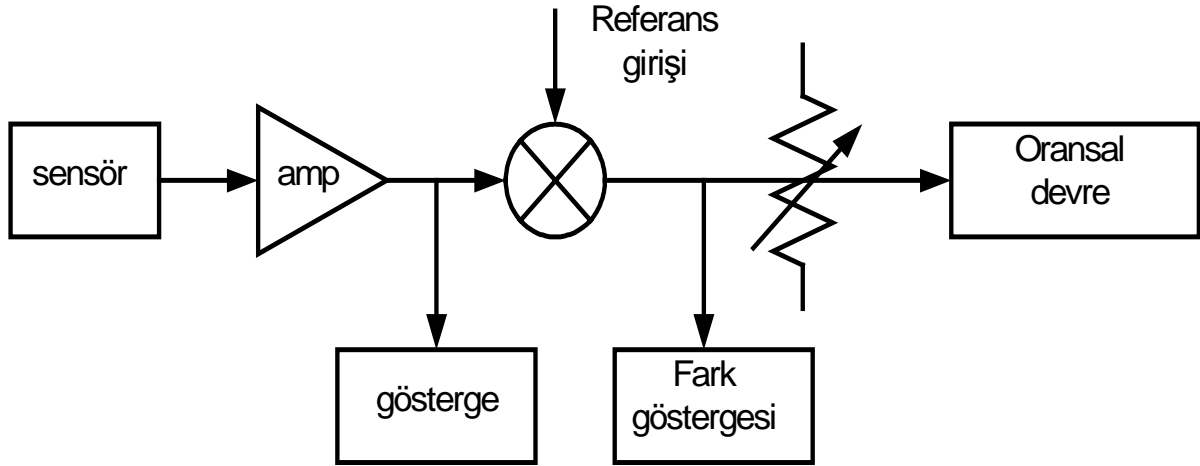
Şekil 4.5 İşlemsel yükseltecin oransal kontrol elemanı olarak kullanılması

İşlemsel yükselteç, şekil 4.6 'daki devrede oransal kontrol elemanı olarak kullanılabilir. Sistemin referans girişi işlemsel yükseltecin (+) girişine, geri beslemesi ise (-) girişine uygulanır. Devre elemanları eşit seçildiğini kabul edersek işlemsel yükseltecin çıkış gerilimi

$$V_o = \left(\frac{R_F}{R_i} + 1 \right) \left(\frac{R_B}{R_A + R_B} \right) V_{ref} + \left(\frac{R_F}{R_i} \right) V_g$$

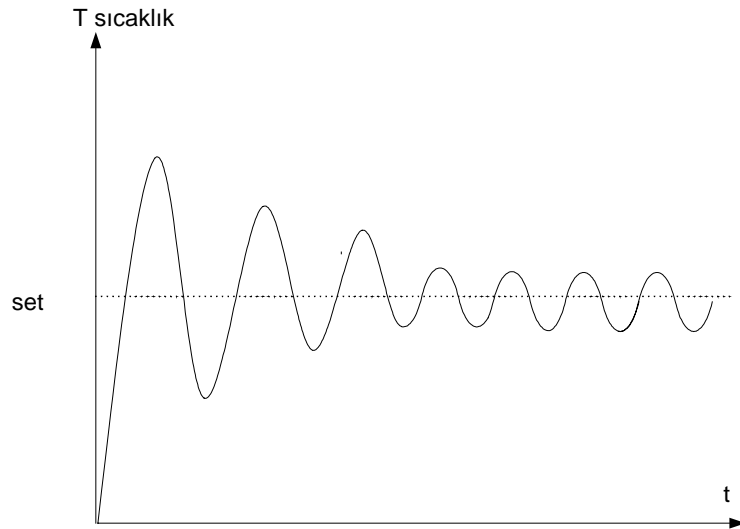
Bu denklemde $R_F = R_i = R_A = R_B$ seçilirse

$V_o = (V_{ref} - V_g)$ olur. Geri besleme gerilimi negatif girişe uygulanırsa , bu devrenin çıkışı bir oransal kontrol işlemi yapar. Burada R_g geri besleme gerilimidir.



Şekil 4.6 Oransal kontrol blok şeması

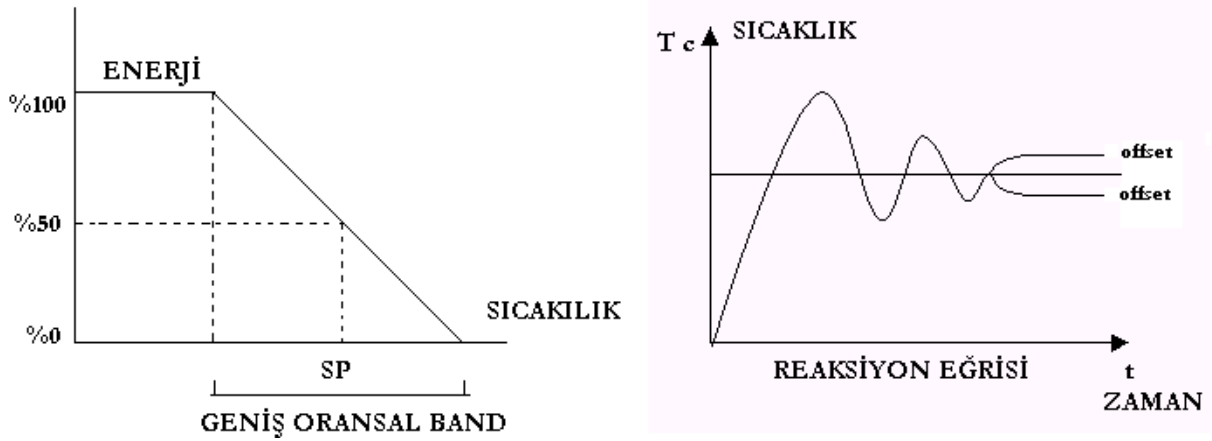
Bu devredeki sensörden gelen sinyal geri besleme sinyalidir. Çıkış büyüklüğü sensörler aracılığı ile elektriksel sinyale dönüştürülür. Amplifikatörlerde yükseltilerek toplayıcı devreye ya da kontrol elemanının negatif girişine uygulanır.



Şekil 4.7 Oransal kontrole ait reaksiyon eğrisi

İlk başlangıçta kontrol değişkeni set değerinin üstüne bir miktar çıkar, geri besleme ile bu yükseliş azaltılmaya çalışılır. Ancak azaltma etkisi, sistemi set değerinin altına düşürür. Tekrar yükseltme isteği gelir , tekrar yükselir ancak set değerini bir önceki duruma göre daha az geçer. Set değeri geçilince azaltma isteği gelir ve değişken azaltılır, ancak yine set değerinin altına düşer. Sistem belirli bir band içerisinde bir salınım girerek çalışmasını sürdürür.

Elektrik enerjisi kullanılarak ısıtma yapılan bir proseste , oransal kontrol cihazı ısıtıcının elektrik enerjisini prosesin ihtiyacı kadar verir. Enerjinin %0 ‘dan %100 ‘ e kadar ayarlanabileceği , oransal kontrol yapılabilen sıcaklık aralığına Oransal Band denir. Genel olarak oransal band, cihazın tam skala değerinin bir yüzdesi olarak tanımlanır ve set değeri etrafında eşit olarak yayılır. Örneğin 1000 C⁰’lik skalası olan bir cihazda %5’lik band, $1000 * 0,05 = 50 \text{ C}^{01}$ lik bir sıcaklık aralığı demektir. Bu 50 C⁰’lik aralığın yarısı set değerinin altında, yarısı da set değerinin üstündedir. Yani 975 ile 1025 C⁰ aralığını ifade eder. Oransal band %2 ye düşürüldüğünde değişim aralığı $1000 * 0,02 = 20 \text{ C}^{0}$ olacak ve 10 derece set değerinin altında 10 derece de üstünde yer alacaktır. Değişik proseslerde ve değişik şartlarda duruma en uygun oransal band seçilir. Aynı sistem için geniş ve dar olarak oransal band alalım ve sistemin tepkime eğrini inceleyelim.

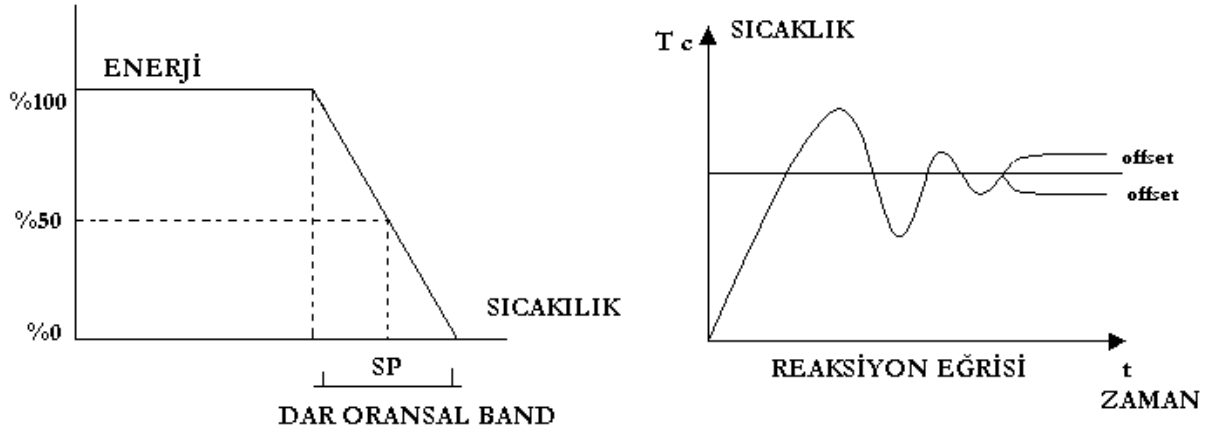


Şekil 4.8 Geniş olarak düzenlenen oransal band ve tepkime eğrileri

Geniş seçilmiş bir band da enerji değişim miktarı küçük, dar seçilmiş band da ise enerji değişim miktarı büyüktür. Oransal band daraltıldıkça enerji değişim miktarı artar, band sıfırlanacak olursa oransal kontrol açık – kapalı kontrol sistemi şeklinde çalışmaya başlayacaktır.

Set değeri ile sistemin oturduğu ve periyodik olarak oluşan farka off-set denir. Off-set farkını azaltmak için oransal bandı dar tutmak gerekir. Ancak belirtildiği üzere çok daraltılırsa sistem açık – kapalı kontrol gibi çalışmaya başlar.

$$Kazanç = \frac{100}{Oransal.band}$$



Şekil 4.9 Dar oransal band

Oransal band daraldıkça kazanç artmaktadır.

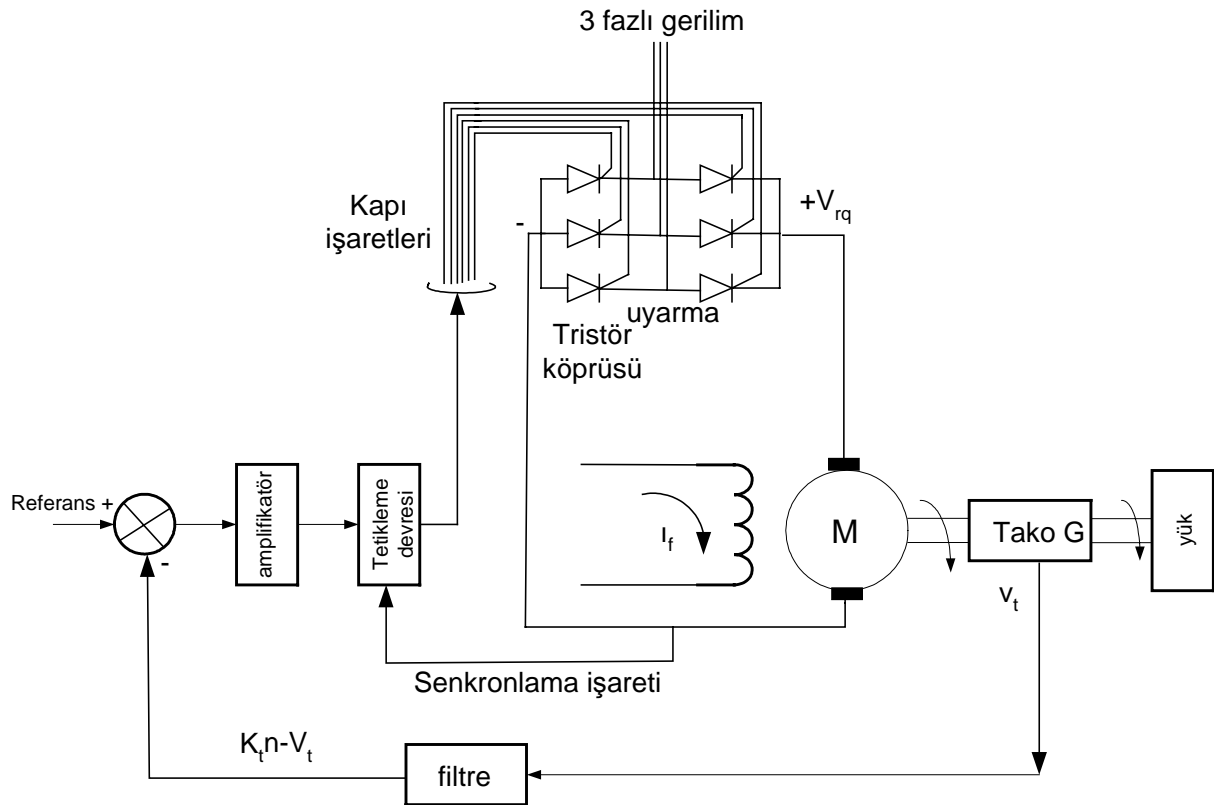
Başka bir örnek olarak bir doğru akım motorunun devir sayısını kontrol eden bir kontrol devresini ele alalım. Şekil 4.10 daki devrede doğru akım motorunun devri endüvisine uygulanan doğru gerilim değeri ile orantılıdır. Devir sayısı tako generatör tarafından ölçülerek , devir karşılığı olan elektrik sinyali kontrol elemanına gitmektedir. Burada kontrol elemanı olarak bir işlemsel yükselteç kullanılabilir. İşlemsel yükseltecin pozitif girişine referans değer girmekte olup , negatif girişine ise geri besleme devresi olan tako generatörden alınan gerilimdir. İşlemsel yükselteç bu iki girişin farkını güçlendirerek tetikleme devresine gönderir. Tetikleme devresi tristörlerin tetikleme açılarını ayarlayarak doğrultulan gerilimi ayarlar. Motor, endüvisine uygulanan gerilime göre belirli bir devir de döner.

Şekil 4.10 daki devrede motorun devrini düşürücü bir etki geldiğinde tako generatörde üretilen gerilim, düşen devirle orantılı olarak azalacaktır. İşlemsel yükseltecin negatif girişine gelen gerilim azalınca , referans ile aralarındaki fark yükselecek ve tetikleme elemanı tristörlerin tetikleme açılarını küçülterek doğrultulan gerilimin değerini yükseltecektir. Gerilim deki bu yükselme azalan devri set değerine tekrar gelmesini sağlayacaktır.

Bu defada motorun devrini yükseltici bir etki geldiğini var sayalım. Tako generatörde üretilen gerilim yükselen devirle orantılı olarak artacaktır. İşlemsel yükseltecin negatif girişine gelen gerilim artınca , referans ile aralarındaki fark küçülecek ve tetikleme elemanı tristörlerin tetikleme açılarını büyütürken doğrultulan gerilimin değerini düşürecek. Gerilim deki bu azalma yükselen devri set değerine gelmesini sağlayacaktır.

Ancak bu tip kontrol sisteminde, sistem set değerinin altında ve üstünde sürekli salınım yapar. Bu salınım aralığına oransal band denir. Örneğin 1000 devir/dakikada sabit tutulmak istenen devir 990 ile 1010 d/d arasında değişiyorsa burada oransal band $20/1000 = \%0,2$ 'dir. Yani

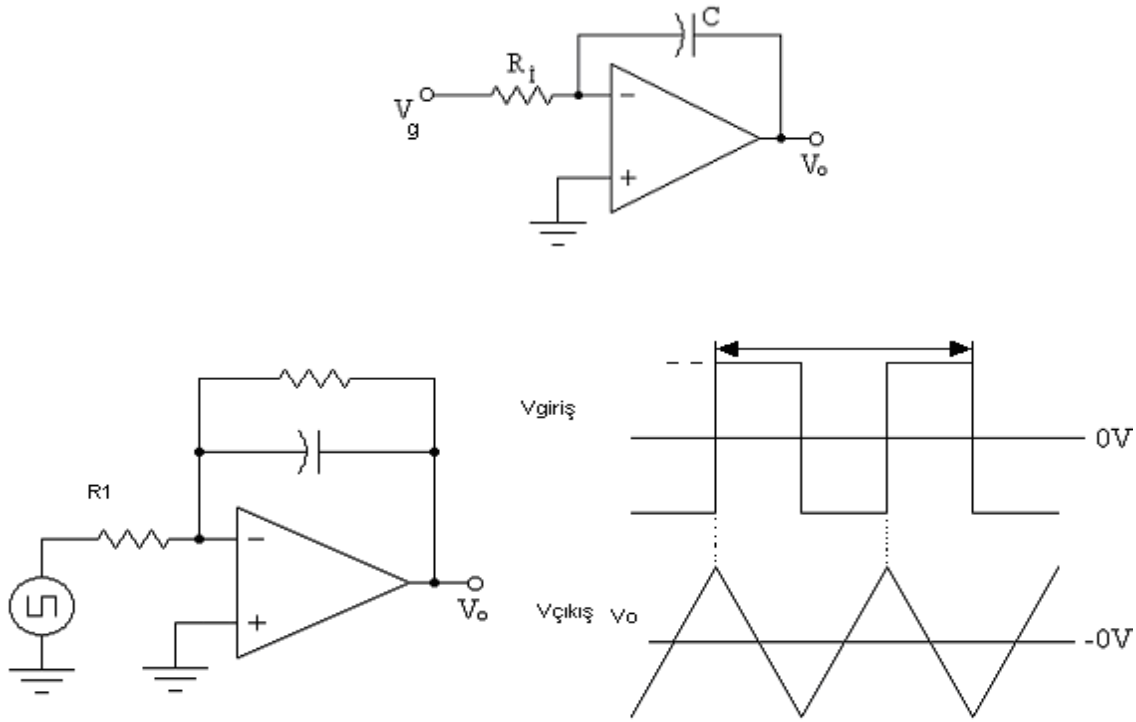
$$OransalBand = \frac{Değişimtarı}{Setdeğeti}$$



Şekil 4.10 bir doğru akım motorunun devir kontrol devresi

İŞLEMSEL YÜKSELTECİN İNTEGRAL DEVRESİ OLARAK ÇALIŞTIRILMASI

Op-amp'lar bir matematiksel fonksiyon olan integral işlemini gerçekleştirebilirler. İntegral alma işlemini gerçekleştiren bu devrelere integral alıcı devre denir. İntegral; zaman üzerinde giriş sinyalinin toplamını alma veya analitik geometride bir eğri altındaki alanı hesaplama işlemidir.

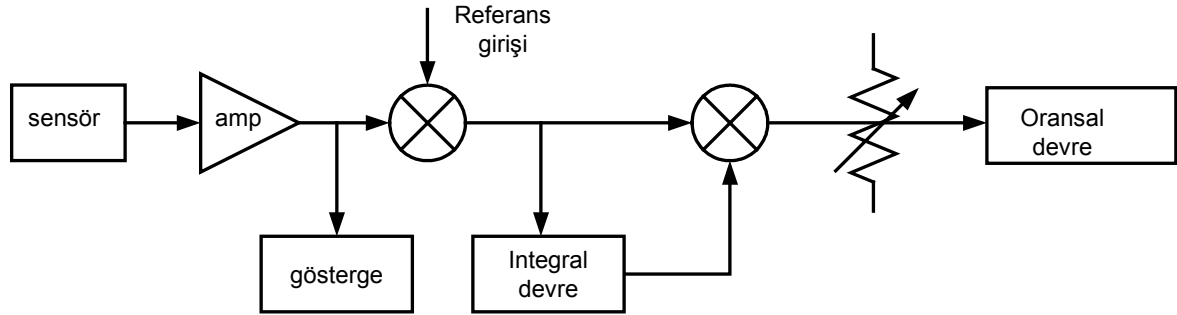


Şekil 4.11 İşlemsel yükseltecin integral alıcı olarak kullanılması

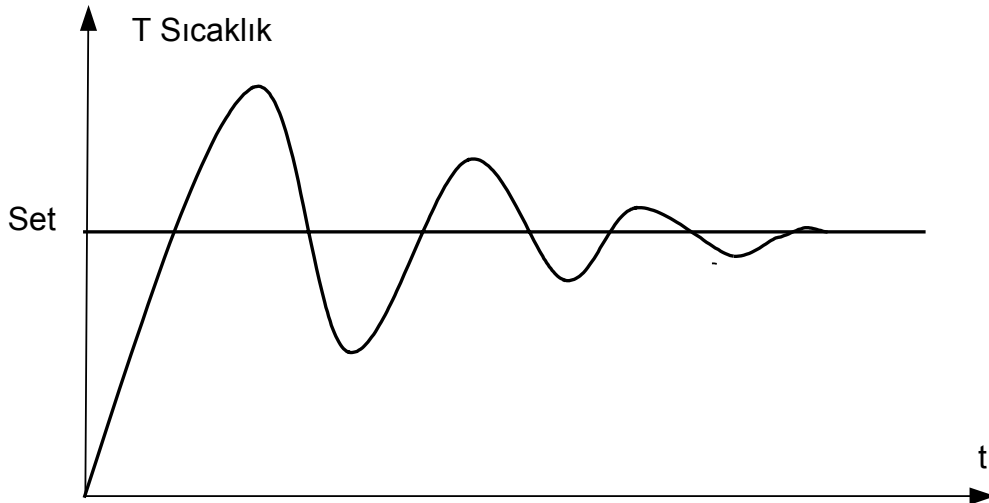
İntegral alıcı devrenin girişine uygulanan kare dalganın çıkışta üçgen dalga olarak çıkar. İntegral alıcı devrenin asıl görevi çıkış büyüklüğünde meydana gelen salınımları ortadan kaldırmak içindir. Sistemde meydana gelen değişimleri hissedip, o değişimi ortadan kaldıracı bir etki yaratmasıdır.

Oransal kontrolde oluşan off-set değerini integral kontrolle kaldırılabilir. Sistem değişkeninin ölçülen değeri ile set değeri arasındaki fark sinyalinin zaman göre integrali alınır. Bu integral değeri, fark değeri ile toplanır ve oransal band kaydırılır. Bu şekilde sisteme verilen enerji otomatik olarak artırılır veya azaltılır. Kontrol değişkeni tam set değerine oturtulur.

İntegratör devresinin çalışması , sistemin set değeri ile ölçülen değeri arasında fark kalmayınca kadar devam eder. Kontrol değişkeni set değerine oturduğunda integral devresinin integralini alacağı bir sinyal yoktur. Sistem değişkeni üzerindeki değişimlerde yine integral devresi düzenleyici etkisini gösterecektir. Şekil 3.8 'de oransal + integral kontrol formu blok şema halinde verilmektedir. Off-seti kalkmış tepkime eğrisi de görülmektedir.



Şekil 4.12 Oransal + İntegral Kontrol blok şeması

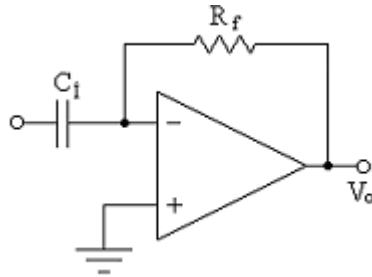


Şekil 4.13 Oransal + İntegral Kontrol blok şeması

Oransal + İntegral kontrolün en belirgin sakıncası ise , sistemin ilk başlamasında kontrol değişkeni set değerini geçer. Bu ilk salınımdaki yükselmeye overshoot ve set değerinin altına düştüğü en düşük değere ise undershoot olarak anılır. Sistemde meydana gelen ani darbelerde overshoot ve undershoot olarak anılana bu tür salınımlara engel olamaz.

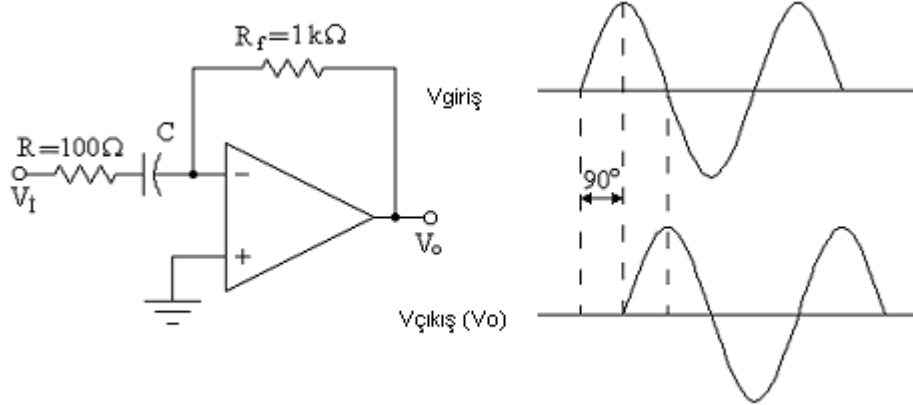
4.4 ORANSAL + TÜREVSEL KONTROL (PD , Proportional + Derivative)

İşlemsel yükseltecin türev alıcı olarak kullanılması şekil 3.14 2deki gibidir.



Şekil 4.14

Matematiksel olarak türev işlemi integral işleminin tersidir. Türev alıcı devrenin çıkışı giriş geriliminin eğimi (değişim hızı) ile orantılıdır. Eğer giriş voltajının değişim hızı sıfırsa (sabitse) çıkışta sıfırdır.

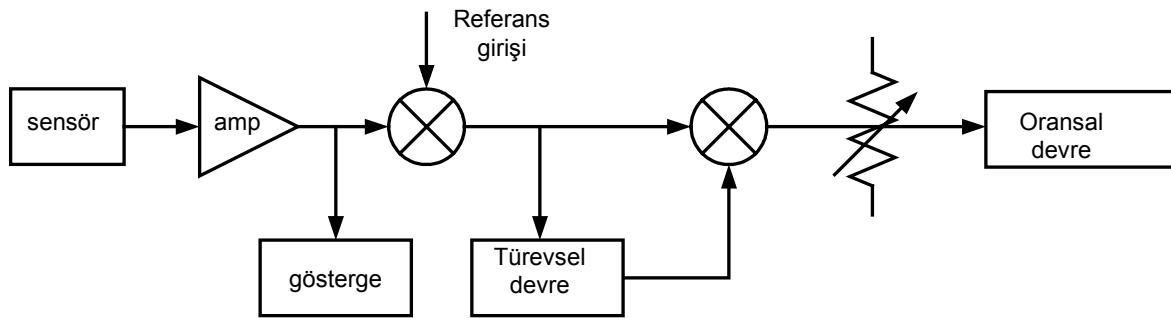


Şekil 4.15 işlemsel yükseltecin türev alıcı olarak kullanılması

Türevsel devrenin kullanılmasının amacı, bozucu etkilerden dolayı sistemde meydana gelen değişimleri önlemektir. Denetlenmesi istenen değişkenin yükselme eğilimine karşı, zayıflatma tepkisi gösterecektir. Aynı şekilde değişkenin zayıflama eğilimine karşı da destekleme tepkisi olmalıdır.

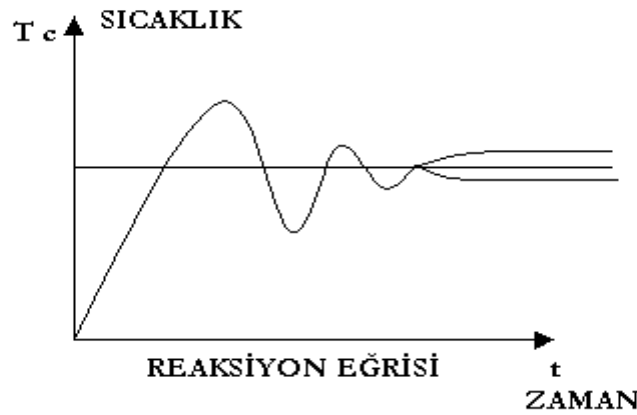
Oransal kontrolde oluşan off-set aralığı , oransal + türevsel kontrol sistemiyle de kaldırılmaya çalışılmıştır. Ancak türevsel kontrolün asıl etkisi overshoot ve undershoot olarak adlandırılan ilk büyük salınımı azalmaktır.

Oransal + türevsel kontrol devresinde set değeri ile ölçülen değer arasındaki fark sinyali türev alıcı devreye girer. Türevi alınan fark sinyali tekrar fark sinyali ile toplanır ve oransal devreden geçer. Oransal devrenin band aralığı kontrol edilerek off-set değeri yok edilmeye çalışılır. Ancak off-set bu tür kontrolle tam sıfır değerine indirilemez, belirli bir aralıkta salınım sürer gider. Şekil 3.10' da oransal + türevsel kontrole ait blok şema görülmektedir.



Şekil 4.16 Oransal + Türevsel Kontrol blok şeması

Bu devrede de sensör bir geri besleme elemanıdır. Kontrol edilmek istene büyüklüğü ölçerek elektriksel sinyale çevirir.



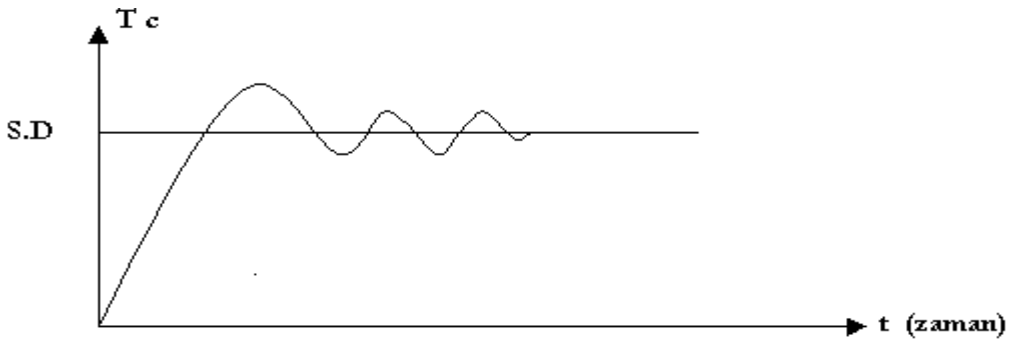
Şekil 4.17 Oransal + Türevsel kontrole ait tepkime eğrisi

Türevsel etki düzeltici etkisini hızlı bir şekilde gösterir. Hızlı değişimlerin düzeltilmesinde tercih edilir.

Türev alma işlemi işlemesel yükselteçlerle sağlanır.

4.5 ORANSAL + İNTEGRAL + TÜREVSEL KONTROL (PID)

Bu kontro sistemi , oransal + integral , oransal + türevsel kontrollerin özelliklerini taşımaktadır. Kontrolü güç karmaşık sistemlerde kullanılır. Bu kontrol sistemi ile off-set değeri sıfırlanabilir , ayrıca overshoot ve undershoot olarak oluşan salınımlar azaltılabilmektedir. Oransal + integral + türevsel kontrolün diğer şekillerde verilen reaksiyon eğrileriyle karşılaştırılacak olursa , overshoot ve undershoot azaltılmış ve off-set değeri kaldırılmış olduğunun farkına varılacaktır.

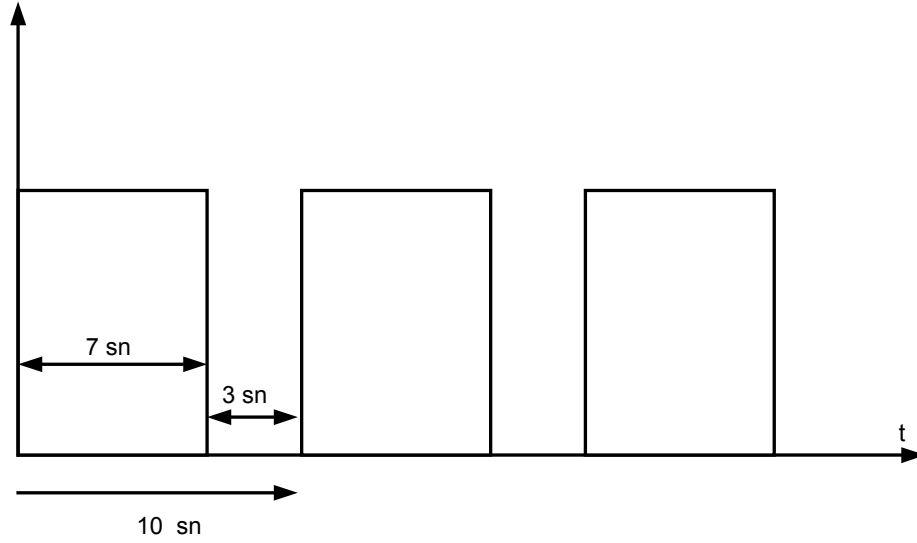


Şekil 4.18 Oransal + İntegral + Türevsel Kontrol tepkime eğrisi

4.5 ZAMAN ORANSAL KONTROL (TIME PROPORTIONAL)

Bu tip kontrol sisteminde enerji sisteme zamana bağlı olarak verilir, kaldırılır. Örneğin 10 saniyelik bir periydun 7 saniyesinde sisteme enerji veriliyor, 3 saniyesinde verilmiyor. Bu tip kontrol formu elektrikle çalışan sistemlerde kullanılmaktadır. Sürücü elemanı tristör veya triyak gibi olan elemanlarda görülür. Sistemde enerji sürekli bulunmakta fakat miktar olarak değiştirilmektedir. Bu kontrol türü ile açık- kapalı kontrol türünün karıştırılmamasına dikkat etmek gerekir. Açık – kapalı kontrol türünde sistemin enerjisi set değerine gelince tamamen kesilmektedir. Değişken histerisiz bandının altına düştüğünde sisteme enerji yine tam olarak uygulanmaktadır. Oysa burada sistemde enerji sürekli var. Ancak sürekli olarak kesik kesik verilmektedir. Kesik kesik enerji verilmesiyle sisteme giren enerjinin seviyesi değiştirilebilmektedir.

Tristör , triyak gibi sürücü elemanlarda enerji kesip verme süresi çok küçük aralıklara indirilebilir. 50 Hz'lik şebeke frekansına göre düşünecek olursak tristörün iletimde kalma süresi yaklaşık olarak 0 – 0,1 saniye arasındadır.



Şekil 4.19 Zaman oransal kontrol

4.6 BULANIK MANTIK (FUZY LOGİK) KONTROL YÖNTEMİ

İkili sistem bu gün kullandığımız bilgisayar teknolojisinin temelini oluşturmuştur. Analog elektronik yöntemleriyle çözülemeyen problemler sayısal olarak çözülmüştü. Gerek teknoloji alanında gerekse bilgi iletişim alanında çok büyük ilerlemeler sağlanmasına olanak sağlamıştır. Ancak bilgi iletişim ağı o kadar büyüdü ki, ikili sistem de tıkanmak üzeredir. Şimdi ikili sayısal sisteme alternatif olarak, daha çok değer içeren bulanık mantık devreye girmektedir. Bulanık mantık şu anda bir çok kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır. Bulanık mantıkta, ikili sistemdeki 1 ve 0 gibi 2 değer yerine daha fazla değer bulunmaktadır. İkili sistemde, mantık iki temel değer üzerine kuruludur. Sonuç ya doğrudur ya da yanlıştır. Veya 1 , 0 gibi.

Gerçek hayatta bilgiler farklı değerler alabilmektedir. Örneğin bir odanın sıcaklığını sabit tutacak bir ısıtıcının kontrolü bulanık mantıkla yapılabilir. Oda sıcaklığı duyarlık elemanları ile ölçülür. Mevcut değer olarak kaydedilir. İstenilen sıcaklık ile arasındaki fark hesaplanarak sisteme enerji girişi ayarlanır. Diyelim ki istenilen sıcaklık değeri $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ölçülen sıcaklık $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve aradaki fark $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu durumda sisteme enerji akışı %100 'dür. Ancak set değerine yaklaşıncaya sisteme verilen enerji azalmaktadır. $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yaklaşıldığında belki sisteme giren enerji % 50 'ye düşürülecektir. $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye gelince % 10 seviyesine düşecek ve sistem çalışmasına düşük enerji seviyesi ile devam edecektir. Bu tür kontrolde büyük salınımlar yapmadan set değerine oldukça yakın bir çalışma sağlanır.

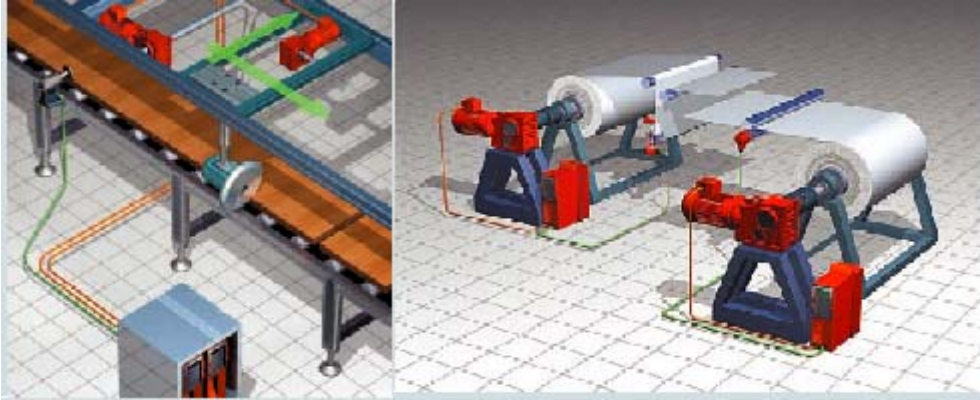
Kısaca bulanık mantık kontrol sistemlerinde, kontrol değişkeninin set değerine göre uzaklığı algılanır. Set değerinden uzaklaşma miktarı belirli basamaklara bölünür. Her sapma aralığı için farklı enerji akışı sağlanarak sistemin kararlı duruma daha çabuk geçmesi sağlanır.

5. GİRİŞ

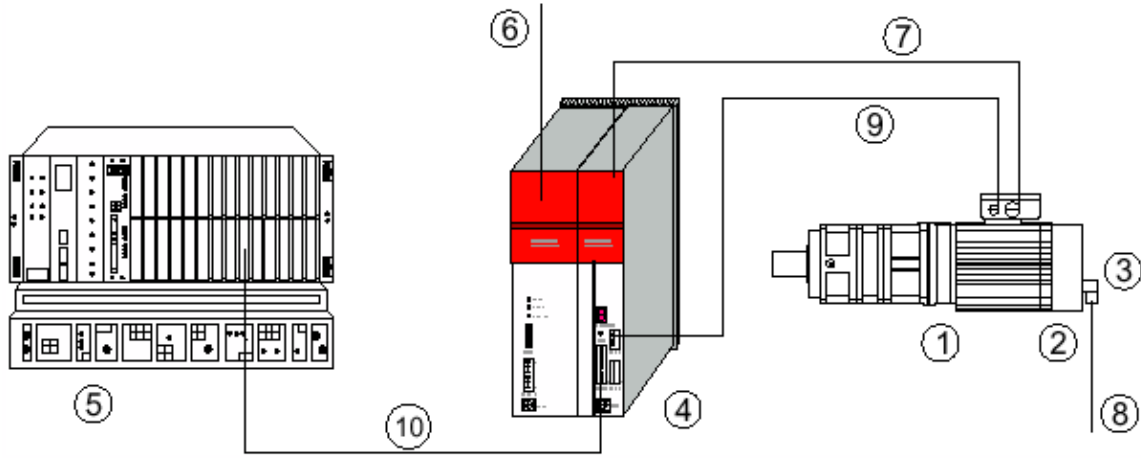
Günümüzde servo sistemler endüstrinin farklı bir çok alanında uygulama yeri bulmaktadır. Özellikle endüstriyel otomasyonda; hız, tork, konumlandırma, çok eksenli hareket, ölçme ve bilgisayar destekli üretim gibi alanlarda sıklıkla servo sistemler kullanılmaktadır. Servo sistemler ile gerçekleştirilen bir uygulamada, yüksek düzeyde duyarlılık ve kontrol sağlanabilmektedir. Ancak servo sistemler, diğer klasik kontrol sistemlerine göre daha karmaşık ve maliyetlidirler. Servo sistemler günümüzde pnömatik, hidrolik ve özellikle de elektrik kontrolü sistemlerde, gün geçtikçe kullanımları artmaktadır.

5.1 SERVO SİSTEM UYGULAMALARI

Tipik bir servo sistem uygulaması, sistemde yer alan elemanlar ve blok diyagramı aşağıda görülmektedir. Servo sistemlerin işleyişini anlayabilmek için birimlere ayırıp her birimi ayrı ayrı inceleyeceğiz

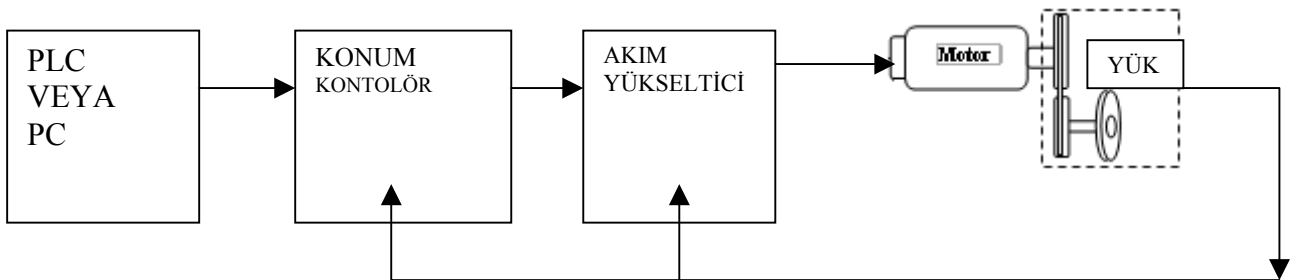


Şekil 5.1 servo sistem uygulamaları



Şekil 5.2 servo sistem birimleri

- 1) Motor (redüktörlü/redüktörsüz)
- 2) Geribesleme elemanı
- 3) Fren sistemi (isteğe bağlı)
- 4) Servo sürücü/kontrolör
- 5) Kontrol sistemi PC/PLC
- 6) Güç kablosu (Besleme kablosu)
- 7) Motor kablosu
- 8) Frenleme kablosu
- 9) Resolver kablosu
- 10) Kontrol kabloları

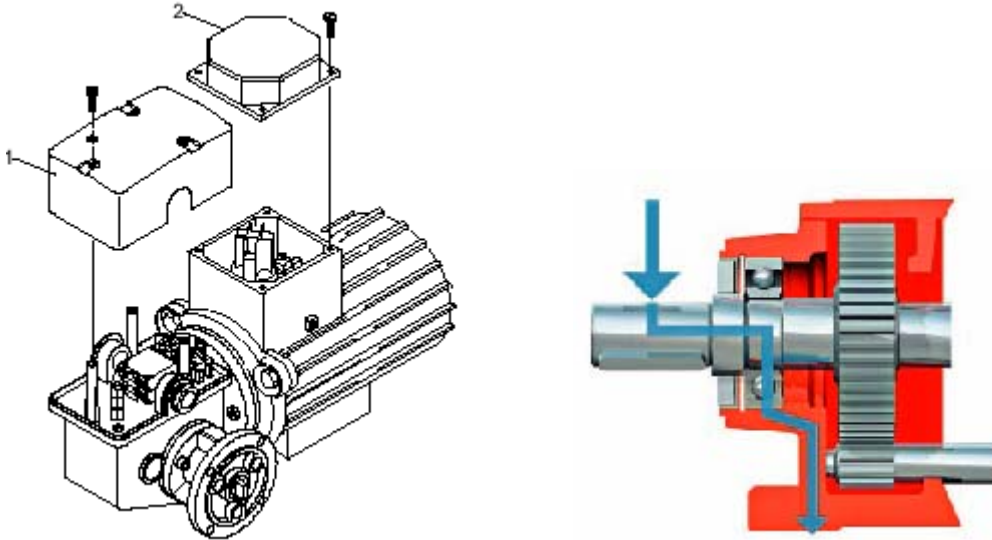


Şekil 5.3 bir servo motor kontrolü blok diyagramı

5.2 YÜK:

Kontrol edilecek, sürülecek herhangi bir mekanik etki, dirençtir. Servo sistemin tasarımı bu yükün büyüklüğüne, ataletine, hızına ve konumlandırma gibi büyüklüklerine göre yapılır. Bu büyüklüklerin değerleri ve duyarlılıkları uygulanacak sisteme göre değişir. Örneğin yük hızının ve hız kararlılığının ne olacağı prosese göre tasarımcı tarafından belirlenmelidir.

Uygulamada yükün türüne ve büyüklüğüne göre, özel mekanik yük dönüştürücüler (redüktörler) kullanılır. Bu yük dönüştürücüleri genellikle motora uygulanacak yükü azaltırlar, ancak sistemin genel duyarlılığını azaltmamak için özel olarak tasarlanırlar. Aşağıda bir mekanik yük dönüştürücüsü görülmektedir.

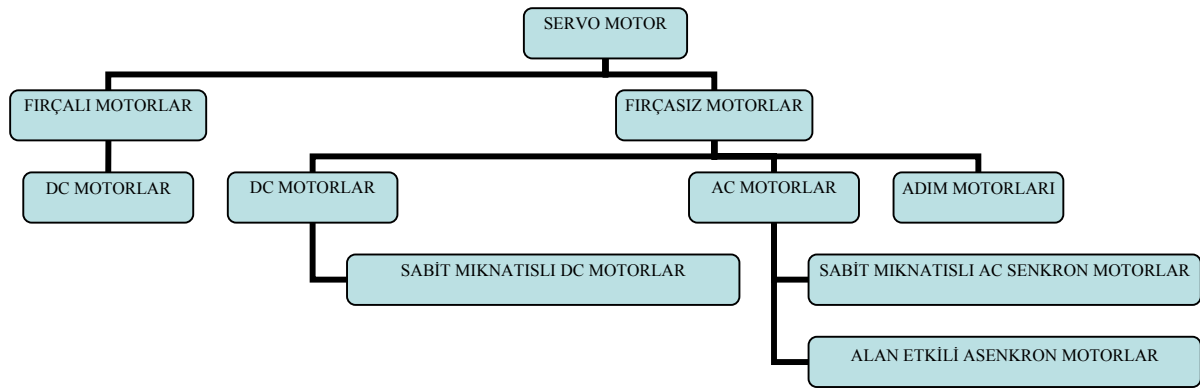


Şekil 5.4 mekanik yük dönüştürücüsü (redüktör)

Yük hızının ölçümü için çeşitli türdeki tako generatör, ve enkoderler kullanılmaktadır. Hız bilgisinin duyarlılığına göre ve servo sistemin yapısına göre uygun türdeki bir eleman seçilmelidir. Yükün çeşitli sınır ve ölçüm değerleri için de uygun sensörler kullanılmalıdır. Bu sensörler genel amaçlı mekanik veya elektronik yaklaşım sensörleridir. Aşağıda bir encoder görülmektedir.

5.3 MOTOR

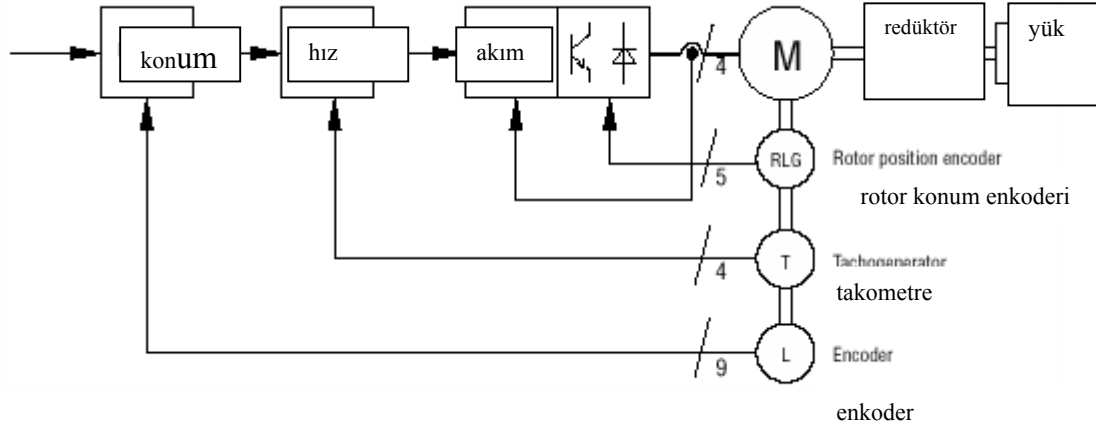
Servo sistemin hareketini sağlayan birimdir. Servo sistemlerde motor tipi uygulamanın yapısına göre hidrolik, pönomatik ve elektrik motoru olarak değişir. Ancak günümüzde uygulamanın zorunluluğu dışında en çok elektrik motorları kullanılmaktadır. Servo sistemlerde çeşitli yapıdaki farklı elektrik motorları kullanılabilir. Aşağıda servo sistemlerde kullanılan elektrik motor türleri görülmektedir.



Şekil 5.5 servo motor türleri

Görüldüğü gibi servo sistemlerde her tür elektrik motorları kullanılmaktadır. Uygulama türüne ve her motorun diğerine olan üstünlüklerine göre uygun motor türü seçilmelidir. İlk zamanlar kontrollerinin daha kolay olmaları nedeni ile uygulamalarda en çok DC motorlar kullanıldı. Ancak DC motorların, fiyat/performans, performans/ağırlık, onarım ve servis güçlüğü ile aşırı ısınmaları gibi kötü tarafları nedeni ile günümüzde daha çok AC motorlar kullanılmaktadır. AC motorların kontrolleri DC motorlara oranla daha güçtür. Ancak mikroelektronığe paralel olarak servo motor sürücülerindeki gelişmeler, yaygın olarak AC motorların kullanılmasını sağlamıştır.

Uygulanacak kontrol yöntemi seçilen motor türüne doğrudan bağlıdır. Bir servo sistem ile kontrol edilen motorun blok diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.6 servo motor kontrol blok diyagramı

Blok diyagramda da görüldüğü gibi, bir servo sistemdeki motorun iki temel büyüklüğünün bilinmesi ve kontrol edilmesi gerekir. Bunlardan biri motorun o andaki hızı, diğeri ise motor milinin konumudur. Motor hızı, birer takometre veya enkoder ile ölçülür. Motor mili konumu ise motor konum enkoderi (resolver) ile ölçülür ve genellikle doğrudan motor miline akupule edilmiştir. Bazı uygulamalarda ise motor miline binen tork kontrol edilmek istenir. Bunun için ise motorun kullandığı akım miktarı kullanılır.

Pratikte 0,1-250 kW ile 40.0000 NM güçlerde servo motorlar üretilmektedir. Seçilecek motor gücü hareket ettireceği mekanik yük aracılığı ile hesaplanır.

Servo motor hızı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

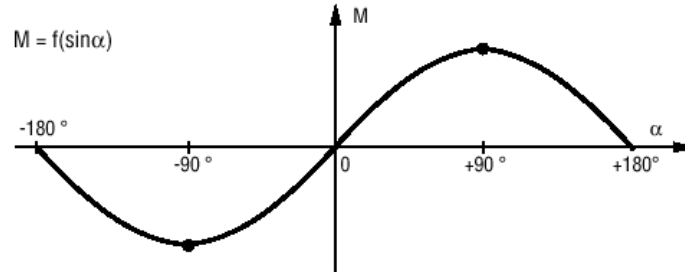
$$n_d = (f \cdot 60) / p$$

Bu bağıntıda n_d , motorun dönüş hızıdır. rpm (rotate per minute = dakikadaki dönüş hızı) ile ölçülür. Tipik servo motorlar için bu değer 2000, 3000, 4500 rpm değerlerindedir.

f : uygulanan gerilimin frekansıdır. Birimi hertz (Hz.) dir. Tipik bir uygulama için değeri 100, 150, 225 Hz. dir

p : Stator kutup çifti sayısıdır. 6 kutuplu bir servo motor için değeri 3 dür.

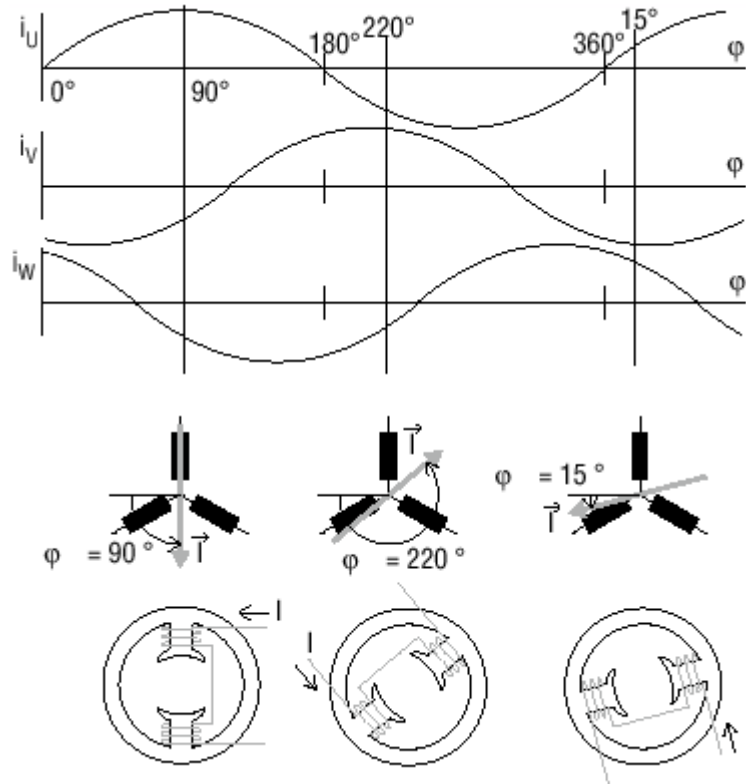
Bir servo motorun yapısı ve çalışma ilkesi klasik bir asenkron motoru veya DC motoru ile aynıdır. Asenkron servo motorunun statoruna uygulanan gerilim rotora döndürme yönünde bir elektromanyetik etki yapar ve bu etki ile motor döner. Motora rotoruna uygulanan torkun değişimi ve matematiksel bağıntısı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.67 Motor torkunun uygulanan gerilimin açısıyla değişimi

Şekilde de görüldüğü gibi motor miline (rotoruna) uygulanan torkun tepe değerleri -90 ve $+90$ derece açılarındadır. Servo motor hız kontrolü, diğer motorlarda olduğu gibi uygulanan gerilimin frekansı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle motor hızının kontrolü için sürücüler bölümünde anlatılacak olan frekans değiştirme yöntemleri uygulanır. Motor hızının istenen değerde kararlı kalabilmesi için de P, PI, PID kapalı çevirim kontrol yöntemleri kullanılır.

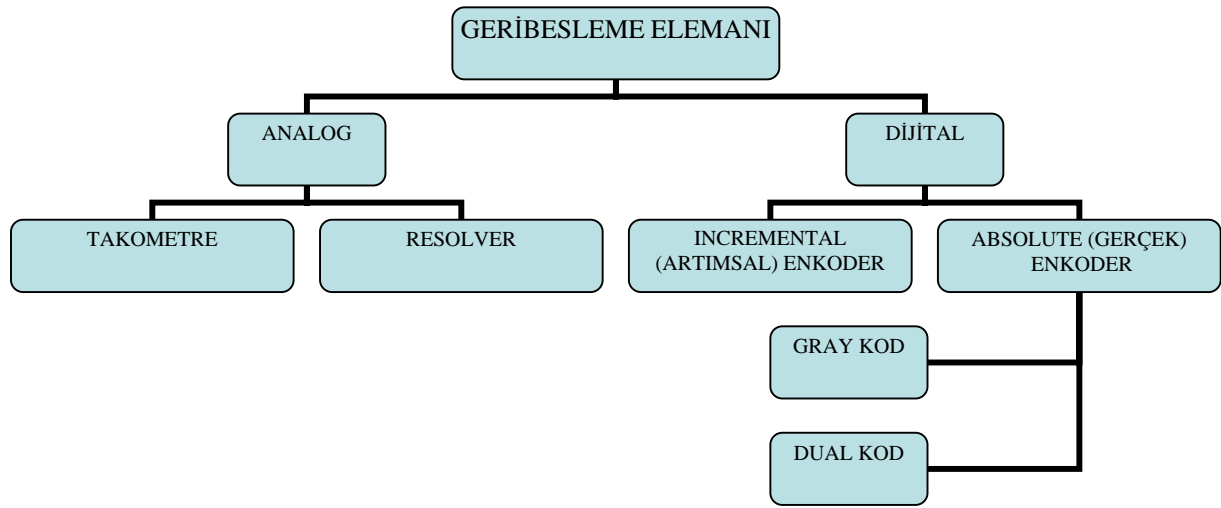
Bir servo motorun stator akımları aşağıda görülmektedir.



Şekil 5.8 Bir servo motorun stator akımları

5.4 GERİBESLEME ELEMANI

Geribesleme elemanı bir servo sistemin, hızını, motor milinin bulunduğu konumu ve yükün bulunduğu konumu ölçmek için kullanılır. Uygulamalarda kullanılan geribesleme eleman türleri aşağıdaki diyagramda görülmektedir.

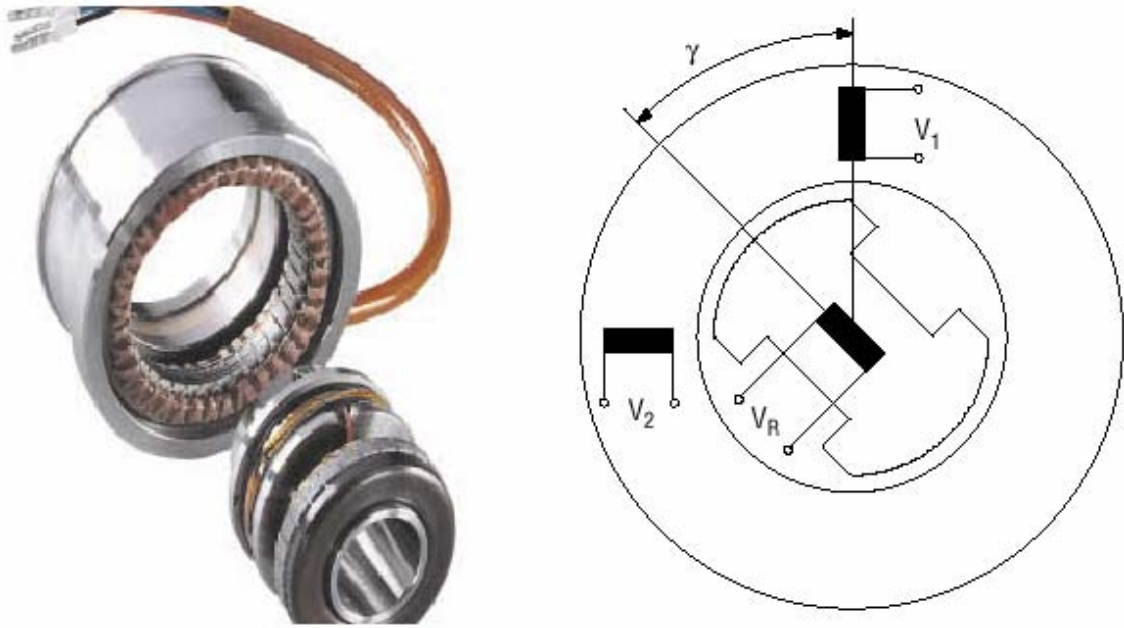


Şekil 5.9 servo motor geribesleme elemanları

Geribesleme elemanı motora bağlı bir şekilde kullanılır ve genellikle motor ile aynı hızda çalışır. Bu nedenle aşırı hızlarda ısınır ve üretikleri işaretler bulundukları manyetik alandan etkilenir. Geribesleme elemanların, sistemi olumsuz yönde etkileyecek bu etkilerinin azaltılması gerekir. Pratik uygulamalarda aşırı hız nedeniyle ısınmanın önlenmesi için uygun dönme (yataklama) sistemleri, elektromanyetik alandan korunması için de uygun şasiler ile korunmaktadırlar.

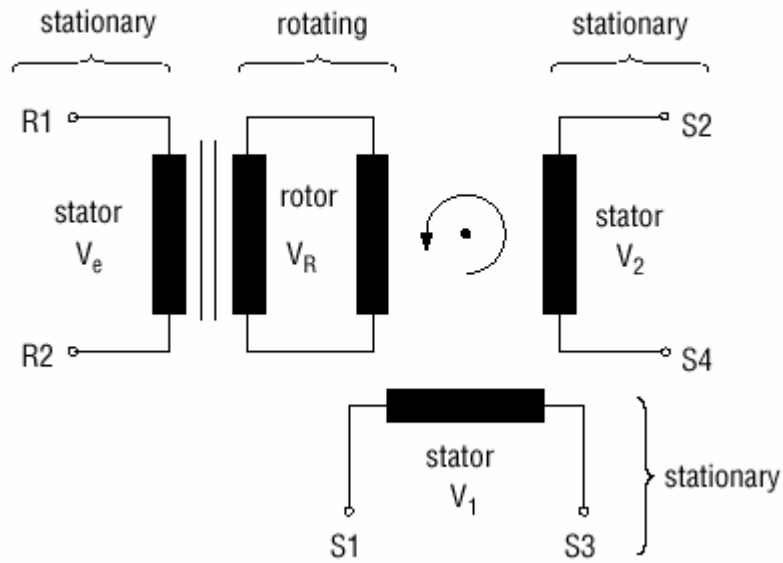
5.5 RESOLVER

Resolverlar genellikle motorun soğutma fanı tarafındaki miline akuple olarak çalışırlar. Motorun bir dönüşü için, o andaki konumunun tespiti için kullanılan bir geribesleme elemanıdır. Resolver motor mili ile eşzamanlı (senkron) dönen bir transformatör gibidir. Aşağıdaki şekilde tipik bir resolver görülmektedir.



Şekil 5.10 tipik bir resolver

Resolverin stator ve rotor sargıları ikişer adettir. Statora uygulanan gerilim motorun dönüş hızına göre rotordan tekrar alınır. Bir resolverin stator ve rotor sargıları aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 5.11 bir resolverin sargı yapısı

V_1 ve V_2 çıkış gerilimleri V_e gerilimi ile olan bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$V_e = V_s \sin \omega t$$

Çıkış gerilimleri;

$$V_1 = V_s \sin \omega t \cos \mu$$

$$V_2 = V_s \sin \omega t \sin \mu$$

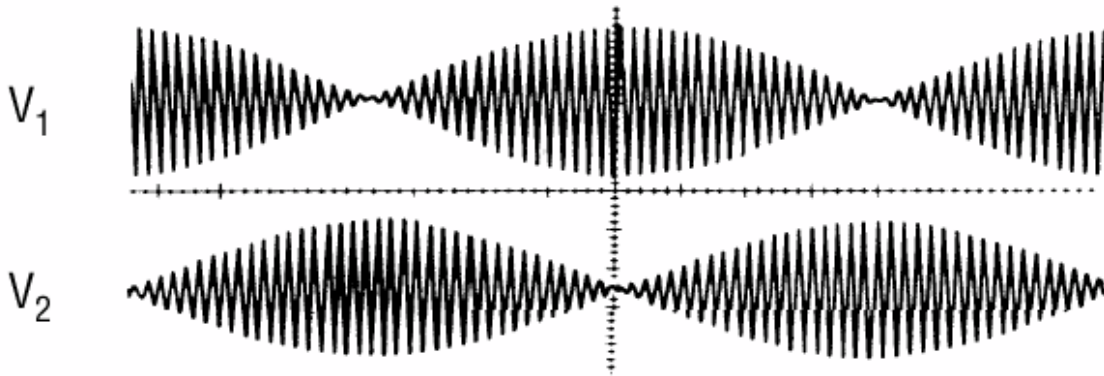
Yukarıdaki bağıntılarda;

V_s : Giriş gerilimi tepe değeri,

μ : Rotor açısı,

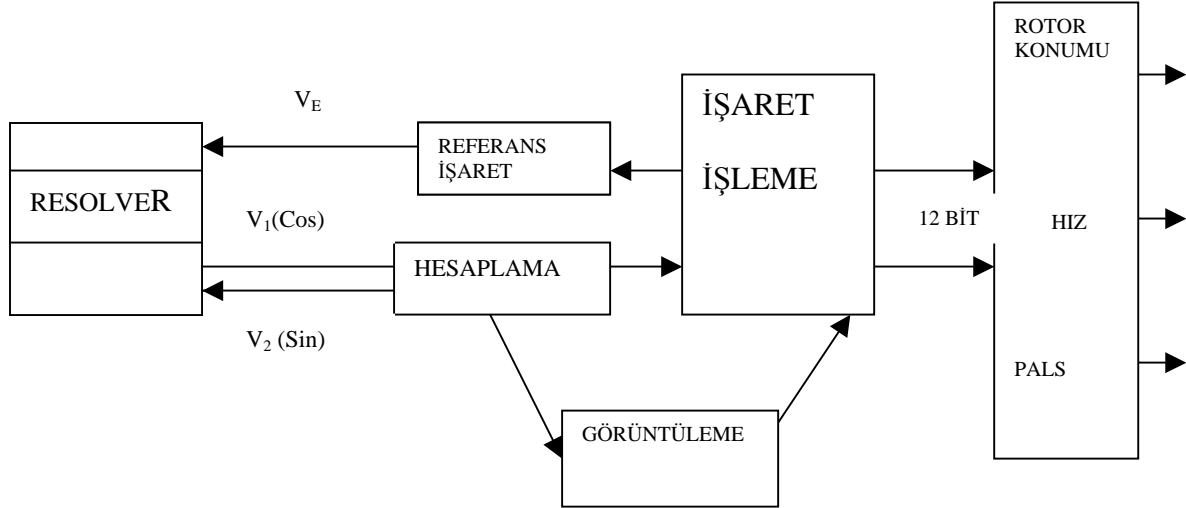
ω : V_s Giriş gerilimi açısal hızıdır.

Bir resolveye uygulanan V_e giriş gerilimine karşılık elde edilen V_1 ve V_2 çıkış gerilimlerinin dalga şekilleri aşağıda görülmektedir.



Resolver 5.12 çıkış gerilimleri dalga şekilleri

Resolverden elde edilen bu analog çıkış gerilimi motor milinin o andaki konumu ve hız bilgisini verir. Elde edilen bu işaret sayısallaştırılarak servo motor konum ve hız kontrolü için kullanılır. Resolver işaretinin işleme aşamaları aşağıdaki blok diyagramda görülmektedir.



Şekil 5.13 resolver işareti işleme aşamaları

5.6 SERVO KONTROLÖR

Servo kontrolör bir servo motorun hız ve torkunu kontrol eder. Günümüzde kullanılan servo kontrolörler sayısal kontrolörlerdir. Sayısal kontrolörlerin örneksel (analog) kontrolörlere oranla aşağıdaki üstünlükleri vardır.

- Bilgisayar destekli uygulamaları kolaydır,
- Diğer birimlerle haberleşmesi kolay ve güvenilirdir.
- İşaret işleme kolaydır,
- Çalışma koşulları sınırlarında uzun ömürlüdürler.

Günümüzde çeşitli üretici firmalar tarafından üretilen çok farklı işlevlere ve güçlere sahip servo motor sürücülerі bulunmaktadır. Her üretici firmanın kendine özgü geliştirdikleri teknik ve özellikleri olmasına rağmen, tipik bir servo sürücüde ortak özellikler bulunur. Biz burada bu ortak özellikleri anlatacağız. Aşağıdaki şekilde çeşitli servo sürücüler görülmektedir.



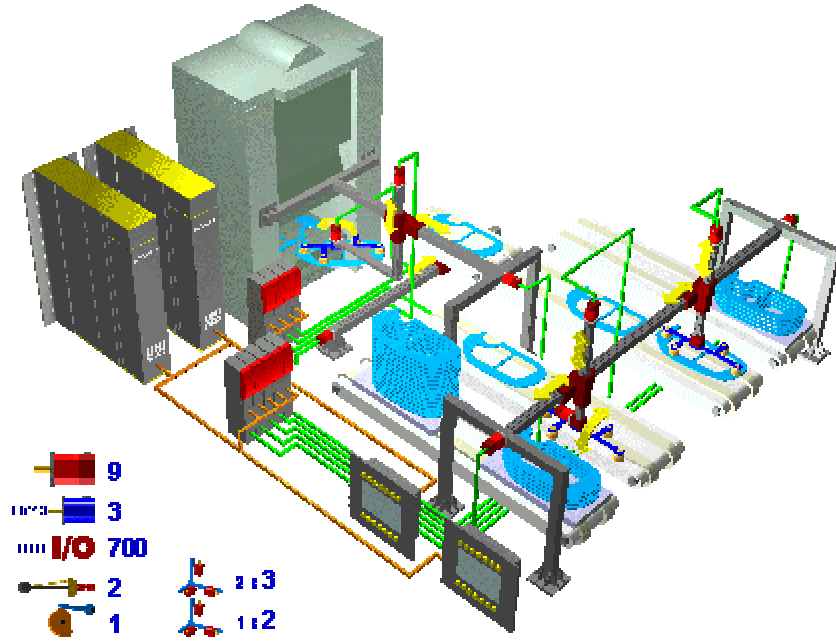
Şekil 5.14 servo sürücüler

Genel olarak bir servo sürücü iki ana birimden oluşur

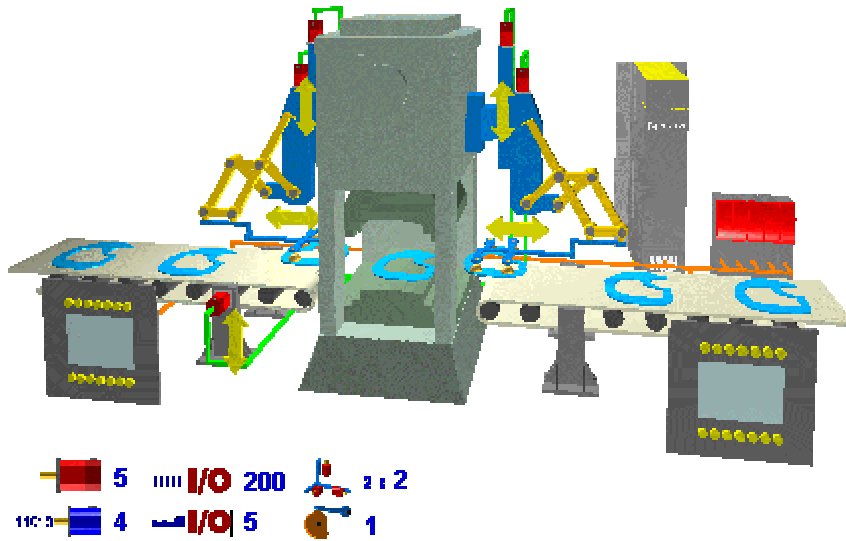
- Güç kaynağı birimi (power supply module)
- eksen birimi (axis module)

Güç kaynağı birimi, sürücü için gerekli besleme gerilimleri yanı sıra, eksen kontrolleri için gerekli güçleri, servo motor frenleme gerilimini, sürücü ve sistemi koruyacak bir çok koruma düzeneği ile standart bir haberleşme kapısına (RS 232 RS 485) sahiptir.

Eksen birimi ise servo motor hız ve torkunu kontrol eder. Bu kontrol için gerekli elektronik donanımı içerir. Günümüzde kullanılan bir çok servo sistem servo motor yanı sıra bu sistemde kullanılabilecek diğer yardımcı motor, sensör, anahtar ve diğer elemanların da kontrolü için gerekli; sayısal giriş/çıkış, örnekssel giriş/çıkış ve kontrol elektroniğine de sahiptirler. Başka bir deyişle ayrıca bir PLC'ye (Programable Logic Controller=Programlanabilir sayısal kontrolör) gerek kalmaksızın sistemin kontrolünü yapabilecek elektronik donanım ve yazılıma sahiptirler. Aşağıdaki şekillerde servo sürücü uygulamaları görülmektedir.



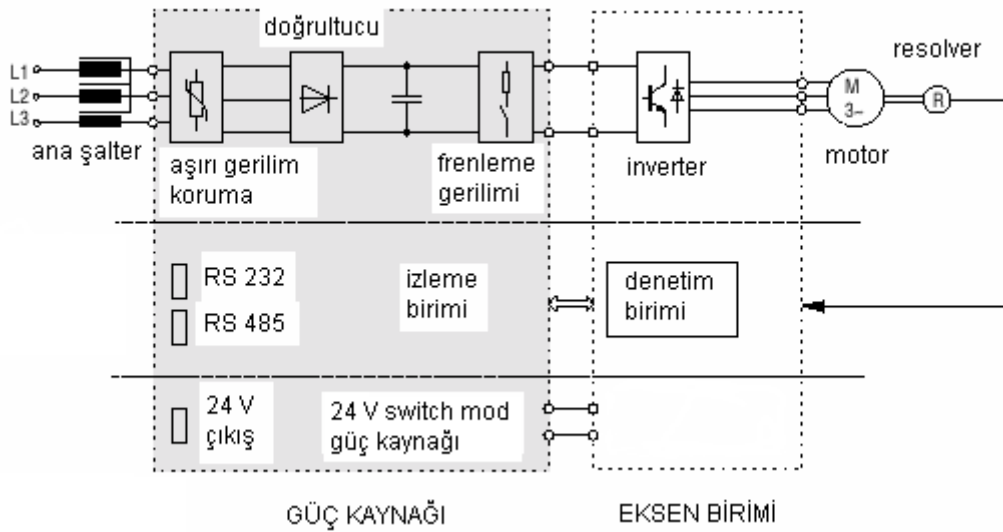
Şekil 5.15 servo sürücüler



Şekil 5.16 servo sürücüler

5.7 GÜÇ KAYNAĞI

Servo motor sürücüsünün güç kaynağı bir kontaktör veya şalter üzerinden ana besleme gerilimine bağlanır. Güç kaynağı biriminin genel blok diyagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.17 bir servo sürücüsünün blok diyagramı

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi bir servo sürücünün güç kaynağı biriminde;

Aşırı gerilim koruması: besleme geriliminde oluşan gerilim dalgalanmalarına karşı sürücü sistemini korur

Doğrultucu: üç fazlı köprü doğrultucu devresidir. Gerilim frekansının değiştirilmesi için öncelikle doğru gerilime çevrilir.

Frenleme gerilimi: servo motorun durma anında ters gerilim verilerek, tam olarak istenen noktada durmasını sağlar. verilen bu ters gerilimin söndürülmesi için motora bir frenleme ohmik direnci bağlanırsa daha iyi bir sonuç alınır. Özellikle yüksek güçlü ve ataletli sistemlerde bu bir zorunluluk haline gelir.

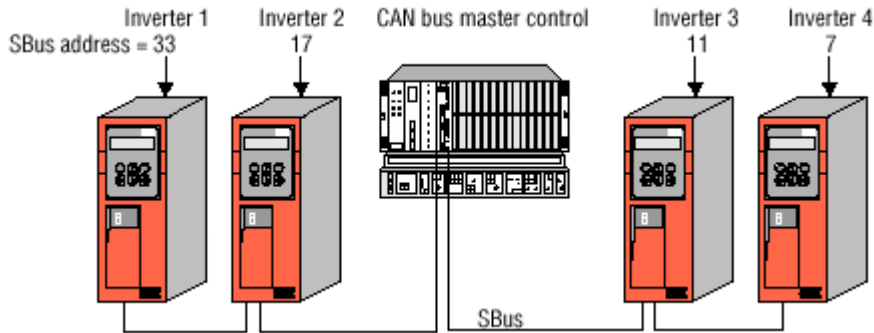
İzleme birimi: bu birimde sürücü çeşitli parametrelerinin merkezi bir kontrol noktasından izlenmesini sağlar. Örneğin sürücü akımı, gerilimi, motor sıcaklığı gibi parametreler bu birim aracılığı ile izlenebilir.

Switch mod güç kaynağı: sistem gereksinimi olan 24 V'luk gerilimi switch mod olarak sağlayan birimdir. Uygulamada bu gerilim sürücü dışındaki çeşitli birimlerin beslenmesi için de kullanılır.

RS 232-RS 485 haberleşme kapısı: servo sürücünün merkezi bir kontrol birimine (PLC veya PC) bağlanması için kullanılır. Endüstriyel uygulamalarda 1500 V gerilim koruması sağlayan ve ağ desteği veren RS 485 haberleşme kapısı tercih edilir. Servo sürücü sistemleri üzerinde bulunan seri haberleşme kapıları kendilerine özgü haberleşme protokollerine sahiptirler. Üretici firmalardan bu haberleşme protokolleri öğrenilebilir. Günümüzde kullanılan servo sistemler RS seri haberleşme dışında endüstriyel uygulamalarda kullanılan aşağıdaki haberleşme protokollerini de desteklerler. Bu haberleşme protokolleri için genellikle ek bir birimin sisteme eklenmesi gerekir.

- PROFIBUS
- INTERBUS
- CAN
- DEVICENET
- SYSTEMBUS

Aşağıda systembus ile gerçekleştirilmiş bir ağ yapısı görülmektedir.

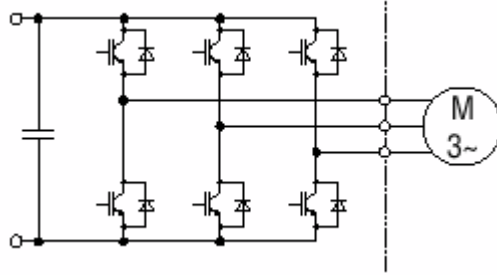


Şekil 5.18 bir Systembus ağı

Yukarıdaki haberleşme protokolleri aracılığı ile bir servo sistem, bir otomasyon sistemin alt birimi olarak kullanılabilir. Birden çok servo sistem kullanılacak ise bunlar birbirlerine bağlanabilir.

5.8 EKSEN BİRİMİ

Bu birim bir servo sisteminde eksen kontrolü için gerekli gerilimini geri besleme elemanı ve kontrol yöntemi aracılığı ile yapar. Bu birimde, güç biriminde Dc'ye çevirilen gerilim tekrar AC gerilime çevrilir ve frekansı isteğe göre değiştirilir. Aşağıdaki şekilde DC gerilimi AC gerilime çevirme modülü görülmektedir.

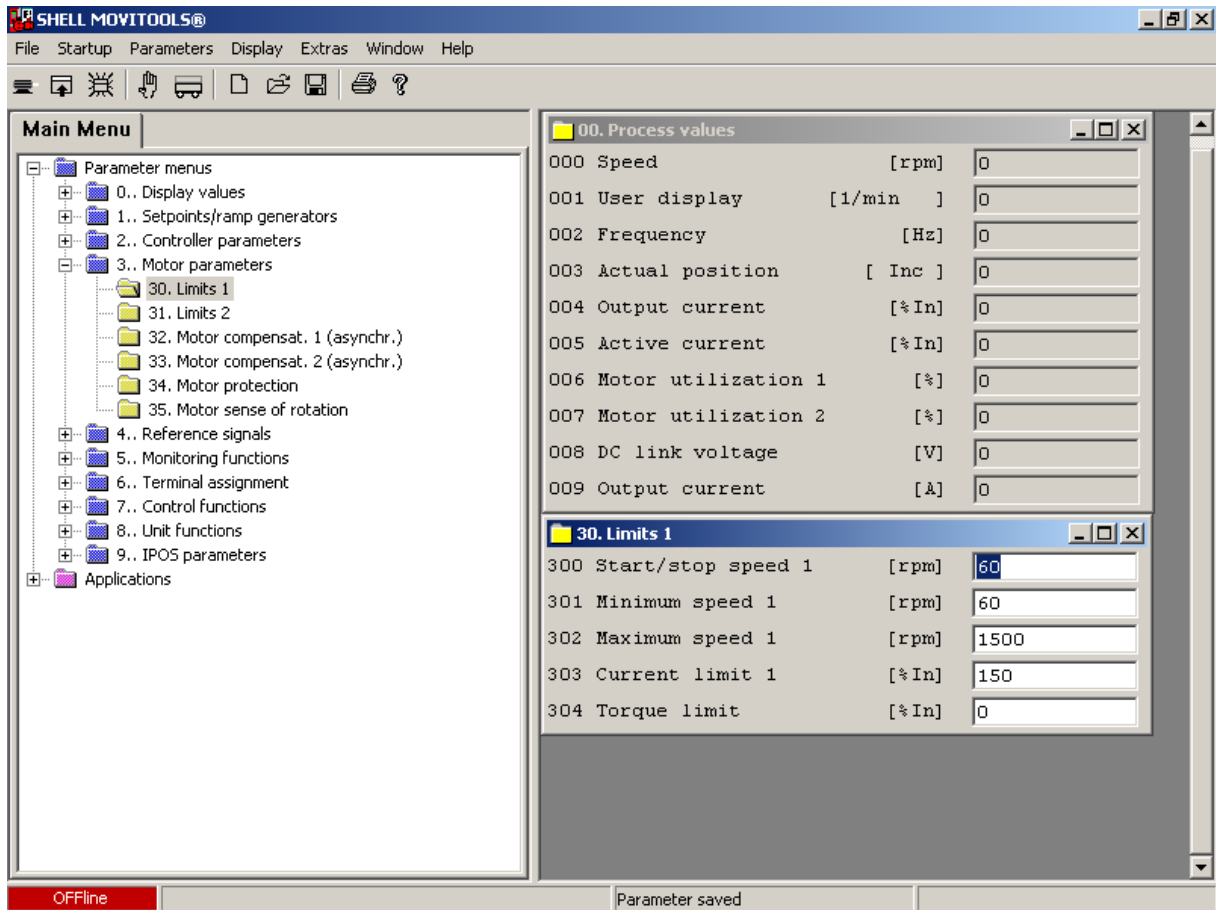


Şekil 5.19 DC gerilimi AC gerilime çevirme modülü

Yukarıda anlatılan donanımlara sahip sürücüler, çeşitli kontrol yöntemleri kullanırlar. Aşağıda uygulamalarda sıkça kullanılan kontrol yöntemleri anlatılacaktır.

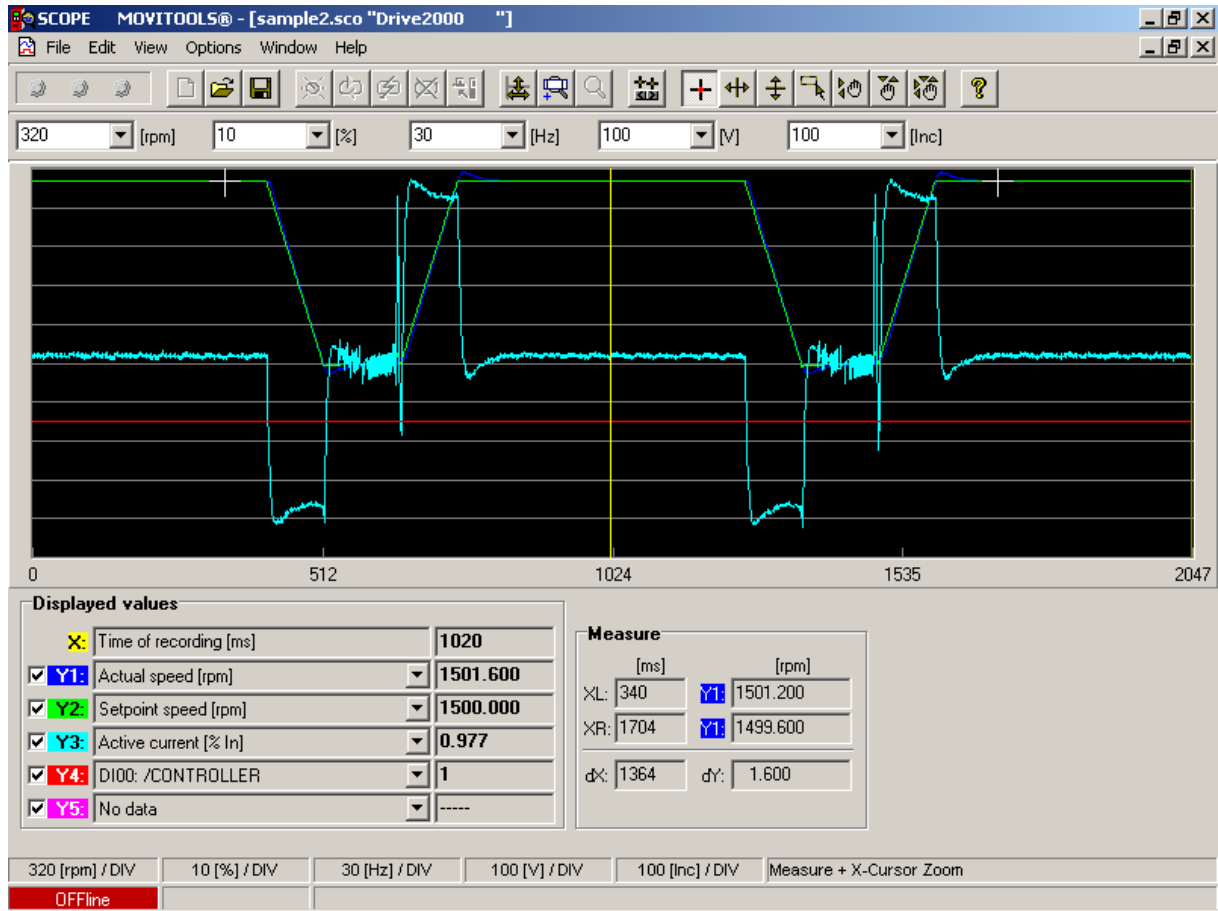
- Sistemde kullanılan motor parametreleri (motor türü, gücü, akımı, koruma yöntemi vb.)
- Referans işaret değerleri (sistemin başlangıç, bitiş ve sınır değerleri)
- Sistem bağlantıları ve hangi girişin ne amaçla kullanıldığı
- Sisteme kullanılan ek birimlerin özellikleri (ağ haberleşme birimi, frenleme birimi gibi)

Aşağıdaki şekillerde örnek bir servo sistem izleme yazılım ekranı görülmektedir.



Şekil 5.22 bir servo sistem izleme yazılımı ekranı

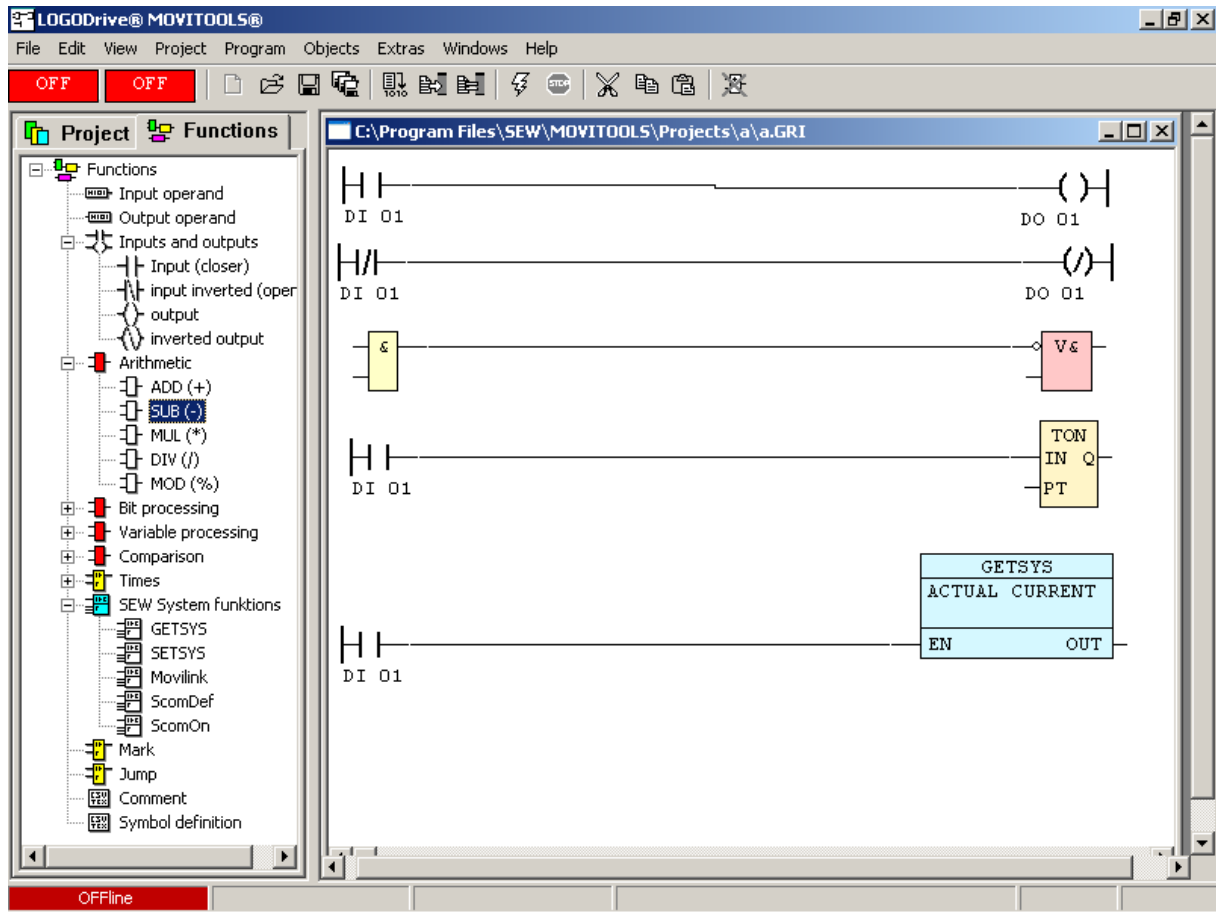
Bazı sürücülerde gerekli örneksel değerlerin (hız, akım, tork, gerilim gibi) örneksel grafikleri de görülebilmekte ve sistem parametreleri bu değerlere göre en iyi hale getirilebilmektedir. Aşağıdaki şekilde bir sistemin bazı örneksel değerleri görülmektedir.



Şekil 5.23 bir servo sistem örneksel değerleri

5.10.B GRAFİKSEL PROGRAMLAMA

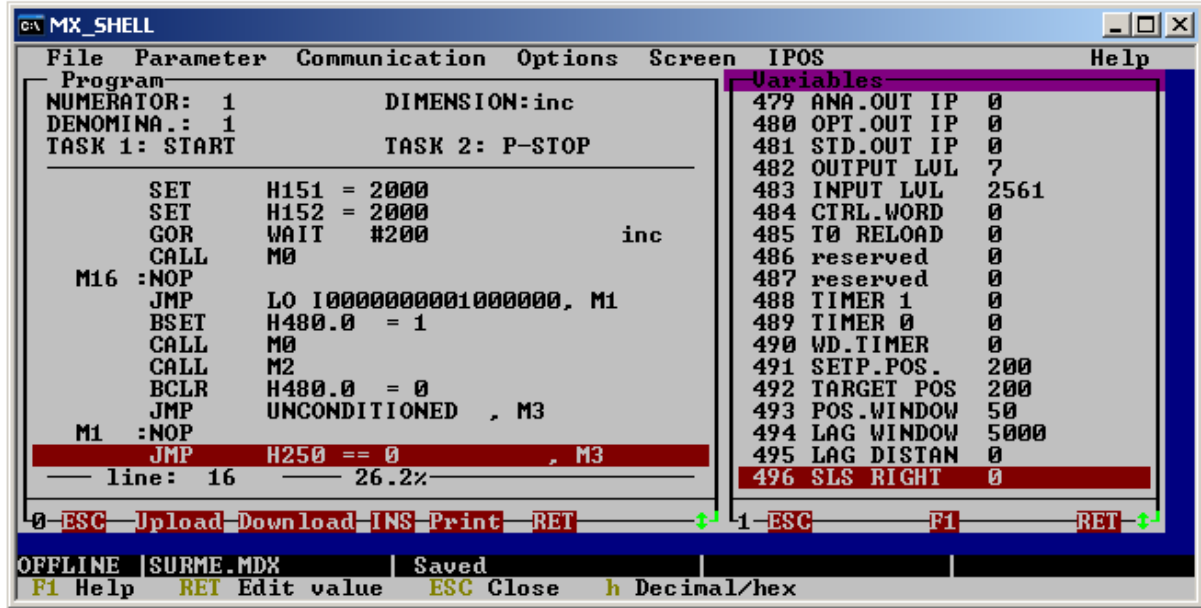
Bazı sürücüler programlamayı oldukça kolaylaştıracak grafiksel programlama araçları sunarlar. Kullanıcının üst düzeyde programlama bilgisi olmasa dahi rahatlıkla programlama araçlarını grafiksel olarak kullanarak servo sistemi istediği gibi programlayabilir. Aşağıdaki şekilde bir grafiksel programlama örnek ekran çıktısı verilmiştir.



Şekil 5.24 grafikselservo sistem programlanması

5.10.C DÜŞÜK DÜZEY (ASSEMBLER) PROGRAMLAMA

Çoğu servo sürücü donanım yapısına uygun assembler programlamaya olanak tanır. Assembler programlama esnek ve hızlı olmasına karşın iyi bir programlama bilgisi gerektirir. Bu nedenle servo sistemi assembler programlama için hem programlama altyapısı bilgilerine ve o sürücü için gerekli özel assembler bilgilerine sahip olmak gerekir. Her sürücü sisteminin assembler komutları ve yapısı kendisine özgü farklılıklar taşır. Ancak temelde yaptıkları işlevler ve yapıları birbirlerine çok benzerdir. Aşağıdaki şekilde bir servo sürücünün assembler programlama ekran çıktısı verilmiştir.



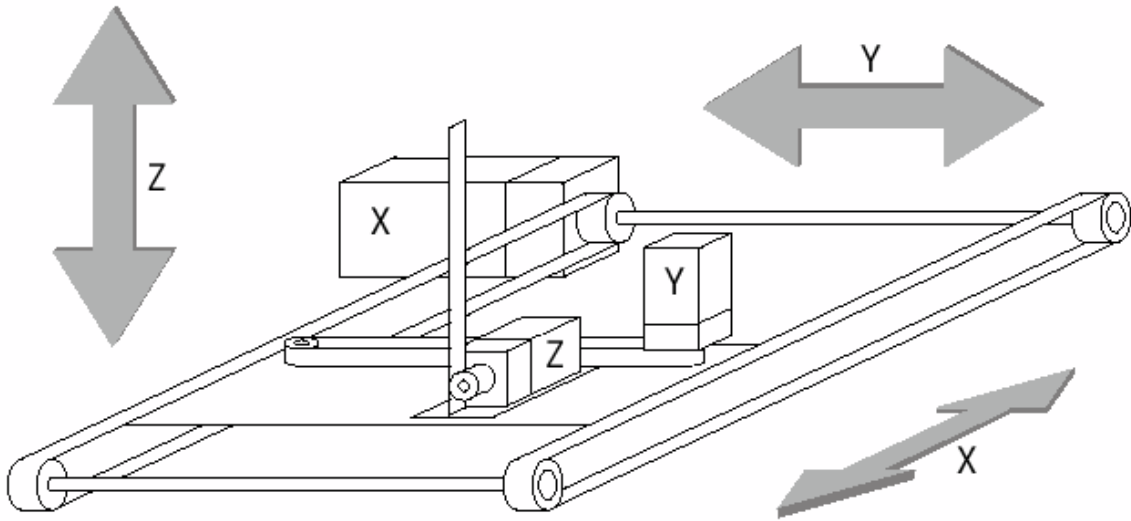
Şekil 5.25 bir servo sürücünün assembler programlanması

5.10.D CAM PROGRAMLAMA

Bazı ileri teknoloji servo sürücüler kendilerine özgü CAM (Computer Aided Manufacture= Bilgisayar Destekli Üretim) programlara sahiptirler. Bu CAM programları ile kolaylıkla bazı servo sistem uygulamaları gerçekleştirilebilir. Ancak bir endüstriyel otomasyon için çoğunlukla bir genel amaçlı SCADA () programı kullanılır. Servo sürücülerin bu SCADA programları ile birlikte doğrudan kullanılabilmesi için de o SCADA için yazılmış bir sürücü programının olması gerekir. Eğer geliştirilecek uygulama küçük çaplı bir uygulama ise SCADA programı yerine yazılacak bir izleme ve kontrol programı kullanılabilir. Bu programı yazmak için ise de sürücü parametrelerini görüntüleme ve değiştirme amacı ile sürücü haberleşme protokollerine ihtiyaç duyulur.

5.11 BİR SERVO SİSTEMİ GERÇEKLEŞTİRME ÖRNEĞİ

Aşağıda görülen sistemin servo sistem ile projelendirilmesini gerçekleştirelim.



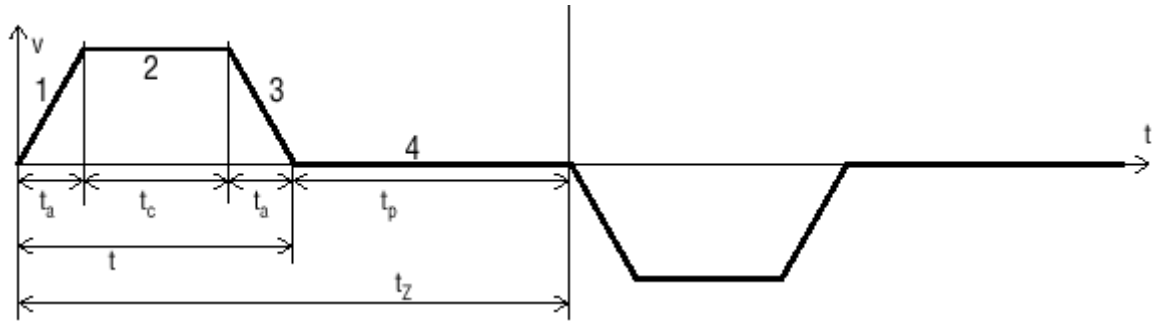
Şekil 5.26 servo sistem ile gerçekleştirilecek sistem

x ekseninin hesaplanması

Verilen bilgiler

m_L	=	453 kg	toplam taşınan yük
D	=	0.175 m	bant çapı
μ_L	=	0.2	sürtünme katsayısı
s	=	2 m	hareket mesafesi
v_{max}	=	2.5 m/s	maksimum hız
a_{max}	=	10 m/s ²	maksimum hızlanma ve yavaşlama
t_z	=	2.1 s	hareketi yineleme süresi (cycle time)
Δs_1	=	±0.1 mm	mekanik duyarlılık
Δs	<	±0.2 mm	gerekli toplam duyarlılık
η_L	=	0.90	yük etkinlik oranı

Verilen bu bilgilerden sonra x eksenini yol alma periyodu belirlenmelidir. X ekseninin yol alma periyodu aşağıda görülmektedir.



Şekil 5.27 X eksenli yol alma periyodu

Hızlanma ve yavaşlama zamanı t_a

$$t_a = \frac{v_{max}}{a_{max}} = \frac{2.5 \frac{m}{s}}{10 \frac{m}{s^2}} = \underline{\underline{0.25 s}}$$

Maksimum hızda yol alma süresi t_c

$$t_c = \frac{s - 2 \cdot \left(\frac{1}{2} a \cdot t_a^2 \right)}{v_{max}} = \frac{2 m - 10 \frac{m}{s^2} \cdot (0.25 s)^2}{2.5 \frac{m}{s}} = \underline{\underline{0.55 s}}$$

Toplam yol alma süresi t ve test periyodu t_p

$$t = 2 \times t_a + t_c = 2 \times 0.25 s + 0.55 s = \underline{\underline{1.05 s}}$$

$$t_p = t_z - t = 2.1 s - 1.05 s = \underline{\underline{1.05 s}}$$

Yük hızı ve dişli oranı

$$n = \frac{v_{max}}{D \cdot \pi} = \frac{2.5 \frac{m}{s}}{0.175 m \cdot \pi} = 4.547 s^{-1} = \underline{\underline{272.8 min^{-1}}}$$

$$i_{setp} = \frac{3000 min^{-1}}{272.8 min^{-1}} = 11,0$$

$$n^* = n \cdot i = 272.8 min^{-1} \cdot 10 = \underline{\underline{2728 min^{-1}}}$$

Konumlandırma doğruluğu

$$\Delta s = \Delta s_G + \Delta s_M + \Delta s_I$$

Δs_G : Dişliden (redüktör) kaynaklanan hata

Δs_M : Enkoder doğruluğundan kaynaklanan hata

Δs_I : Diğer mekanik elemanlardan kaynaklanan hata

$$\Delta s_G = \frac{D \cdot \pi}{360^\circ} \cdot \alpha_G = \frac{0.175 \text{ m} \cdot \pi}{360^\circ} \cdot 0.1^\circ = 0.153 \text{ mm} \rightarrow \pm 0.076 \text{ mm}$$

$$\alpha_G = 6' = 0.1^\circ \text{ standart redüktörler için}$$

$$\Delta s_M = \pm \frac{D \cdot \pi}{p \cdot i} = \pm \frac{0.175 \text{ m} \cdot \pi}{4096 \cdot 10} = \pm 0.013 \text{ mm}$$

p=4096 pals her dönüş için (enkoder duyarlılığı)

$$\Delta s = (\pm 0.076 \text{ mm}) + (\pm 0.013 \text{ mm}) + (\pm 0.1 \text{ mm}) = \underline{\underline{\pm 0.189 \text{ mm}}} < \pm 0.2 \text{ mm}$$

Yük torku

Hızlanma

$$M_{dyn_1} = m_L \cdot a_{max} \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 453 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0.9} \cdot \frac{0.175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{440.42 \text{ Nm}}}$$

Sabit hızda statik yük

$$M_{stat} = m_L \cdot g \cdot \mu_L \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 453 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.2 \cdot \frac{1}{0.9} \cdot \frac{0.175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{86.41 \text{ Nm}}}$$

Yavaşlama

$$M_{dyn_2} = m_L \cdot (-a_{max}) \cdot \eta_L \cdot \frac{D}{2} = 453 \text{ kg} \cdot (-10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \cdot 0.9 \cdot \frac{0.175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{-356.74 \text{ Nm}}}$$

Yol alma periyodunda yük torku

Hızlanma modu

$$M_1 = M_{stat} + M_{dyn_1} = 440.42 \text{ Nm} + 86.41 \text{ Nm} = \underline{\underline{526.83 \text{ Nm}}}$$

Sabit hızda

$$M_2 = M_{stat} = \underline{\underline{86.41 \text{ Nm}}}$$

Yavaşlama modu

$$M_3 = M_{stat} + M_{dyn_2} = 86.41 \text{ Nm} - 356.74 \text{ Nm} = \underline{\underline{-270.33 \text{ Nm}}}$$

Redüktör kataloğundan

$$\eta_G = 0.97$$

$$J_G^* = 28.51 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \text{ değerleri bulunur.}$$

Bu değerler için motor miline uygulanan torku hesaplayalım

Hızlanma modu

$$M_1^* = M_1 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 526.83 \text{ Nm} \cdot \frac{1}{0.97 \cdot 10} = \underline{\underline{54.31 \text{ Nm}}}$$

Sabit hızda

$$M_2^* = M_2 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 86.41 \text{ Nm} \cdot \frac{1}{0.97 \cdot 10} = \underline{\underline{8.91 \text{ Nm}}}$$

Yavaşlama modu

$$M_3^* = M_3 \cdot \eta_G \cdot \frac{1}{i} = -270.33 \text{ Nm} \cdot 0.97 \cdot \frac{1}{10} = \underline{\underline{-26.22 \text{ Nm}}}$$

Motora yansıtılan toplam moment

$$M_{1G}^* = \frac{J_G \cdot 2\pi \cdot n^*}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a \cdot \eta_G} = \frac{28.51 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 2728 \text{ min}^{-1}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 0.25 \text{ s} \cdot 0.97} = \underline{\underline{3.36 \text{ Nm}}}$$

Sistem şasisini hareket ettiren moment

$$J_L^* = m_L \cdot \left(\frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{v_{\max}}{n^*} \right)^2 = 453 \text{ kg} \cdot \left(\frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2728 \text{ min}^{-1}} \right)^2 = \underline{\underline{0.0347 \text{ kgm}^2}}$$

Servo motor seçimi

Bir servo motor seçimi aşağıdaki koşullar sağlanırsa uygun bir motor seçilmiş olunur.

a) $k_i = \frac{J_{\text{ext}}^*}{J_{\text{Mot}}} < 10$

b) $M_{\max}^* < 3 \cdot M_0$

c) $M_{\text{rms}} < M_{\text{perm}}$

d) $n^* \approx 0.9 n_N$

Motor momentinin en yüksek değeri hesaplanırsa

$$J_{\text{ext}}^* = J_L^* + J_G^* = 0.0347 \text{ kgm}^2 + 0.0028 \text{ kgm}^2 = \underline{\underline{0.0375 \text{ kgm}^2}}$$

$$M_{\max}^* = M_1^* + M_{1G}^* = 54.31 \text{ Nm} + 3.36 \text{ Nm} = \underline{\underline{57.67 \text{ Nm}}}$$

Bu değerlere uygun bir motorun değerleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}n_N &= 3000 \text{ min}^{-1} \\M_0 &= 35 \text{ Nm} \\J_{\text{mot}} &= 148 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2\end{aligned}$$

Bu motora uygun sürücü değerleri

$$\begin{aligned}i &= 10 \\M_{\text{amax}} &= 800 \text{ Nm} \\n_N &= 3000 \text{ min}^{-1} \\M_0 &= 35 \text{ Nm} \\I_0 &= 24 \text{ A} \\J_{\text{mot}} &= 148 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2\end{aligned}$$

Seçilen motor öngörülen koşullara uygunluğunu kontrol edelim

a) $M_{\text{amax}} > M_1$
 $800 \text{ Nm} > 526.83 \text{ Nm}$

b) $k_j > 10$
$$k_j = \frac{J_{\text{ext}}}{J_{\text{mot}}} = \frac{0.0375 \text{ kgm}^2}{0.0148 \text{ kgm}^2} = \underline{\underline{2.53}}$$

c) $M_{1\text{mot}} < 3 \cdot M_0$
$$\frac{M_{1\text{mot}}}{M_0} = \frac{74.58 \text{ Nm}}{35 \text{ Nm}} = \underline{\underline{2.13}}$$

d) $M_{\text{rms}} < M_{\text{perm}}$
 $30 \text{ Nm} < 32 \text{ Nm}$

Tüm öngörülen koşullar sağlanıyor. Bu durumda seçilen sürücü uygun bir sürücüdür. Aynı işlemler y ve z eksenleri için yapıldığında, sistemin üç eksen boyunca hareketi için gerekli birimler seçilmiş olunur.

Günümüzde kullanılan bir çok servo kontrolör birden çok eksen kullanımları için eksen eşzamanlılığını (sencronization) sağlayan donanım ve yazılımlara sahiptir. Eksen konumu için genellikle resolver kullanılmaktadır. Resolverden alınan bilgi işlendikten sonra sayısal olarak diğer eksen sürücüsüne aktarılarak eşzamanlılık sağlanmaktadır.