

T.C.
MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI



MEGEP

(MESLEKİ EĞİTİM VE ÖĞRETİM SİSTEMİNİN
GÜÇLENDİRİLMESİ PROJESİ)

ENDÜSTRİYEL OTOMASYON
TEKNOLOJİLERİ

PID KONTROLÜ

ANKARA, 2009

Milli Eğitim Bakanlığı tarafından geliştirilen modüller;

- Talim ve Terbiye Kurulu Başkanlığının 02.06.2006 tarih ve 269 sayılı Kararı ile onaylanan, Mesleki ve Teknik Eğitim Okul ve Kurumlarında kademeli olarak yaygınlaştırılan 42 alan ve 192 dala ait çerçeve öğretim programlarında amaçlanan mesleki yeterlikleri kazandırmaya yönelik geliştirilmiş öğretim materyalleridir (Ders Notlarıdır).
- Modüller, bireylere mesleki yeterlik kazandırmak ve bireysel öğrenmeye rehberlik etmek amacıyla öğrenme materyali olarak hazırlanmış, denenmek ve geliştirilmek üzere Mesleki ve Teknik Eğitim Okul ve Kurumlarında uygulanmaya başlanmıştır.
- Modüller teknolojik gelişmelere paralel olarak, amaçlanan yeterliği kazandırmak koşulu ile eğitim öğretim sırasında geliştirilebilir ve yapılması önerilen değişiklikler Bakanlıkta ilgili birime bildirilir.
- Örgün ve yaygın eğitim kurumları, işletmeler ve kendi kendine mesleki yeterlik kazanmak isteyen bireyler modüllere internet üzerinden ulaşılabilirler.
- Basılmış modüller, eğitim kurumlarında öğrencilere ücretsiz olarak dağıtılır.
- Modüller hiçbir şekilde ticari amaçla kullanılamaz ve ücret karşılığında satılamaz.

İÇİNDEKİLER

AÇIKLAMALAR	ii
GİRİŞ	1
ÖĞRENME FAALİYETİ-1	3
1. P, PI ve PD DENETİM YÖNTEMLERİ	3
1.1. Oransal (P) Denetim Yöntemi.....	4
1.2. Oransal-İntegral (PI) Denetim Yöntemi.....	15
1.3. Oransal-Türevsel (PD) Denetim Yöntemi	24
UYGULAMA FAALİYETİ	31
ÖLÇME VE DEĞERLENDİRME	34
ÖĞRENME FAALİYETİ-2	35
2. ORANSAL-İNTEGRAL-TÜREV (PID) DENETİM YÖNTEMİ.....	35
2.1. PID Denetim Yöntemi Temel Özellikleri	35
2.2. PID Kontrolör Devreleri ve Cihazları.....	38
2.3. PID Kontrolör Ayarı	44
UYGULAMA FAALİYETİ	46
ÖLÇME VE DEĞERLENDİRME	48
MODÜL DEĞERLENDİRME	49
CEVAP ANAHTARLARI.....	50
KAYNAKÇA	51

AÇIKLAMALAR

KOD	523EO0379
ALAN	Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri
DAL/MESLEK	Endüstriyel Kontrol Teknisyenliği
MODÜLÜN ADI	PID Kontrolü
MODÜLÜN TANIMI	PID yöntemi kullanan kapalı çevrim denetim sistemleri ile ilgili konuların verildiği öğrenme materyalidir.
SÜRE	40/32
ÖN KOŞUL	Kapalı Çevrim Kontrolü modülünü almış olmak
YETERLİK	PID kontrolü yapmak
MODÜLÜN AMACI	Genel Amaç Bu modül ile gerekli ortam sağlandığında PID denetim sistemini blok diyagramına ve devre şemasına göre kurabileceksiniz. Amaçlar 1. P, PI ve PD denetim yöntemleri hazırlığını matematiksel olarak yapabileceksiniz. 2. PID denetim devresini devre şeması ve blok diyagramına göre kurabileceksiniz.
EĞİTİM ÖĞRETİM ORTAMLARI VE DONANIMLARI	Ortam: Uygulamalar için ardışık kontrol atelyesi Donanım: Elektronik devre elamanları, osilaskop, multimetre, el aletleri, deney bordu
ÖLÇME VE DEĞERLENDİRME	Modülün içinde yer alan her faaliyetten sonra verilen ölçme araçları ile kazandığınız bilgileri ölçerek kendi kendinizi değerlendireceksiniz. Öğretmen modül sonunda ölçme aracı (test, çoktan seçmeli, doğru-yanlış vb.) kullanarak modül uygulamaları ile kazandığınız bilgi ve becerileri ölçerek sizi değerlendirecektir.

GİRİŞ

Sevgili Öğrenci,

Kapalı Çevrim Kontrolü modülünde, kapalı çevrim denetimi temel bilgileri, geri besleme elemanları, kapalı çevrim denetimi için matematiksel modelleme ve aç-kapa denetim yöntemi başlıkları ile ilgili temel yeterlikleri kazandınız. Bu modüle başlamadan önce öğrendiğiniz bilgileri tekrarlamanızda fayda vardır. Bu modülde ilgili denetim yöntemlerinde temel olarak opamplar kullanılacağından opamp uygulama devrelerini tekrar ediniz.

Kapalı çevrim denetim sistemlerindeki yolculuğunuza ileri düzey denetim yöntemleri ile devam ediyorsunuz. Bu kapsamda aç-kapa denetim yönteminin sıkıntılarını azaltan ve daha kaliteli bir denetim döngüsü sağlayan uygulamaları bilmeniz sizleri otomasyon dünyasında önemli bir aşamaya çıkaracaktır. Konuların ileri düzeyde matematik bilgileri ile ilişkileri bulunduğu öncelikle bu ilişkileri irdelemeniz ve ilgili blok şema ve devrelerle bağdaştırmanız gerekmektedir. Öğrenme faaliyetleri sonunda uygulama faaliyetlerini matematiksel ilişkiler ile irdeleyerek gerçekleştiriniz.

ÖĞRENME FAALİYETİ-1

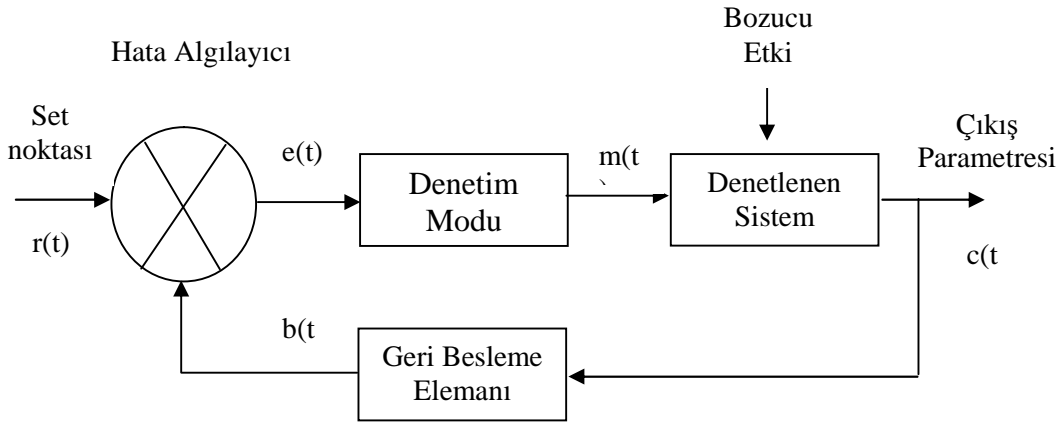
AMAÇ

P, PI ve PD denetim yöntemleri hazırlığını matematiksel olarak yapabileceksiniz.

- Denetim yöntemleri hakkında yerli ve yabancı kaynaklardan ön araştırma yapınız.

1. P, PI VE PD DENETİM YÖNTEMLERİ

Şekil 1.1'den hatırlanacağı gibi, bir kapalı çevrim denetim sisteminde geri besleme elemanı üzerinden alınan çıkış büyüklüğünün değerlendirilebilir kısmı, referans bir değer ile karşılaştırılır ve elde edilen hata sinyalinin yapısına ve kontrol edilen değişkene uygun bir denetim sinyali üretilir. Uygun denetim sinyalini denetim modu ünitesi oluşturur. Denetim modu ünitesi bu işlemi bir veya birkaç denetim yöntemi (denetim modu) kullanarak gerçekleştirir. Bu kısımda P, PI veya PD denetim yöntemlerini kullanarak sinyal üreten denetim devreleri ve matematiksel modeller incelenecektir.



Şekil 1.1: Kapalı çevrim denetim sistemi genel blok şeması

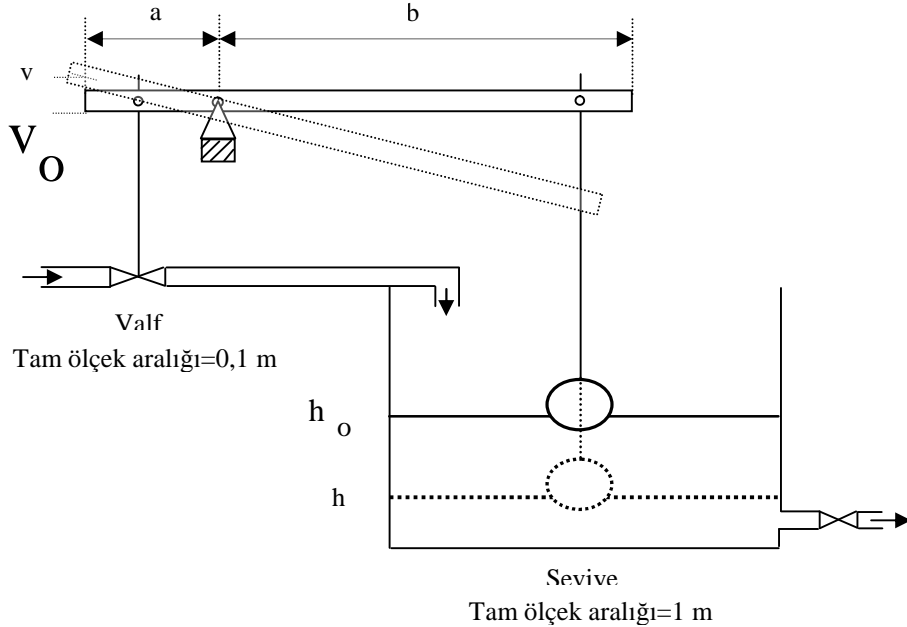
Aç-kapa yöntemi kullanılan kapalı çevrim denetim sistemlerinde daha önce anlatıldığı gibi histeresiz olayı meydana gelmektedir. Bu tür kapalı denetim sistemlerinde set değeri etrafında histeresiz bantı oluşur. Çıkış değeri set değerini geçer geçmez kontrolör çıkışı kapalı sinyali üretemez, ancak bu bant geçildikten sonra çıkış kapatılır. Aynı şekilde, ölçüm değeri set değerinin altına histeresiz bantının dışına ulaşıncaya kadar açık sinyali üretilir. Bu nedenle aç-kapa modlu denetim sistemi sağlıklı bir sistem değildir. Ölçülen çıkış değişkeni hiçbir zaman set noktasında sabitlenemez ve sistemde sürekli salınım oluşur. Bu nedenle de

sistemde aşırı enerji tüketimi oluşur. Kritik proseslerde ve hızlı tepki gereken işlemlerde yetersiz bir denetim gerçekleşir. Kapalı çevrim denetim sistemlerinde aç-kapa denetim yönteminin sakıncalarını ortadan kaldırmak için P, I, D denetim yöntemleri ve bunların birleşiminden meydana gelen yöntemler geliştirilmiştir. Aç-kapa yöntemi kullanan denetim modu ünitesi kesikli çalışırken bu modülde bahsedilecek olan denetim yöntemlerini kullanan üniteler sürekli çalışırlar.

1.1. Oransal (P) Denetim Yöntemi

Oransal denetim yönteminde, kontrolör çıkışında hata sinyali($e(t)$) ile orantılı bir değişim üretilir ve çalışma devamlıdır. Sistemin enerji ihtiyacı her an değişim gösterir. Kontrolör ölçme elemanından aldığı ölçme bilgisine göre sürücü elemanı uyarır. Sürücü eleman da güç elemanına giren enerjiyi kontrol eder. Ölçme elemanı denetlenen değişkeni sürekli ölçer ve kontrolöre sürekli olarak sinyal gönderir. Sistemin set değerinde bir sapma olduğu anda ölçme elemanı bunun karşılığı olan elektrik sinyalini kontrolöre gönderir. Kontrolör bu bilgiyi referans değer ile karşılaştırarak sürücü elemanı uyarır.

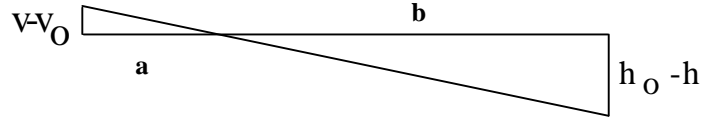
Denetlenen değişken değeri ile son denetim elemanının durumu arasında sabit lineer bir ilişki vardır. Şekil 1.2’de oransal denetime örnek olabilecek basit bir sistem görülmektedir. Bu sistemde çıkış parametresi ya da diğer bir ifadeyle denetlenen değişken tanktaki sıvı seviyesidir. Suyun üstünde yüzen duba, ölçüm elemanı olarak kullanılırken valf son denetim elemanı olarak görev yapar. Kaldıraç ise denetim hareketini gerçekleştirir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, her seviyede valf açıklığının farklı olduğudur.



Şekil 1.2: Örnek oransal mod denetleyicisi

İstenen sıvı seviyesi h_o 'dır ve v_o ise h_o değeriyle uyumlu valf pozisyonudur. Diğer bir ifadeyle v_o , hata değeri 0 iken gerçekleşen valf pozisyonudur. Hata değeri sıfır iken oransal denetleyicinin bir çıkış değerinin olması gereklidir.

Kaldıracın iki ayrı konumu ile aşağıda görülen iki ayrı üçgensel bölge oluşur. Bu üçgensel bölge yardımıyla valf pozisyonu (v) bulunabilir.



Şekil 1.3: Üçgenlerde benzerlik

Üçgenlerde benzerlik ilişkisinden aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\frac{v-v_o}{a} = \frac{h_o-h}{b} \quad (1.1)$$

$$\text{Hata Sinyali}(e) = h_o - h \quad (1.2)$$

Şekil 1.2'de valf pozisyonunun tam ölçek aralığı ya da diğer bir ifadeyle skalası 0,1 m olarak verilmiştir. Tam ölçek aralığının valf için anlamı, valfin tam açık ve tam kapalı olduğu durumlar arasında 0,1 m farkın olmasıdır. Sıvı seviyesi için sıvı tankının tam ölçek aralığı ise 1 m olarak verilmiştir. Bu değerler aşağıdaki eşitliklerde kullanılır.

$$\text{Valf pozisyonundaki yüzdelik değişim} = \frac{100(v-v_o)}{0,1} = 1000(v-v_o) \quad (1.3)$$

$$\text{Sıvı seviyesindeki yüzdelik değişim} = \frac{100(h_o-h)}{1} = 100(h_o-h) \quad (1.4)$$

1.3 ve 1.4 eşitlikleri kullanılarak oransal denetleyicinin kazancı (K_p) aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\text{Kazanç}(K_p) = \frac{1000(v-v_o)}{100(h_o-h)} = 10 \left(\frac{v-v_o}{h_o-h} \right) = 10 \left(\frac{a}{b} \right) \quad (1.5)$$

$$v = K_p e + v_o \quad (1.6)$$

Eşitliklerde;

v = Valf pozisyonu (metre)

v_o = Sıfır hata durumundaki valf pozisyonu (metre)

h = Daba pozisyonu (metre)

h_o = Sıfır hata durumundaki sıvı seviyesi (metre)

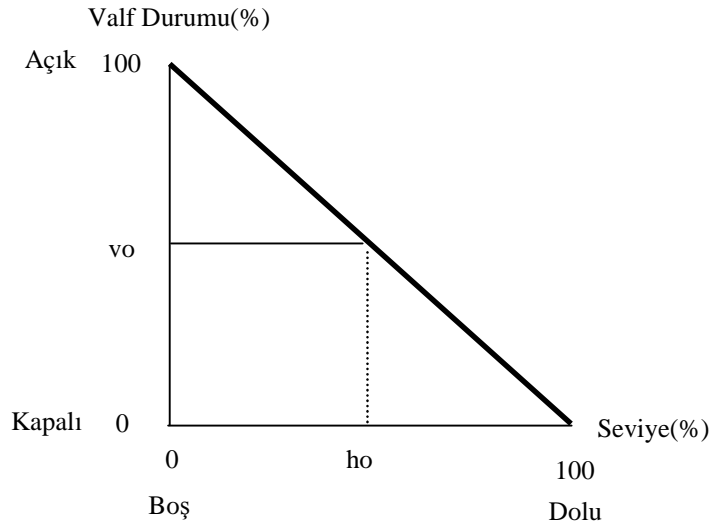
e = Hata sinyali (metre) olarak yer almışlardır.

1.6 eşitliği oransal denetimi anlama adına çok önemlidir. Şekil 1.2'deki oransal denetleyicinin kazancı valf pozisyonundaki değişimin sıvı seviyesindeki değişime oranıdır. Her ikisi de tam ölçek aralığına bağlı bir yüzdelik oran ile ifade edilir.

Şekil 1.2'deki oransal denetleyicinin kazanç değerleri 0.5, 1 ve 2 olduğunda elde edilen giriş çıkış grafikleri Şekil 1.4'te görülmektedir. Şekilde h_o %50 doluluğu ifade ederken v_o 'da %50 açıklığı ifade etmektedir. Valf tıpasının tam açık ve tam kapalı durumları arasında 0,1 m mesafe vardır ve seviye sensörü olarak tanımlayabileceğimiz duba, kabın tam dolu ve tam boş olması arasında 1 metrelik bir mesafede hareket etmektedir.

1 değerindeki bir oransal kazanç kaldırıcın b kolu a kolunun 10 katı yapılırsa elde edilir.

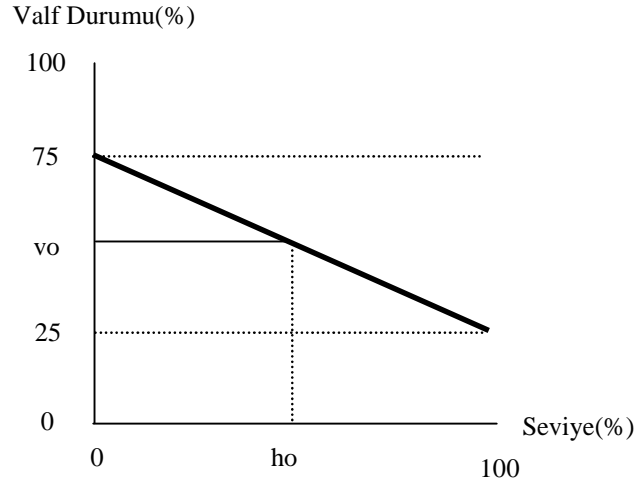
$$K_p = 10(a/b) = 10(a/10a) = 1$$



Şekil 1.4: $K_p=1$ Değerindeki giriş çıkış grafiği

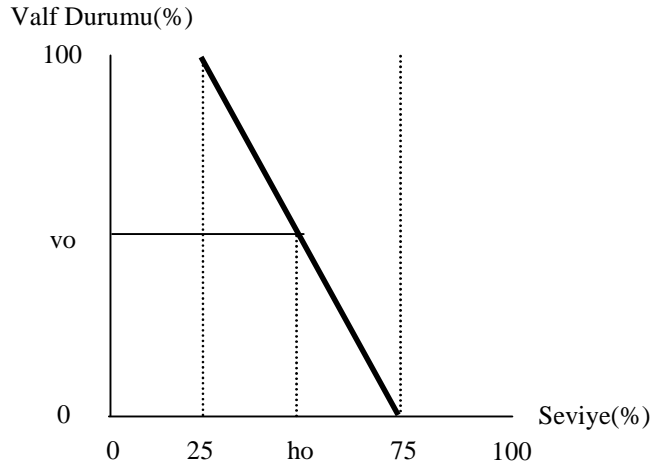
Şekil 1.4 oransal kazanç 1 iken oluşan giriş çıkış grafiğini göstermektedir. % 0'lık bir seviye valfin %100 açılmasına neden olur. Seviye % 50'de iken valf açıklığı %50, seviye % 100 iken valf açıklığı % 0'dır. Kazanç 1 iken seviye ve valf açıklığı aynı oranda azalır ve artar.

$b=20a$ yapıldığında kazanç 0,5 olur. Bu durumda oluşan giriş çıkış eğrisi Şekil 1.5'te görülmektedir. Grafikte görüldüğü üzere seviye % 0 iken valf açıklığı %75'tir. Sıvının debisi $K_p=1$ değerine göre daha azdır. Sıvı seviyesi yine h_o değerine v_o açıklığı ile ulaşır.



Şekil 1.5: $K_p=0.5$ Değerindeki giriş çıkış grafiği

$b=5a$ yapıldığında kazanç 2 olur. Bu durumda oluşan giriş çıkış eğrisi Şekil 1.6'da görülmektedir. Seviyedeki % 25 değeri, valfi % 100 oranında açar ve çok kuvvetli bir sıvı akışı gerçekleşir. Sıvı önceki kazanç değerlerine göre daha hızlı kabı doldurur. h_o set değerine v_o açıklığı ile daha çabuk ulaşılır. Ancak h_o etrafındaki salınım önceki kazanç değerlerine göre daha fazladır.



Şekil 1.6: $K_p=2$ Değerindeki giriş çıkış grafiği

Genel olarak kazançtaki artış hatayı azaltır fakat set değeri etrafında osilasyon oluşumuna yol açabilir. Kazanç değeri, osilasyonların oluşması ile minimum hata elde edilmesi arasında güvenli bir değere ayarlanmalıdır. Diğer bir ifadeyle istenmeyen osilasyonlar oluşmadan mümkün olduğu kadar büyük ayarlanmalıdır. Oransal denetim yönteminin bir diğer problemi de yük değişimi tarafından meydana getirilen hatayı tamamen ortadan kaldıramamasıdır. Yük değişimi, proseste dengeli bir durum sürdürmek için farklı

bir çıkış pozisyonunun veya değerinin gerekmesidir. Kalıcı bir hata set değerinden kaymaya neden olur. Oransal denetleyicideki sabit oluşan bu hataya “kalıcı durum hatası” ya da “oransal ofset” denilmektedir. Ofset büyüklüğü yük değişimiyle ve oransal kazanç ile orantılıdır. Bu nedenlerle oransal denetim yöntemi oransal ofset değerinin kabul edilebilir bir seviyeye inmesi için kazanç değerinin yeterli büyüklükte ayarlanabildiği küçük kapasiteli sistemler için uygundur.

P-I-D yöntemleri kullanılan sistemlerde, sistemin transfer fonksiyonu büyük önem arz eder. Transfer fonksiyonu yazılırken $v=K_p e+v_o$ formülündeki v_o değeri sıfır kabul edilir. Şekil 1.2’deki mekanik sistem için aşağıdaki formül transfer fonksiyonunu tanımlar.

$$K_p = \frac{V}{E}$$

K_p oransal kazanç değerinin daha büyük olması kontrolörün çıkış sinyalinin, hataya bağlı olarak daha da artacağını ifade eder. Diğer bir ifade ile kazanç 1 iken hata %10 ise kontrolör çıkış sinyalinin değişimi %10 oranında olacaktır. Günümüzde pek çok üretici K_p yerine PB (proportional band - oransal bant) deyimini kullanmaktadır. “Oransal bant”, sistemden elde edilen hata sinyalinin büyüklüğü her ne olursa olsun, çıkış sinyalinin artabileceği aralığı yüzde (%) olarak tanımlar.

Oransal denetim modu ünitesi çıkışı, zamanın fonksiyonu olarak $m(t)$ ile hata sinyali de $e(t)$ ile ifade edilirse aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

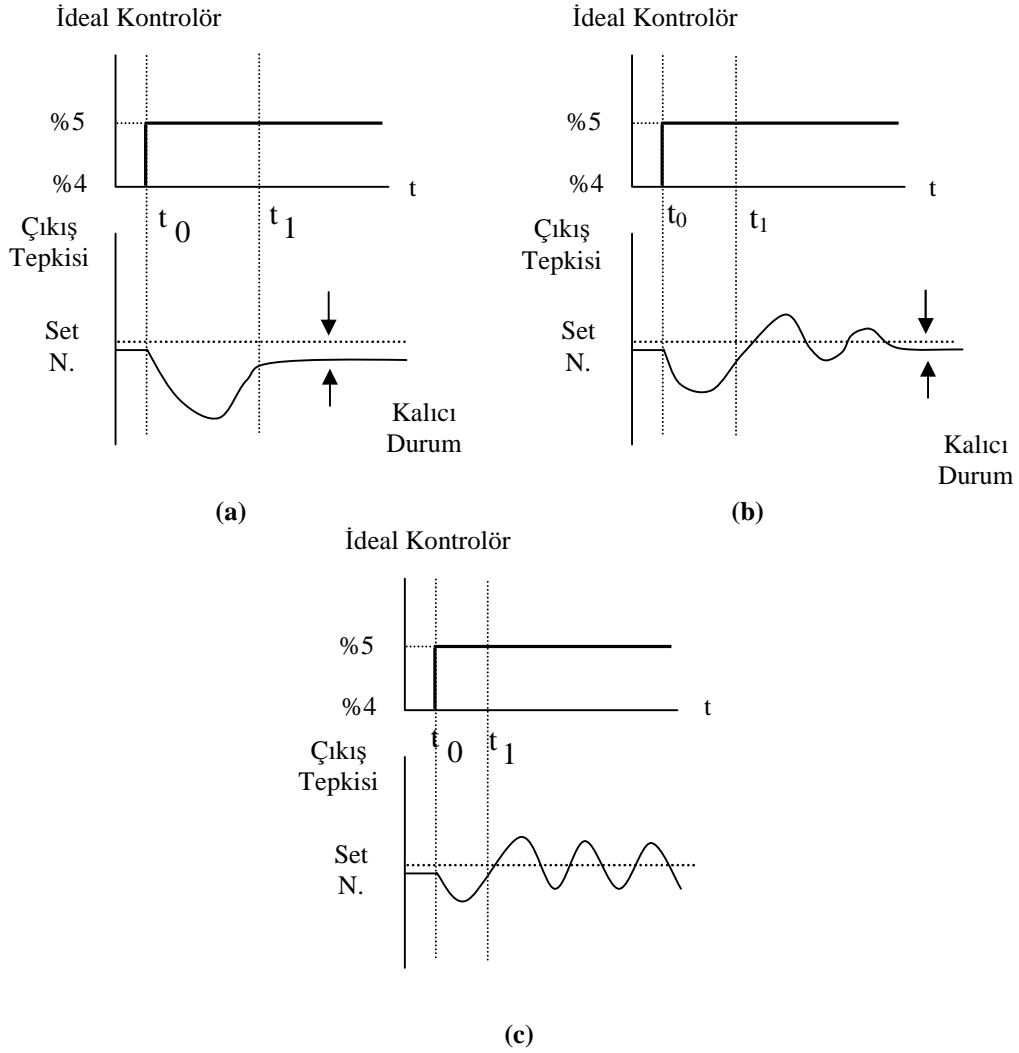
$$m(t)=K_p.e(t)+v_o$$

Transfer fonksiyonu başlangıç değeri olan v_o ’ın sıfır kabul edilmesi ile hesaplanır. Buna göre K_p değeri de;

$$K_p = \frac{m(t)}{e(t)}$$

ile ifade edilir.

Şekil 1.7’de üç ayrı kazanç değerinde yük değişimi % 40’dan % 50’ye çıkan bir prosesin çıkış denetim tepkileri görülmektedir. Şekillerde çıkışta yük değişiminin başlamasından itibaren çıkış tepkisinin set değerine ulaşmasına kadar geçen süreye “oturma zamanı” adı verilir.



Şekil 1.7: Oransal mod denetleyicisi çıkış tepkileri
a-Düşük kazanç değerli
b-Kritik kazanç değerli
c-Çok yüksek kazanç değerli

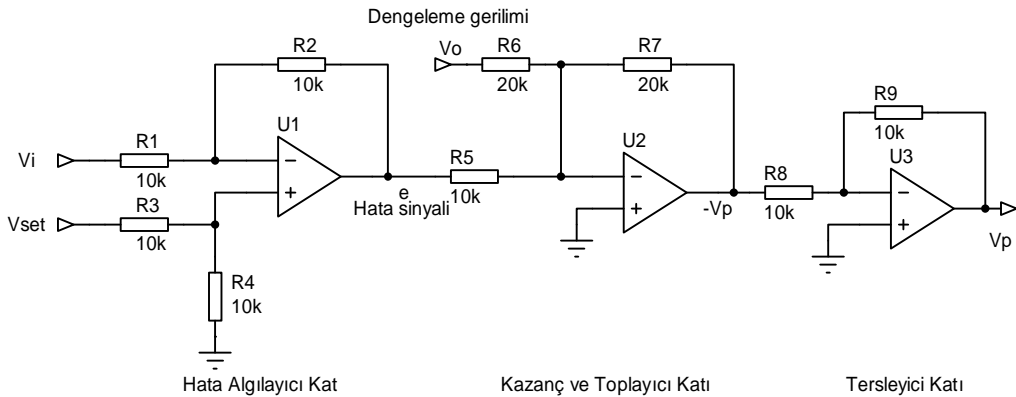
Şeklinde a'da kazanç çok düşük olduğundan çıkış set değeri etrafında salınma girmeden kalıcı durum hatası vermeye başlamaktadır. t_1-t_0 farkı ile ifade edilen oturma zamanı da b ve c şekillerine göre daha uzundur. Diğer bir deyişle çıkış tepki vermeye daha geç başlar. B şeklinde ise kazanç biraz daha artırılmış, sistem çıkışı set değeri etrafında salınma başlamıştır. Fakat bir süre sonra kalıcı durum hatası oluşur. Kalıcı durum hatası a şeklinden daha düşük değerdedir. Oturma zamanı daha azdır diğer bir deyişle sistem daha çabuk tepki verir. c şeklinde ise kazanç çok yüksek bir değere getirilmiştir. Bu durumda sistem çok daha çabuk tepki verir ve set değeri etrafında kararsız salınımlar yapmaya başlar. Bu tür bir durumda kalıcı durum hatası oluşmaz. Hata değeri yüksek olduğunda da sistem

tepkisi çok hızlı olarak gerçekleşir. Bu nedenle, oransal denetleyici tasarımında ve ayarlamasında bozucu etkilere karşı tepki süresi, kalıcı durum hatası ve sistem kararlılığı arasındaki denge en iyi şekilde ayarlanmalıdır.

Denetim organı çıkışı olan $m(t)$ hatanın büyüklüğüne bağlı olarak değişir. Herhangi bir t zamanında hata ne kadar büyük olursa düzeltici denetim sinyali olan $m(t)$ 'de o oranda büyük değişim meydana gelir. Hata çok küçük olduğunda ise denetim organı etkili bir düzeltme sinyali üretilmez. Bu nedenle oransal denetim organında kalıcı durum hatası oluşur. K_p değerini artırarak kalıcı durum hatasını azaltmak mümkündür.

Otomatik denetim sistemleri dinamik sistemlerdir. Dinamik sistemlerde “geçici durum” ve “kalıcı durum” olmak üzere iki tür davranış görülür. Geçici durum davranışı, sistemin belli bir dış uyarı karşısında belli bir başlangıç değerinden bir sonraki duruma kadar zaman değişimine bağlı olarak gösterdiği davranıştır. Kalıcı durum davranışı ise sistemin geçici durum davranışı tamamlandıktan sonra sonsuz sayılabilecek bir zaman diliminde koruduğu davranıştır ve istenmeyen bir durumdur. Örneğin valf açıklığının % 45’lik bir değerde olması gerekirken % 47’de sabit kalması ve durumunu sürekli olarak koruması bir tür kalıcı durum hatasıdır. Hata sinyali çok düşük olduğunda ya da oransal kazanç düşük olduğunda kalıcı durum hatası oluşabilir. Kazanç çok aşırı yüksek olduğunda ise sistem kararsızlaşır. Oransal denetimde bir diğer önemli husus sistemin bozucu etkilere karşı oluşturduğu tepkideki zaman gecikmesidir. Sistem kazancının değişiminden bu zaman gecikmesi de etkilenir. Aşağıdaki şekillerde kazanç değişiminin tepki zamanı ve kalıcı durum etkisi oluşumundaki rolü görülmektedir.

Oransal denetim organının en önemli avantajı yapısının basit olmasıdır. Şekil 1.8’de opampla yapılmış örnek bir oransal denetim devresi görülmektedir.



Şekil 1.8: Opampla yapılmış örnek bir oransal denetim devresi

Şekilde sistemde ölçülen çıkış büyüklüğünün istenen değerde kalması için gereken set gerilim değeri U1 opampının (+) girişine, geri besleme gerilimi ise (-) girişine uygulanmaktadır. Hata sıfır iken çıkışı süren başlangıç gerilim değeri olan V_o , U2 opampının (-) girişine uygulanır. V_o gerilimi dengeleme gerilimidir ve oransal bandın

oluşacağı hareketi başlatır. Örneğin bir dc motorun dakikada 500 rpm dönüş yapması için gereken gerilim V_o ile verilir. Motor dönüş hızı takojeneratörle ölçülürse 500 rpm için jeneratörün ürettiği gerilim değeri bulunur. Bu gerilim değeri V_{set} gerilimi olarak U1 opampının (+) girişinden uygulanır. Böylece motorun dönüş hareketini V_o gerilimi sağlarken bu gerilim ile elde edilen dönüş hızını da V_{set} gerilimi opampa öğretir. Sistem çalışmaya başlayınca motor 500 rpm ile dönüş yapmaya başlar. Takojeneratörden motorun dönüş hızıyla ilgili üretilen gerilim U1 opampının (-) girişine uygulanmıştır. Böylece bozucu bir etki motorun dönüş hızını etkilerse V_{set} gerilimi ile V_i gerilimi arasında fark oluşur ve bu fark gerilimi U2 opampında kazanç ile çarpılarak V_o gerilimine eklenir veya bu gerilimden çıkarılır. U2 opampında R6 ve R7 direnç değerleri eşit olmalıdır. R7/R5 oransal kazancı belirler. U2 opampı çıkışında negatif oransal denetim gerilimi ($-V_p$) oluşmaktadır. Bu nedenle U3 opampı tersleyici olarak kullanılmıştır. Sistem ile ilgili eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Hata algılayıcı katta hata sinyali aşağıdaki eşitliğe göre bulunur. Bu katta tüm dirençler eşit olduğu için;

$$e = V_{set} - V_i$$

formülü hata sinyalini elde etmek için kullanılır.

Kazanç ve toplayıcı katı aslında oransal denetim ünitesidir. Burada toplama işlemi yapılır. Aşağıdaki eşitlik bu katta geçerlidir.

$$V_p = -\left[\left(\frac{R_7}{R_5}\right)e + \left(\frac{R_7}{R_6}\right)V_o\right]$$

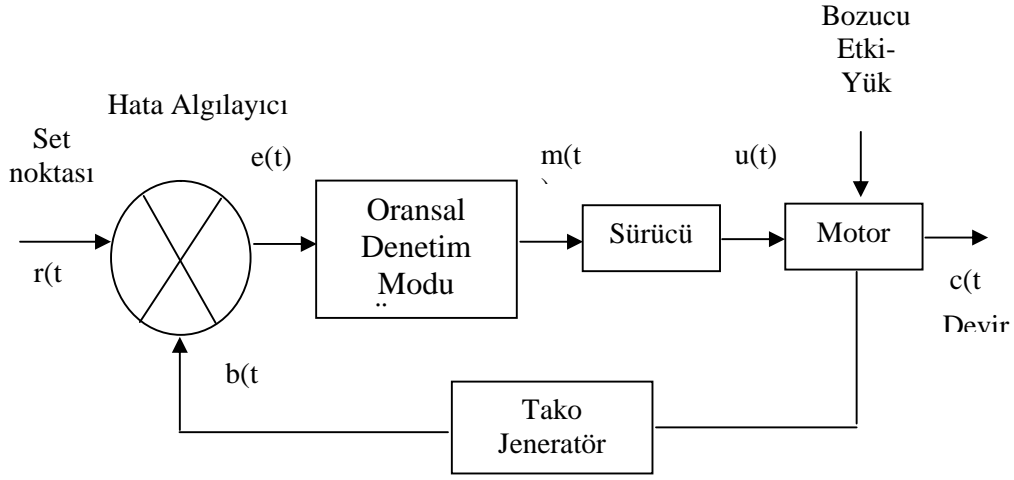
Devrede $R_7 = R_6$ ve $K_p = \frac{R_7}{R_5}$ olduğundan dolayı aşağıdaki formül türetilebilir.

$$V_p = -[K_p e + V_o]$$

Tersleyici katı aslında faz çeviren yükselticidir ve kazancı 1'dir. Bu nedenle U3 opampı (-) girişine gelen gerilimi ters çevirir. Böylece aşağıdaki sonuç eşitliği elde edilir.

$$V_p = K_p e + V_o$$

Yukarıdaki eşitlik opamplarla yapılmış oransal kontrolör çıkış eşitliğidir. V_o dengeleme gerilim değeridir ve oransal denetimi başlatır. Hata sinyaline göre bu gerilim etrafında denetim hareketi gerçekleşir.



Şekil 1.9: Motor devir sayısının oransal denetimi

Şekil 1.8'deki oransal kontrolörde örnek olarak verilen dc motor devir sayısı denetimi ile ilgili sistem Şekil 1.9'da blok şema olarak görülmektedir. Sistemde doğru akım motorunun devri endüvisine uygulanan doğru gerilim değeri ile orantılıdır. Devir sayısı tako jeneratör tarafından ölçülerek devir karşılığı olan elektrik sinyali kontrolöre gitmektedir. Kontrolör olarak işlemsel yükselteçler daha önce anlatıldığı gibi bu tür bir sistemde kullanılabilir. İşlemsel yükseltecin pozitif girişine set değeri, negatif girişine ise geri besleme devresi olan tako-jeneratörden alınan gerilim uygulanır. İşlemsel yükselteç bu iki girişin farkını güçlendirip dengeleme gerilimi ile toplayarak sürücü devresine gönderir. Motor, endüvisine uygulanan gerilime göre belirli bir devirde döner.

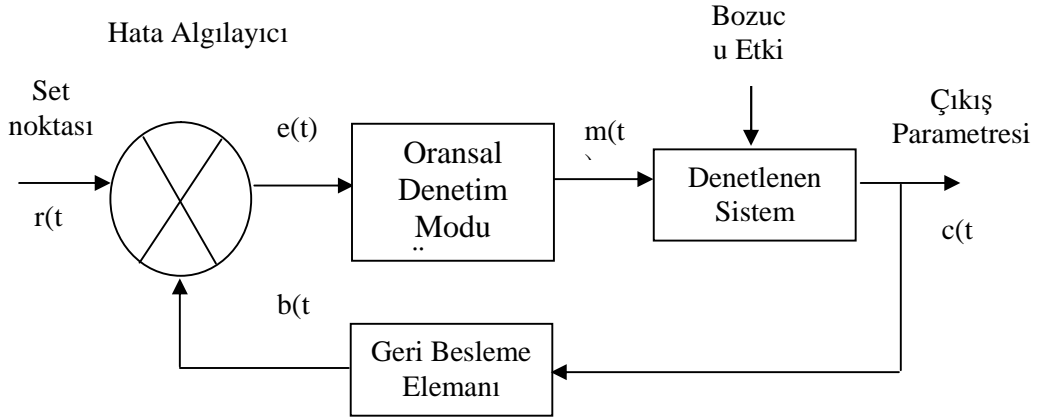
Sistemde motorun devrini düşürücü bir etki geldiğinde tako jeneratörde üretilen gerilim, düşen devirle orantılı olarak azalacaktır. İşlemsel yükseltecin negatif girişine gelen gerilim azalınca, set değeri ile aralarındaki fark artacak ve sürücü devresi üzerinden motora uygulanan gerilimin değeri yükselecektir. Gerilimdeki bu yükselme azalan devrin set değerine tekrar gelmesini sağlayacaktır.

Sistemde motorun devrini yükselten bir etki geldiğinde tako jeneratörde üretilen gerilim yükselen devirle orantılı olarak artacaktır. İşlemsel yükseltecin negatif girişine gelen gerilim artınca, set değeri ile aralarındaki fark küçülecek ve sürücü devresi üzerinden motora uygulanan gerilimin değeri düşecektir. Gerilimdeki bu azalma yükselen devrin set değerine tekrar gelmesini sağlayacaktır.

Bu tip denetim sisteminde de daha önce anlatıldığı gibi bozucu bir etki geldiğinde sistem set değerinin altında ve üstünde sürekli salınım oluşturur. Sistem durağan iken kalıcı durum hatası oluşurken bozucu etki geldiğinde salınım yapar. Salınım aralığında oransal band meydana gelir. Oransal band yüzdeliği aşağıdaki formülle bulunabilir.

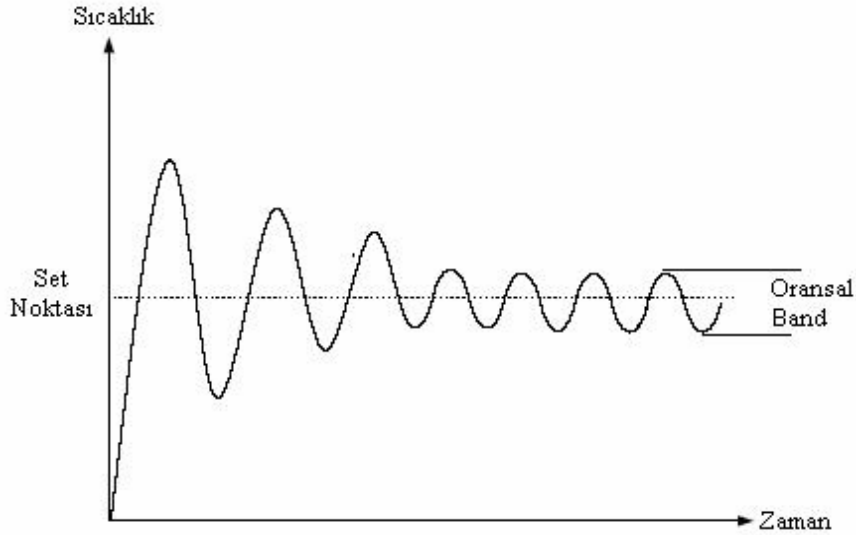
$$PB = \frac{2x(\text{Ofset farkı})}{\text{Set Değeri}}$$

Örneğin 1000 devir/dakikada sabit tutulmak istenen devir 990 ile 1010 d/d arasında değişiyorsa burada oransal band $20/1000 = \%2$ 'dir. Set değeri 1000 ise $\%2$ 'lik bir oransal band 990 ile 1010 devir arasını gösterir.



Şekil 1.10: Oransal denetim modlu kapalı çevrim

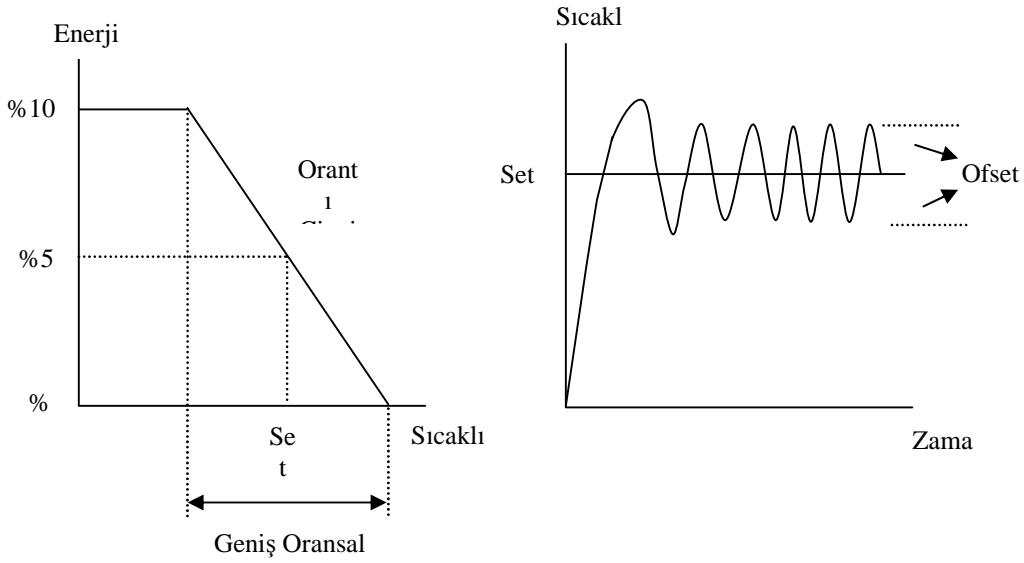
Şekil 1.10'daki blok şema üzerinden oransal sıcaklık denetiminin çalışmasını incelemek konunun anlaşılması adına iyi bir referans olacaktır. Geri besleme elemanından gelen sinyal kontrolörün negatif girişine uygulanır. Set noktasına ait geri besleme gerilimi ile kıyaslama sonucunda Şekil 1.11'deki çıkış grafiği elde edilir. Grafikteki osilasyon eğilimi yüksek oransal kazanç işaret etmektedir.



Şekil 1.11: Oransal sıcaklık denetimi çıkış tepki eğrisi

Başlangıçta oransal kazanç değeri yüksektir, sistemde çıkış parametresi olan sıcaklık değeri set değerinin üstüne bir miktar çıkar, geri besleme ile bu yükseliş azaltılmaya çalışılır. Geri beslemenin etkisi ile sistem sıcaklığı set değerinin altına iner. Sistemde tekrar

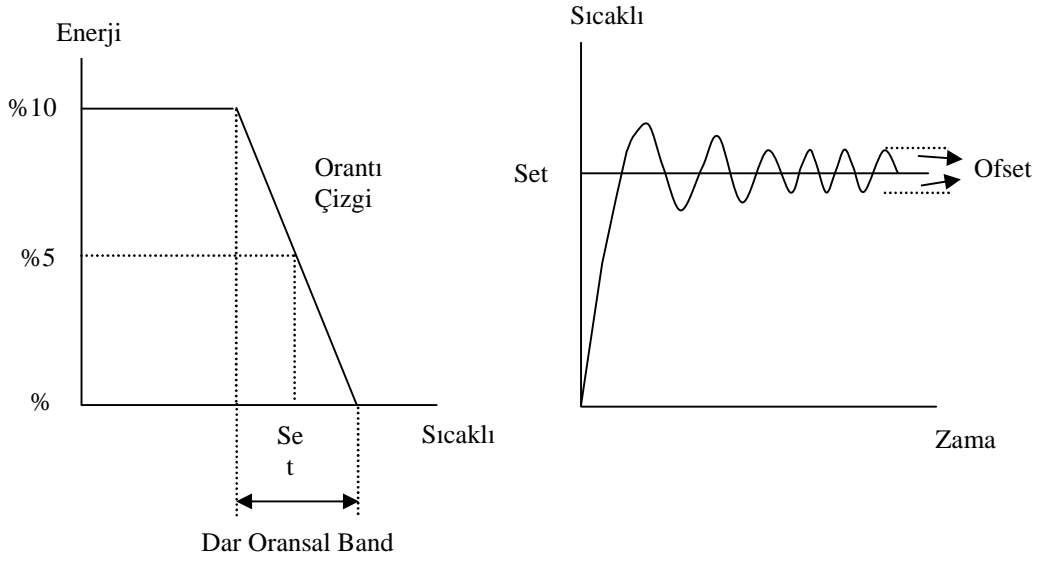
yükseltme isteği oluşur, çıkış parametresi tekrar yükselir ancak set değerini bir önceki duruma göre daha az geçer. Sistem bu şekilde oransal band içerisinde salınma girerek çalışmasını sürdürür. Oransal band oluşumu, yüksek oransal kazanç değerli oransal denetim sisteminin karakteristik bir özelliğidir. Elektrik enerjisi kullanılarak ısıtma yapılan bir proseste, oransal kontrolör ısıtıcının elektrik enerjisini prosesin ihtiyacı kadar verir. Bu sistemde enerjinin % 0 'dan % 100'e kadar ayarlanabileceği oransal kontrol yapılabilen sıcaklık aralığına oransal band denilmektedir. Genel olarak oransal band, cihazın tam skala değerinin bir yüzdeliği olarak tanımlanır ve set değeri etrafında eşit olarak yayılır. Örneğin 1000 C° 'lik skalası olan bir kontrolörde % 5'lik band $1000 * 0,05 = 50\text{ C}^{\circ}$ 'lik bir sıcaklık aralığı demektir. Bu 50 C° 'lik aralığın yarısı set değerinin altında, yarısı da set değerinin üstündedir. Yani 975 ile 1025 C° aralığını ifade eder. Oransal band %2'ye düşürüldüğünde değişim aralığı $1000 * 0,02 = 20\text{ C}^{\circ}$ olacak ve 10 derece set değerinin altında 10 derece de üstünde yer alacaktır. Değişik proseslerde ve değişik şartlarda duruma en uygun oransal band seçilir. Şekil 1.12 ve 1.13'teki eğrilerde geniş ve dar oransal bandlar sonucunda sistem tepkileri görülmektedir.



Şekil 1.12: Geniş oransal band durumunda sistem çıkışı

Geniş seçilmiş bir bandda enerji değişim miktarı küçük, dar seçilmiş bandda ise enerji değişim miktarı büyüktür. Oransal band daraltıldıkça enerji değişim miktarı artar. Oransal band sıfırlanırsa denetim modu üretici aç – kapa denetimi gerçekleştirir.

Set değeri ile sistem çıkışı arasındaki periyodik farka ofset farkı denir. Ofset farkını azaltmak için oransal bandı dar tutmak gerekir. Ancak daraltma işlemi sistemin aç-kapa moduna girmesi engellenmelidir.

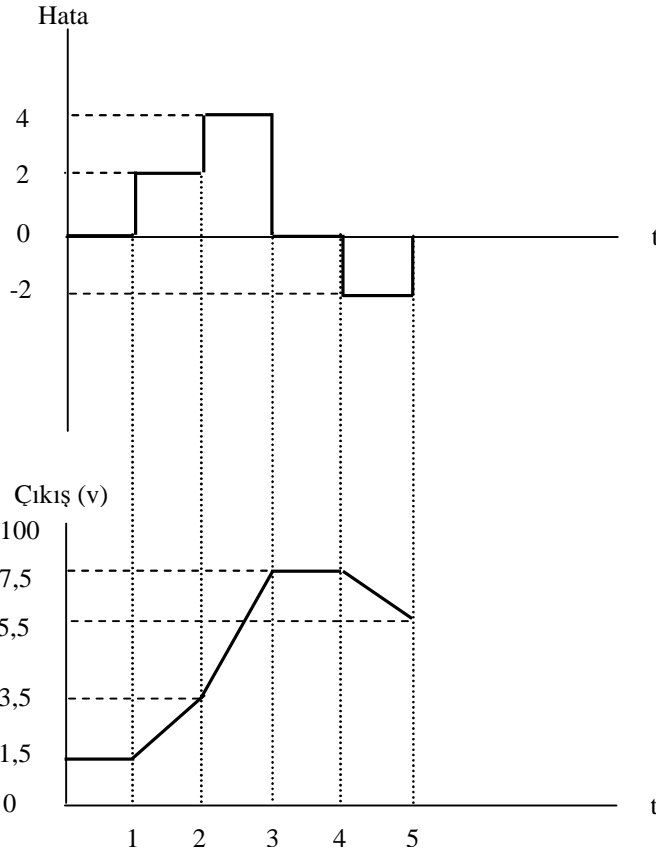


Şekil 1.13: Dar oransal band durumunda sistem çıkış tepkisi

Şekil 1.12 ve 1.13'teki grafiklerde oransal kazanç değeri orantı çizgisinin eğimi olarak düşünülebilir. Şekil 1.12'de geniş oransal bandda eğim düşük, oransal kazanç düşük ve oransal band değeri yüksektir. Şekil 1.13'teki dar oransal bandın ise eğimi daha yüksek, oransal kazanç yüksek ve oransal band değeri düşüktür. Eğer orantı çizgisi en dik durumuna getirilecek olursa oransal band sıfır, orantı kazancı ise sonsuz olur. Bu durumda denetim organı aç-kapa denetim etkisi ile çalışır. Gerçekte aç-kapa biçiminde tasarlanan bir denetim organı kazancı çok yüksek olan bir orantı etkisi gösterir. Diğer taraftan oransal bandı sonsuz derecede artırılacak olursa (orantı kazancının sifıra yaklaşması) orantı çizgisi herhangi bir yerde yatay konum alır ve denetim etkisi tamamen ortadan kalkar. Pratik olarak bu durumda örneğin, bir valf elemanı hangi açıklık veya kapalılık durumunda kalmış ise hata sinyalindeki değişime rağmen yine o durumda kalacaktır. Bu durum kalıcı durum etkisidir. Sistem için daha önce belirtildiği gibi olumsuz bir durumdur.

1.2. Oransal-İntegral (PI) Denetim Yöntemi

PI denetime başlamadan önce integral denetim yönteminden bahsetmekte fayda vardır. İntegral denetim yöntemi kontrolör çıkışını hata sinyalinin integrali ile orantılı olarak değiştirir. Hata olduğu sürece çıkışta bir değişim meydana getirir. Şekil 1.14 hata sinyali ile kontrolör çıkışı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 1.14: İntegral sinyalinin hataya göre değişimi

Şekil 1.14'te kontrolör çıkışı değişim hızının hata sinyali ile orantılı olduğu görülmektedir. Sabit hata integral çıkışında bir değişim oluşturmaktadır. Bu değişimin hızı da hata gerilimine bağlıdır. İntegral denetim yöntemi çoğu zaman oransal denetimle birlikte kullanılır. Oransal denetim tarafından üretilen çıkış değişimini karşılamak için belirli bir hız gereklidir. Bu hıza "integral etki hızı" (I) adı verilir. Aşağıda integral denetim yönteminin eşitlikleri 180 derece faz farkı olmadığı var sayılarak aşağıda verilmiştir.

İntegral etkisi çıkış gerilimi;

$$v=I \int_0^t edt$$

Transfer fonksiyonu;

$$\frac{V}{E} = \frac{I}{s}$$

formülü ile tanımlanır.

Örnek:

Şekil 1.14'teki eğrilerin eşitliğini aşağıda verilen integral etki hızı(I), hata(e) ve v_0 değerlerine göre bulunuz.

$$I=1 \text{ s}^{-1} \quad v_0=1,5 \quad t=0$$

$$\text{a) } e=0, \quad 0 \leq t \leq 1 \text{ s} \quad \text{b) } e=2, \quad 1 \leq t \leq 2 \text{ s} \quad \text{c) } e=4, \quad 2 \leq t \leq 3 \text{ s}$$

$$\text{d) } e=0, \quad 3 \leq t \leq 4 \text{ s} \quad \text{e) } e=-2, \quad 4 \leq t \leq 5 \text{ s}$$

$$\text{a) } e=0, \quad 0 \leq t \leq 1 \text{ s} \quad v(0)=1,5 \text{ için;}$$

$$v(t)=I \int_0^t edt + v(0) = (1) \int_0^t 0dt + 1,5 = 0 + 1,5$$

$$v(t)=1,5$$

$$\text{b) } e=2, \quad 1 \leq t \leq 2 \text{ s} \quad v(1)=1,5 \text{ için;}$$

$$v(t)=I \int_1^t edt + v(1) = (1) \int_1^t 2dt + 1,5 =$$

$$2x \int_1^t 1 + 1,5 = 2(t-1) + 1,5$$

$$2t - 0,5 = (2)(2) - 0,5 = 3,5$$

$$\text{c) } e=4, \quad 2 \leq t \leq 3 \text{ s} \quad v(2)=3,5 \text{ için;}$$

$$v(t)=I \int_2^t edt + v(2) = (1) \int_2^t 4dt + 3,5 =$$

$$v(t)=4t - 4,5$$

$$v(3)=(4)(3) - 4,5 = 7,5$$

$$\text{d) } e=0, \quad 3 \leq t \leq 4 \text{ s} \quad v(3)=7,5 \text{ için;}$$

$$v(t)=7,5$$

$$v(4)=7,5$$

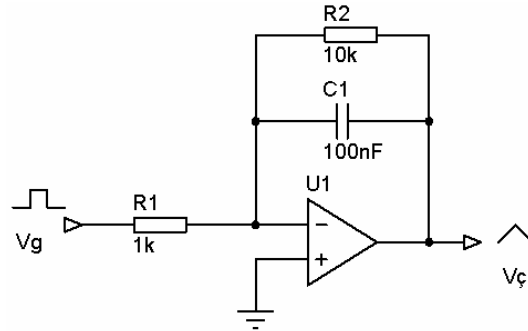
$$\text{e) } e=-2, \quad 4 \leq t \leq 5 \text{ s} \quad v(4)=7,5 \text{ için;}$$

$$v(t)=I \int_4^t edt + v(4) = (1) \int_4^t -2dt + 7,5 =$$

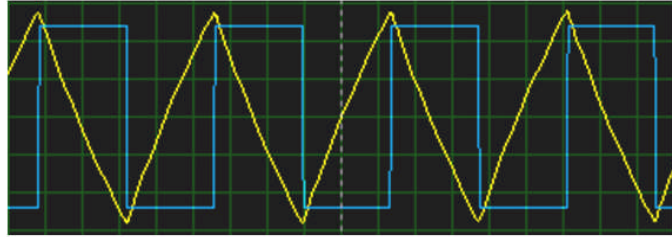
$$v(t)=-2t + 15,5$$

$$v(5)=(-2)5 + 15,5 = 5,5 \text{ bulunur.}$$

Şekil 1.15'de pratik olarak kullanılabilen bir integral alıcı devresi ve Şekil 1.16'da ise bu devreye ait giriş çıkış osiloskop animasyon görüntüleri görülmektedir.



Şekil 1.15: İntegral alıcı devre



Şekil 1.16: İntegral alıcı devre giriş çıkış dalga şekilleri

Şekil 1.15'te görülen integral alıcı devrenin integral etki hızı;

$$I = \frac{1}{R_1 C_1}$$

formülü ile bulunur. R_1 ve C_1 değerleri yerlerine konursa devrenin integral etki hızı 10000 s^{-1} bulunur. Çıkış gerilim değeri de aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$V_{\text{ç}}(t) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t V_g(t) dt$$

Formüldeki “-“ işareti integral alıcının çıkışının girişine göre 180 derece faz farklı olduğu anlamına gelir. Diğer bir ifadeyle integral alıcı devre girişin integralini alır ve sonucu ters çevirerek çıkışa aktarır. Çünkü giriş sinyali opampın “-“ girişine uygulanmaktadır. “ V_g ” ise girişten uygulanan kare dalganın tepe değeridir.

Devredeki giriş ofset geriliminin çıkışı doyuma götürmemesi için R_2 kazanç sınırlayıcı direnç kullanılır. Bu direncin etkisiyle devrenin bir kesim frekansı vardır. Kesim frekansı (F_c) aşağıdaki formülle hesaplanır.

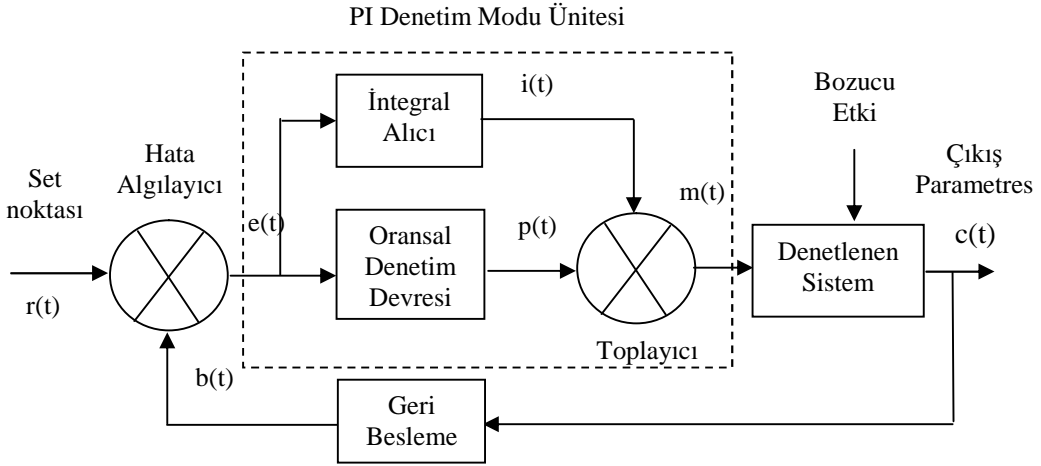
$$F_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$

Devre elemanları değerlerini yerlerine koyarsak kesim frekansı 159 Hz bulunur. Devrenin integral alıcı olarak çalışabilmesi için;

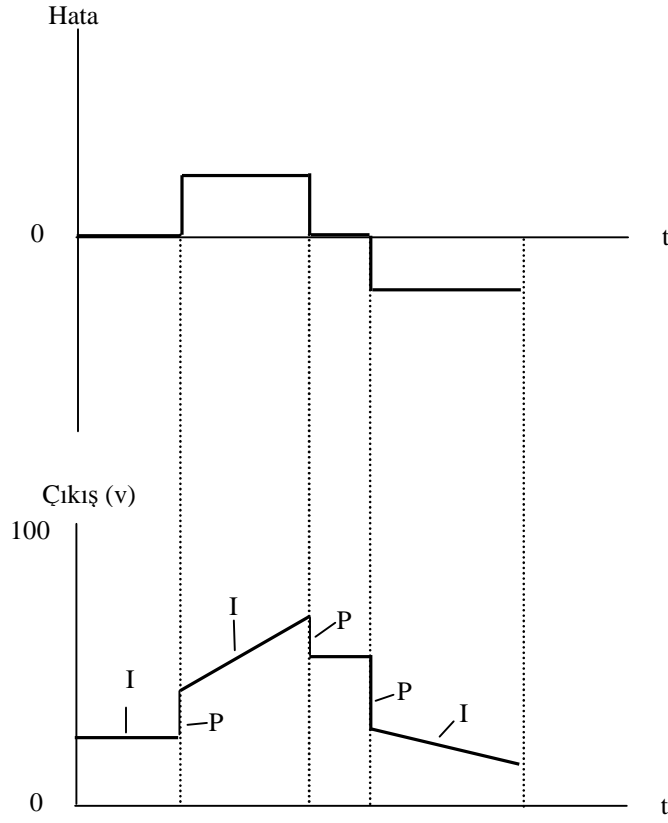
$$F_g \geq F_c$$

şartı sağlanmalıdır. Buna göre girişten en az 159Hz'lik bir değişim hızı uygulanması gereklidir. Kesim frekansının altında sinyal uygulanırsa integral sinyalinde bozulmalar meydana gelir. Şekil 1.15'teki devrede çıkıştaki üçgen dalga, sinyal kare dalgaya doğru bir geçiş yapmaya başlar. Aynı zamanda giriş frekansı da I integral etki hızına yakın bir değerde olmalıdır.

İntegral denetleyicinin tek başına sisteme olan etkisine kısa açıklamalarla ve bir örnekle değindikten sonra çoğu sistemde oransal denetim ile başarılabilen denetim derecesinin kabul edilebilir seviyelerde olmadığını belirtmekte fayda vardır. Özellikle birçok sistemde kalıcı durum hatası ya da oransal ofset kabul edilemez. Bu nedenle oransal denetimin en büyük dezavantajı olan kalıcı durum hatasının ortadan kaldırılması ve çıkışta oluşan zayıf denetim sinyallerinin yükseltilmesi gereklidir. İntegral alma yaklaşımı ile kalıcı durum hatası giderilebilir. İntegral etkisi oransal ofseti ortadan kaldıran bir otomatik resetleme sağlar. Bunun yanı sıra yükseltme değeri arttıkça hata da buna bağlı olarak azalacaktır. Bu bağlamda, hata sinyali çok uzun süre ısrarla devam ederse kademeli olarak denetleyici çıkışı yükseltilmelidir. Hata sinyalinin integrali alınıp denetleyici çıkışına integral değeri eklenmelidir. Bu yapılan işlemlerle oransal-integral (PI) denetim elde edilir. Aşağıda PI denetleyicinin blok şeması görülmektedir.



Şekil 1.17: Oransal integral denetim modlu kapalı çevrim denetimi



Şekil 1.18: PI çıkışının hataya göre değişimi

Şekil 1.18'de PI yönteminin basamak cevabı diğer bir ifadeyle giriş çıkış karakteristiği görülmektedir. PI denetleyicide oransal yöntem hata sinyali ile orantılı bir kontrolör çıkış değişimi sağlarken integral yöntemi de hata sinyalinin integrali ile orantılı bir ilave çıkış değişimi gerçekleştirir.

Şekil 1.2'deki sıvı seviye denetim sistemine bir de I etkisi eklenince gerçekleşen olayları anlatmak konunun daha iyi anlaşılmasına yardımcı olabilir. Şekil 1.2'de oransal yöntem kaldırmaç tarafından sağlanmaktadır. Oransal kazanç da a ve b uzunlukları tarafından belirlenir. Daha ayrıntılı olarak oransal kazanç $10 a/b$ 'dir. Integral yöntemin etkisi kaldırmaç en solu ile valf tıpasının arasındaki ipin boyunu değiştirerek gerçekleşmektedir. Bu bağlantının hızı hata sinyali ile orantılı olarak değiştirilir. İntegral etkisi valf tıpasının durumunu değiştirir.

Şekil 1.4, 5 ve 6'daki grafikler incelenirse, yük çizgilerinin farklı eğimlerde olduğu görülür. İntegral yöntemi yük çizgisinin eğimini değiştirmeden düşey yönde yükseltir ya da alçaltır. Çıkıştaki değişikliğe hızlı tepki vermek için yük çizgisini yükselterek ya da alçaltarak yük doğrusunu otomatik olarak ayarlar.

Diğer taraftan integral yönteminin bir problemi denetlenen değişkenin osilasyon eğilimini artırmasıdır. Oransal denetleyicinin kazancı integral yöntemiyle birleştirildiğinde azaltılmalıdır. Bu kontrolörün hızlı yük değişimlerine olan tepki yeteneğini azaltır. Denetlenen sistem büyük ölü zaman* gecikmesine sahipse hata sinyali sistemdeki gerçek hatayı hızlı bir şekilde yansıtamayacaktır. Bu gecikme sık sık integral alıcının aşırı düzeltme yapmasıyla sonuçlanır. Bunun anlamı, hata gerçekten sıfır olduktan sonra integral alıcı kontrolör çıkışını değiştirmeye devam eder, çünkü integral denetimi eski sinyal üzerine etki etmektedir.

PI yöntemi, oransal yöntemin ofset değerini kabul edilebilir bir seviyeye tek başına düşüremediği proseslerde kullanılır. İntegral yöntemi ofset değerini yok eden bir reset hareketi sağlar. PI denetim yöntemi eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

$$v = Pe + I \int_0^t e dt + v_0$$

Transfer fonksiyonu;

$$\frac{V}{E} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

$$\frac{V}{E} = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

PI, PD ve PID denetim yöntemleri için gereken transfer fonksiyonları laplas dönüşümleri ile zaman tabanından “s” tabanına çevrilerek bulunur. S tabanı laplas tabanıdır. İleri düzeyde denetim hesaplamalarını kolaylaştıran bir matematik uygulamasıdır. Burada laplas ile ilgili ayrıntılı dönüşümler verilmemiş, doğrudan sonuçlar gösterilmiştir. Transfer fonksiyonunda P yerine K_p , I yerine de K_i kullanılmıştır. K_i integral etki kazancı olarak bilinir. Genellikle literatürde I yerine K_i parametresi kullanılır.

K_i integral etki kazancı T_i integral zaman sabitine bağlıdır. $K_i = 1/T_i$ olarak bilinir. Denetim organına bir integral alıcı ilavesi hata sıfır olana kadar değişimi sürdüren bir denetim etkisi sağlamaktadır. İntegral etkili deneticileri tanımlamak için otomatik yeniden ayar (reset) deyimi kullanılır. İntegral etki zamanı T_i bazen yeniden ayar (reset time) zamanı olarak da bilinir. Aşağıdaki formüle göre reset zamanı bulunabilir.

$$T_i = RC$$

İntegral denetleyicinin çıkış denetim parametresi olan $i(t)$ aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

PI denetiminin eşitlikleri ve transfer fonksiyonu zaman tabanında aşağıdaki gibi yazılırlar.

$$i(t)=K_i \int_0^t e(t)d(t)$$

$$p(t)=K_p e(t)$$

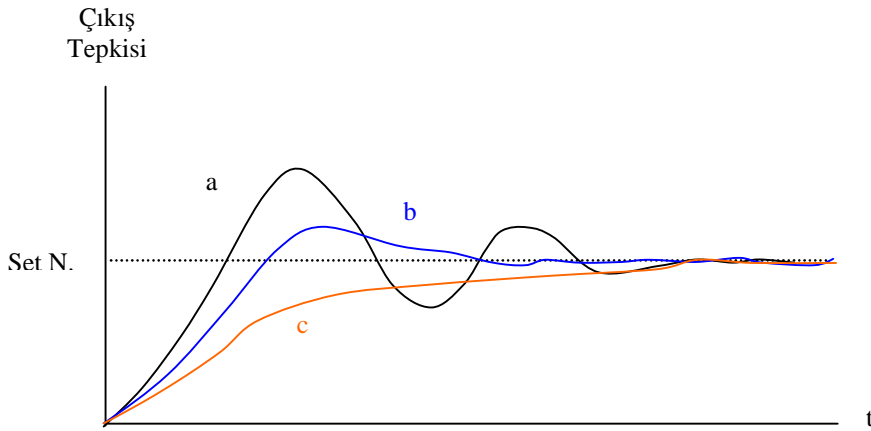
$$m(t)=K_p e(t)+K_i \int_0^t e(t)d(t) + v_o$$

eşitlikleri yazılabilir. Transfer fonksiyonu daha önce belirtildiği gibi;

$$TF = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

ile tanımlanır.

Şekil 1.19’da çeşitli integral etki hızları için, PI sistemin basamak giriş cevabı eğrileri diğer bir değişle çıkış tepki eğrileri görülmektedir. İntegral etkinin kalıcı durum hatasını ortadan kaldıracı etkisi eğrilerden gayet açık bir biçimde görülmektedir. Ama ihmal edilebilecek çok küçük bir dalgalanma yine oluşmaktadır. ‘c’ eğrisinde integral zaman sabiti en yüksek değerde olup hatanın sıfırlama işlemi çok uzun zaman almaktadır. Buna karşılık ‘a’ eğrisinde integral zaman sabiti en düşük değerde olup cevabın olması gerektiği değere ilk defa ulaşması çok kısa zamanda olmakta ancak eğri biraz salınım yapmaktadır. Hem az salınımlılık ve hem de hızlı cevap açısından en iyi durumun ‘b’ eğrisi ile olduğu görülmektedir.

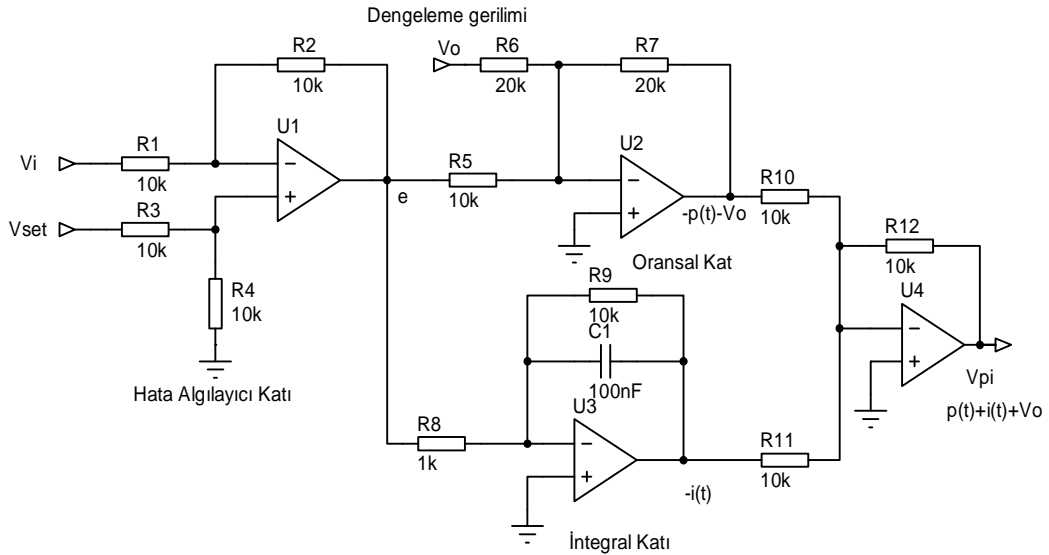


Şekil 1.19: Oransal integral denetim modu çıkış tepkisi

Şekil 1.19’da görüldüğü gibi integral alıcı devre aynı zamanda çıkış büyüklüğünde meydana gelen salınımlara da etki eder. Sistemde meydana gelen değişimleri hissedip o değişimi ortadan kaldıracı bir etki yaratır. Sistem değişkeninin ölçülen değeri ile set değeri

arasındaki fark sinyalinin zamana göre integrali alınır. Bu integral değeri, yükseltilmiş fark değeri ile toplanır ve oransal band kaydırılır. Bu şekilde sisteme verilen enerji otomatik olarak artırılır veya azaltılır. Sonuç olarak denetlenen değişken tam set değerine oturtulur. İntegral devresinin çalışması, sistemin set değeri ile ölçülen değeri arasında fark kalmayınca kadar devam eder. Çıkış değişkeni set değerine oturduğunda integral devresinin integralini alacağı bir sinyal kalmaz. Çıkış değişkeni üzerindeki değişimlerde yine integral devresi düzenleyici etkisini gösterecektir.

PI denetimin en belirgin sakıncası sistemin ilk başlamasında denetlenen değişken set değerini geçmesidir. Bu ilk salınımdaki yükselmeye üst aşım (overshoot) ve set değerinin altına düştüğü en düşük alçalmaya ise alt aşım (undershoot) denir. Sistemde meydana gelen bu türden ani darbelere engel olunamaz.



Şekil 1.20: PI kontrolör devresi

Şekil 1.20’de opamplarla gerçekleştirilmiş örnek bir PI denetleyici devresi görülmektedir. U1 hata yükseltici, U2 oransal denetleyici, U3 integral denetleyici ve U4’te toplayıcı olarak çalışmaktadır.

Şekildeki devrede U2, U3 ve U4 opampları girişleri terslerler. Bu durum da dikkate alındığında aşağıdaki eşitlikler devre için yazılabilir.

$$i(t) = -K_i \int_0^t e(t) dt$$

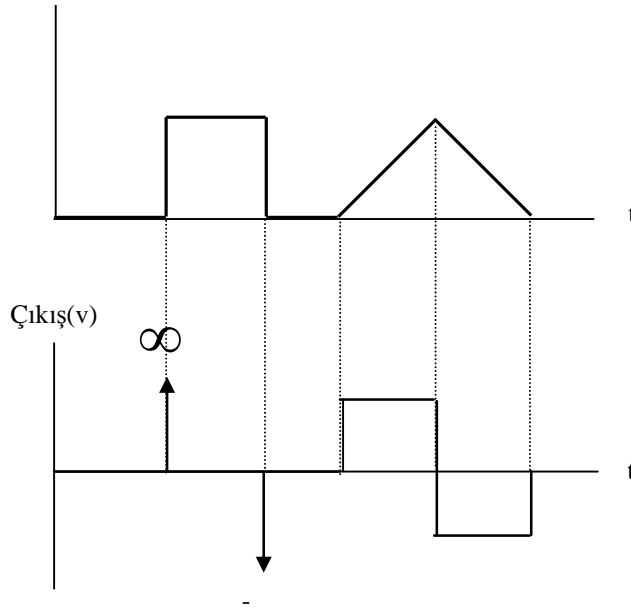
$$p(t) = -K_p e(t) - V_o$$

$$m(t) = -(-K_p e(t) - K_i \int_0^t e(t) dt - V_o)$$

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + V_o \text{ elde edilir.}$$

1.3. Oransal-Türevsel (PD) Denetim Yöntemi

Türev denetim yöntemi hata sinyalinin değişim hızıyla orantılı olarak kontrolör çıkışını değiştirir. Bu değişim set noktası, ölçülen değişken ya da her ikisinin birden gerçekleştiği bir değişim nedeniyle olur. Türev denetimi hatanın ne kadarlık bir hızla değiştiğini gözleyerek bu hatayı sezinlemeye çalışır. Beklenen bir hatayı azaltmak için ve bir denetim hareketi üretmek için değişim hızını kullanır. Türev yöntemi sadece hata değiştiğinde kontrolör çıkışına katkıda bulunur. Bu sebeple bu yöntem her zaman oransal yöntemle ve bazen de bunlara ilave olarak integral yöntemiyle beraber kullanılır. Türev denetim yöntemi tek başına asla kullanılamaz. Şekil 1.21’de ideal türev denetim yönteminin basamak cevabı verilmiştir.



Şekil 1.21: İdeal türev alıcı basamak tepki cevabı

Tüm zaman dilimlerinde türev değeri hata sinyalinin değişim hızıyla ya da diğer bir ifadeyle hata sinyalinin eğimiyle elde edilir. Basamak cevabı ideal türev denetim yönteminin pratik kontrolörlerde kullanılamayacağını göstermektedir. 90 derecelik bir hata değişimi ortaya çıktığında sonsuz bir çıkış eğimi oluşur. İdeal türev yöntemi, kontrolör

çıkışına sonsuz bir değişimle tepki vermek zorundadır. Pratik kontrolörlerde, hızlı değişen sinyallere olan türev etkisi sınırlandırılır. Bu pratikte sık sık oluşan istenmeyen gürültü sinyallerine olan denetleyici hassasiyetini büyük ölçüde azaltır. İdeal türev yönteminin eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

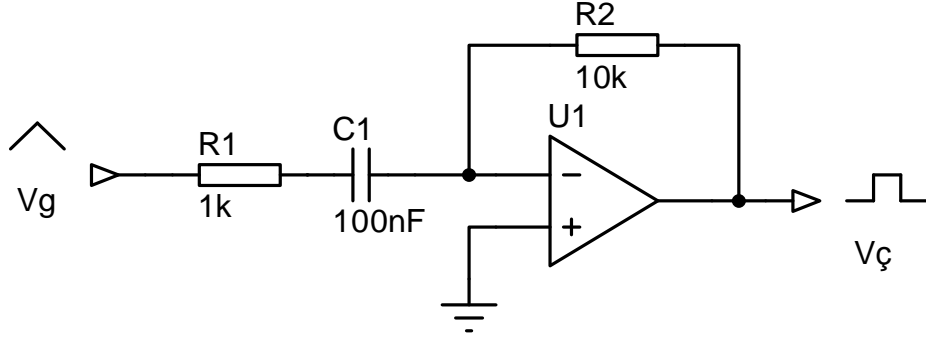
$$v=D \frac{de}{dt}$$

Transfer fonksiyonu ise

$$\frac{V}{E}=Ds$$

formülü ile ifade edilir.

Şekil 1.22’de pratik olarak kullanılabilen bir türev alıcı devre görülmektedir.



Şekil 1.22: Türev alıcı devre

Şekil 1.22’deki türev alıcı devrede türev alma işleminin gerçekleşmesi için girişten uygulanan sinyalin frekansının devrenin kesim frekansından küçük olması gereklidir. Devrede kesim frekansı aşağıdaki formül ile bulunur.

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

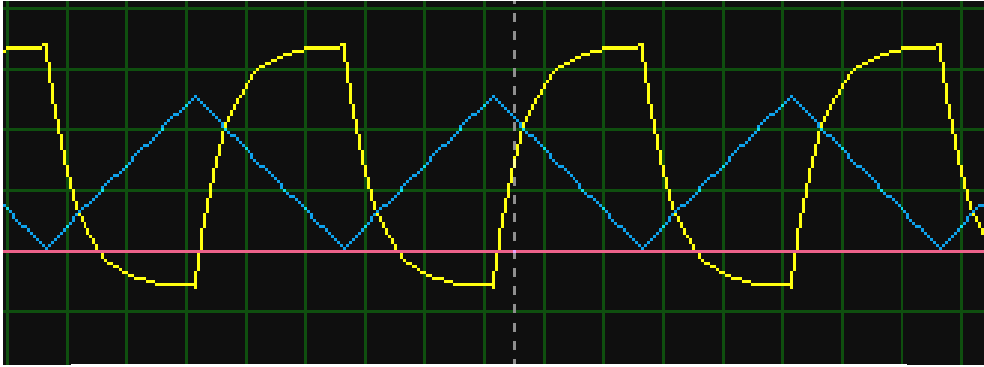
R_1 ve C_1 değerlerini formülde yerlerine koyarsak kesim frekansını 1,59 kHz buluruz. Bu devre 1,59 kHz’den düşük frekanslı sinyallerin türevini alabilir. Devrede bir diğer önemli parametre türev etki zamanıdır. Bu türev denetleyici de “D” ile ya da “Kd” ile gösterilir. Türev etki zamanı aşağıdaki formülle bulunur.

$$D=R_2 C_1$$

Devre elemanlarının değerleri yerlerine konduğu zaman türev etki zamanı 1 ms bulunur. Türev alma işleminin sağlanmasının ikinci şartı ise girişten uygulanan sinyalin periyodunun türev zamanına yakın olmasıdır. Çıkış gerilimi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$V_{\zeta}(t) = -R_2 C_1 \frac{dV_g(t)}{dt}$$

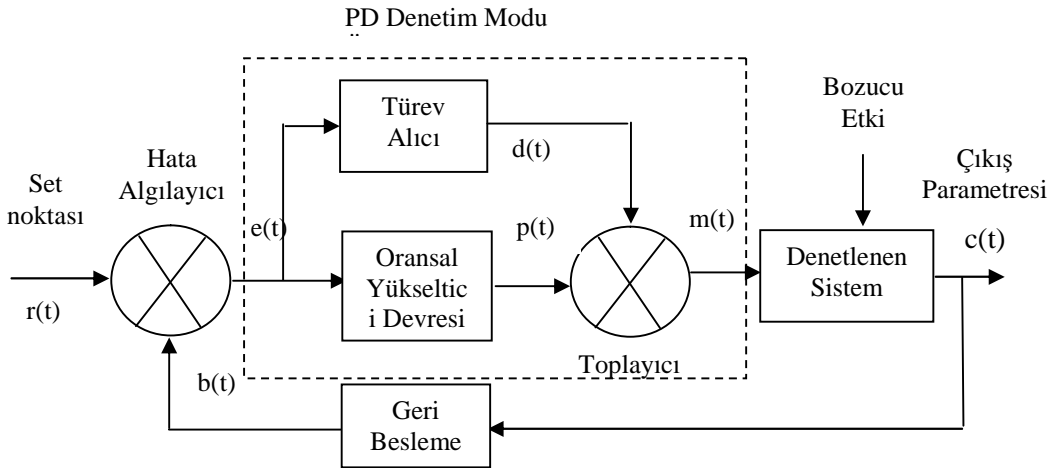
Devrede R_1 direnci kazancı sınırlandırmak için kullanılmıştır. Şekil 1.23’de türev alıcı devrenin örnek giriş çıkış osiloskop animasyon görüntüleri görülmektedir.



Şekil 1.23: Türev alıcı devre giriş çıkış sinyal şekilleri

Şekil 1.23’te üçgen dalganın azalan kenarında kare dalga sinyal pozitif değer alırken artan kenarında eğim pozitif olmasına rağmen negatif değer almıştır. Devre üçgen dalganın türevini 180 derece faz farklı olarak almaktadır.

Şekil 1.24’te PD kontrolör blok şeması görülmektedir.



Şekil 1.24: Oransal türevsel denetim modlu kapalı çevrim denetimi

PD denetimde set değeri ile ölçülen değer arasındaki fark sinyalinin türevi alınır. Hata sinyali oransal denetleyiciden geçer ve toplayıcı devresinde türev sinyali, oransal sinyal ve

dengeleme gerilimi (V_o) toplanır. Bu şekilde dengeleme gerilimi taban alınarak düzeltme yapılmış olur. Ancak türevsel etkinin asıl fonksiyonu üst aşım (overshoot) ve alt aşım (undershoot) değerlerini azaltmak içindir. Üst aşım ve alt aşım değerlerini azaltırken bir miktar da olsa sapma kalabilmektedir.

Türev yöntemi oransal yöntemle birleştiğinde daha yüksek oransal kazanç ayarı elde edilebilir ve osilasyonlara olan eğilim azaltılabilir. Türev yöntemi hata sinyalinin gelecekteki değerini sezinler ve buna göre kontrolör çıkışı değiştirir. Bu sezinleyici hareket hızlı yük değişimleri olan proseslerin denetiminde türev yöntemini oldukça kullanışlı hâle getirir. Bu sebeple hızlı yük değişimleri aşırı hatalar meydana getirdiğinde, genellikle türev yöntemi oransal veya oransal-integral denetim yöntemleriyle birlikte kullanılır. Türev yönteminin sağladığı denetim hareketi denetlenen değişkendeki osilasyonları bozarak set değerinden sapan ani değişimlere karşı koyar.

Denetlenen bir proseste hata değişim hızı ne kadar hızlı artarsa üst aşım değeri de o kadar büyük olacaktır. Oransal denetim de integral denetim de böylesi bir değişime karşı tepki veremez. Hata sinyali değişim hızı büyüdükçe türev ünitesi prosesin kabul edilebilir hata seviyelerine yerleşmesini sağlayacaktır. Türevsel etki, düzeltici etkisini hızlı bir şekilde gösterdiği için hızlı değişimlerin olduğu kısa süreli proseslerde kullanılması uygundur. Sürekli tip uzun süreli proseslerde ve sapma istenmeyen durumlarda PI veya PID tip denetim seçilebilir.

Aşağıda pratik PD denetim yönteminin eşitlikleri görülmektedir. Pe terimi oransal yöntem etkisidir. Dde/dt terimi ideal türev yöntemi etkisidir. Oransal-türevsel etki üzerine dengeleme gerilimi (V_o) eklenmiştir.

$$v=Pe+D \frac{de}{dt} +v_0$$

Transfer fonksiyonu ise aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$\frac{V}{E} = \frac{Ps+Ds^2}{s}$$

PD denetiminin eşitlikleri ve transfer fonksiyonu farklı gösterimler olarak zaman tabanında aşağıdaki gibi yazılırlar. Kd türev kazancıdır ve denetim literatüründe türev etki zamanının yerine kullanılır.

$$d(t)=K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$p(t)=K_p e(t)$$

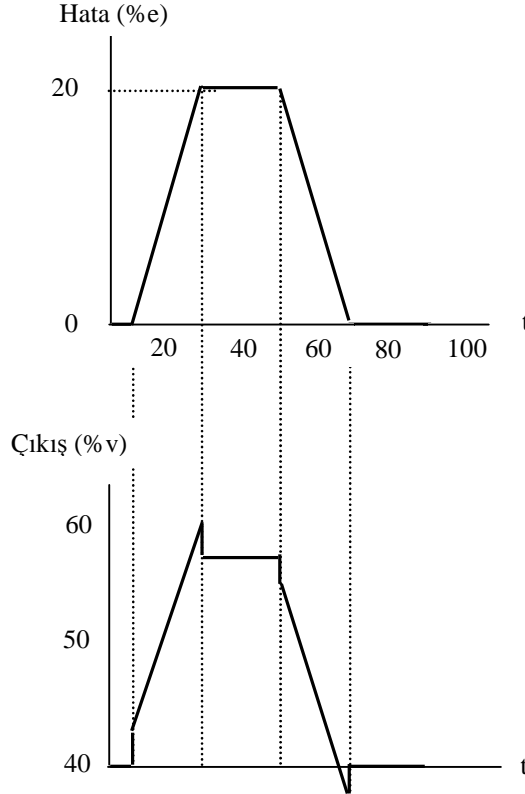
$$m(t)=K_p e(t)+K_d \frac{de(t)}{dt} +V_o$$

eşitlikleri yazılabilir. Transfer fonksiyonu daha önce belirtildiği gibi;

$$TF = \frac{K_p s + K_d s^2}{s}$$

ile tanımlanır.

Örnek:



Şekil 1.25: Örnek Hata-Çıkış Grafiği

Bir PD kontrolör 0,8'lik bir kazanç (P), 1s 'lik türev etki zaman sabitine (D) sahiptir. Başlangıç çıkışı (V_0) % 40'dır. Aşağıda verilen zamanlar için kontrolör çıkış değerlerini belirleyiniz. a) $t=0$ s, b) $t=10^-$ sa. ($t=10$ s den önceki ani değer), c) $t=10^+$ sa. ($t=10$ s 'den sonraki ani değer), d) $t=20$ s, e) $t=40$ s, f) $t=60$ s.

$$v = Pe + D \frac{de}{dt} + v_0 \text{ formülünü kullanalım.}$$

$$v = 0.8e + 1 \frac{de}{dt} + 40$$

$\frac{de}{dt}$ terimi herhangi bir ani zamandaki eğri eğimine eşittir.

a) $t=0$, $e=0$ ve eğim = $\frac{de}{dt}$
 $v=(0.8)(0)+(1)(0)+40=\%40$

b) $t=10^-$, $t=10$ s'den önceki ani değer $e=0$, eğim = 0
 $v=(0.8)(0)+0+40=\%40$

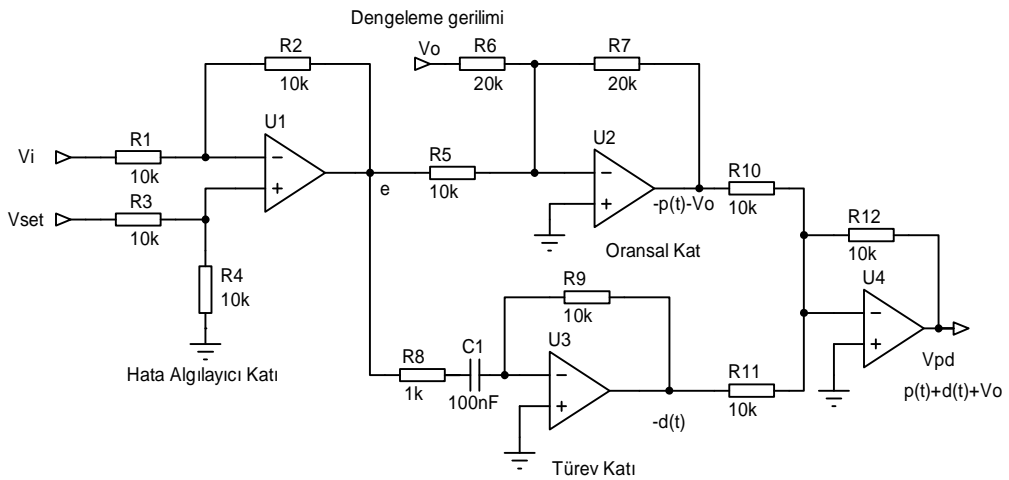
c) $t=10^+$, $t=10$ s'den sonraki ani değer, $e=0$, eğim = $20/20=\%1$
 $v=(0.8)(0)+1+40=\%41$

(t 'deki %40'dan %41'e bir yükselmenin 10 s sürdüğüne dikkat edin. $T=10$ s' de %0.8'lik bir v değerinde basamak değişiminin olduğunu söyleyebiliriz.)

d) $t=20$ sa., $e=\%10$ ve eğim = $20/20=\%1$
 $v=(0.8)(10)+1+40=\%49$

e) $t=40$ sa., $e=\%20$ eğim = 0
 $v=(0.8)(20)+0+40=\%56$

f) $t=60$ sa., $e=\%10$ eğim = $-20/20=-1$
 $v=(0.8)(10)-1+40=\%47$



Şekil 1.26: Örnek PD denetleyici devresi

Şekil 1.26'da opamplarla gerçekleştirilmiş örnek bir PD denetleyici devresi görülmektedir. U1 hata yükseltici, U2 oransal denetleyici, U3 türev denetleyici ve U4'te toplayıcı olarak çalışmaktadır.

Şekildeki devrede U2, U3 ve U4 opampları girişleri terslerler. Bu durum da dikkate alındığında aşağıdaki eşitlikler devre için yazılabilir.

$$d(t) = -K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$p(t) = -K_p e(t) - V_o$$

$$m(t) = -(K_p e(t) - K_d \frac{de(t)}{dt} - V_o)$$

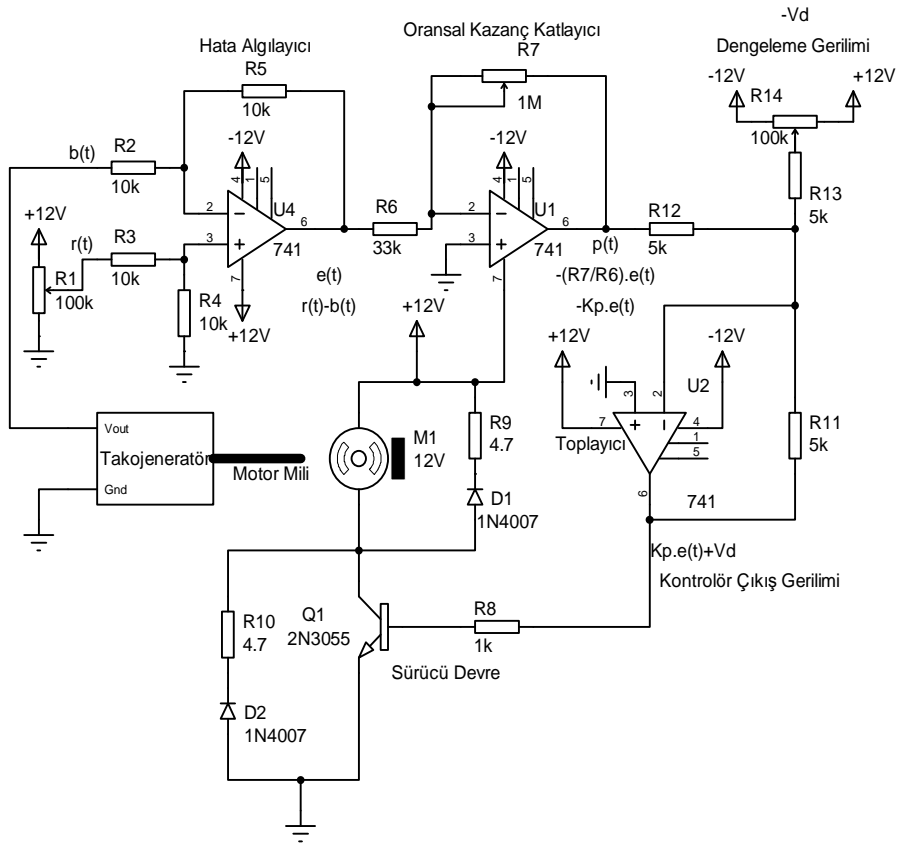
$$m(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + V_o$$

UYGULAMA FAALİYETİ

Aşağıda malzeme listesi ve şeması verilen devreyi çizerek işlem basamaklarını gerçekleştiriniz.

Kullanılan Malzeme Araç ve Gereç:

1. 3 adet 741 Opamp
2. 3 adet 8'li entegre soketi
3. 2N3055 transistör
4. 2x1N4007 diyot
5. 12V PM tipi DC servo motor
6. 4x10k, 3x5k, 1x1k, 2x4,7, 33k dirençler, 100 k, 500 k, ve 1M potansiyometre
7. ± 12 V / 3A simetrik güç kaynağı
8. 1 adet deney boardu
9. Yeterli sayıda zil teli
10. Yan keski ve kargaburun



Şekil 1.27: Öğrenme faaliyeti-1 uygulama devresi

Not: Dc servomotor yerine 12V dc motor kullanmanız durumunda devir sayısını ölçmek için takojeneratör kullanınız. $b(t)$ işareti takojeneratör ya da servo motor geri besleme gerilimini ifade etmektedir. $r(t)$ işareti ise R1 direnci ile ayarlanan set değeri gerilimini ifade etmektedir. İşlem basamaklarında dengeleme gerilimini (Vd) R14 potu ile negatif değerde uygulamayı unutmayınız.

İşlem Basamakları	Öneriler
➤ Şekil 1.27'deki devre için gereken malzemeleri ve araç gereci hazırlayınız.	➤ Özellikle dc gerilim kaynağı en az 2A akım verebilecek kapasitede olması tavsiye edilir.
➤ 741 opamp ve 2N3055 transistörün katalog bilgilerini inceleyiniz.	➤ Özellikle devreye bağlantı şekillerini ve maksimum akım ve gerilim değerlerini kontrol ediniz.
➤ İlk olarak motora 0V'dan başlayarak 12V'a kadar 1'er V farklarla gerilim uygulayınız ve her gerilimdeki motor devir sayısı için takojeneratörün ürettiği gerilim değerlerini tablo hâline getiriniz.	➤ Her gerilim için motor devir sayısını da ölçünüz. ➤ 500 rpm için takojeneratörün ürettiği gerilimi de gerilim kaynağını hassas şekilde ayarlayarak bulunuz.
➤ $p(t)$ sinyalini R12 direncinden ayırınız.	
➤ Devreye enerji veriniz. Motorun 500 rpm'in biraz üzerinde dönmesini sağlayacak dengeleme gerilimini R14 potu ile uygulayınız.	➤ Dengeleme gerilim değerini ve motorun rpm değerini not ediniz.
➤ Motor 500 rpm civarında dönüş yaparken takojeneratörün ürettiği gerilim değerini ölçünüz.	➤ Ölçüm yaptıktan sonra enerjiyi kesiniz.
➤ R1 potansiyometresi ile 3. işlem basamağında 500 rpm için ölçtüğünüz set değeri gerilimini uygulayınız.	
➤ Enerjiyi kesiniz ve takojeneratör çıkışını $b(t)$ girişine uygulayınız.	
➤ $p(t)$ çıkış ucunu R12 direnci ile tekrar birleştiriniz.	
➤ R7 potunu sıfır yaparak K_p kazancının sıfır olmasını sağlayınız.	
➤ Devreye enerji veriniz.	
➤ Motorun devir sayısını ölçünüz.	
➤ Dengeleme gerilimi(Vd) ile yavaş yavaş oynayınız devir sayısındaki değişiklikleri gözleyiniz.	

İşlem Basamakları	Öneriler
➤ Vd gerilimini 500 rpm için tekrar ayarlayınız.	
➤ R7 potu ile oynayarak Kp değerini yavaş yavaş artırınız.	➤ R7 için lineer potansiyometre kullanınız ve Kp değerini 1,2,3 gibi birer birer artırınız.
➤ Devir sayısında değişiklik varsa ölçünüz.	
➤ 500 rpm'den küçük en yakın devir sayısı için ofset farkını diğer bir deyişle kalıcı durum hatasını ölçünüz.	
➤ Kp değerini yukarıdaki devir sayısı için hesaplayınız.	
➤ Motorda yük değişimi meydana getiriniz.	➤ Kısa süreli olarak motor milini elinizle tutarak ya da bir kayış kasnak sistemi ile motorun yüklenmesini ya da milin sürtünmesini artırabilirsiniz.
➤ Motorun yeni devir sayısını ölçünüz.	
➤ Motor milindeki yüklenmeyi kaldırınız. Motor devir sayısının eski hâline gelip gelmediğini gözlemleyiniz.	

ÖLÇME VE DEĞERLENDİRME

Aşağıdaki soruları dikkatlice okuyunuz ve doğru seçeneği işaretleyiniz.

1. Aşağıdaki yöntemlerden hangisinde denetlenen değişken ile son denetim elemanının durumu arasında doğrusal bir ilişki vardır?
A) Aç kapa yöntemi B) Türev yöntemi C) Oransal yöntem D) İntegral yöntemi
2. Oransal denetim yönteminde kazançtaki artış aşağıdakilerden hangisini etkilemez?
A) Set değerini B) Hata değerini
C) Osilasyon genliklerini D) Oransal ofset değerini
3. Denetlenen değişkenin set değerinden sapması ile oluşan hataya ne ad verilir?
A) Ofset hatası B) Çevrim hatası C) Kalıcı durum hatası D) Denetim hatası
4. Kalıcı durum hatasını azaltmak için aşağıdakilerden hangisi yapılabilir?
A) Set değeri artırılır. B) Proses yükü değiştirilir.
C) Kp değeri azaltılır. D) Kp değeri artırılır.
5. Proses denetim sistemin belli bir dış uyarı karşısında belli bir başlangıç değerinden bir sonraki duruma kadar zaman değişimine bağlı olarak gösterdiği davranışa ne ad verilir?
A) Kalıcı durum davranışı B) Geçici durum davranışı
C) Sürekli durum davranışı D) Süreksiz durum davranışı
6. Oransal denetim yönteminde osilasyonların asıl nedeni aşağıdakilerden hangisidir?
A) Proses yükündeki negatif değişim B) Proses yükündeki pozitif değişim
C) Prosesteeki bozucu etkiler D) Oransal kazancın aşırı artırılması
7. Aşağıdaki etkilerden hangisi kalıcı durum hatasını ortadan kaldırır?
A) Oransal B) Toplama C) İntegral D) Türev
8. Oransal yöntem tarafından üretilen çıkış değişimini karşılamak ve hatayı sıfırlamak için gereken zamana ne ad verilir?
A) İntegral etki zamanı B) Türev etki zamanı
C) Oransal etki zamanı D) Toparlanma zamanı
9. Denetim sisteminde overshoot denilen üst aşım değerine sıçramayı hangi denetim etkisi azaltır?
A) Aç kapa B) P C) I D) D
10. Başlangıçtan itibaren denetlenen değişkenin oransal band içine girinceye kadar geçirmiş olduğu zamana ne ad verilir?
A) Denetim zamanı B) Yükseliş zamanı C) Çıkış zamanı D) Oturma zamanı

DEĞERLENDİRME

Soruların tamamını doğru cevapladıysanız bir sonraki faaliyete geçiniz. Yanlış cevap verdiğiniz konuya dönerek tekrar ediniz.

ÖĞRENME FAALİYETİ-2

AMAÇ

PID denetim devresini devre şeması ve blok diyagramına göre kurabileceksiniz.

ARAŞTIRMA

- PID denetim yönteminin kullanım örnekleri ile ilgili yerli ve yabancı kaynaklardan ön araştırma yapınız. Araştırma sonuçlarınızı arkadaşlarınızla paylaşınız.

2. ORANSAL-İNTEGRAL-TÜREV (PID) DENETİM YÖNTEMİ

2.1. PID Denetim Yöntemi Temel Özellikleri

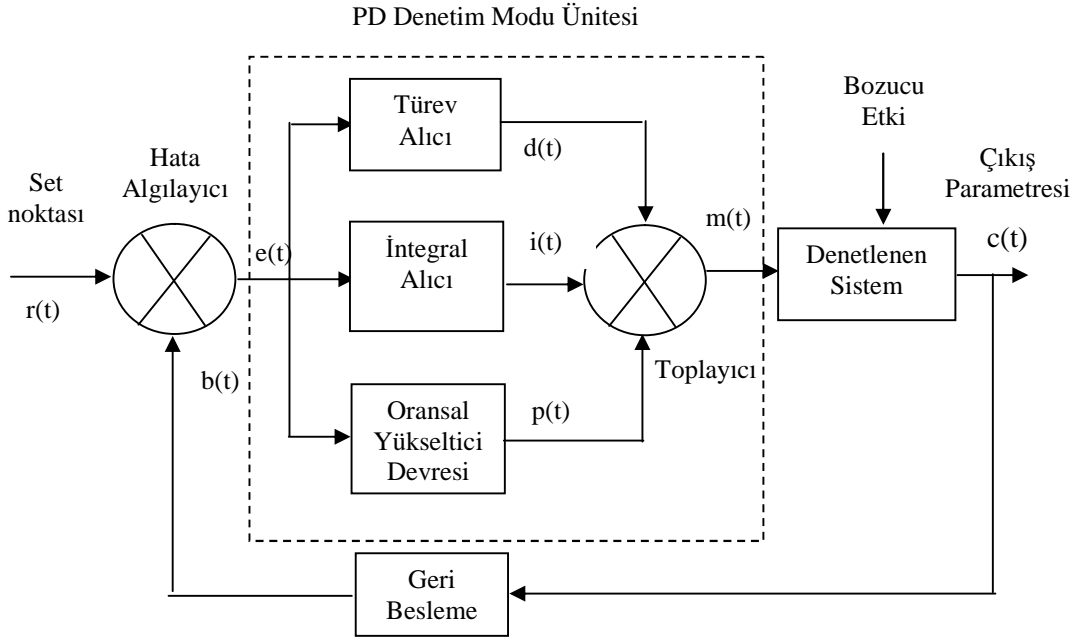
PID yöntemi oransal, türevsel ve integral yöntemlerin birleşmesiyle oluşur. PID kontrolör 3-modlu kontrolör olarak da bilinir. İntegral bileşeni büyük yük değişimleri nedeniyle oluşan oransal ofseti azaltmak ve yok etmek için kullanılır. Türev yöntemi de osilasyon eğilimini azaltır ve hata sinyalini önceden sezen bir etki sağlar. Türev yöntemi özellikle ani yük değişimlerinin olduğu proseslerde çok kullanışlıdır. Diğer bir ifadeyle PID yöntemi bir veya iki denetim yönteminin hatayı kabul edilebilir limitler içerisinde tutamadığı hızlı ve büyük yük değişimleri olan proseslerde kullanılır. Aşağıdaki eşitlikler ideal 3-modlu kontrolörü tanımlamaktadır.

$$v=Pe+I\int_0^t edt+D\frac{de}{dt}+v_0$$

Transfer fonksiyonu ise aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır.

$$\frac{V}{E}=\frac{Ds^2+Ps+I}{s}$$

Şekil 2.1’de PID denetim sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 2.1: PID Kapalı çevrim denetimi

PID denetimde set değeri ile ölçülen değer arasındaki fark sinyalinin türevi ve integrali alınır. Hata sinyali oransal denetleyiciden geçer ve toplayıcı devresinde türev sinyali, integral sinyali, oransal sinyal ve dengeleme gerilimi (V_o) toplanır. Bu şekilde dengeleme gerilimi taban alınarak düzeltme yapılmış olur. Türevsel etkinin fonksiyonu üst aşım (overshoot) ve alt aşım (undershoot) değerlerini azaltmaktadır. İntegral etki ise kalıcı durum hatasını sıfırlar. Türev yöntemi sayesinde daha yüksek kazanç değerleri elde edilebilir.

PID denetiminin eşitlikleri ve transfer fonksiyonu K_p , K_d ve K_i terimleriyle aşağıdaki gibi formülize edilirler.

$$d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

$$p(t) = K_p e(t)$$

$$m(t)=K_p e(t)+K_i \int_0^t e(t)dt+K_d \frac{de(t)}{dt}+V_o$$

eşitlikleri yazılabilir. Transfer fonksiyonu daha önce belirtildiği gibi;

$$TF=\frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

ile tanımlanır.

Örnek:

Bir PID denetleyicinin parametreleri $P=4.3$, $I=\frac{1}{7} \text{ s}^{-1}$, $D=0.5 \text{ s}$, $V_o=\%10$ olarak veriliyor. Denetleyiciye ait hata sinyali Şekil 1.24'te veriliyor. Verilen t değerleri için kontrolör çıkışlarını belirleyiniz. a) $t=5$, b) $t=10$, c) $t=15$, d) $t=25$

Kontrolör çıkışını $v=Pe+I\int_0^t edt+D\frac{de}{dt}+v_o$ formülü ile bulalım. Verilen değerleri ve yukarıdaki varsayımları kullanarak kontrolör için gereken özel eşitlik aşağıdadır.

$$v=4.3e+\frac{1}{7}\int_0^t edt+0.5\frac{de}{dt}+10$$

$$v=4.3e+0.14\int_0^t edt+0.5\frac{de}{dt}+10$$

$\int_0^t edt$ terimi 0-t arasındaki hata eğrisinin altındaki net alana eşittir.

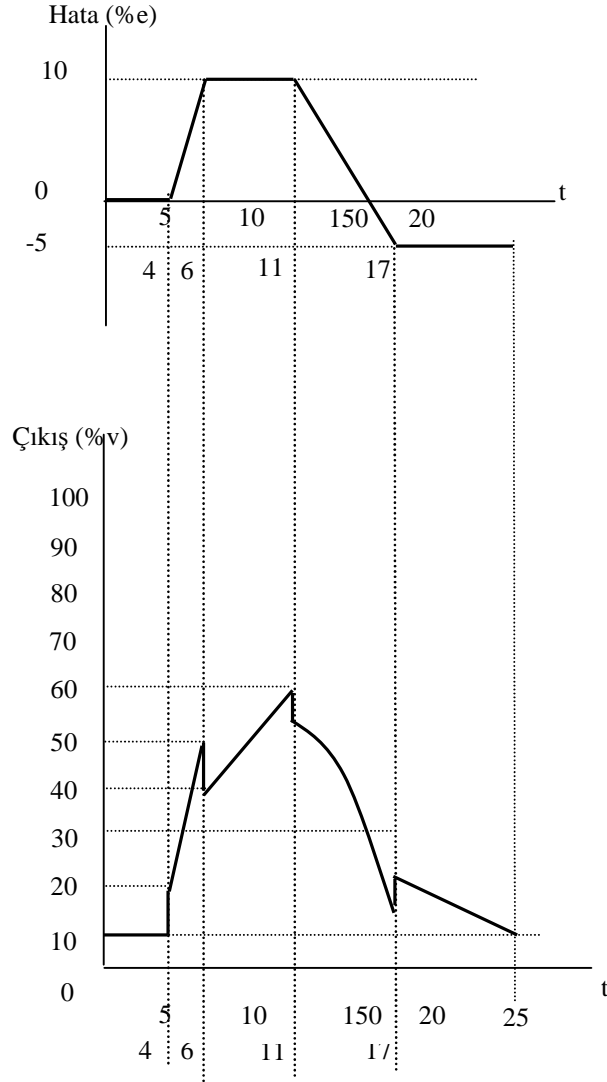
a) $t=5 \text{ s}$ 'de $e=\%5$, Alan=(0.5)(1)(5)=2.5, eğim=10/(6-4)=5
 $v=(4.3)5+(0.14)(2.5)+(0.5)5+10=\%34,35$

b) $t=10 \text{ s}$ 'de $e=\%10$, Alan=(0.5)(2)(10)+(4)(10)=50, eğim=0
 $v=(4.3)10+(0.14)(50)+(0.5)0+10=\%60$

c) $t=15 \text{ s}$ 'de $e=\%0$, Alan=(0.5)(2)(10)+(5)(10)+(0.5)(4)(10)=80,
eğim=(-15)/(17-11)=-2.5
 $v=(4.3)0+(0.14)(80)+(0.5)(-2.5)+10=\%19,95$

d) $t=25 \text{ s}$ 'de $e=\%(-5)$, Alan=80-(0.5)(2)(5)-(8)5=35, eğim=0,
 $v=(4.3)(-5)+(0.14)(35)+(2.15)(0)+10=\%9,99$

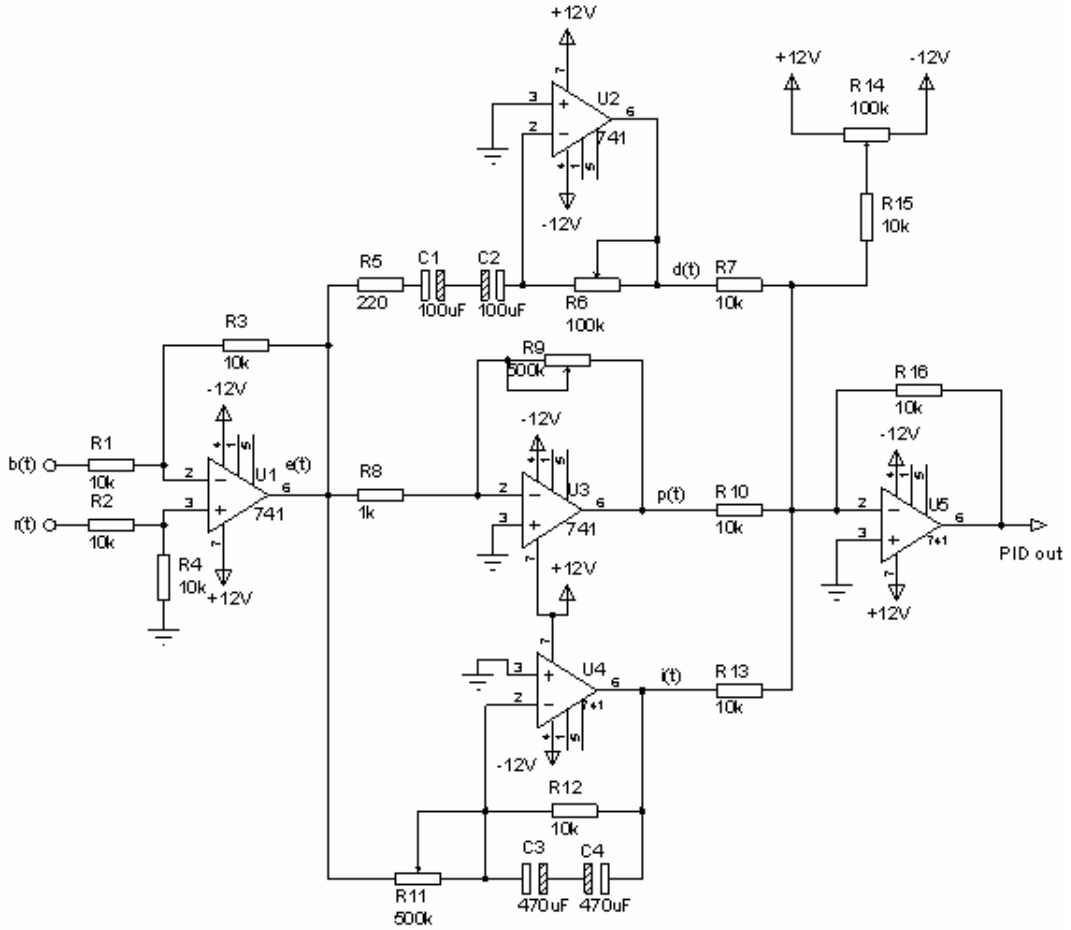
Şekil 2.2’de hesaplamalar sonucunda oluşan PID çıkış grafiği görülmektedir.



Şekil 2.2: Örnek hata çıkış grafiği

2.2. PID Kontrolör Devreleri ve Cihazları

Bir PID kontrolör devresinde oransal, türev ve integral katları genellikle ayrı ayrı bulunur ve sonuçta bu katlar toplanır. Bu sistem ileri düzeyde yapılan bir sistemdir. PID kontrolör devresi analog olabileceği gibi dijital de olabilir. PID denetim devresi dijital bir devre ise içerisinde ayrıca A/D ve D/A çeviricileri de içermelidir. Aşağıda örnek bir PID kontrolör devresi görülmektedir.



Şekil 2.3: PID Kontrolör Devresi

Şekildeki PID kontrolör devresinde U1 opampı hata algılayıcı, U2 opampı türev denetleyici, U3 opampı oransal denetleyici, U4 opampı integral alıcı ve U5 opampı da toplayıcı olarak çalışmaktadır. Şekil 2.3'deki PID kontrolör devresi ile ilgili önemli hesaplamalar aşağıda örnek olarak verilmiştir.

➤ U1-hata algılayıcı hesapları:

Hata algılayıcı katında $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}$ olduğundan dolayı;

$$e(t) = r(t) - b(t)$$

eşitliği geçerlidir. Hata algılayıcı set değeri gerilimi ile geri besleme geriliminin farkını alır ve hatayı bulur.

➤ U2-türev denetleyici hesapları:

Türev denetleyici katında C1 ve C2 birbirlerine seri bağlanmışlardır. Bu bağlantının amacı kapasiteyi uF seviyesine çıkartarak türev zamanını yükseltmektir. Eş değer kapasite aşağıdaki formülle bulunur.

$$C_{T1} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \text{ formülünde } C_1 \text{ ve } C_2 \text{ değerlerini yerlerine koyalım.}$$

$$C_{T1} = \frac{100\mu\text{F} \cdot 100\mu\text{F}}{100\mu\text{F} + 100\mu\text{F}} = 50\mu\text{F} \text{ bulunur.}$$

Türev etki zamanı ya da diğer bir deyişle türev kazancı K_D ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_D = R_6 C_{T1}$$

Eğer R_6 değeri 10 k olarak ayarlanırsa $K_D = 10\text{k} \times 50\mu\text{F} = 500$ ms değerinde bir türev etki zamanı elde edilir.

Türev devresinin kesim frekansı aşağıdaki formülle bulunur.

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_5 C_{T1}}$$

Eleman değerlerini yerlerine koyarsak;

$$F_c = \frac{1}{2.3,14.220.50\mu\text{F}} = 14,48 \text{ Hz} \text{ Bulunur.}$$

Girişte 14,48 Hz ve altında bir değişim hızı meydana gelirse türev denetleyici hata sinyalinin türevini alabilir. Geri besleme direnci (R_6) 10 k ayarlandığında $K_D = 500$ ms bulunduğundan hatanın değişim periyodu 500 ms civarında olursa iyi bir türev etkisi sağlanabilir. 10 k geri besleme direnci kullanıldığında türev denetim etkisi aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$d(t) = -0,5 \frac{de(t)}{dt}$$

- U3-oransal denetleyici hesapları:

Şekil 2.4 incelendiğinde oransal denetleyici devresinde K_p değerinin aşağıdaki formülle bulunacağı görülür.

$$K_p = \frac{R_9}{R_8}$$

R_9 potu 5 k değerine ayarlanırsa $R_8=1$ k olduğundan oransal kazanç değeri $K_p=5$ olarak ayarlanmış olur.

Oransal denetleyici etkisi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$p(t) = -5e(t)$$

- U4-integral denetleyici hesapları:

Şekildeki integral devresi incelendiğinde C_3 ve C_4 kondansatörlerinin seri olarak geri besleme hattında bağlı oldukları görülür. İki kondansatörün eşdeğerine C_{T2} dersek bu değer aşağıdaki formülle bulunur.

$$C_{T2} = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = \frac{470 \cdot 470}{470 + 470} \mu F = 235 \mu F \text{ bulunur.}$$

Devrede integral etki kazancı aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$K_i = \frac{1}{R_{11} C_{T2}}$$

R_{11} potunun değerinin 10 k olarak ayarlandığını varsayalım. Bu durumda K_i integral etki kazancını hesaplayalım.

$$K_i = \frac{1}{10k \cdot 235 \mu F} = 0,43 \text{ s}^{-1}$$

Bu sonuca göre integral denetim etkisi aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$i(t) = -0,43 \int_0^t e(t) dt$$

İntegral devresinin kesim frekansı ise aşağıdaki formülle bulunur.

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_{12} C_{T2}} = \frac{1}{2.3,14.10.10^3 .235.10^{-6}} = 0,07 \text{ Hz}$$

İntegral alma işleminin gerçekleşmesi için hata sinyalinin değişim hızı 0,07 Hz'den büyük olmalıdır.

- U5 toplayıcı devresi hesapları:

Toplayıcı devresinde U5'e sinyal uygulanan tüm dirençler ve geri besleme direnci 10 k olduğu için doğrudan toplama işlemi gerçekleşir. Ancak çıkış toplam değeri girişleri 180 derece ters çevirir. Aşağıda bu işlem gösterilmektedir.

$$V_{pid}(t) = -[p(t) + i(t) + d(t) + V_o]$$

$$V_{pid}(t) = -[-5e(t) - 0,43 \int_0^t e(t) dt - 0,5 \frac{de(t)}{dt} - V_o]$$

“- V_o” teriminin anlamı dengeleme geriliminin R₁₄ potu ile negatif olarak verilmesidir. Toplayıcı devresi bu gerilimi pozitif çevirir. Bu gerilimin üzerine PID etkilerini ekler. Toplayıcı devresi zaten 180 derece faz farklı gelen denetim sinyallerinin tekrar 180 derece faz farkını alır ve böylece düzeltilmiş bir PID sinyali sağlar.

$$V_{pid}(t) = 5e(t) + 0,43 \int_0^t e(t) dt + 0,5 \frac{de(t)}{dt} + V_o$$

Sonuçta elde edilen pid çıkış etkisinin laplas dönüşümü yapıldığında aşağıdaki transfer fonksiyonu elde edilir.

$$TF = \frac{0,5s^2 + 5s + 0,43}{s}$$

Sonuçta elde edilen transfer fonksiyonu günümüzde ileri düzeyde matematiksel analizlerde kullanılmaktadır. Denetim sistemlerinin bilgisayarda analizinin yapılması için transfer fonksiyonları gereklidir.



Şekil 2.4: Çeşitli PID kontrolör cihazları

PID denetim yönteminin günümüzde birçok kullanım alanı mevcuttur. Sıvı seviye denetiminde, motor kontrolünde, sıcaklık kontrol sistemlerinde ve daha birçok benzer kapalı çevrim denetim sisteminde kullanılmaktadır. Bu sistemler özellikle sıcaklık kontrolünün önemli olduğu tıp elektroniği uygulamalarında, nükleer santrallerde, kimyasal işlemlerle ürün oluşturulan fabrikalarda, sebze ve meyve üreten seralarda, fabrikalarda ham maddenin bulunduğu depo seviyelerinin kontrolünde çok yaygın biçimde kullanılmaktadır. Günümüzde tüm bu alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmış birçok PID kontrolör cihazı bulunmaktadır. Aşağıda bu cihazlardan birkaç tane örnek görülmektedir.

Günümüzde kullanılan PID kontrolör cihazlarının katalogları incelendiğinde aşağıdaki özellikler dikkat çekmektedir.

- Düşük boyut ve panoya ya da makine üzerine monte edilebilme özelliği
- Dijital göstergeye sahip olma, dijital olarak set değerlerini ve parametreleri ayarlayabilme özelliği
- On-Off, P, PI ve PD modları ile çalışabilme özelliği
- PID parametrelerinin otomatik olarak ayarlanabildiği autotune özelliği
- Sıcaklık denetimi için hazır termokupl ya da RTD girişleri özelliği
- Akım ve/veya gerilim türünden analog giriş özelliği
- Analog, röle veya SSR çıkışlardan birini kullanabilme özelliği
- Programlanabilir alarm özellikleri
- Ofset farkı ayarlayabilme ve röle çıkışı için çekme bırakma gecikmesi oluşturabilme özelliği
- RS232 ile seri haberleşebilme özelliği
- RS485 Modbus protokolü ile haberleşebilme özelliği

Aşağıda Enda EUC442RS model Universal kontrolör cihazının bağlantı yapısı görülmektedir.



Şekil 2.5: Enda EUC442RS universal kontrol cihazı bağlantıları

2.3. PID Kontrolör Ayarı

Çevremizde ve tabii ki endüstride birçok PID uygulaması mevcuttur. Analog veya dijital olarak mevcut olan bir PID kontrolör cihazının ayarı çok önemlidir.

PID kontrolörü oluşturan oransal, integral, türev kazançlarının her biri sistemin çalışmasına çeşitli şekillerde etki etmektedir. Oransal kontrolör, yükseliş zamanının azalmasına etkiliyken kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmada etkili değildir. İntegral kontrolör bu hatayı ortadan kaldırır fakat geçici olan tepkileri kötüleştirir. Türev kontrolörü sistemin kararlılığını artırır, aşımı azaltır ve geçici olan tepkileri iyileştirir. Kapalı çevrim sisteminde her bir kontrolörün etkisi K_p , K_i ve K_d kazançları verilerek Şekil 2.6'da özetlenmiştir.

Kontrolör	Kazanç	Yükselme zamanı	Aşım	Oturma zamanı	Kalıcı durum hatası
Oransal	K_p	Azaltır	Arttırır	Biraz arttırır	Azaltır
İntegral	K_i	Biraz azaltır	Arttırır	Arttırır	Yok eder
Türev	K_d	Biraz değiştirir	Azaltır	Azaltır	Çok az etkiler

Şekil 2.6: PID kontrolör parametrelerinin etkileri

Şekil 2.6 incelendiğinde kapalı çevrim denetim sisteminde temel olarak dört önemli parametrenin olduğu görülmektedir. Yükselme zamanı, sisteme ilk enerji verilmesinden set değerinin yaklaşık olarak % 90'ına ulaşılması için gereken süredir. Oransal kontrol kazancının artırılması bu süreyi azaltırken, integral kazancı ve türev kazancı değişiminin bu süre üzerinde çok az etkisi vardır. Oransal ve integral kazançları oransal ofseti ya da diğer

bir deyişle set değerinin üzerindeki ve altındaki aşım miktarını artırırken, türev kazancı aşımı azaltır. Oturma zamanı set değeri etrafındaki osilasyonların kabul edilebilir bir seviyeye inmesi için gereken süredir. Set değerine oturma zamanını oransal ve integral kazançları artırırken, türev kazancı oturma zamanını azaltır. Oturma zamanının az olması istenen bir durumdur. Oransal kazancın arttırılması kalıcı durum hatasını azaltır fakat sınırlayamaz, integral kazancı sayesinde kalıcı durum hatası ortadan kaldırılır. Türev kazancının kalıcı durum hatasına etkisi yoktur. PID parametrelerinin ayarlanması kapalı çevrim sisteminin güvenli bir şekilde yürütülmesi için çok önemlidir. PID parametreleri deneysel olarak ayarlanabileceği gibi daha profesyonel anlamda değişik matematiksel yöntemlerle hesaplanarak da ayarlanabilir. Ziegler–Nichols metodu, öz uyarlamalı metot vb. metotlar bunlardan bazılarıdır. Bu modülden deneysel ayarlamadan bahsedilecektir. Bir PID cihazı kullanıldığında ya da PID devresi oluşturulduğunda deneysel olarak ve pratik anlamda aşağıdaki işlem basamakları gerçekleştirilir.

- Öncelikle K_p kazancı ayarlanır. K_i ve K_d sıfır iken K_p kazancı, çıkıştaki hatayı azaltmak için sıfırdan başlayarak yavaş yavaş artırılır. Set değerine en yakın noktadaki kalıcı durum hatasına kadar artırma işlemine devam edilir.
- Daha sonra K_p değeri ve K_i değeri değiştirilmeden K_d değeri aşım kabul edilebilir bir seviyeye inene kadar artırılır. Aşım kısa süreli yük değişimiyle izlenebilir. Örneğin motorun devri denetleniyorsa kısa süre motor mili tutulabilir ve bırakılabilir. Ayrıca kalıcı durum etrafında denetlenen değişkenin salınımına bakılır ve minimum genlikli salınımında K_d değerini ayarlama işlemi bırakılır. Deneysel olarak set değerinden ne kadar farklı bir aşım meydana geldiği bu deneysel tekniklerle gözlenebilir.
- K_p ve K_d değerleri ile çıkışta bir kalıcı durum hatası mevcuttur. Bu hatayı sıfırlayana kadar K_i değeri artırılır.

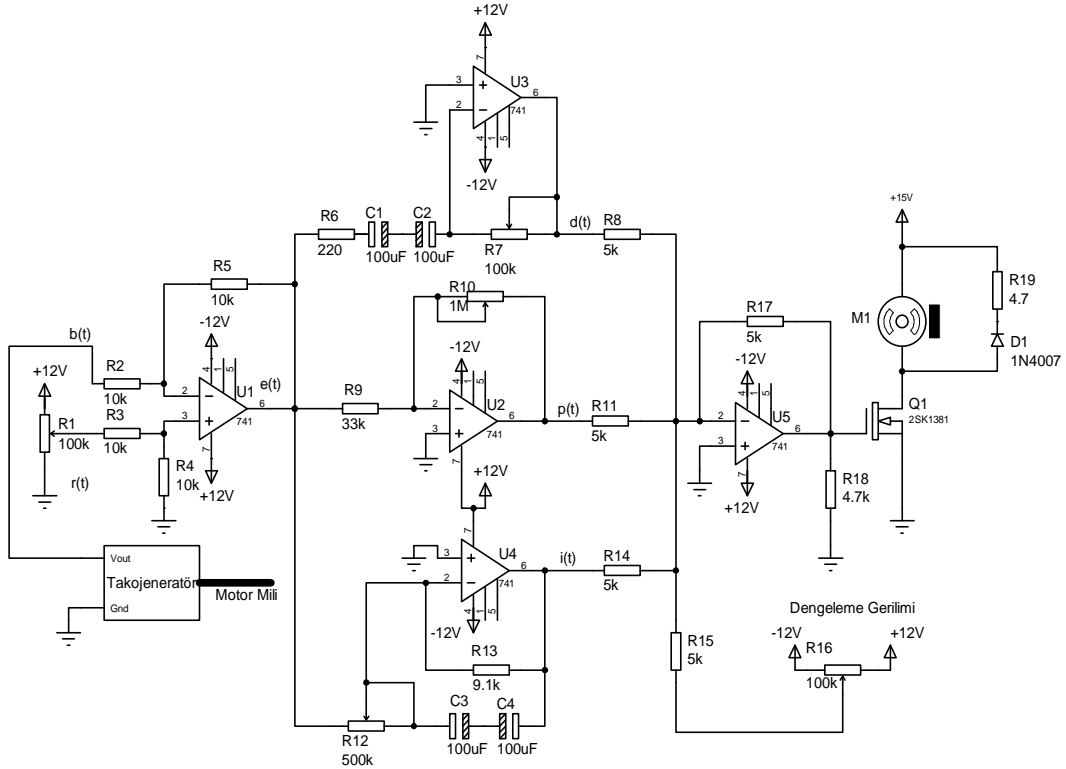
Aşağıdaki uygulamada Öğrenme Faaliyeti-1'deki uygulamadan farklı olarak motor sürücü kısmında mosfet kullanılmıştır. Transistörün ısınma problemi nedeniyle aynı denetim geriliminde transistör ısındıkça devir sayısının arttığını gözlemlemiş olmalısınız. Aşağıdaki uygulamada ise mosfet kullanılmış ve aradaki çalışma farkının anlaşılması amaçlanmıştır.

UYGULAMA FAALİYETİ

Aşağıda verilen devreyi yaparak işlem basamaklarını uygulayınız.

Kullanılan Malzeme Araç ve Gereç

1. Sabit dirençler (4x10 k, 1x4.7 k, 1x4.7, 1x220, 1x33 k, 5x5 k)
2. Potansiyetreler (1x500 k, 3x100 k, 1x1M)
3. Kondansatörler (4x100 uF)
4. Diyot 1x1N 4007
5. Opamp (5xLM 741)
6. 2SK1381 mosfet (Bulunamazsa IRF640 kullanılabilir.)
7. 12V DC PM tipi servo motor
8. Deney bordu ya da pertinaks kart
9. Osilaskop
10. Multimetre
11. Simetrik güç kaynağı (+12V,-12V)
12. Yeterli sayıda muhtelif kablo ve krokodil



Şekil 2.7: Öğrenme Faaliyeti-2 uygulama devresi

İşlem Basamakları	Öneriler
➤ Şekil 2.5'teki devre için gereken malzemeleri ve araç gereci hazırlayınız.	➤ Özellikle dc gerilim kaynağının 3A akım verebilecek kapasitede olmasına dikkat ediniz.
➤ 741 Opamp, mosfet ve motorun katalog bilgilerini inceleyiniz.	➤ Motor takojeneratörlü bir dc motor olmalıdır. Bu tür bir motor bulunamıyorsa dc motor devir sayısını gerilime çeviriniz.
➤ Uygulama Faaliyeti-1'deki motor ölçüm sonuçlarınızı hazırlayınız.	
➤ $b(t)$ geri besleme gerilimini motorun takojeneratör çıkışından alıp U1 opampının girişine bağlayınız.	
➤ $p(t)$, $d(t)$ ve $i(t)$ çıkış hatlarını bağlı oldukları çıkış dirençlerinden ayırınız.	
➤ Daha önce ölçtüğünüz 500 devir için gerekli gerilimi set değeri gerilimini R1 potu ile uygulayınız.	
➤ Motor 500 devirin biraz üzerinde hareket gösterene kadar, R16 potu ile dengeleme gerilimi uygulayınız.	
➤ $p(t)$ çıkışını R11 ile irtibatlandırınız.	
➤ K_p değerini R10 potu ile yavaş yavaş artırınız.	
➤ 500 devrin altında kalıcı durum hatası olduğu en yakın noktada artırmayı bırakınız.	➤ R10 potunun değerini ölçüp K_p değerini hesaplayınız.
➤ Devreye türev etkisini ilave etmek için $d(t)$ çıkışını R8 ile irtibatlandırınız.	
➤ R7 potunun değerini yavaş yavaş artırınız. Kalıcı durum hatası etrafındaki osilasyon eğiliminin en az olduğu yerde durunuz.	➤ R7 potunun değerini ölçüp K_d değerini hesaplayınız.
➤ Devreye integral etkisi eklemek için $i(t)$ çıkışını R14 direnci ile irtibatlandırınız.	
➤ R12 potunun değerini motor devir sayısı 500 devirde olana kadar artırınız.	➤ R12 potunun değerini ölçüp K_i değerini hesaplayınız.
➤ Motorun milini kısa bir süre tutup bırakınız, motorun set değerine oturmasını gözlemleyiniz.	
➤ Oransal, integral ve türev etkilerini eklemeyen önceki ve sonraki motor çalışmasını karşılaştırınız.	

ÖLÇME VE DEĞERLENDİRME

Aşağıdaki soruları dikkatlice okuyunuz ve doğru seçeneği işaretleyiniz.

1. Aşağıdaki yöntemlerden hangisi hem kalıcı durum hatasını hem de aşımı azaltan bir etki gösterir?
A) Aç kapa B) PI C) PI D) PID
2. PID yönteminde hangi alt yöntemin hata sinyalini önceden sezen bir etkisi vardır?
A) Aç kapa B) P C) I D) D
3. Ani yük değişimlerinin olduğu proseslerde hangi etki PID yöntemi içerisinde etkisini tek başına gösterir?
A) P B) D C) PI D) PD
4. PID denetim yönteminde hangi denetim etkisinin oturma zamanını azaltıcı özelliği vardır?
A) P B) PI C) I D) D
5. PID denetleyicinin ayarlanması işlemi öncelikle hangi parametre ile başlar?
A) T_i B) K_i C) K_p D) K_d
6. Aşağıdaki proseslerden hangisinde PID yöntemi kullanmak kesinlikle gereksizdir?
A) Sıvı seviye denetimi B) Motor hız denetimi
C) Oda sıcaklık denetimi D) Lambanın aç kapa denetimi
7. PID kontrolör cihazlarında PID parametrelerinin otomatik olarak ayarlanabilme özelliğine ne ad verilir?
A) Autocontrol B) Autoinstall C) Autotune D) Autoreset
8. Bir oda sıcaklığı denetim sisteminde kapının ve pencerenin aynı anda açılması ile PID denetim sisteminde meydana gelebilecek ilk olumsuzluk aşağıdakilerden hangisidir?
A) Set değerinde kayma B) Kısa süreli aşım meydana gelmesi
C) Kalıcı durum hatası D) Oturma zamanında artış

DEĞERLENDİRME

Soruların tamamına doğru cevap verdiyseniz “Modül Değerlendirme”ye geçiniz. Yanlış cevap verdiğiniz konulara dönerek bunları tekrar ediniz.

MODÜL DEĞERLENDİRME

Bu modül kapsamında kazandığınız bilgi ve becerileri aşağıdaki listelenen ölçütlerine göre değerlendiriniz.

	Değerlendirme Ölçütleri	Evet	Hayır
1	Bir denetim problemini kapalı çevrim denetim sistemine göre çözümleyebildiniz mi ?		
2	Denetim sisteminde matematiksel denklemleri oluşturabilme, modellemeler kurabilme ve analiz edebildiniz mi?		
3	Denetim sistemine uygun geri besleme oluşturabildiniz mi?		
4	Oransal denetim sistemi kurabildiniz mi?		
5	İstenilen oransal bandı ayarlayabildiniz mi?		
6	Kalıcı durum hatasını ortadan kaldırabilmek için ayar yapabildiniz mi?		
7	Aşımı indirgemek için ayar yapabildiniz mi?		
8	Oturma zamanını ayarlayabildiniz mi?		
9	PID parametrelerini kurallara uygun biçimde ayarlayabildiniz mi?		
10	PID denetim sistemini elektronik elemanlarla kurabilme ve matematiksel ilişkilere göre eleman değerlerini ayarlayabildiniz mi?		

DEĞERLENDİRME

Sorulara “Hayır” şeklinde verdiğiniz cevaplar için ilgili öğrenme faaliyetine dönerek bunları tekrar ediniz. Tüm sorulara “Evet” cevabını verdiyseniz diğer modüle geçmek için öğretmeninize başvurunuz.

CEVAP ANAHTARLARI

ÖĞRENME FAALİYETİ-1'İN CEVAP ANAHTARI

1	B
2	A
3	C
4	D
5	B
6	D
7	C
8	A
9	D
10	D

ÖĞRENME FAALİYETİ-2'NİN CEVAP ANAHTARI

1	D
2	D
3	B
4	D
5	C
6	D
7	C
8	B

KAYNAKÇA

- ÖZDAŞ Nimet, A.Talha DİNİBÜTÜN, Ahmet KUZUCU, **Otomatik Kontrol Temelleri**, İTÜ, İstanbul, 1998.
- SARIOĞLU M.Kemal, **Otomatik Kontrol 1**, İTÜ, İstanbul, 1997.
- YÜKSEL İbrahim, Otomatik Kontrol-Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 1997.
- UĞUR Naci, **Proses ve Tesis Kontrolü**, Ege Üniversitesi, İzmir, 1991.
- KAYA Yılmaz, **Servo-senkro Mekanizmalar**, Mersin Üniversitesi, Mersin, 1992.