

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KONTROL SİSTEMLERİNDE BOZUCULARIN  
GİDERİLME YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Emre TEKİN**

**Anabilim Dalı: ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ  
Programı : KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ**

**EYLÜL 2008**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KONTROL SİSTEMLERİNDE BOZUCULARIN  
GİDERİLME YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Emre TEKİN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Eylül 2008**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Atilla BİR**  
**Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. MÜJDE GÜZELKAYA**  
**Prof.Dr. TAYFUN AKGÜL**

**EYLÜL 2008**

## **ÖNSÖZ**

Tez konumun belirlenmesinden sonlandırma aşamasına kadar her konuda yol gösteren, yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Atilla BİR' e ve fikirleri ile yol gösteren hocalarım Sayın Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA ve Sayın Prof. Dr. Tayfun AKGÜL' e teşekkür ederim.

Ayrıca desteklerini esirgemeyen kardeşime ve aileme teşekkür ederim.

**Eylül 2008**

**Müh. Emre TEKİN**

## İÇİNDEKİLER

<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>v</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>ix</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
<b>2. KONTROL VE KONTROL SİSTEMİNİN TANIMI</b>	<b>2</b>
2.1. Kontrol ve Sistem Nedir?	2
2.2. Kontrol Sistemleri	2
2.3. Kontrol Yöntemleri	3
2.3.1. Açık Çevrim Kontrol Sistemi	3
2.3.2. Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi	5
2.4. Matematiksel Modeller	6
2.4.1. Durum Denklemleri	8
2.4.2. Fark Denklemleri	8
2.5. Transfer Fonksiyonları	9
2.5.1. Doğrusal Sistemlerde İmpuls Yanıtı ve Transfer Fonksiyonu	9
2.5.1.1 İmpuls Yanıtı	10
2.5.1.2 Transfer Fonksiyonunun Doğrusal Denklemlerle İfade edilmesi	11
<b>3. BOZUCULAR</b>	<b>13</b>
3.1. Bozucuların Modellenmesi	13
3.1.1. Belirgin İşaretler ile Modellenmesi	13
3.1.2. Olasıl İşaretler ile modellenmesi	17
3.1.2.1. Beyaz Gürültü	18
3.2. Bozucuların Sınıflandırılması	18
3.2.1. Referans İşareti Değişimleri	19
3.2.2. Yük Bozucuları	20
3.2.3. Ölçüm Gürültüleri	21
3.2.4. Modellenemeyen Dinamikler	22
3.2.4.1. Doğrusal Olmama Durumu	22
3.2.4.2. Parametrik Modeller	22
3.2.4.3 Süreç Değişkenleri	23

<b>4. BOZUCULARIN GİDERİLME YÖNTEMLERİ</b>	<b>24</b>
4.1. Bozucuların Kaynağında Giderilmesi	24
4.2. Bozucuların Geri Besleme ile Giderilmesi	24
4.3. Öngörü Yöntemi ile Giderilmesi	26
4.3.1. İdeal Öngörücü	27
4.3.1.1. Doğrusallık	27
4.3.1.2. Zamanla Değişmeyen Sistemler	28
4.3.1.3. Kararlılık	28
4.3.1.4. Nedensellik	28
4.3.1.5. İdeal Öngörücünün Transfer Fonksiyonu	29
4.3.2 Wiener Öngörü Yöntemi	29
4.3.2.1. Bode-Shannon Çözüm Yöntemi	33
4.3.3. Kalman Öngörü Yöntemi	39
4.3.3.1. Doğrusal Sistemlerin Durum Denklemleri	40
4.3.3.2. Kalman Öngörücüsü	41
<b>5. SONUÇLAR</b>	<b>44</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>46</b>
<b>EKLER</b>	<b>48</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>52</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Kontrol edilen sistem.....	2
Şekil 2.2 : Kontrol edilen sistem ve çıkış işareti.....	3
Şekil 2.3 : Açık çevrimli kontrol sistemi.....	4
Şekil 2.4(a) : Açık çevrimli kontrol sisteminde bozucu etkisini gösteren blok diyagramı.....	4
Şekil 2.4(b) : Açık çevrimli kontrol sisteminde bozucu etkisi.....	5
Şekil 2.5 : Kapalı çevrim kontrol sistemi.....	5
Şekil 2.6 : Kapalı çevrimli kontrol sisteminde bozucu etkisi.....	6
Şekil 2.7 : Kontrol sistemindeki işaretlerin gösterimi.....	7
Şekil 2.8 : Açık çevrim kontrol sisteminde işaretler.....	10
Şekil 2.9 : Kapalı çevrim kontrol sisteminde işaretler.....	11
Şekil 3.1(a) : İmpuls işareti.....	14
Şekil 3.1(b) : Basamak işareti.....	14
Şekil 3.3(c) : Rampa işareti.....	15
Şekil 3.4(d) : Sinüs işareti.....	15
Şekil 3.2(a) : Basamak ve İmpuls işaretlerinin toplanması ile oluşan model....	16
Şekil 3.2(b) : Basamak işaretinin genliğinin değiştirilmesi ile oluşan model....	16
Şekil 3.2(c) : Rampa işaretinin toplanması ile oluşturulan model.....	16
Şekil 3.2(d) : Sinüs işaretinin genlik ve frekansını değiştirilmesi modeli.....	17
Şekil 3.3 : Beyaz gürültü.....	18
Şekil 3.4 : Kontrol sisteminde bozucuların gösterimi.....	19
Şekil 3.5 : Referans işarettaki değişimin filtre kullanılarak yumuşatılması... 20	20
Şekil 3.6(a) : Yük bozucu etkisinin filtreleme ile giderilmesinin blok diyagramı.....	20
Şekil 3.6(b) : Yük bozucu etkisinin filtreleme ile giderilmesi.....	21
Şekil 3.7(a) : Ölçüm gürültüsünün filtreleme ile giderilmesinin blok diyagramı.....	21
Şekil 3.7(b) : Ölçüm gürültüsünün filtreleme ile giderilmesi.....	22
Şekil 4.1 : Bozucuların geri besleme ile giderilmesi.....	24
Şekil 4.2 : Basamak işareti bozucunun geri besleme ile giderilmesi.....	25
Şekil 4.3 : Beyaz gürültü bozucunun geri besleme ile giderilmesi.....	26
Şekil 4.4 : $s(t)$ işareti ve $n(t)$ bozucusu spektral yoğunluk fonksiyonları.....	30
Şekil 4.5 : Öngörücü giriş ve çıkış işaretinin blok diyagramı.....	30
Şekil 4.6 : Kontrol sisteminde öngörü uygulanmasının blok diyagramı.....	34
Şekil 4.7 : Birinci derece sistemde basamak bozucusunun etkisinin Wiener yöntemi ile giderilmesi.....	35
Şekil 4.8 : Birinci derece sistemde beyaz gürültü bozucu etkisinin Wiener yöntemi ile giderilmesi.....	37
Şekil 4.9 : İkinci derece sistemde basamak bozucusunun etkisinin Wiener yöntemi ile giderilmesi.....	38

<b>Şekil 4.10</b>	: İkinci derece sistemde beyaz gürültü bozucu etkisinin Wiener yöntemi ile giderilmesi.....	39
<b>Şekil 4.11</b>	: Doğrusal sisteme ait durum denklemlerinin blok diyagramı.....	40
<b>Şekil 4.12</b>	: Kalman öngörücüsü.....	41
<b>Şekil 4.13</b>	: Birinci derece sistemde basamak bozucusu için Kalman öngörücüsü blok diyagramı .....	43
<b>Şekil 4.14</b>	: Birinci derece sistemde basamak bozucu etkisinin Kalman yöntemi ile giderilmesi.....	43

## SEMBOL LİSTESİ

$x$	: Giriş işareti
$y$	: Çıkış işareti
$f$	: Kontrol işareti
$u$	: Referans işareti
$K$	: Kazanç
$e$	: Hata işareti
$T$	: Örnekleyici
$t$	: Zaman
$a, b$	: Sabit reel katsayılar
$k$	: katsayı ve $k = \sqrt{1 - \xi^2}$ sönüm katsayısı
$A$	: Sabit genlik
$A, B$	: Katsayı matrisleri
$[A(t)]$	: Geri besleme matrisi
$[B(t)]$	: Giriş matrisi
$g(t)$	: İmpuls yanıtı
$L$	: Laplace dönüşümü
$\phi(\omega)$	: Spektral yoğunluk fonksiyonu
$\omega$	: Doğal frekans $\omega = \sqrt{1 - \xi^2}$
$\omega_n$	: Rezonans frekansı
$\xi$	: Sönüm oranı
$\sigma = \xi \omega_n$	: Sönüm
$\sigma^2$	: Ortalama güç
$\tau$	: Zaman aralığı, öngörücü sabiti
$S_{\omega n}$	: Beyaz gürültü genliği
$R_{\omega n}$	: Beyaz gürültü özkorelasyon fonksiyonu
$W$	: Fiziksel band genişliği
$l$	: Yük bozucusu
$n$	: ölçüm gürültüsü, gürültü
$\delta(t)$	: Dirak distribüsyonu
$l(t)$	: Birim basamak fonksiyonu
$s(t)$	: İşaret
$e_p$	: Öngörücü hatası
$e^2(t)$	: Ortalama karesel hata
$z(t)$	: İstenen işaret
$G_1(s), G_2(s)$	: İleri besleme ile ilgili bloklar
$H(s)$	: Geri besleme ile ilgili blok
$\alpha, \beta$	: Katsayılar



- $\psi_{xx}(v), \phi_{xx}(s)$  : Giriş işaretinin özkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $\psi_{yy}(v), \phi_{yy}(s)$  : Çıkış işaretinin özkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $\psi_{zz}(v), \phi_{zz}(s)$  : İstenen işaretin özkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $\psi_{xz}(v), \phi_{xz}(s)$  : Giriş işareti ile istenen işaret arasındaki çaprazkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $\psi_{xy}(v), \phi_{xy}(s)$  : Giriş işareti ile çıkış işareti arasındaki çaprazkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $\psi_{ss}(v), \phi_{ss}(s)$  : İşaretin özkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $\psi_{nn}(v), \phi_{nn}(s)$  : Gürültünün özkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $\psi_{sn}(v), \phi_{sn}(s)$  : İşaret ile gürültü arasındaki çaprazkorelasyonu ve güç dağılımı  
 $[\phi(t, t_0)]$  : Geçiş matrisi

## KONTROL SİSTEMLERİNDE BOZUCULARIN GİDERİLME YÖNTEMLERİ

### ÖZET

Kontrol sistemlerinde girişleri önceden belirlenemeyen ve sistem üzerinde olumsuz etkileri olan girişlere bozucu denir. Bu çalışmada kontrol sistemlerindeki bozucuların ve etkilerinin giderilme yöntemleri incelenmiştir. Kontrol sistemleri açık çevrim kontrol ve kapalı çevrim kontrol sistemi olarak iki grupta toplanabilir. Kontrol sistemlerinde incelenmesi gereken diğer bir konu da bozucu kavramıdır. Bozucular belirgin yada olası işaretler ile modellenebilir. Bozucular sınıflandırılırken kontrol sistemine girdikleri yerleri, sistem üzerindeki etkileri ve bozucuyu üreten etkenler dikkate alınmıştır. Yapılan sınıflandırmalar ve modellemelerden yola çıkarak bozucuların sistem üzerindeki etkisi MATLAB Simulink programı kullanılarak gözlemlenmiştir. Bozucu etkilerinin giderilmesinde bozucuların kaynağında giderilmesi, geri besleme ile giderilmesi ve öngörü yöntemi ile giderilmesi olarak üç yöntem önerilmiş ve bozucu etkilerinin ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Bozucu etkilerinin kaynağında giderilmesi, bozucuyu üreten etkenin ortadan kaldırılmasına yönelik bir çalışmadır. Bu yöntem ile kontrol sistemine ek olarak geri besleme yada öngörü kullanılması gereksiz kılınmıştır. Kaynağında giderilemeyen bozucular için geri besleme kullanılabilecek temel bir yöntemdir. Bu yöntemin kullanılmasında iki önemli konu mevcuttur. Burada geri beslemenin bozucunun sisteme girdiği yerin yakınından uygulanması gerekmektedir. Diğer önemli bir unsurda sistem kazancının seçilmesi konusudur. Kazancın yüksek seçildiği durumda, sisteme giren bozucuya karşı daha hızlı ve iyi bir cevap alındığı benzetimler ile gözlemlenmiştir. Geri besleme yönteminin sakıncası olası işaretler ile modellenen bozucular için yetersiz olmasıdır. Belirgin yada olası işaretler ile modellenebilen bozucular giderilmesi için öngörü yöntemi kullanılabilir. Öngörü yöntemi kullanılarak bozucuların giderilmesinde İdeal, Wiener ve Kalman öngörü yöntemi olmak üzere üç yöntem ele alınmıştır. Belirgin ve olası işaretler için yapılan benzetimlerde olumlu sonuçlar alınmıştır. İdeal öngörü yönteminde nedensellik ilkesinden dolayı bir kayıp mevcuttur. Wiener ve Kalman yöntemlerinde işaretin özelliklerinden yararlanıldığından ötürü daha iyi sonuç alınmaktadır. Wiener öngörücüsü giriş çıkış büyüklüklerinden yararlanarak elde edilir. Kalman yöntemi Wiener yöntemi temeline dayanmaktadır. Wiener yönteminden farklı olarak Kalman yönteminde durum denklemlerinden yararlanarak öngörücü elde edilir. Önerilen öngörü yöntemleri için Kalman öngörü yönteminin uygulanmasının uygun yol olduğu gözlemlenmiştir. Wiener ve Kalman öngörü yöntemlerinin uygulanabilmesi için işaretin istatistiksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. İstatistiksel özellikleri bilinmeyen işaretler için ideal öngörü yöntemi uygulanabilir. Çalışmanın sonucunda, sisteme giren belirgin yada olası işaretler ile modellenebilen bozucuların etkisi ortadan kaldırılmıştır.

# ELIMINATION METHODS FOR DISTURBANCES ON CONTROL SYSTEMS

## SUMMARY

Inputs, whose entrance cannot be predicted in control systems and which effect these systems negatively are called disturbances. In this study disturbances in systems and the methods to eliminate them have been analysed. Control systems can be subdivided into two groups as open circuit control and closed circuit control. One of the main subjects in control systems to be handled is the concept “disturbance”. Disturbances can be modeled with definite or possible signs. In the disturbance categorization process; inputs where they enter into the systems, their effects on the system and their sources have been taken into consideration. Depending on categorizations and modelizations made, the effects of disturbances on systems have been observed by means of MATLAB Simulink program. In the elimination of the effects of the disturbances, three methods, which are elimination the roots of the disturbances, elimination by feedback and elimination by prediction have been proposed and proven to be successful. Elimination of the effects of the disturbance sources is a method aimed at elimination of the cause. In this method elimination by feedback and elimination by prediction are made unnecessary. If this method is not useful, elimination feedback method is another principle method to use. In this method there are two main points. The feedback has to be applied very close to the entrance point of the disturbance on system. Another important subject is to choose the gain of the system. In the cases in which the gain of the system has been chosen high, a more fast and better response was observed through simulations. The bad side of the feedback method is that, it is inadequate for the systems which are modeled with possible signs. For the elimination of disturbances modeled with definite or stochastic signs, prediction method can be utilized. In the elimination process of disturbances by prediction method; Ideal, Wiener and Kalman methods have been handled. In simulations made for definite and stochastic signs, positive results have been achieved. In Ideal prediction method there occurs a loss due to causality principle. In Wiener and Kalman method better results are taken due to the utilization from the features of the sign. Wiener prediction is achieved by utilization of the signs of the input-output. Kalman method bases itself on Wiener method. They differ in that, in Kalman method the prediction is achieved by utilization from the situation equations. For proposed methods, Kalman method has been observed to be appropriate way to apply. For Wiener and Kalman methods to be applied it is

necessary to know the statistical features of the sign. For the signs, the statistical features of which are not known, Ideal prediction method may be used. At the end of the study, effects of the disturbances entering into the system, which can be modeled by definite or possible signs, have been eliminated.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Kontrol ve kontrol sistemleri üretin hızını ve kalitesini artıran, yaşamı kolaylaştıran kavramlar olarak tanımlanabilir. Evlerde kullanılan fırında, çamaşır makinesinde, sokaktaki trafik lambalarında, araçlardaki otomatik klimalarda, fabrikaların üretim bantlarındaki sistemlerde bu kavramlardan yararlanılmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte kontrol uygulamalarının önemi artmakta ve hayatımızın değişmez bir parçası olmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak kontrol kavramı ve kontrol sistemleri ele alınmıştır. Sistemlerde kullanılan öğeler, kavramlar tanımlanıp, açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol sistemleri örnek benzetimlerle gözlemlenmiştir. Bu benzetimlerde kullanılan transfer fonksiyonlarının nasıl oluşturulduğuna değinilecektir. Üçüncü bölümde kontrol uygulamalarında karşılaştığımız ve sistem üzerinde olumsuz etkileri olan bozucu kavramı incelenmiştir. Bozucu türleri sistem üzerindeki etkilerine göre sınıflandırılacak ve benzetimler ile sistem üzerindeki etkileri incelenecektir. Buraya kadar ele alınan konularda kontrol sistemi ve sistem üzerindeki bozucu etkileri incelenmiştir. Bozucu etkilerini ortadan kaldırma yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanmak için gerekli şartlar ele alınarak bozucu türleri için hangi yöntemlerin kullanılması gerektiği gösterilmiştir. Çözüm yöntemleri arasında belirgin yada olası bozucular için geçerli olan öngörü yönteminde ideal, Wiener ve Kalman'ın geliştirdiği optimal öngörücüler incelenecektir.

Bu çalışmada bir kontrol sisteminin elemanlarını, sistemlerde karşılaşılabileceğimiz bozucu türlerini ve bu türler için etkilerin giderilme yöntemleri hakkında bilgiye sahip olunacaktır. Çalışmanın sonunda sistemlerdeki belirgin yada olası bozucu etkilerinin ortadan kaldırılabilceği gösterilmiştir.

## 2. KONTROL VE KONTROL SİSTEMİNİN TANIMI

### 2.1 Kontrol ve Sistem Nedir?

Bir sistemin davranışının istenildiği şekilde değiştirilmesine yönelik çalışmalara kontrol, davranışları kontrol edilmek istenen sistemlere kontrol sistemleri denir(1).

#### Tanım 2.1

İstenilen bir görevi yapmak üzere aralarında belirli ilişkiler ve etkileşimler bulunan nesnelere ve donanımların bir bütün oluşturacak şekilde bütünleşik kombinasyonuna sistem denir(1).



Şekil 2.1: Kontrol Edilen Sistem

#### Tanım 2.2

Sistem elemanlarının ve sistemlerin birbirleri ile etkileşmesini sağlayan her türlü ölçülebilir büyüklüğe işaret denir(1).

Uygulamada karşılaştığımız sistem ve işaretlere örnekler verilecek olursa; Elektriksel sistemler için elektrik devresini, bu sistemin olası işaretlerini de gerilim ve akım olarak belirtmek mümkündür. Mekanik sisteme de bir araba, bu sistemin işaretlerine de arabanın konumu, hızı ve fren, gaz pedallarının konumunu örnek verilebilir.

### 2.2 Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri kontrol edilen sistem ve kontrol elemanı olmak üzere iki ana kısımdan oluşur(2).

#### Tanım 2.3

Çıkışları kontrol edilmek istenen sisteme kontrol edilen sistem denir(2).

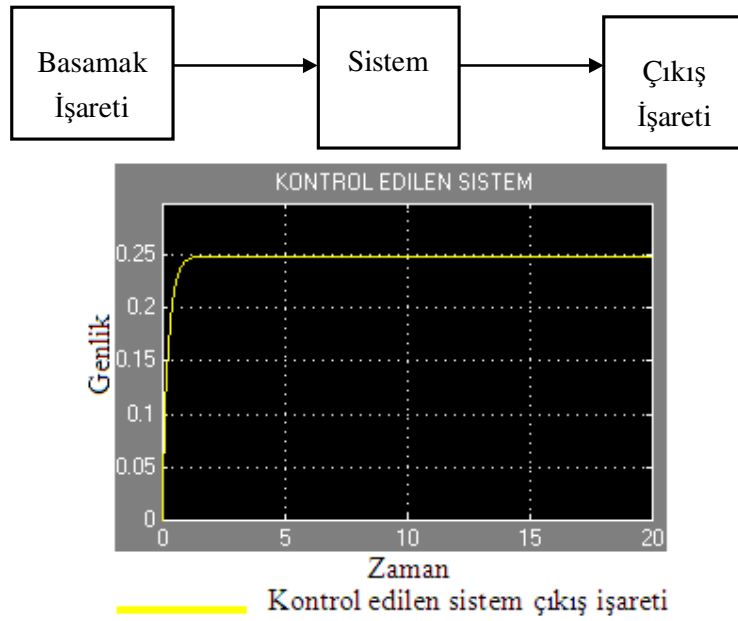
## Tanım 2.4

Kontrol edilen sistemin verilen amaca yönelik çıkışları üretmesi için gerekli olan kontrol sistemlerini üreten elemanlar topluluğuna kontrol elemanı denir(2). Kontrol elemanı genellikle elektronik devre ya da bir program olabilir.

## Örnek 2.1:

Transfer fonksiyonu

olan sistemin basamak işaretine verdiği yanıt gözlemlenmektedir.



Şekil 2.2: Kontrol edilen sistem ve çıkış işareti

## 2.3 Kontrol Yöntemleri

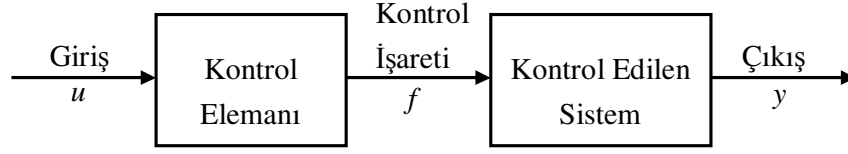
Matematik modeli belirlenen bir sistemi kontrol etmek için kontrol yöntemi iki ana grupta toplanabilir.

- Açık Çevrim Kontrol Sistemi
- Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi

### 2.3.1 Açık Çevrim Kontrol Sistemi

Kontrol işareti çıkış işaretinden etkilenmeyen sistemlere açık çevrim kontrol sistemleri denir(1). Açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı şekil 2.3'de

gösterildiği gibi kontrol sisteminin iki temel elemanı kontrol elemanı ve kontrol edilen sistemden oluşur.



**Şekil 2.3: Açık çevrim kontrol sistemi**

Açık çevrim kontrol sisteminin temel olarak çalışma prensibi aşağıdaki gibi açıklanır:

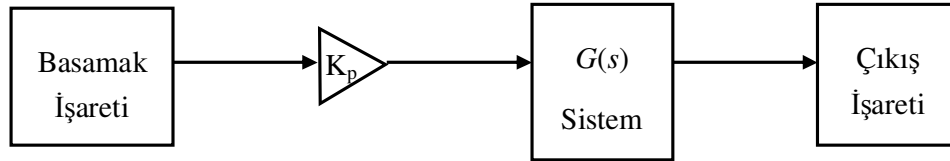
Sistemde  $u$  giriş işareti kontrol elemanına uygulanır. Kontrol elemanın çıkışında sistemin daha önceden belirlenen duruma göre çalışmasını sağlayacak  $f$  kontrol işareti üretilir ve kontrolü yapılan sistemi sürer. Bu tür kontrol sistemlerine örnek olarak çamaşır makinesi, ekme kızartma makinesi yada trafik lambalarını vermemiz mümkündür. Bütün bu örneklerde sistemi etkileyen durum kullanıcı tarafından öngörülerek belirlenmiştir. Ancak hiçbir açık çevrim kontrol sisteminde, sistem parametrelerindeki değişimler yada sisteme etkiyen bozucular nedeniyle sistem çıkışında oluşabilecek olan değişiklikler düzeltilemez.

**Örnek 2.2:**

Transfer fonksiyonu

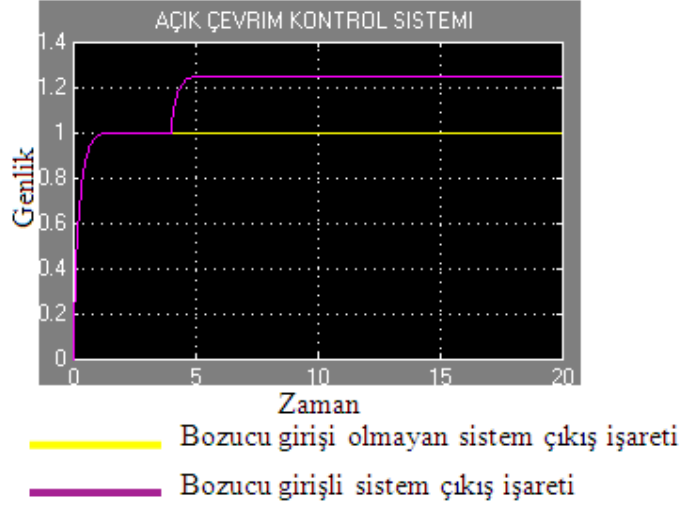
$$G(s) = \frac{1}{s + 4}$$

olan kapalı çevrim sistemin basamak cevabı gözlemlenmektedir. Sistemin kontrolü için oransal P kontrolörü kullanılmıştır. Aynı zamanda açık çevrim sisteme bozucu bir işaret girdiğinde sistemin nasıl etkilendiği gözlemlenmektedir.



**Şekil 2.4 (a): Açık çevrim kontrol sisteminde bozucu etkisini gösteren blok diyagramı**



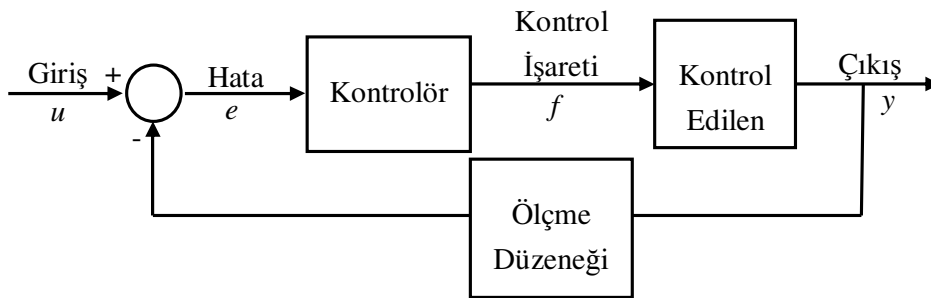


**Şekil 2.4 (b): Açık çevrim kontrol sisteminde bozucu etkisi**

Şekil 2.4'den de anlaşılacağı gibi sisteme daha sonradan herhangi bir bozucu bulmadığı durumda sistem çıkışı önceden parametrelere göre çalışmasını sürdürmektedir. Ama sisteme  $t=4$ . saniyede basamak biçiminde bozucu işareti uygulandığında açık çevrim sistemin bozucu işaretine karşı tepkisiz kaldığı görülmektedir.

### 2.3.2 Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi

Sistemi etkileyen kontrol işaretinin sistem çıkışının da göz önüne alınarak üretildiği kontrol sistemlerine kapalı çevrim kontrol sistemleri denir. Sistem çıkışının sistem girişine yansıtılması işlemine geri besleme denir.

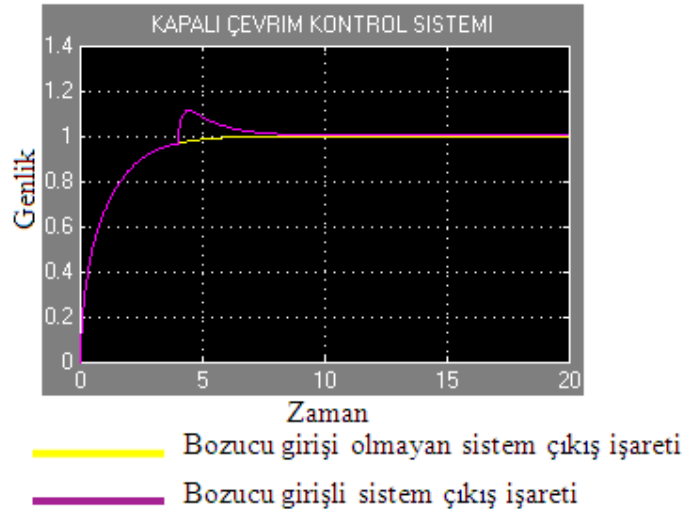
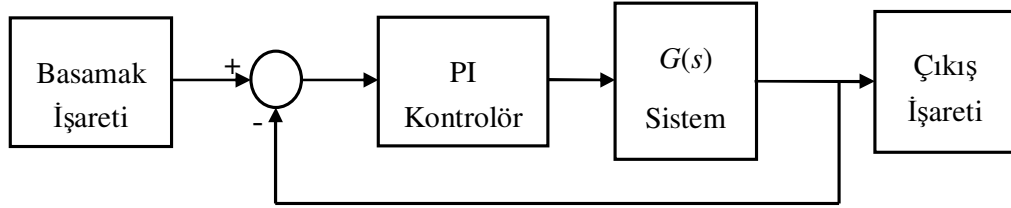


**Şekil 2.5: Kapalı çevrim kontrol sistemi**

Daha hatasız bir kontrol elde etmek için  $y$  kontrol edilen işaret geri beslenerek referans işaretle karşılaştırılmalıdır. Giriş çıkış işaretleri farkı ile orantılı bir kontrol işareti hatayı gidermek için sisteme uygulanmalıdır. Bu şekilde açık çevrimli kontrol sistemlerinin hatasız olarak kontrolü yapılabilir.

### Örnek 2.3:

Aşağıda transfer fonksiyonu verilen kapalı çevrim sistemin basamak cevabı şekil 2.6'da gözlemlenmektedir. Sistemin kontrolü için PI kontrolörü kullanılmıştır.



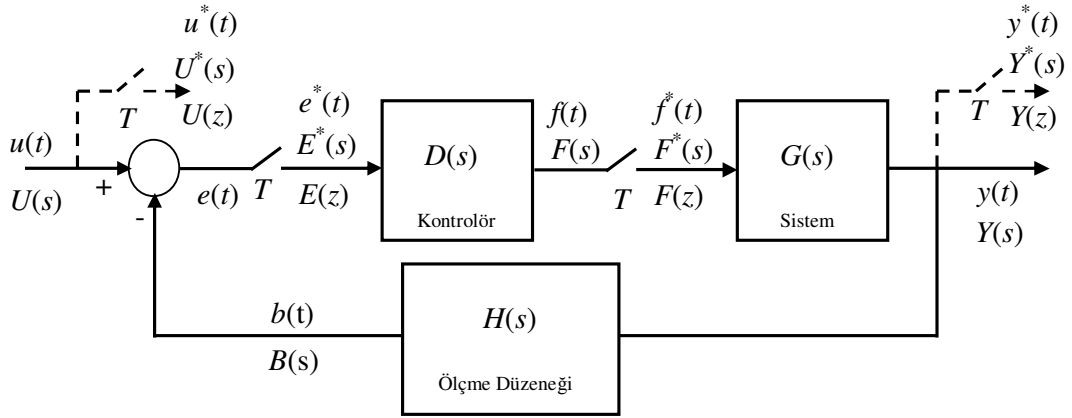
**Şekil 2.6: Kapalı çevrim kontrol sisteminde bozucu etkisi**

Kapalı çevrim kontrol sisteminde de sisteme  $t=4$ . saniyede basamak biçiminde bozucu işareti uygulanmıştır. Açık çevrimden farklı olarak kapalı çevrimde sistem bozucu etkisini kısa bir zamanda ortadan kaldırmıştır. Bunun sebebi sistem çıkışının giriş işareti ile karşılaştırıp meydana gelen hata işaretinin ölçülmesi ve kontrolör tarafından sistemi süren  $f$  kontrol işaretini değiştirerek sistem çıkışını istenen değere göre ayarlamasıdır.

## 2.4 Matematiksel Modeller

Modeller gerçekçiliğin sadeleştirilmiş şeklidir. Bir sistemin dinamik karakteristiğinin matematiksel tanımına matematiksel model denir(3). Dinamik sistemin çözümlenmesinde ilk adım sistemin matematiksel modelinin çıkarılmasıdır. Sisteme ait uygun bir matematiksel modelin elde edilmesi çözümlenmenin en önemli kısmıdır.

Bu kontrol sistemlerinin matematik modelleri, zaman domeninde, eğer sistem parametreleri zamanla değişmiyor ve doğrusal ise normal diferansiyel denklemlerle yada durum denklemleri ile ifade edilir. Doğrusal zamanla değişmeyen bu kontrol sistemleri  $s$  domeninde Laplace dönüşümü ve transfer fonksiyonları ile frekans  $\omega$  domeninde Fourier dönüşümü ve transfer fonksiyonları ile modellenir. Sürekli kontrol işaretleri ile çalışan kontrol sistemlerinin analiz ve sentezi anılan bu model aracılığı ile yapılır. Ayrık kontrol sistemlerinin matematik modellerinin elde edilmesinde fark denklemleri kullanılır. Sürekli kontrol sistemlerinin  $s$  bölgesi analizine benzer şekilde ayrık kontrol sistemlerinin analizi  $z$  dönüşümü transfer fonksiyonu ile verilir.



**Şekil 2.7: Kontrol sistemindeki işaretlerin gösterimi**

Şekil 2.7’de kullanılan kısaltmaları aşağıda listelenmiştir.

$T$ : Örnekleme periyodu

$u(t)$ ,  $U(s)$ : Referans İşareti

$e(t)$ ,  $E(s)$ : Hata İşareti

$f(t)$ ,  $F(s)$ : Kontrol İşareti

$y(t)$ ,  $Y(s)$ : Çıkış İşareti

$b(t)$ ,  $B(s)$ : Geri Besleme İşareti

$u^*(t)$ ,  $U^*(s)$ ,  $U(z)$ : Örneklenmiş Referans İşareti

$e^*(t)$ ,  $E^*(s)$ ,  $E(z)$ : Örneklenmiş Hata İşareti

$f^*(t)$ ,  $F^*(s)$ ,  $F(z)$ : Örneklenmiş Kontrol İşareti

$y^*(t)$ ,  $Y^*(s)$ ,  $Y(z)$ : Örneklenmiş Çıkış İşareti

### 2.4.1. Durum Denklemleri

Diferansiyel denklemlerin çözümünde, diferansiyel denklemin derecesi kadar birinci mertebeden diferansiyel denklemden yararlanılır. Birinci mertebeden diferansiyel denklemin çözümü daha kolaydır. Kontrol sistemlerinin incelenmesinde birinci mertebeden denklemler kullanılır.

Genelde  $n$ ' inci mertebeden diferansiyel denklem

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = f(t) \quad (2.1)$$

şeklinde yazılır ve  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$  katsayıları  $y(t)$ ' nin bir fonksiyonu olmadığı sürece doğrusal diferansiyel denklem olarak adlandırılır.

$$x_1 = y(t)$$

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \quad (2.2)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = x_3(t)$$

⋮

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = -a_0 x_1(t) - a_1 x_2(t) - \dots - a_{n-2} x_{n-1}(t) - a_{n-1} x_n(t) + f(t)$$

Kontrol sistem kuramında (2.2) birinci mertebeden diferansiyel denklem takımına durum denklemleri ve  $x_1, x_2, \dots, x_n$  değişkenlerine durum değişkenleri denir.

### 2.4.2 Fark Denklemleri

Sayısal kontrolörlerin kullanıldığı kontrol sistemlerinde, sayısal ve zamanda ayrık işaretleri ilişkilendiren denklemlerden yararlanmak gerekir. Durum denklemleri sürekli sistemleri belirlediği gibi, fark denklemleri de ayrık verili sistemleri belirlerler.

Genelde  $n$ ' inci mertebeden sabit katsayılı doğrusal bir fark denklemi

$$y(k+n) + a_{n-1} y(k+n-1) + \dots + a_1 y(k+1) + a_0 y(k) = f(k) \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada bağımsız değişkenin zaman olması nedeniyle  $i=k, k+1, \dots, kn$  için  $y(i)$  bağımlı değişken  $y'$  nin  $i$  anındaki değerini ifade eder. Genelde bağımsız değişken herhangi bir büyüklük olabilir. Sürekli sistemlerde olduğu gibi yüksek mertebeden fark denklemleri de birinci mertebeden fark denklemleri yada durum denklemleri ile ifade edilebilir. (2.3) denklemlerinde eğer

$$x_1(k) = y(k)$$

$$x_2(k) = x_1(k + 1) = y(k + 1)$$

$$\vdots \tag{2.4}$$

$$x_{n-1}(k) = x_{n-2}(k + 1) = y(k + n - 2)$$

$$x_n(k) = x_{n-1}(k + 1) = y(k + n - 1)$$

olarak tanımlanır ve en yüksek mertebeden terim diğer terimler cinsinden (2.5) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$x_n(k + 1) = -a_0x_1(k) - a_1x_2(k) - \dots - a_{n-1}x_n(k) + f(k) \tag{2.5}$$

İlk durum denklemi, (2.4) ilişkisindeki son  $n-1$  denklemden ve sonuncusu ise (2.5) eşitliğinden elde edilir. Böylece  $n$  adet durum denklemi

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{2.6}$$

vektör-matris biçiminde yazılırsa,  $(n \times 1)$  boyutlu durum vektörü

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

ile ifade edilir.  $A$  ve  $B$  katsayı matrisleri

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

şeklinde ve  $u(k) = f(k)$  olarak elde edilir.

## 2.5 Transfer Fonksiyonları

Kontrol kuramında kontrol edilen sistemin analizi önemli bir konudur. Bu nedenle kontrol edilen sürecin matematiksel modellenmesine dikkat edilmelidir. Kontrol kuramında doğrusal sistemlerin giriş ve çıkış bağıntıları transfer fonksiyonları ile yapılır. İlk olarak sürecin dinamik özelliklerini belirleyen bir değişken takımı tanımlamak gerekir.

Transfer fonksiyonu kavramını kullanabilmek için, sistemin doğrusal olması yada doğrusallığın geçerli olduğu bir bölgede çalışması gerekmektedir(2).

## 2.5.1 Doğrusal Sistemlerde İmpuls Yanıtı ve Transfer Fonksiyonu

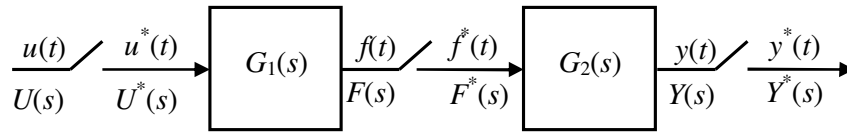
Doğrusal sistemleri modellemede giriş çıkış arasındaki bağıntıyı belirtmek için transfer fonksiyonlarının kullanılacağı daha önce belirtilmiştir. Doğrusal sistemlerin girişine impuls fonksiyonu uygulandığında sistemin transfer fonksiyonundan yararlanarak sistem özellikleri hakkında bilgi edilebilir.

### 2.5.1.1 İmpuls Yanıtı

Doğrusal bir sistemde giriş işaretinin  $u(t)$  ve çıkış işaretinin  $y(t)$  olduğu kabul edilirse sistemin girişine birim impuls fonksiyonu  $\delta(t)$  uygulandığında, çıkışta elde edilen impuls yanıtı  $g(t)$  ile belirlenebilir. Doğrusal sistemin darbe işaretine yanıtı hakkında transfer fonksiyonundan yararlanarak bilgiye sahip olunursa sistemin herhangi bir  $u(t)$  girişine yanıtı  $y(t)$ , transfer fonksiyonundan yararlanılarak belirlenebilir.

#### Örnek 2.4:

Şekil 2.8'de gösterilen açık çevrim sistem için transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır.



Şekil 2.8: Açık çevrim kontrol sisteminde işaretler

$$F(s) = G_1(s).U^*(s)$$

$$Y(s) = G_2(s).F^*(s)$$

olarak yazılır.  $U^*(s)$  ile  $Y^*(s)$  arasındaki bağıntıyı bulmak için  $F^*(s)$ ' i ikinci denklemde yerine yazarak;

$$Y^*(s) = G_1^*(s).G_2^*(s).U^*(s)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $z$  dönüşümleri yapıldığında

$$Y(z) = G_1(z).G_2(z).U(z)$$

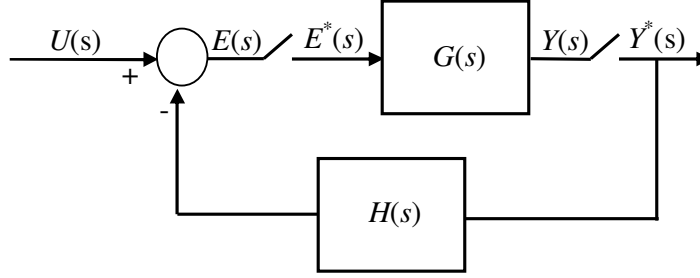
elde edilir. Açık çevrim sistemin darbe transfer fonksiyonu

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = G_1(z).G_2(z)$$

olarak bulunur.

### Örnek 2.5:

Şekil 2.9'de gösterilen kapalı çevrim sistem için transfer fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır.



Şekil 2.9: Kapalı çevrim kontrol sisteminde işaretler

$$E(s) = U(s) - H(s).Y^*(s)$$

$$Y(s) = G(s).E^*(s)$$

Bu ifadelerin yıldız dönüşümü yapılırsa;

$$E^*(s) = U^*(s) - [H^*(s).Y^*(s)]$$

$$Y^*(s) = G^*(s).E^*(s)$$

olur.  $E^*(s)$  ifadesi ikinci denklemde yerine yazıldığında;

$$Y^*(s) = G^*(s)[U^*(s) - H^*(s).Y^*(s)]$$

elde edilir ve bu ifade düzenlendiğinde

$$Y^*(s) = \frac{G^*(s).U^*(s)}{1 + G^*(s).H^*(s)}$$

olarak elde edilir. Kapalı çevrim sistem için transfer fonksiyonu

$$G_t^*(s) = \frac{Y^*(s)}{U^*(s)} = \frac{G^*(s)}{1 + G^*(s).H^*(s)}$$

olarak bulunur.

#### 2.5.1.2 Transfer Fonksiyonunun Diferansiyel Denklemler ile İfade Edilmesi

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistemin başlangıç koşulları sıfır olması halinde, transfer fonksiyonu sisteme uygulanan impuls yanıtının Laplace dönüşümü olarak tanımlanır(2). Giriş işaretinin  $u(t)$ , çıkış işaretinin  $y(t)$  ve impuls yanıtının  $g(t)$  olduğu tek giriş çıkışlı sistemin transfer fonksiyonunun  $G(s)$  olduğu kabul edilirse;

Bu durumda  $G(s)$

$$G(s) = L[g(t)] \quad (2.9)$$

olarak tanımlanır.

$G(s)$  transfer fonksiyonu,  $u(t)$  giriş ve  $y(t)$  çıkış işaretinin Laplace dönüşümü  $U(s)$  ve  $Y(s)$  olur ve

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.10)$$

ilişkisini sağlar.

Transfer fonksiyonunun impuls yanıtı cinsinden bulunması dışında, doğrusal bir sistem için diferansiyel denklemlerden yararlanarak transfer fonksiyonunun bulunması daha kolaydır(2). Doğrusal bir sistemin giriş-çıkış ilişkisinin sabit katsayılı  $n$ 'inci mertebeden olan (2.11) diferansiyel denklemi ile verildiği kabul edilirse:

$$\begin{aligned} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Sistemin yanıtı başlangıç koşulları belirlenmiş ise (2.11) denklemi çözülerek elde edilebilir. Kontrol sistemlerinin benzetimlerinde genellikle transfer fonksiyonlarından yararlanır. Bu sebepten dolayı bulunun diferansiyel denklemlerden yararlanarak transfer fonksiyonu hesaplanmalıdır(2,3).

Sistemin transfer fonksiyonunu bulmak için başlangıç koşulları sıfır kabul edilerek diferansiyel denklemi (2.11) ile verilen doğrusal bir sistemin transfer fonksiyonunu elde etmek için, denklemin her iki tarafına Laplace dönüşümü uygulanır. Bu durumda

$$(s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0)Y(s) = (b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0) \quad (2.12)$$

olarak elde edilir. Sistem girişi  $u(t)$  ve çıkışı  $y(t)$  arasındaki transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (2.13)$$

olarak bulunur.



### 3. BOZUCULAR

Bir sistemin girişleri arasında kumanda edilemeyen ve değişimi önceden kestirilmeyen girişlere bozucu denir. Bozucu, sistemin çıkış değerini kötü yönde etkilemeye çalışan bir işarettir. Eğer bozucu sistem içerisinden üretilirse dahildir. Sistem dışından üretiliyorsa dış bozucu denir.

#### 3.1 Bozucuların Modellenmesi

Bozucular kontrol sisteminin tasarımının önemli bir bölümünü oluşturur. Bu sebepten ötürü bozucuları sınıflandırmak ve bu sınıflamaya uygun bir şekilde bozucuları modellemek, sistemdeki etkilerinin analizi yapılırken kolaylık sağlar. Burada ele alınan belirgin modeller dışında uygulamada karşılaşılan daha karmaşık bozucuların modellenmesi için olası kontrol kavramı ele alınacaktır.

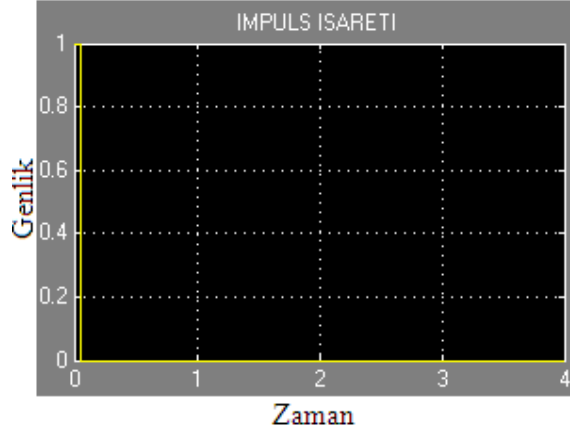
##### 3.1.1 Belirgin İşaretler ile Modellenmesi

Bu bölümde kontrol sistemlerinde karşılaşılan belirgin bozucular için kullanılan modellemeler yapılmıştır. Belirgin bozuculara örnek olarak basamak, rampa, sinüs ve darbe biçimli modeller verilebilir. Bu işaretlerin sadece başlangıç noktalarında belirsiz elemanları mevcuttur. Bu noktalar haricinde kararlıdır.

Belirgin modeller giriş işareti impuls olan ve aşağıdaki transfer fonksiyonlarına sahip sistemlerin çıkışları olarak da şekil 3.1’de gösterildiği gibi elde edilebilir.

İmpuls işareti için,

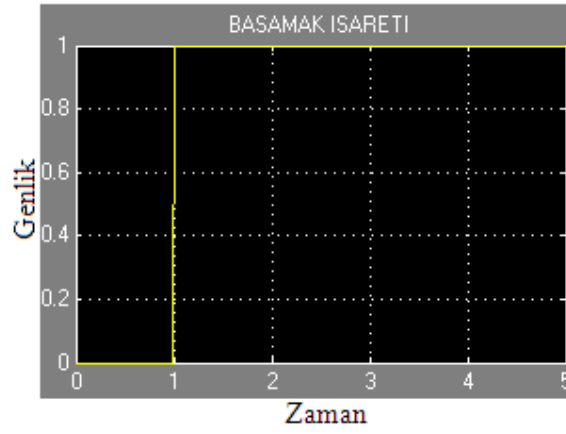
$$G(s) = 1$$



Şekil 3.1 (a): Impuls işareti

Basamak işareti için,

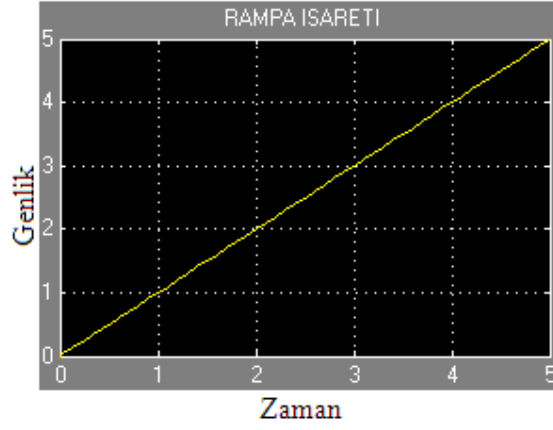
$$G(s) = \frac{1}{s}$$



Şekil 3.1 (b): Basamak işareti

Rampa işareti için

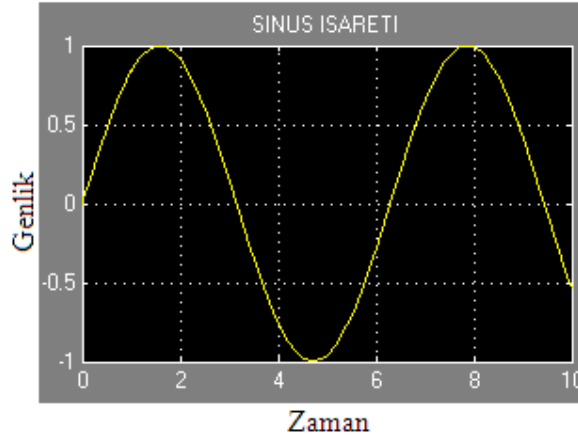
$$G(s) = \frac{1}{s^2}$$



**Şekil 3.1 (c): Rampa işareti**

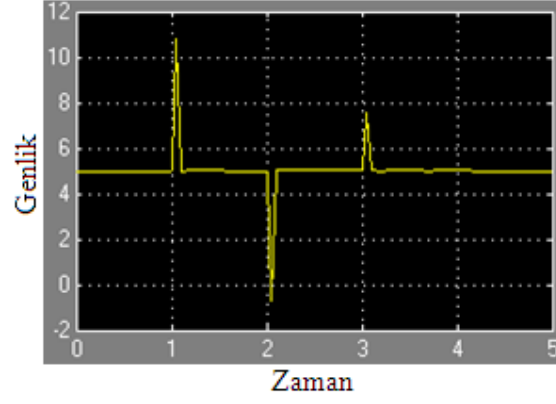
Sinüs işareti için

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + \omega^2}$$

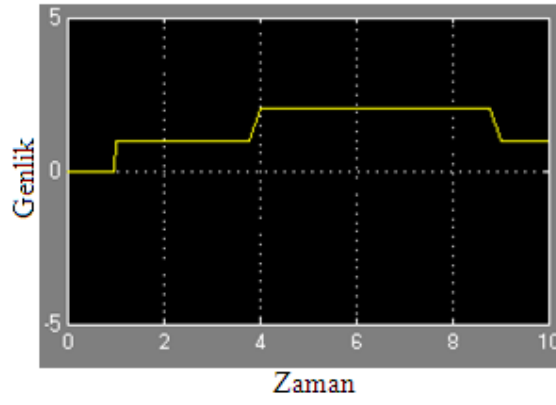


**Şekil 3.1 (d): Sinüs işareti**

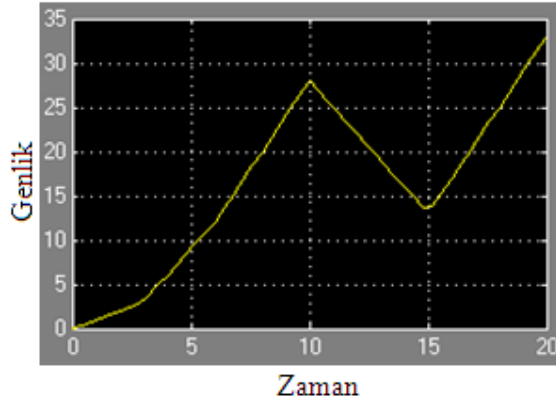
Belirgin bozucu modellerinden yararlanarak daha karmaşık bozucular elde etmek de mümkündür. Şekil 3.2’de gösterilen daha karmaşık bozucular ise belirgin bozucuların birbirleri ile toplanması, çıkarılması, genlik ve frekanslarının değiştirilmesi ile elde edilmişlerdir.



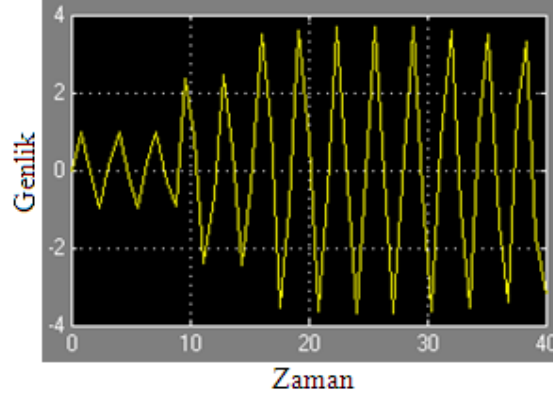
Şekil 3.2 (a): Basamak ve impuls işaretinin toplanması ile oluşturulan model



Şekil 3.2 (b): Basamak işaretinin genliğinin değiştirilmesi ile oluşturulan model



Şekil 3.2 (c): Rampa İşaretlerinin toplanması ile oluşturulan model



**Şekil 3.2 (d): Sinüs işaretinin genlik ve frekansının değiştirilmesi ile oluşturulan model**

### 3.1.2 Olasıl İşaretler ile Modellenmesi

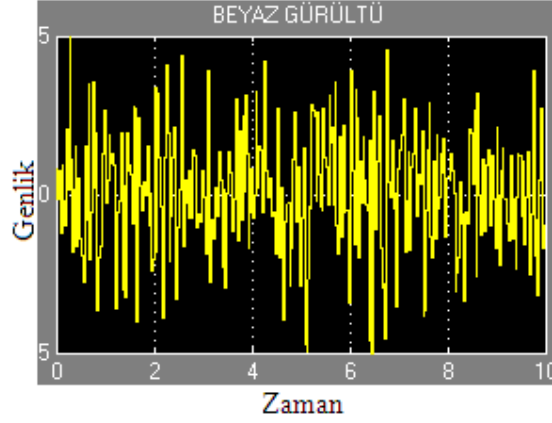
Kontrol sistemlerinde gürültü kavramı belirgin işaretler ile modellenemeyen, sistemler üzerinde olumsuz etkileri olan işaretler olarak tanımlanabilir. Veri iletiminde bilgi kaybına yol açan gürültü kavramı ile radyo frekanslarında parazit olarak karşılaşılmaktadır. Gürültü analitik işaretler ile modellenemediğinden dolayı işaretin genlik zaman karakteristiği gibi özelliklerinden yararlanarak belirlenebilir. Eğer işaret durağan ise yani işaretin özellikleri tüm zamandan aynı ise işaretin özelliğini tespit etmek mümkündür. Bunu yaparken ortalama değer, standart sapma ve varyans gibi kavramlardan yararlanılabilir(4). Eğer genlik dağılımı normal ise, ortalama değer  $m$  standart sapma  $\sigma$  ile verilir. Durağan bir işaretin  $\phi(\omega)$  ile gösterilen spektral yoğunluk fonksiyonundan yararlanarak, değeri merkezi  $\omega$ , band genişliği  $\Delta\omega$  olan dar bir bantta işaretin ortalama gücü

$$\frac{1}{2\pi} \phi(\omega) \Delta\omega \quad (3.1)$$

ile gösterilir. Spektral yoğunluk fonksiyonu sabit ve ortalama gücü

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\omega) d\omega \quad (3.2)$$

olan işarete beyaz gürültü denir. Bu işaretin gücü bütün frekans değerleri için eşittir. Belirgin işaretlerden yararlanılarak elde edilen bozucu modelleri için yapılan uygulama gürültü kavramı içinde uygulanabilir.



**Şekil 3.3: Beyaz gürültü**

### 3.1.2.1 Beyaz Gürültü

Beyaz gürültü belli bir band genişliğinde sabit spektral yoğunluk fonksiyonuna sahip durağan bir sürece sahiptir. Beyaz gürültünün genliği  $A$  kabul edilirse;

$$S_{wn}(j\omega) = A \quad (3.3)$$

olur. Beyaz gürültünün öz ilinti fonksiyonu

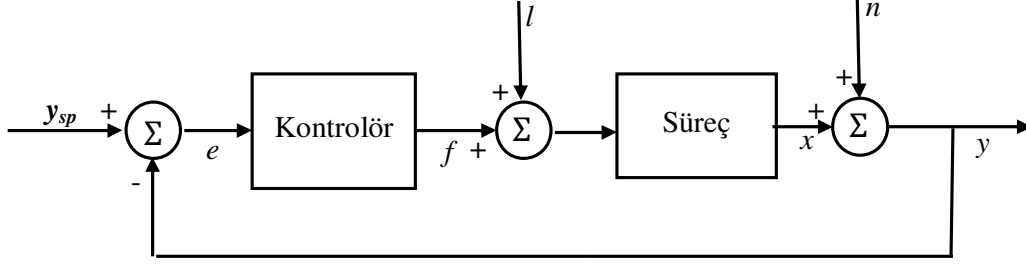
$$R_{wn}(\tau) = A\delta(\tau) \quad (3.4)$$

Beyaz gürültü özelliklerinin incelenmesi çok zor olduğundan dolayı bazı matematiksel kabuller yapılması yararlı olacaktır. Bundan dolayı beyaz gürültünün spektral genliğinin bütün frekanslar için sahip olduğu kabul edilirse, süreç sonsuz varyansa sahip olur(8). Diğer bir kolaylıkta beyaz gürültünün sınırlı bir bantta olduğu kabulüdür. Bu şekilde belirlenen frekans bandında sabit bir spektral genliğe ve belli bir oranda örnekleme yapıldığında sıfır öz ilinti fonksiyonuna sahip olur. Yapılan bu kabuller analizi kolaylaştırdığından dolayı sınırlı bir banttaki beyaz gürültü kullanılır.

Beyaz gürültü konusunda diğer bir kavramda beyaz dizi konusudur. Beyaz dizi sıfır ortalamaya sahip, ortak ilintisiz ortak değişkenler olarak tanımlanabilir. Dizinin bütün elemanları sıfır ortalamaya sahip ve dizinin diğer elemanları ile ilintisizdir. Eğer rasgele değişkenler normal ise Gauss Beyaz dizisi denir.

### 3.2 Bozucuların Sınıflandırılması

Kontrol sistemlerinde bozucular genellikle mevcuttur. İlk olarak bozucuların özellikleri belirlenmeli ve sınıflandırılmalıdır. Bu çalışmada bozucular referans işareti değişimleri ( $y_{sp}$ ), yük bozucuları ( $I$ ) ve ölçüm gürültüleri ( $n$ ) ve modellenemeyen dinamikler olarak üç grupta toplanmıştır.



**Şekil 3.4: Kontrol sisteminde bozucuların gösterimi**

### 3.2.1 Referans İşareti Değişimleri

Kontrol sistemlerinde sistem çıkışının istenilen değere ulaşması amaçlanır. Bu nedenle kontrol döngüsünde sistem çıkışındaki işaret sistemin referans işareti ile karşılaştırılır ve oluşan hata kontrolör yardımı ile giderilmeye çalışılır. Süreç kontrolünde birçok sistem sabit referans işaretine sahiptir. Referans işaret belli zaman ve durumlarda çalışma koşullarından ötürü değişebilir. Referans işaret nadiren değişen kısmen belirli bir sabittir. Bundan dolayı referans işareti basamak fonksiyonu olarak belirlemek uygun olacaktır.

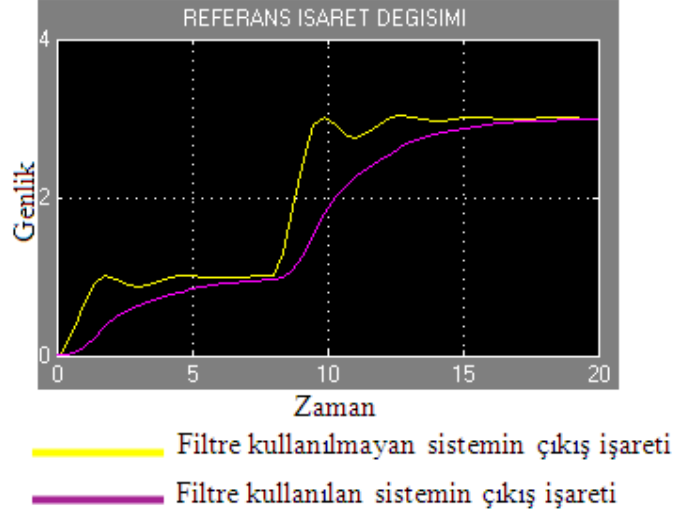
Referans işareti kontrolöre girmeden önce alçak geçirgen filtreden geçirilirse basamak işaretinin değişimden kaynaklanan geçişinin daha yumuşak olması sağlanır(4,6). Bu özellik birçok kontrol sisteminin tasarımında ani referans işareti değişiminden sonra geniş aşımalar veren yük bozucularının giderilmesinde kullanışlıdır.

#### Örnek 3.1

Referans işareti birim basamak fonksiyonu olan transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 4}$$

ile verilen sistemde referans işareti  $t=15$ . saniyede üç katına çıktığında sistem tepkisi ile aynı sistemde referans işareten sonra filtre uygulandığında sistemin bu değişime verdiği tepki arasındaki fark şekil 3.5’de gösterilmiştir.

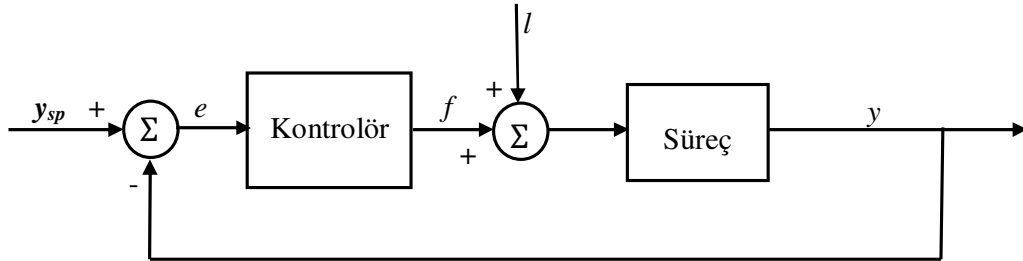


**Şekil 3.5: Referans işaretteki değişimin filtre kullanılması ile yumuşatılması**

### 3.2.2 Yük Bozucuları

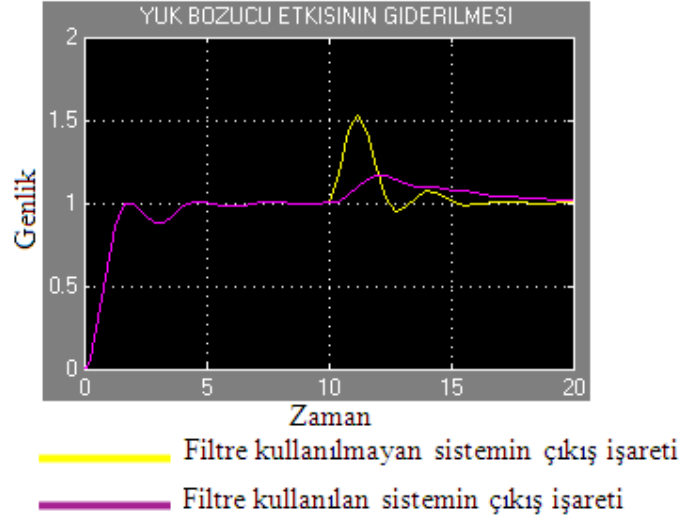
Kontrol sistemlerinde en yaygın karşılaşılan bozuculardır. Bir sistemde motordaki anın yük değişimi buna örnek verilebilir. Yükteki değişim motorun hızını değiştirerek sistem çıkışını etkilemektedir.

Genelde düşük frekanslı bozucular olarak meydana gelir. Bu yapılarından dolayı yük bozucuları modellenirken basamak işareti şeklinde sisteme eklenir. Bozucu etkisini ortadan kaldırmak için bozucunun sisteme girdiği yere alçak geçiren filtre konulabilir.



**Şekil 3.6 (a): Yük bozucu etkisinin filtreleme ile giderilmesinin blok diyagramı**



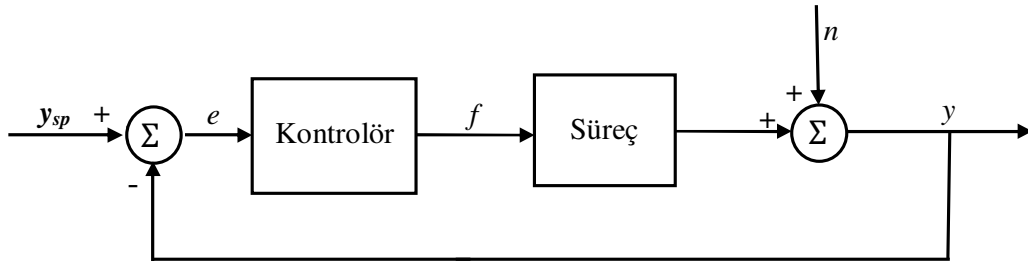


**Şekil 3.6 (b): Yük bozucu etkisinin filtreleme ile giderilmesi**

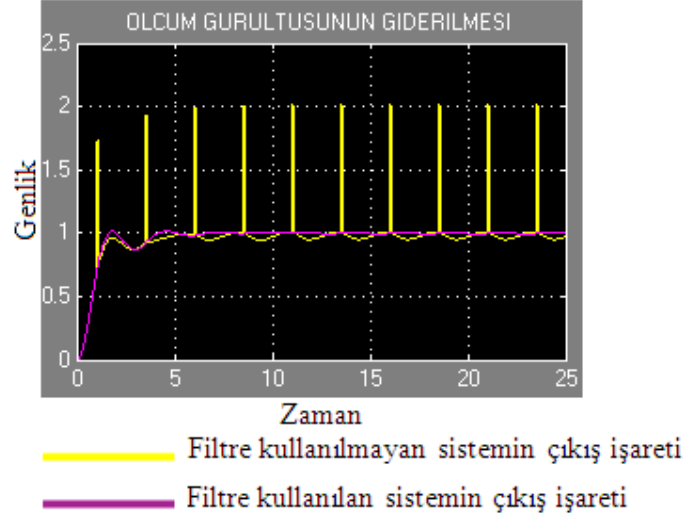
### 3.2.3 Ölçüm Gürültüleri

Ölçüm gürültüleri sistemlerde algılayıcılardan kaynaklanan hatalar olarak tanımlanabilir. Sistemin ürettiği işaretin büyüklüğünün ölçülmesi sırasında meydana gelir. Sistemdeki algılayıcılarının kalibrasyonun etkisi çok büyüktür. Yüksek frekanslı dalgalanma yada düşük frekanslı kalibrasyon hatası şeklinde farklı yapılarda olabilirler(4,6). Yüksek frekanslı işaret olarak eklenmesi ve modellenmesi gerektiğinden dolayı sistem çıkışına impuls işareti olarak eklenmesi uygun olacaktır.

Ölçüm gürültüleri sürecin durumu hakkında herhangi bir bilgi içermediğinden dolayı filtrelenebilir. Ölçülen işarettaki yüksek frekanslı bileşenler kontrolör tarafından kuvvetlendirilebilir. Benzetimde ölçüm hatalarının filtreleme yöntemi ile giderildiği gösterilmektedir.



**Şekil 3.7 (a): Ölçüm gürültüsünün filtreleme ile giderilmesinin blok diyagramı**



**Şekil 3.7 (b): Ölçüm gürültüsünün filtreleme ile giderilmesi**

### 3.2.4 Modellenemeyen Dinamikler

Kontrol edilen süreçlerin ve bu süreçlerde karşılaşılan bozucular için belirgin modellerin yanında bu gruba alınamayan durumlarda vardır. Doğrusal olmama durumu, parametrik ve süreç değişkenleri buna örnek verilebilir(4).

#### 3.2.4.1 Doğrusal Olmama Durumu

Kontrolü yapılan birçok süreç doğrusal değildir. Farklı çalışma noktalarında farklı dinamiklere sahip algılayıcılardan elde edilen sonuçlar buna örnek verilebilir. Doğrusal olan model, doğrusal olmayan sürecin geçerli bir çalışma noktasındaki frekans cevabının analizi ile elde edilir. Bunun anlamı kontrolör sadece çalışma noktasında düzgün olarak çalışacak şekilde ayarlanmıştır.

Bu sorunu aşmak için kontrolör en kötü durum düşünülerek ayarlanır.

#### 3.2.4.2 Parametrik Modeller

Doğrusal süreçlerde basamak yanıtı süreç dinamikleri hakkında bilgileri gösterir. Aynı şekilde Nyquist eğrisi yada frekans yanıtından yararlanarak süreç dinamikleri hakkındaki bilgiler elde edilebilir. Bu grafiksel tanımlamalardan parametrik modellere geçerken bilgiler kaybolabilir.

Basamak yanıtının analizine dayanan parametrik modeller düşük frekanslarda doğrudur. Yüksek frekanslarda ise daha belirsiz olurlar.

### **3.2.4.3 Süreç Değişkenleri**

Süreç dinamikleri zamanla değişiyor ise yapılan modelleme daha sonra uygun olmayabilir. Doğrusal olmayan sistemlerde yapıldığı izlenen yol burada da geçerli olur. Bu sorunu gidermek için kontrolör en kötü duruma göre ayarlanmalıdır. Kazanç planlaması, eğer zaman değişimleri ölçülebilir değişkenler ile ilgili ise kullanılabilir.

## 4. BOZUCULARIN GİDERİLME YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada kontrol sistemlerinde karşılaştığımız bozucular üç grupta toplanmıştır. Bu sınıflandırmada bozucuların özelliklerine göre etkilerinin azaltılması için farklı yöntemler ele alınmıştır.

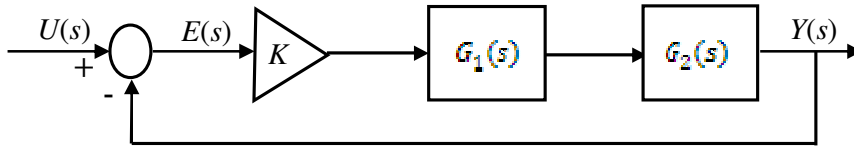
### 4.1 Bozucuların Kaynağında Giderilmesi

Bozucu etkilerinin kaynağında giderilmesi, bozucuyu oluşturan sebebin giderilmesi temeline dayanmaktadır. İlk uygulanması gereken yöntemdir. Sistemdeki sürtünmeyi azaltmak, algılayıcıları sistem davranışına göre ayarlamak gibi sistemin tasarımında değişiklikler yapılarak giderilebilir. Bu yöntem ile sistemde geri besleme yada öngörücü kullanmadan bozucuları ortadan kaldırmayı mümkün kılar.

### 4.2 Bozucuların Geri Besleme ile Giderilmesi

Bozucu etkisinin geri besleme ile giderilmesi yolu sistemin tasarımında yapılan değişiklikler yeterli olmadığı durumlarda kullanılmalıdır. Bu yöntem kontrol sistemlerinde kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu yöntemi kullanabilmek için sistemi etkileyen bozucunun sistemi düzenli etkilediği bölge ve bozucu ile birlikte sistemi etkileyen kontrol değişkeni bilinmelidir(4,6).

Çevrimde yüksek kazanç kullanıldığı takdirde, sistemin iç yapısı hakkında bilgiye sahip olmadan geri besleme yöntemi basit ve etkileyici bir şekilde kullanılabilir. Şekil 4.1'de gösterilen sistem için kapalı çevrim transfer fonksiyonundan yararlanarak yüksek kazanç kullanılmasının etkisi görülmesi açısından faydalı olacaktır.



Şekil 4.1: Bozucuların geri besleme ile giderilmesi

Kontrol sistemindeki hata

$$E(s) = U(s) - Y(s) \quad (4.1)$$

ile ifade edilir. Sistem çıkışı

$$Y(s) = E(s) \cdot [K \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)] \quad (4.2)$$

olduğuna göre (4.1) eşitliğinde yerine yazıldığında

$$E(s) = U(s) - E(s) \cdot [K \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)]$$

$$E(s) = \frac{U(s)}{1 + [K \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)]} \quad (4.3)$$

şeklinde bulunur. Buradan da anlaşılacağı gibi yüksek  $K$  kazancı kullanıldığında hatanın sifıra yakınsadığı görülmektedir. Aynı şekilde sistem kararlılığı açısından bakıldığında (4.2) eşitliğinin formu değiştirilirse

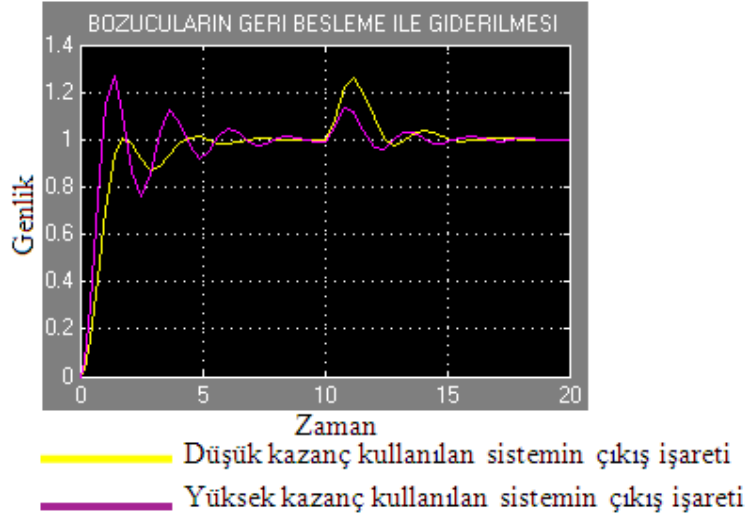
$$E(s) = \frac{Y(s)}{[K \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)]}$$

şeklinde yazılabilir. (4.1) eşitliğinde yerine yazıldığında

$$\frac{Y(s)}{[K \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)]} = U(s) - Y(s)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)}{1 + K \cdot G_1(s) \cdot G_2(s)}$$

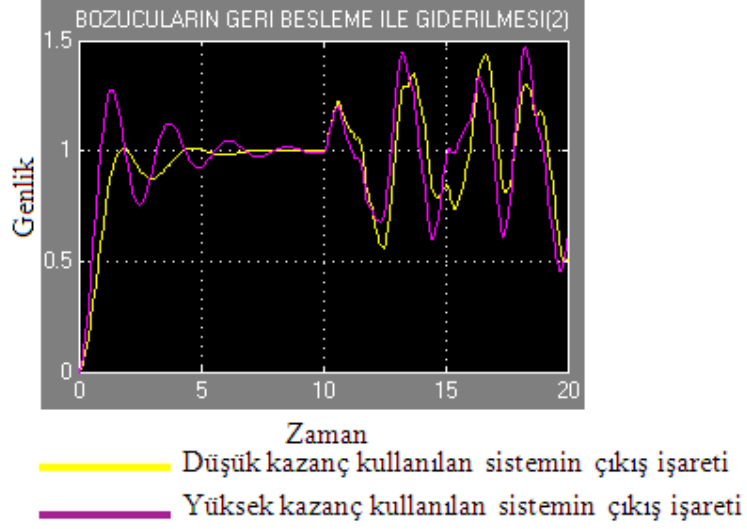
olur ve  $K$  kazancının yüksek olduğu durumda kapalı çevrim transfer fonksiyonunun bire yakınsadığı görülmektedir. Bu durum basamak işareti biçiminde bozucunun girdiği aynı sistemde kazanç  $K_1=2$  ve  $K_2=4$  için denenmiştir.



**Şekil 4.2: Basamak işareti biçiminde bozucu işareti için geri besleme yöntemi**

Şekil 4.2’de kazancın yüksek olduğu durumda sistemin fazla aşım yaptığını fakat bozucunun sisteme girdiği anda yüksek kazançlı olan sistemin tepkisinin daha iyi

olduğu görülmektedir. Aynı işlem basamak işareti yerine güç yoğunluğu bir olan beyaz gürültü uygulandığında şekil 4.3 elde ediliyor.



**Şekil 4.3: Beyaz gürültü bozucu işareti için geri besleme yöntemi**

Burada her iki sistemde bozucu etkisinden kurtulamamıştır. Bunun sebebi geri besleme ile bozucu etkisinin giderilmesi yönteminin beyaz gürültü gibi rasgele işaretlerin etkisini gidermekte yeterli olmayışındır. Bu durum bir sonraki bölümde öngörü yöntemi ile bozucu etkilerinin giderilmesi konusunda ele alınacaktır.

#### 4.3 Öngörü Yöntemi ile Giderilmesi

Belirgin işaretler için geri besleme ile bozucu etkisinin giderilebildiği fakat olası işaretler için yeterli olmadığı görülmüştür. Bu sorunu aşabilmek için öngörü yöntemi kullanılmalıdır.

Sisteme bozucuların girmesi sonucunda sistem çıkışındaki işaret incelenerek, sistemin çıkışlarının incelenmesi sonucunda, bir sistemin gelecekteki çıkışlarını önceden kestirebilmeye öngörü denir(7). Burada sistemin belirgin yada olası olması sonucu etkilemektedir.

Bu çalışmada ideal öngörücü, Wiener ve Kalman öngörücüleri kullanılarak çözüme gidilmeye çalışılmıştır. Her üç yöntemde de kontrol sistemlerinde belirgin yada olası bozuculara karşı başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.

İdeal öngörücünün doğrusal, zamanla değişmeyen ve kararlı olduğu fakat nedensel olmadığı gözlemlenmektedir. Bu sorunu aşmak için ideal öngörücünün nedensel yaklaşıklığı kullanılmıştır(7). Wiener ve Kalman yöntemlerinde, öngörücü transfer fonksiyonunun elde edilebilmesi için, işaretin istatistiksel özelliklerinin bilinmesi

gereklidir. Wiener ve Kalman öngörücülerinde, istenen özellik ile elde edilen özellik arasındaki hatanın karesinin ortalaması en küçük kılınmaktadır(7,8).

Bu yöntemlerin işleyişi incelenirken, ideal öngörücü Wiener ve Kalman öngörücülerinin transfer fonksiyonunun elde edilmesinde kullanılan kavramlara da değinilecektir.

### 4.3.1 İdeal Öngörücü

Öngörü kavramının tanımı yapılırken sistem çıkışının incelenerek sistemin gelecek değerleri hakkında bilgiye sahip olunması şeklinde yapılmıştır. Sistemin  $x(t)$  girişi ile  $y(t)$  çıkışı arasında bir bağıntı kurulabilir ise sistemin analiz edilmesi mümkün olabilir.

Bu bilgi doğrultusunda ideal öngörücü girişindeki  $x(t)$  işaretinin uygulandığı andaki çıkış  $y(t)$  ise giriş  $\tau$  zamanı kadar sonra  $x(t + \tau)$  değerini alır. Buna göre ideal öngörücüye ilişkin dönüşüm kuralı

$$y(t) = x(t + \tau) \quad (4.4)$$

biçiminde yazılabilir(7).

İdeal öngörücü doğrusal, zamanla değişmeyen ve kararlı bir sistemdir(7). İdeal öngörücün bu özelliklerine kısa bir şekilde değinmek faydalı olacaktır.

#### 4.3.1.1 Doğrusallık

İdeal öngörücünün doğrusallığını incelemeyden önce doğrusallığın tanımı yapılmalıdır. Bir sisteme  $x_1(t)$  girişi uygulandığında çıkışı  $y_1(t)$ ,  $x_2(t)$  girişi uygulandığında  $y_2(t)$  çıkışı elde edilebiliyorsa,  $a_1$  ve  $a_2$  reel sabit sayılar olmak üzere:

$$\begin{aligned} y(t) &= T\{a_1x_1(t) + a_2x_2(t)\} \\ &= a_1T\{x_1(t)\} + a_2T\{x_2(t)\} = a_1y_1(t) + a_2y_2(t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

denkleminin sağlanması gereklidir(7). Bu sistemlere doğrusal sistemler denir. (4.5) eşitliği ideal öngörücü için uygulanırsa:

ideal öngörücüde  $y(t) = T\{x(t)\} = x(t + \tau)$  olduğundan, doğrusallık koşulu

$$\begin{aligned} y(t) &= T\{a_1x_1(t) + a_2x_2(t)\} = a_1x_1(t + \tau) + a_2x_2(t + \tau) \\ &= a_1T\{x_1(t)\} + a_2T\{x_2(t)\} = x(t + \tau) = L\{x(t)\} \end{aligned} \quad (4.6)$$

denkleminden görüldüğü gibi sağlanmaktadır.

#### 4.3.1.2 Zamanla Değişmeyen Sistemler

Sistemin zamanla değişen bir sistem olduğunu anlamak için doğrusallık kavramında olduğu gibi sistemin giriş çıkış ilişkisine bakılmalıdır. Girişin  $x(t)$  çıkışın  $y(t)$  olduğu kabul edilirse, bu sistemin zamanla değişmediğini söyleyebilmek için  $x(t-\lambda)$  girişine olan sistem çıkışı  $y(t-\lambda)$  olmalıdır(2,7). İdeal öngörücü için bu şart (4.4) eşitliğinden yararlanılarak

$$L\{x(t-\lambda)\} = x(t-\lambda+\tau) = y(t-\lambda) \quad (4.7)$$

şeklinde elde edilir. (4.7) eşitliğinde gösterildiği gibi ideal öngörü doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistemdir.

#### 4.3.1.3 Kararlılık

İdeal öngörücünün doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistem olduğu (4.6) ve (4.7) eşitliklerinde gösterilmiştir. Buna göre ideal öngörücünün kararlılığı incelendiğinde sınırlı genlikli bir giriş işareti uygulandığında çıkış işaretinin de sınırlı olması gerekir. Bu tanım matematiksel olarak ifade edilirse,  $A$  ve  $k$  reel bir sayı olmak üzere,  $|x(t)| < A$  ise çıkış işareti  $|y(t)| < k.A$  biçiminde sınırlı olmalıdır.

İdeal öngörücü için kararlılık kavramı (4.4) eşitliğinden yararlanılarak elde edilebilir.

$$|x(t+\tau)| \text{ ve } |x(t)| < A \quad (4.8)$$

olacağından, çıkış işaretinin mutlak değeri

$$|y(t)| < A \quad (4.9)$$

biçiminde sınırlıdır ve ideal öngörücü kararlı bir sistemdir.

#### 4.3.1.4 Nedensellik

Nedenselliğin tanımı gereği sisteme uygulanan giriş işaretine karşılık sistemin vereceği yanıt, giriş işaretine bağlı değil ise sisteme nedensel yada fiziksel denir(7). Buna göre doğrusal ve zamanla değişmeyen bir sistemin nedensel olması için gerek ve yeter koşul, herhangi bir  $t_0$  zamanı ve  $x_1(t)$  ile  $x_2(t)$  giriş işaretleri için, eğer  $t \leq t_0$  zaman aralığında eşit olmalıdır:

$$y_1(t) = L\{x_1(t)\} = L\{x_2(t)\} = y_2(t), \quad t \leq t_0 \quad (4.10)$$

İdeal öngörücü için (4.10) eşitliği sağlanamadığından dolayı ideal öngörücü nedensel değildir.



#### 4.3.1.5 İdeal Öngörücünün Transfer Fonksiyonu

İdeal öngörücü sistemin giriş işaretine verdiği yanıtın yararlanarak,  $\tau \geq 0$  olmak üzere  $\tau$  zaman sonraki değerini kestirebilmek amacı ile sisteme uygulanır. Bunu yapabilmek için öngörücüye ait transfer fonksiyonunun bulunması gereklidir. İdeal öngörücünün transfer fonksiyonu başlangıç koşullarının sıfır olduğu kabul edilerek, giriş ve çıkış işaretlerinin Laplace dönüşümleri alındığında

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) \quad (4.11)$$

şeklinde elde edilir.

Laplace dönüşümleri yapılırken zamanın sıfırdan büyük olduğu dikkate alınırsa,

nedensel bir çıkış işareti için Laplace dönüşümü

$$\begin{aligned} Y(s) &= L_1\{x(t + \tau)\} = \int_0^{+\infty} x(t + \tau)e^{-st} dt = \int_{\tau}^{+\infty} x(\lambda)e^{-s(\lambda-\tau)} d\lambda \\ &= e^{\tau s} \left[ \int_0^{+\infty} x(\lambda)e^{-\lambda s} d\lambda - \int_0^{\tau} x(\lambda)e^{-\lambda s} d\lambda \right] \\ &= e^{\tau s} X(s) - e^{\tau s} \int_0^{\tau} x(\lambda)e^{-\lambda s} d\lambda \end{aligned} \quad (4.12)$$

elde edilir. (4.12) denkleminde ideal öngörücünün nedensel bir yaklaşımın transfer fonksiyonu olan  $G_N(s)$

$$\begin{aligned} \frac{Y_N(s)}{X(s)} &= G_N(s) = e^{\tau s} \left[ 1 - \frac{\int_0^{\tau} x(\lambda)e^{-\lambda s} d\lambda}{\int_0^{+\infty} x(\lambda)e^{-\lambda s} d\lambda} \right] \\ &= \frac{\int_{\tau}^{+\infty} x(\lambda)e^{-s(\lambda-\tau)} d\lambda}{X(s)} = [e^{\tau s}]_+ \end{aligned} \quad (4.13)$$

şekilde bulunur.

$$\begin{aligned} Y(s) &= e^{\tau s} X(s) - e^{\tau s} \int_0^{\tau} x(\lambda)e^{-\lambda s} d\lambda \\ &= e^{\tau s} X(s) - E_p(s) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Burada  $E_p(s)$  ifadesinin ters Laplace dönüşümü yapıldığında öngörücüye uygulanan işaretin  $\tau$  zamanına kadar nedensellik şartı dolayısıyla kaybolan kısmı elde edilir(7).

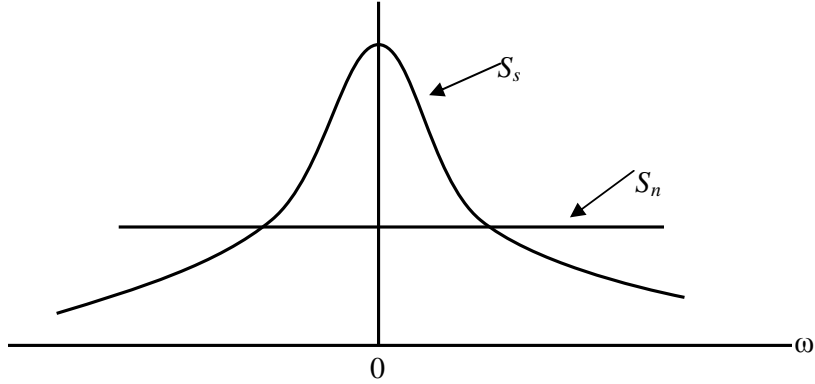
#### 4.3.2 Wiener Öngörü Yöntemi

Wiener'in öngörü yönteminin kontrol sisteminde kullanılabilmesi için sistemdeki işaretlerin matematiksel olarak ifade edilebilmesi gerekmektedir. Bu şekilde

öngörücünün transfer fonksiyonu hesaplanarak kontrol sistemine uygulanabilir. Öngörücüye giren işaretin  $x(t)$  olduğu düşünülürde:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (4.15)$$

bir  $s(t)$  işareti ve herhangi bir  $n(t)$  gürültüsünün toplamından oluştuğu kabul edilir(7,8,13).

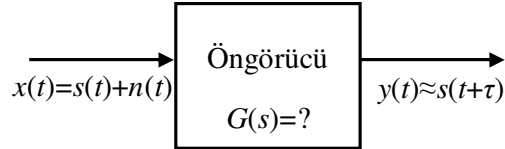


**Şekil 4.4:**  $s(t)$  işareti ve  $n(t)$  bozucusuna ait spektral yoğunluk fonksiyonları

Öngörücü çıkış işaretinin

$$y(t) \approx s(t + \tau) \quad (4.16)$$

olabilmesi için, öngörü transfer fonksiyonu  $G(s)$ ' in ne olması gerektiği incelenmelidir.



**Şekil 4.5:** Öngörücü giriş ve çıkış işaretlerinin blok diyagramı

Şekil 4.5'de gösterilen öngörücünün transfer fonksiyonunun hesaplanabilmesi için aşağıdaki şartların sağlanması gerekmektedir.

Bu problemin çözümü Wiener'in verdiği aşağıdaki önkoşulu gerektirmektedir(7,8,12):

- $x(t)$  işaretini oluşturan  $s(t)$  işareti ve  $n(t)$  gürültüsünün spektral yapısının, öz ve çapraz ilinti fonksiyonlarının bilinmesi gerekir.
- En iyi sonucu veren öngörücü  $e(t)$  hata işaretinin karesel ortalaması  $e^2(t)$ ' nin en küçük olma ölçütüne göre hesaplanır:

$$\overline{e^2(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} [s(t + \tau) - y(t)]^2 dt \quad (4.17)$$

- c) Wiener'in yöntemi, zamanla değişmeyen zaman fonksiyonlarının karesel yanılı ortalaması ölçütüne göre doğrusal öngörülmesine ve filtrelenmesine ilişkindir.

$$e(t) = s(t + \tau) - y(t)$$

ile verilen hata eşitliğinde  $\tau$ 'nun aldığı değere göre Wiener yönteminin durumları sınıflandırılabilir(8).

$\tau > 0$  olduğu durumda Wiener öngörücüsü  $\tau$  zaman önceki değerini kestirmek için kullanılır.  $\tau = 0$  olduğu zaman filtreleme sorununa dönüşmektedir.  $\tau < 0$  için işaretin geçmiş değerini kestirme sorununda kullanılır. (4.17) denklemi ile verilen ortalama karesel hatanın çözülebilmesi için işaret ve gürültünün öz ve çapraz ilinti fonksiyonlarını tanımlamak gerekir. İlinti fonksiyonları

$$\Psi_{ss}(v) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} s(t)s(t+v) dt = \overline{s(t)s(t+v)} \quad (4.18)$$

$$\Psi_{nn}(v) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} n(t)n(t+v) dt = \overline{n(t)n(t+v)} \quad (4.19)$$

$$\Psi_{sn}(v) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} s(t)n(t+v) dt = \overline{s(t)n(t+v)} = \Psi_{ns}(-v) \quad (4.20)$$

biçiminde tanımlanır.

$s(t)$  işareti ve  $n(t)$  işaretlerinin güç dağılımları ilinti fonksiyonlarının yada işaretlerin Laplace dönüşümleri cinsinden bulunabilir:

$$\begin{aligned} L\{\Psi_{ss}(v)\} &= \phi_{ss}(s), \\ L\{\Psi_{nn}(v)\} &= \phi_{nn}(s), \\ L\{\Psi_{sn}(v)\} &= \phi_{sn}(s) = \phi_{ns}(-s). \end{aligned} \quad (4.21)$$

Bir doğrusal sistemde giriş ve çıkış büyüklüklerinin güç dağılımları arasında Wiener-Khintchine bağıntıları vardır(7,8).

$$\phi_{xy}(s) = G(s)\phi_{xx}(s), \quad (4.22)$$

$$\phi_{yx}(s) = G(-s)\phi_{xx}(s), \quad (4.23)$$

$$\phi_{yy}(s) = G(-s)\phi_{xy}(s) = G(s)\phi_{yx}(s) = G(s)G(-s)\phi_{xx}(s) \quad (4.24)$$

biçimindedir.

Güç dağılımlarını giriş ve çıkış işaretlerinden yararlanarak

$$\phi_{xx}(s) = X(-s)X(s), \quad \phi_{xy}(s) = X(-s)Y(s) \quad (4.25)$$

şeklinde yazılabilir. Bağımsız darbelerden oluşan ve güç dağılımı  $\phi_{xx}(s) = 1$  olan bir işaretin beyaz gürültü olduğu daha önce belirtilmiştir. Bu doğrultuda (4.24) ve (4.25) denklemleri uyarınca, güç dağılımı  $\phi_{yy}(s)$  olan  $y(t)$  işareti, girişine beyaz gürültü uygulanan ve transfer fonksiyonu  $G(s) = Y(s)$  olan bir sistemin çıkışından elde edilir. Buna göre, elde edilmek istenen herhangi bir  $y(t)$  işareti beyaz gürültüden oluşturulabilir.

Eğer  $z(t)$  ile sistem çıkışında elde edilmek istenen işareti ifade ederse, hata işareti  $e(t)=z(t)-y(t)$  biçiminde yazılabilir.

Ortalama karesel hata

$$\begin{aligned} \overline{e^2(t)} &= \overline{\{z(t) - [g(t) * x(t)]\}^2} \\ &= \Psi_{zz}(0) - 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{xz}(u)g(u)du + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{xx}(u-v)g(u)g(v)dudv \end{aligned} \quad (4.26)$$

biçiminde ilinti fonksiyonları cinsinden belirlenebilir.

$\phi_{xx}(s)$  ve  $\phi_{xz}(s)$  güç dağılımları,  $s'$  nin rasyonel birer fonksiyonu ise, optimal  $y_0(t)$  yanıtı elde edileceğimiz, fiziksel gerçekleştirilebilir bir sisteme ilişkin  $G_0(s)$  transfer fonksiyonu, Wiener-Hopf denkleminde

$$G_0(s) = \frac{Y_0(s)}{X(s)} = \frac{1}{\phi_{xx}^+(s)} \left[ \frac{\phi_{xz}(s)}{\phi_{xx}^-(s)} \right]_+ \quad (4.27)$$

biçiminde hesaplanır(7,8,12,13). Bu denklemde  $\phi_{xx}^+(s) = X(s)$ ,  $\phi_{xx}^-(s) = X(-s)$  biçiminde sıfır ve kutupları sol ve sağ yarı s-düzleminde bulunan ve güç dağılımından elde edilen iki rasyonel fonksiyondur. Bunun için güç dağılımı

$$\begin{aligned} \phi_{xx}(s) &= X(s)X(-s) = \frac{k \prod_{i=0}^m (b_i + s)}{\prod_{i=0}^n (a_i + s)} \frac{k \prod_{i=0}^m (b_i + s)}{\prod_{i=0}^n (a_i + s)} \\ \phi_{xx}^+(s) &= \phi_{xx}^-(s) \end{aligned} \quad (4.28)$$

biçimindeki iki çarpana ayrılır. Ayrıca  $\phi_{xz}(s)/\phi_{xx}^-(s)$  oranı

$$\frac{\phi_{xz}(s)}{\phi_{xx}^-(s)} = \left[ \frac{\phi_{xz}(s)}{\phi_{xx}^-(s)} \right]_+ + \left[ \frac{\phi_{xz}(s)}{\phi_{xx}^-(s)} \right]_- \quad (4.29)$$

biçimindeki kutupları sol ve sağ yarı s-düzleminde iki fonksiyonun toplamı biçimindeki gösterilebilir. (4.27) denkleminde ikinci çarpan bu ifadenin ilk terimidir. Wiener'in verdiği (4.27) en uygun çözümü öz öngörme olayına uygulanırsak, burada  $s(t)=x(t)$  ve istene işaret  $z(t)=x(t+\tau)$  olduğundan, çapraz ilinti

$$\Psi_{xz}(u) = \overline{x(t)z(t+u)} = \overline{x(t)x(t+\tau+u)} = \Psi_{xx}(u+\tau) \quad (4.30)$$

biçiminde yazılabilir. (4.30) denkleminin Laplace dönüşümü

$$\phi_{xz}(s) = e^{\tau s} \phi_{xx}(s) \quad (4.31)$$

Biçimindedir. Bu ilişkiyi optimum (4.27) ifadesine uygularsak

$$\begin{aligned}
 G_0(s) &= \frac{Y_0(s)}{X(s)} = \frac{1}{\phi_{xx}^+(s)} \left[ \frac{\phi_{xz}(s)}{\phi_{xx}^-(s)} \right]_+ \\
 &= \frac{1}{\phi_{xx}^+(s)} \left[ \frac{e^{\tau s} \phi_{xx}(s)}{\phi_{xx}^-(s)} \right]_+ \\
 &= \frac{1}{\phi_{xx}^+(s)} [e^{\tau s} \phi_{xx}^+(s)]_+ = [e^{\tau s}]_+
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

sonucu elde edilir.

#### 4.3.2.1 Bode-Shannon Çözüm Yöntemi

Optimal Wiener öngörücüsünde  $x(t)=s(t)+n(t)$  şeklinde giriş işaretine sahip öngörücünün çıkışındaki işaret  $y(t)=s(t+\tau)$  işaretinin elde edilmesinde izlenecek yol Bode ve Shannon tarafından verilmiştir(7,8,14,15).

Bode-Shannon tarafından optimal öngörücü hesaplanırken aşağıdaki yol izlenmelidir:

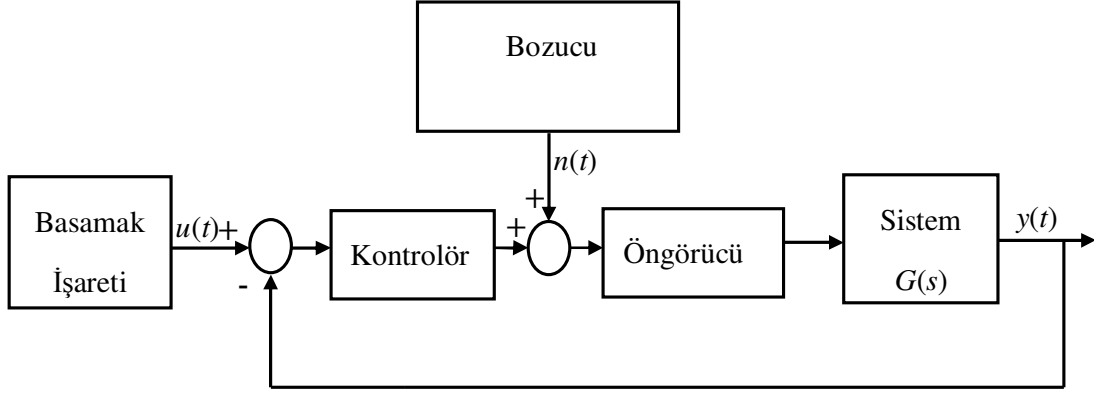
- Değeri kestirilecek  $x(t)$  işaretinin  $\phi_{xx}(s)$  güç dağılımı bulunur ve  $\phi_{xx}(s) = \phi_{xx}^+(s)\phi_{xx}^-(s)$  biçiminde sıfır ve kutupları sol ve sağ yarı s-düzleminde bulunacak biçimde iki çarpana ayrılır.
- $\phi_{xx}^+(s)$ ' in ters Laplace dönüşümünden  $\Psi_{xx}^+(t) = L^{-1}\{\phi_{xx}^+(s)\}$  bulunur.
- $t>0$  değerler için sıfırdan farklı  $g(t) = \Psi_{xx}^+(t + \tau)$  hesaplanır.
- Bulunan sonucun Laplace dönüşümü  $G(s) = L\{g(t)\}$  alınır.
- Optimal öngörücünün transfer fonksiyonu  $G_0(s) = G(s)/\phi_{xx}^+(s)$ ' dir.

#### Örnek 4.1:

Birinci dereceden transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{1}{s + 4}$$

olan bir sisteme şekil 4.6'da gösterildiği gibi basamak biçimli bir bozucu işareti uygulandığında, bu sistem için öngörücüyü hesaplamak için sırasıyla aşağıdaki işlemler yapılır.



**Şekil 4.6: Kontrol sisteminde öngörü uygulanmasının blok diyagramı**

Sistemin girişine basamak işareti uygulandığında sistem çıkışındaki işaret

$$X(s) = \frac{K}{s(s+a)} = \frac{2}{s(s+4)}$$

şeklindedir.

- a) İşaretin güç dağılımı  $K = 2$  için

$$\begin{aligned} \phi_{xx}(s) &= \phi_{xx}^+(s) \cdot \phi_{xx}^-(s) = X(s)X(-s) \\ &= \frac{2}{s+4} \cdot \frac{2}{-s(-s+4)} = \frac{4}{s^2(s^2-16)} \end{aligned}$$

biçimindedir.

- b) Güç dağılımından faydalanarak işaretin zaman domenindeki karşılığı şu şekilde bulunur:

$$\psi_{xx}^+(t) = x(t) = L^{-1} \left\{ \frac{K}{s(s+a)} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{2}{s(s+4)} \right\}$$

$$A = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{2}{s(s+4)} = 0.5$$

$$B = \lim_{s \rightarrow -4} (s+4) \frac{2}{s(s+4)} = -0.5$$

$$x(t) = 0.5(1 - e^{-4t})$$

- c) İşaretin öngörü zamanı  $\tau$  kadar ötelenmesi sonucu

$$g(t) = \psi_{xx}^+(t + \tau) = 0.5(1 - e^{-4(t+\tau)}), \quad t > 0$$

elde edilir.

- d) İşaretin Laplace dönüşümü

$$G(s) = L\{g(t)\}$$

$$G(s) = 0.5 \int_0^{\infty} (1 - e^{-4(t+\tau)}) \cdot e^{-st} dt$$

$$G(s) = 0.5 \left[ \frac{1}{s} - \frac{e^{-4\tau}}{s+4} \right]$$

olarak hesaplanır.

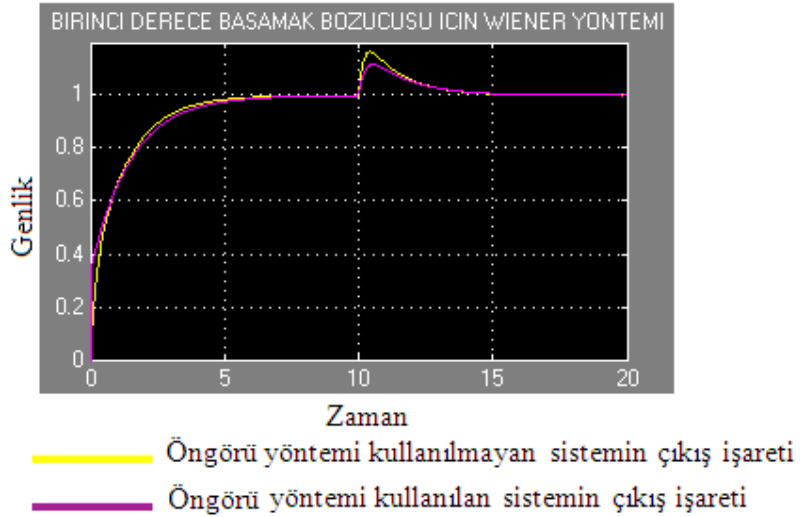
e) Buradan öngörücünün transfer fonksiyonunu

$$G_0(s) = \frac{G(s)}{\phi_{xx}^+(s)} = \frac{0.5 \left( \frac{1}{s} - \frac{e^{-4\tau}}{s+4} \right)}{\frac{2}{s(s+a)}}$$

$$G_0(s) = 1 + 0.25(1 - e^{-4\tau})s \quad \tau = 1.5 \text{ için}$$

$$G_0(s) = 1 + 0.25s$$

olarak bulunur. Şekil 4.6'daki kontrol sistemi için, basamak işareti şeklinde sisteme giren bozucu işaretinin sistemi nasıl etkilediği ve sistemde Wiener öngörücüsü kullanıldığında bozucu işaretinin etkisinin daha erken ortadan kalktığı şekil 4.7'de görülmektedir.



**Şekil 4.7: Birinci dereceden bir sistemde basamak işareti biçimindeki bozucu etkisinin giderilmesi.**

#### Örnek 4.2:

Örnek 4.1'deki aynı sistem için sisteme etkiyen bozucu işaretinin şekil 4.6'da gösterildiği gibi güç dağılımı 1 olan beyaz gürültü olduğu durumda, kontrol sistemine uygulanacak öngörücü aşağıdaki yolları izleyerek hesaplamamız mümkündür.

İşaretin güç dağılımı

$$\phi_{xx}(s) = G(s)G(-s)A = \frac{4}{16 - s^2}$$

olur ve bu işaretin öz ilintisi

$$\psi_{xx}(v) = L^{-1} \left\{ \frac{K^2}{(4^2 - s^2)} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{4}{(s+4)(-s+4)} \right\}$$

$$A = \lim_{s \rightarrow -4} (s+4) \frac{4}{(s+4)(-s+4)} = 0.5$$

$$B = \lim_{s \rightarrow 4} (-s+4) \frac{4}{(s+4)(-s+4)} = 0.5$$

$$\psi_{xx}(v) = 0.5(e^{-4v} - e^{4v}) = 0.5e^{-4|v|}$$

olarak bulunur; bu öz ilintinin bağımsız  $v$  değişkeninin pozitif değerlerine ilişkin parçası

$$[\psi_{xx}(v)]_+ = 0.5e^{-4v}$$

biçimindedir. İşaretin öngörü zamanı  $\tau$  kadar ötelenmesi sonucu

$$g(t) = \psi_{xx}^+(t + \tau) = 0.5e^{-4(t+\tau)}, \quad t > 0$$

elde edilir. İşaretin laplace dönüşümü

$$G(s) = L\{g(t)\}$$

$$G(s) = 0.5 \int_0^{\infty} (e^{-4(t+\tau)}) \cdot e^{-st} dt$$

$$G(s) = 0.5 \left[ \frac{e^{-4\tau}}{s+4} \right]$$

olarak hesaplanır. Buradan öngörücünün transfer fonksiyonunu

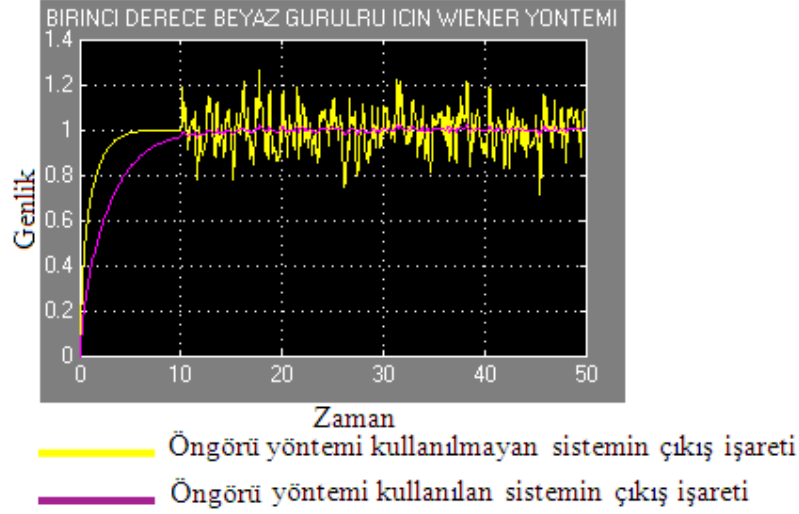
$$G_0(s) = \frac{G(s)}{\phi_{xx}^+(s)} = \frac{0.5 \left( \frac{e^{-4\tau}}{s+4} \right)}{\frac{0.5}{(s+4)}}$$

$$G_0(s) = e^{-4\tau} \quad \tau = 0.65 \text{ için}$$

$$G_0(s) = 0.074$$

olarak hesaplanır. Şekil 4.6'daki kontrol sistemi için, sisteme bozucu olarak giren beyaz gürültünün etkisi ve sistemde öngörücü kullanıldığında bu etkinin ortadan kaldırıldığı şekil 4.8'de gösterilmiştir.





**Şekil 4.8: Birinci dereceden sistemde beyaz gürültü etkisinin giderilmesi**

**Örnek 4.3:**

Transfer fonksiyonu

$$\frac{1}{s^2 + 2s + 4}$$

şeklinde olan ikinci dereceden bir sisteme şekil 4.6'da gösterildiği gibi basmak biçiminde bir bozucu etkilediğinde, bozunun sistem üzerindeki etkisini azaltmak için kullanılacak öngörücüyü aşağıdaki şekilde hesaplanır.

Sisteme basamak biçiminde işaret uygulandığında öngörücüye giren işaret

$$X(s) = \frac{K.A}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} = \frac{2}{s(s^2 + 2s + 4)}$$

biçimindedir. Burada  $\zeta$  sistemin sönüm oranı ve  $\omega_n$  sistemin doğal frekansdır.

$$\omega_n^2 = 4, \quad \xi\omega_n = 2 \rightarrow \xi = 0.5, \quad \sigma = \xi\omega_n = 1, \quad k = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} = 1.155$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{(-\xi)} = -60$$

olduğu görülebilir. Burada  $\tau = 0.3$  olmak üzere, Bode-Shannon çözüm yönteminin işlem basamakları sırası ile uygulandığında optimal öngörücü

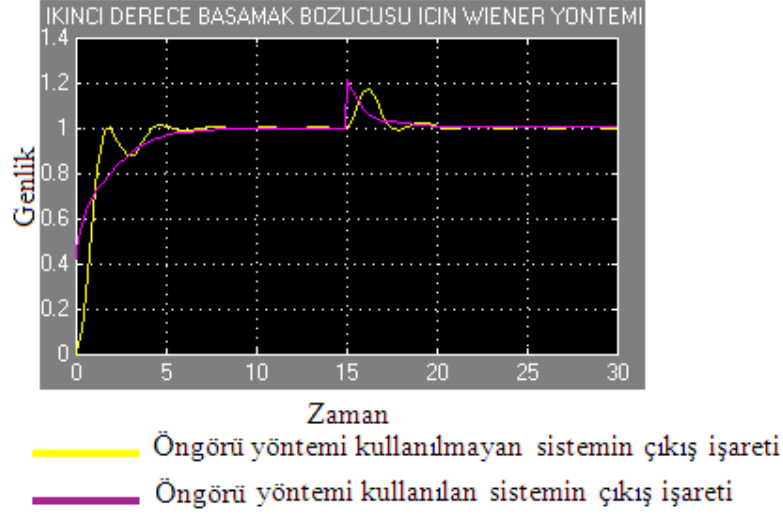
$$G_0(s) = 1 + \alpha s + \beta s^2 \tag{4.33}$$

olarak bulunur; burada

$$a = \frac{[2\sigma + \sigma k e^{-\sigma\tau} \sin(\omega\tau - \phi) + \omega k e^{-\sigma\tau} c \cos(\omega\tau - \phi)]}{\omega_n^2}$$

$$\beta = \frac{[1 + ke^{-\sigma\tau} \sin(\omega\tau - \phi)]}{\omega_n^2}$$

olur. İkinci derece sisteme ait bilgiler doğrultusunda  $\alpha=0.8534$  ve  $\beta=0.3638$  olarak hesaplanır. Basamak biçimindeki bozucu işaretinin sisteme olan etkisini ve sistemde öngörücü kullanıldığında sistemin daha erken referans değere ulaştığı şekil 4.9'da gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.9: İkinci dereceden sistemde basamak işareti biçimindeki bozucu etkisinin giderilmesi.**

#### Örnek 4.4:

Kontrolü yapılan transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 4}$$

şeklinde olan ikinci dereceden sisteme şekil 4.7'de gösterildiği gibi etkileyen bozucu işareti basamak işareti yerine, güç dağılımı 1 olan beyaz gürültü olduğunu düşünelim.

Bozucu etkisini ortadan kaldırmak için öngörü yöntemi kullanmak gereklidir. Bu öngörücü aşağıdaki yollar izlenerek hesaplanır.

$x(t)$  işaretinin güç dağılımı

$$\phi_{xx}(s) = G(s)G(-s)A = \frac{AK^2}{s^4 + 2(\omega_n^2 - 2\sigma^2)s^2 + \omega_n^4}$$

olur. Öz ilintinin pozitif değerlerine ilişkin güç dağılımı

$$[\phi_{xx}(s)]_+ = \frac{AK^2}{4\sigma\omega_n^2} \frac{(s + 2\sigma)}{s^2 + 2\sigma s + \omega_n^2} = \frac{0.25s + 0.5}{(s^2 + 2s + 4)}$$

biçimindedir. Eğer güç dağılımı çarpanlarına ayrılırsa,

$$\phi_{xx}^+ = \frac{2}{s^2 + 2s + 4}$$

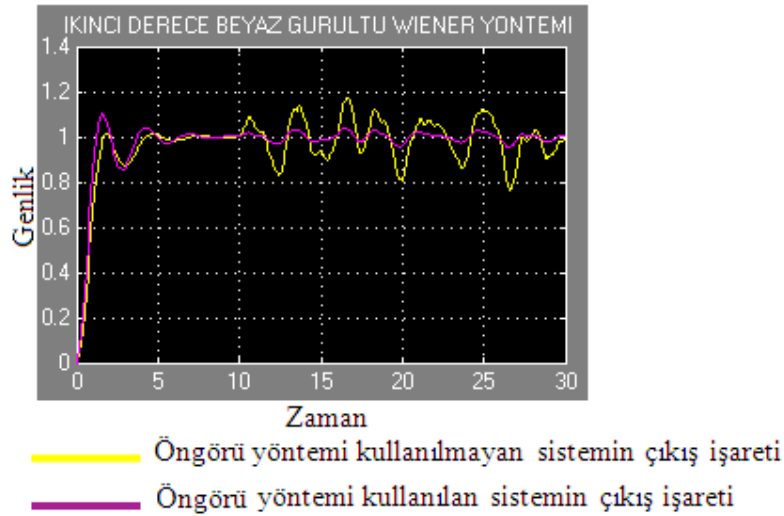
olduğuna göre, Bode-Shannon yöntemini kullanarak optimal öngörücü  $\tau = 1$  için,

$$G_0(s) = \frac{e^{-\sigma\tau}}{\omega} (s \sin \omega\tau + \omega c \cos \omega\tau + \sigma \sin \omega\tau)$$

$$G_0(s) = \frac{e^{-2}}{1.732} [s \sin(1.732) + 1.732 c \cos(1.732) + \sin(1.732)]$$

$$G_0(s) = 0.0024s + 0.08$$

olarak bulunur.



**Şekil 4.10: İkinci dereceden sistemde beyaz gürültü etkisinin giderilmesi**

Wiener yöntemine ait öngörücü birinci dereceden ve ikinci dereceden sistemlere uygulanmıştır. Bu örneklerde bozucu işaretleri basamak işareti ve beyaz gürültü biçiminde ayrı ayrı uygulanarak sonuçlar gözlemlenmiştir. Burada bozucu işaretinin belirgin yada olası olmasının öngörü yönteminde bir soruna yol açmadığı gözlemlenmiştir. Ama olası işaretlerde öngörü kullanılabilmesi işaretin istatistiksel özelliğinin belirlenebilmesi gerekmektedir. Eğer işarete ait istatistiksel özellikler belirlenemiyor ise ideal öngörü yaklaşığı kullanılabilir.

### 4.3.3 Kalman Öngörü Yöntemi

Kontrol sistemlerindeki işaretlerin öngörülmesinde kullanılan diğer önemli bir yolda Kalman öngörü yöntemidir. Kalman'ın geliştirdiği bu öngörü yöntemi Wiener yöntemine dayanmaktadır. Aralarındaki farklardan birisi Wiener yönteminde

kullanılan zamanla değişmeme şartının ortadan kalkmasıdır. Diğer bir fark ise Wiener yönteminde giriş-çıkış büyüklüklerinin oranından elde edilen transfer fonksiyonu kavramı kullanılırken, Kalman öngörücüsü elde edilirken sistem durum değişkenlerinden oluşan durum denklemleri ile kullanılır(7,8,16,17,18). Bu şekilde Wiener yöntemi ile elde ettiğimiz sonuçların çoğunu Kalman'ın öngörü yöntemi ile kısa bir yoldan elde etme olanağı vardır.

#### 4.3.3.1 Doğrusal Sistemlerin Durum Denklemleri

Bir sistemin modelinin transfer fonksiyonları ile belirlenebildiği gibi durum denklemleriyle belirlenebildiğine ikinci bölümdeki değinilmiştir. Doğrusal bir sistemde  $\vec{x}(t)$  vektörü sistemin durum vektörü,  $x_i$  vektörü bileşenleri sistemin durum değişkenleri,  $\vec{u}(t)$  vektörü sistemin giriş büyüklüğü,  $u_i(t)$  bileşenleri ise sistemin giriş değişkenleridir(7,16,18).

Kalman modelinde sistemin durumu,  $-\infty < t < \infty$  olmak üzere,

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{f}(\vec{x}(t), \vec{u}(t), t) \quad (4.34)$$

biçiminde bir vektör diferansiyel denklemleriyle belirlenir(7).

Doğrusal sistemlerde  $\vec{f}$  fonksiyonu  $\vec{x}$  ve  $\vec{u}$  değişkenlerinin doğrusal bir fonksiyonudur. Bu durumda

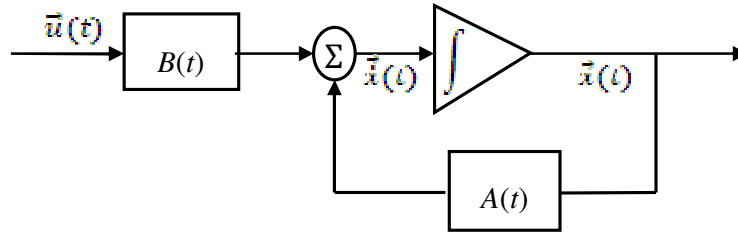
$$[A(t)] = \frac{\delta f_i(t)}{\delta x_j}, \quad [B(t)] = \frac{\delta f_i(t)}{\delta u_j} \quad (4.35)$$

olmak üzere sistemin denklemi

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = [A(t)]\vec{x}(t) + [B(t)]\vec{u}(t) \quad (4.36)$$

ile ifade edilebilir. (4.36) denkleminde geri besleme matrisi  $[A(t)]$  bir (nxn) ve giriş matrisi  $[B(t)]$  bir (nxm) boyutlu zamana bağlı matristir.

(4.36) denklemi ile hesaplanan doğrusal bir sistemin durum denklemleri, şekil 4.11'deki blok diyagram ile gösterilebilir.



Şekil 4.11: Doğrusal sistem ait durum denkleminin blok diyagramı

Şekil 4.11’de blok diyagramı gösterilen sistemin (4.36) ile verilen durum denkleminin çözümü

$$\vec{x}(t) = \vec{\phi}(t; \vec{x}_0, t_0) = [\phi(t, t_0)]\vec{x}_0 + \int_{t_0}^t [\phi(t, v)][B(v)]\vec{u}(v)dv \quad (4.37)$$

şeklindedir.

### 4.3.3.2 Kalman Öngörücüsü

Kalman yönteminde de Wiener yönteminde olduğu gibi giriş işareti  $u(t)$  ile çıkış işareti  $y(t)$  arasındaki bağıntıdan faydalanmak gerekir. Sisteme uygulana  $u(t)$  işaretinin beyaz gürültü olması halinde  $\vec{x}(t)$  değeri (4.37) denklemini kullanılarak elde edilebilir(7,16,17). Sistemin  $t$  anında olduğu kabul edilirse  $\tau$  zaman sonra  $t_1=t+\tau$  zamanındaki değeri  $\vec{x}(t_1)$  (4.37) denkleminde yerine yazıldığında

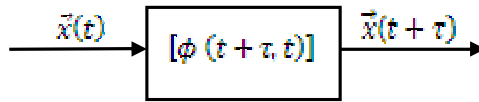
$$\vec{x}(t_1) = [\phi(t_1, t)]\vec{x}(t) + \int_t^{t_1} [\phi(t_1, v)][B(v)]\vec{u}(v)dv \quad (4.38)$$

olarak elde edilir. Ancak, giriş işareti  $\vec{u}(v)$  beyaz gürültü olduğundan dolayı ortalaası sıfırdır. Bundan dolayı (4.38) denkleminin ikinci kısmı sıfır olur.

Buna göre  $t_1 = t + \tau$  zamanına ilişkin  $\vec{x}(t + \tau)$  durumunu,  $\vec{x}(t)$  durumundan bulacak olan Kalman öngörücüsü

$$\vec{x}(t + \tau) = [\phi(t + \tau, t)]\vec{x}(t) \quad (4.39)$$

denklemini ile elde edilir. Şekil 4.11’de elde edilen  $\vec{x}(t)$  işaretinden yararlanarak çıkışta  $\vec{x}(t + \tau)$  işaretini elde eden öngörücü şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Kalman öngörücüsü

### Örnek 4.5:

Birinci dereceden transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{1}{s + 4}$$

olan birinci derecede sisteme basamak işareti biçiminde bozucu girişi uygulanmaktadır. Bu sistem için Kalman öngörüyü yönteminin kullanarak bozucu

etkisinden kurtulmak için durum denklemlerinden yararlanarak ideal öngörücü elde edilebilir. Burada

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= u \\ \dot{x}_2 &= 2x_1 - 4x_2 \\ x &= x_2\end{aligned}$$

olmak üzere, işaret durum denklemleriyle

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2 & -4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

biçiminde ifade edilebilir. Durum denklemlerinden yararlanarak geçiş matrisi

$$\begin{aligned}\phi(s) &= [sI - A]^{-1} = \begin{bmatrix} s & 0 \\ -2 & s + 4 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{s(s+4)} \begin{bmatrix} s+4 & 0 \\ 2 & s \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 \\ \frac{2}{s(s+4)} & \frac{1}{s+4} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

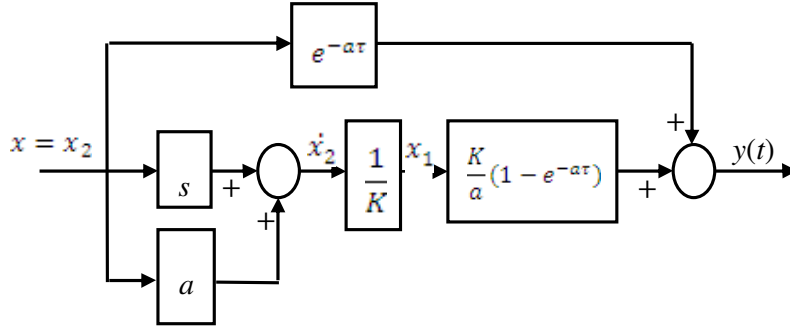
olarak elde edilir. Durum vektörünün  $\tau$  zaman sonraki durumunu belirlemek için (4.39) denkleminde yararlanarak

$$\begin{bmatrix} x_1(t + \tau) \\ x_2(t + \tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11}(\tau) & \phi_{12}(\tau) \\ \phi_{21}(\tau) & \phi_{22}(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

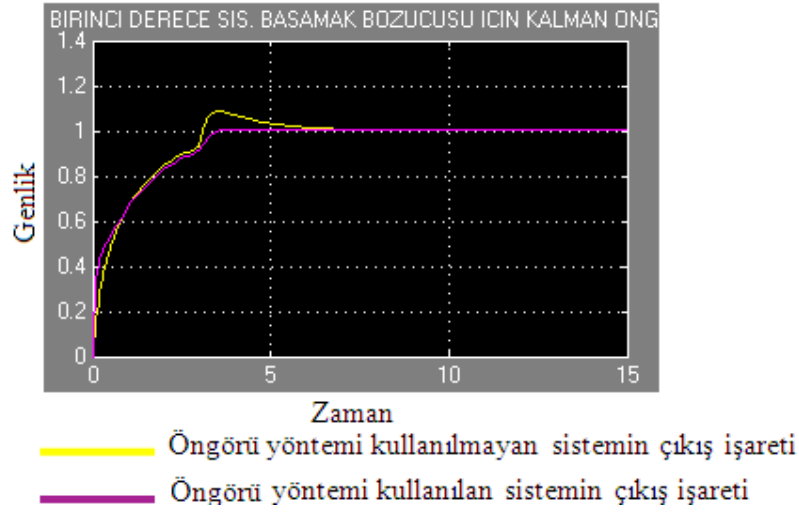
elde edilir ve  $\tau = 0.65$  için

$$\begin{aligned}x_2(t + \tau) &= \phi_{21}(\tau)x_1(t) + \phi_{22}(\tau)x_2(t) \\ &= \frac{K}{a}(e^{-a\tau} - 1)x_1(t) + e^{-a\tau}x_2(t) \\ &= \frac{2}{4}(e^{-2.6} - 1)x_1(t) + e^{-2.6}x_2(t) \\ &= 0.5(-0.926)x_1(t) + 0.0743x_2(t)\end{aligned}$$

olarak hesaplanır. Kalman öngörücüsüne ait blok diyagram durum denklemlerinden yararlanarak şekil 4.13'deki gibi elde edilir.



**Şekil 4.13: Birinci derece sistemde basamak bozucu için Kalman öngörücüsü blok diyagramı**



**Şekil 4.14: Birinci derece sistem için basamak işareti biçiminde bozucunun Kalman yöntemi ile giderilmesi**

Şekil 4.14'de görüldüğü gibi birinci derece sisteme basamak işareti biçiminde bozucu uygulandığında sistemdeki bozucu etkisi Kalman öngörücüsü kullanılarak giderilmiştir. Kalman öngörücüsünün transfer fonksiyonu, şekil 4.13'deki blok diyagramının çıkış işaretinin Laplace dönüşümü alındığında

şeklinde elde edilir. Elde edilen sonuç incelendiğinde Wiener yöntemi ile bulunan öngörücünün transfer fonksiyonu ile aynı olduğu görülmektedir. Wiener öngörücüsü için belirtilmiş olan bütün özellikler Kalman öngörücüsü için de geçerlidir.

## 5. SONUÇLAR

Kontrol sistemlerinde karşılaşılan, sistem çıkışını olumsuz yönde etkileyen bozucuların özelliklerini, etkilerini ve bu etkilerin kaldırılması için çeşitli yöntemlerin incelendiği bu çalışmadaki sonuçları şu şekilde özetleyebiliriz:

- 1) Sistemdeki bozucular impuls, basamak, rampa ve sinüs biçimi gibi belirgin işaretlerle ve gürültü olarak iki grupta toplanmıştır. Bozucuların belirgin modellerinin doğrusal sistemlerin impuls işareti ile sürülmesi ile elde edildiği gösterilmiştir. Daha karmaşık bozucular impuls işaretinin tekrarlanması, basamak ve rampa işaretlerinin birleştirilmesi ve sinüs işaretinin genlik ve frekansının değiştirilmesi ile elde edilebileceği ile gösterilmiş ve beyaz gürültü kavramı ele alınmıştır.
- 2) Bozucu etkilerinin giderilmesinde bir yol takip edilmesi açısından önce bozucular modellemiştir. Daha sonra bozucular özelliklerine göre sınıflandırılarak modellediğimiz işaretler bu sınıflandırmada kullanılmıştır. Benzetimler yardımı bozucuların sistem üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.
- 3) Bu çalışmadaki son aşama bozucu etkilerinin giderilmesidir. Bunun için bozucuların kaynağında giderilmesi, geri besleme ile giderilmesi ve öngörü yöntemi ile giderilmesi olarak üç yöntem önerilmiştir.  
Bozucu etkisinin giderilmesinde önerilen ilk yöntem bozucuların kaynağında giderilmesidir. Bu yöntem sistemin tasarımı ile ilgilidir. Eğer bozucular kaynağında giderilemiyorsa geri besleme ile giderilebilir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için bozucunun sistemi düzenli olarak etkilediği bölgenin bilinmesi gerekmektedir. Bu şekilde sistemde yüksek kazanç kullanarak bozucu etkisinin giderildiği benzetimde gösterilmiştir. Fakat bu yöntem beyaz gürültü için geçerli olmaktadır. Daha karmaşık bozucular ve gürültü için öngörü yöntemi kullanılması gerekmektedir.
- 4) İdeal öngörücü girişi  $x(t)$  işareti olan bir sistemde, çıkışı işareti girişin  $\tau$  zamanı kadar sonraki  $y(t)=x(t+\tau)$  değerini alan sistemlerdir.
- 5) Wiener ve Kalman yöntemlerinin uygulanabilmesi için sisteme giren  $x(t)$  işaretinin  $\phi_{xx}(s)$  güç dağılımının bilinmesi gerekir.. Bu öngörücü,  $\overline{e^2}(t)$  karesel ortalama yanılğının en küçükleştirilmesi sonucu elde edilir. Eğer işaretin bir istatistiksel özelliği olan  $\phi_{xx}(s)$  güç dağılımı göz önüne alınmazsa



6) optimal öngörücü  $G_0(s)=[e^{Ts}]_+$  ifadesinin belirttiği gibi nedensel ideal öngörücü yaklaşımına dönüşür.

7) Wiener yönteminden olası işaretler için Bode-Shannon çözüm yönteminin uygulanması gerekirken, belirgin bir  $x(t)$  işareti için geliştirilen nedensel optimal öngörücünün transfer fonksiyonu

$$G_0(s) = \frac{\int_{\tau}^{+\infty} x(\lambda)e^{-s(\lambda-\tau)}d\lambda}{X(s)} \quad (4.17)$$

denklemleri ile hesaplanır.

8) Transfer fonksiyonu  $e^{Ts}$  olan ideal öngörücü ister belirgin ister olası olsun, özelliği bilinen yada bilinmeyen her tür işaretin değerinin önceden kestirilmesinde kullanılır.

9) Kalman modeline göre geliştirilen optimal öngörücü Wiener modeline göre geliştirilen öngörücüye eşdeğerdir. Wiener öngörücüsü için belirtilen bütün nitelikler Kalman öngörücüsü içinde geçerlidir.

10) Wiener ve Kalman yöntemi arasındaki fark Wiener yönteminde giriş çıkış büyüklüklerinin oranında elde edilen transfer fonksiyonu kavramı kullanılırken Kalman yönteminde sistemin durum değişkenlerinden oluşan daha kısa bir yol izlenmesidir.

11) Wiener ve Kalman yöntemlerinin kullanılabilmesi için işaretin istatistiksel özelliklerinin bilinmesi gerekir. Eğer işaretin istatistiksel özellikleri bilinmiyorsa, yada bu özellikler zamanla çok değişken ise, ideal öngörücünün kullanılması gereklidir.

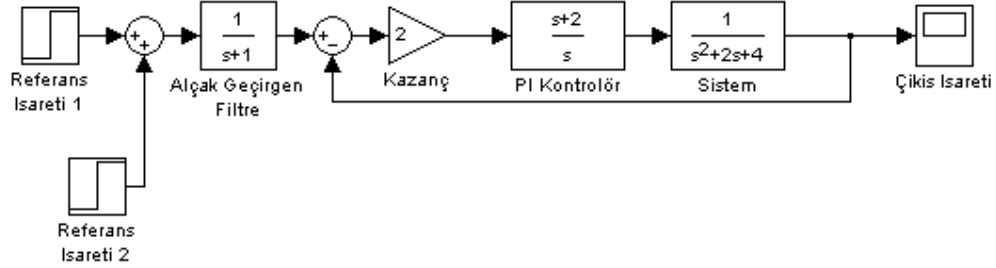
## KAYNAKLAR

- [1] **Söylemez, M.T.**, <http://triton.elk.itu.edu.tr/~soylemez/modelling.pdf>
- [2] **Kuo, B.C.** , 1995. Automatic Control Systems, Prentice Hall, N.J.
- [3] **Sariođlu, M.K.**, 1998.Dijital Kontrol Sistemleri, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [4] **Aström, K.J. and Hagglund, T.**, 1995. PID Controller, Research Triangle Park, N.C.
- [5] **Skogestad,S. and Postlethwaite,I.** , 1995. Multivariable Feedback Control, John Wiley, N.J.
- [6] **Aström, K.J. and Wittenmark, B.**, 1990. Computer Controlled Systems, Prentice Hall, N.J.
- [7] **Bir, A.**, 1975. Belirgin ve Olasıl Kontrol Sistemlerinde Prediksiyon, İ.T.Ü, İstanbul.
- [8] **Brown, R.G and Hwang, Y.C.**, 1997. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, Wiley, N.Y.
- [9] **Bingöl, Z.**, 2005. Matlab ve Simulink'le Modelleme / Kontrol 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [10] **Uzunođlu, M., Onar Ö.Ç. and Kızıl, A.**, 2003. Her Yönü ile Matlab, Türkmen Kitapevi, İstanbul.
- [11] **Schwarzenbach, J. and Gill, K.F.**, 1984. System Modelling and Control, The Pitman Press, Great Britain.
- [12] **Laning, J.H. and Battin, R.H.**, 1956. Random Processes in Automatic Control, McGraw-Hill,N.Y.
- [13] **Davenport, W.B. and Root, W.L.**, 1958. An Introduction to The Theory of Random Signals and Noise, McGraw-Hill,N.Y.
- [14] **Newton, G., Gould L. and Kaiser, J.**, 1957. Analytical Design of Linear Feedback Controls, John Wiley, N.J.
- [15] **Traxual, J.G.**, 1955. McGraw-Hill,N.Y.
- [16] **Kalman, R.E.**, 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Trans ASME, Series D, Journal of Basic Engineering.

- [17] **Kalman, R.E. and Bucy, R.S.**, 1960. New Result in Linear Filtering and Prediction Theory, Trans ASME, Series D, Journal of Basic Engineering.
- [18] **Kalman, R.E.**, 1961. On The General Theory of Control Systems, Proceedings first International Conference on Automatic Control, Moscow.

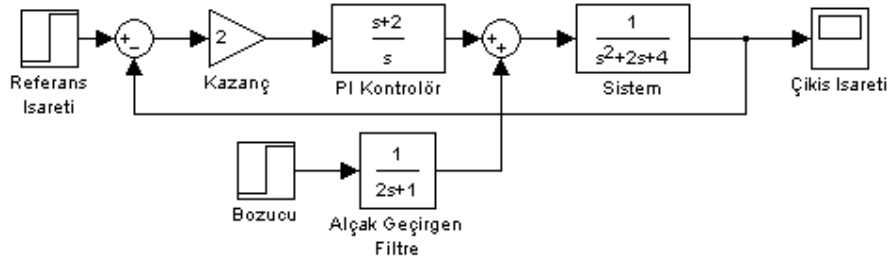
## EKLER

### EK A.1



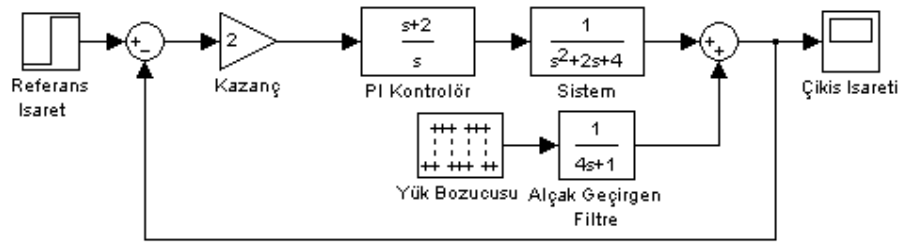
Şekil A.1 : Referans işaretindeki değişimden kaynaklanan bozucunun alçak geçirgen filtreden geçirilerek giderilmesi.

### EK A.2



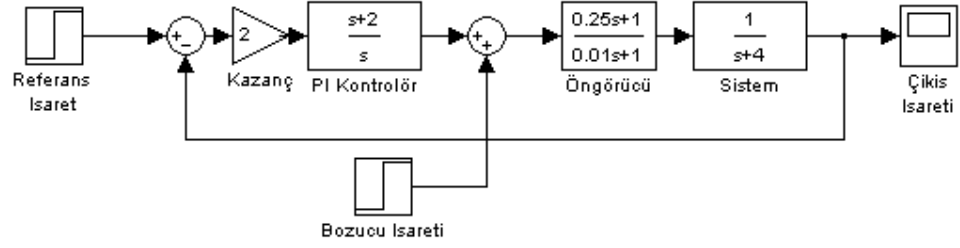
Şekil A.2 : Yük bozucusundan kaynaklanan bozucunun alçak geçirgen filtreden geçirilerek giderilmesi.

### EK A.3



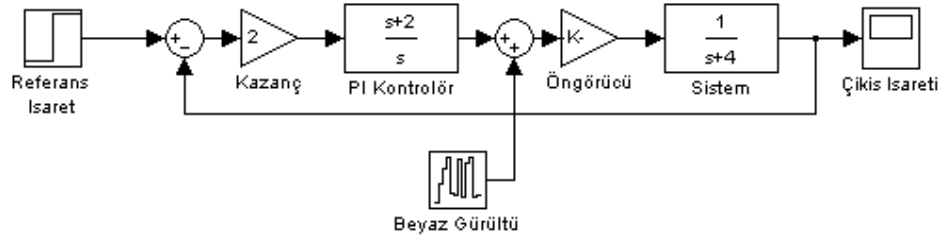
Şekil A.3 : Ölçüm gürültüsünden kaynaklanan bozucunun alçak geçirgen filtreden geçirilerek giderilmesi.

#### EK A.4



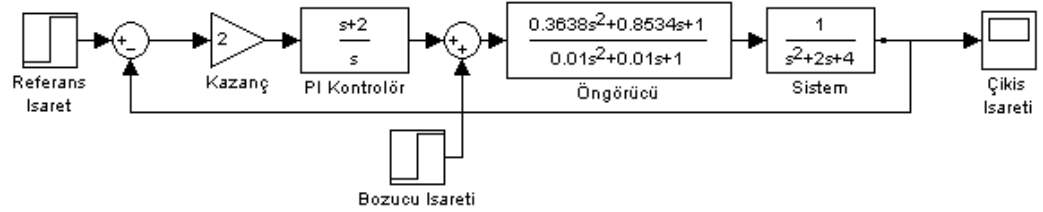
Şekil A.4 : Birinci derece sistemde basamak işareti biçimindeki bozucu işareti için Wiener öngörücüsünün uygulanması.

#### EK A.5



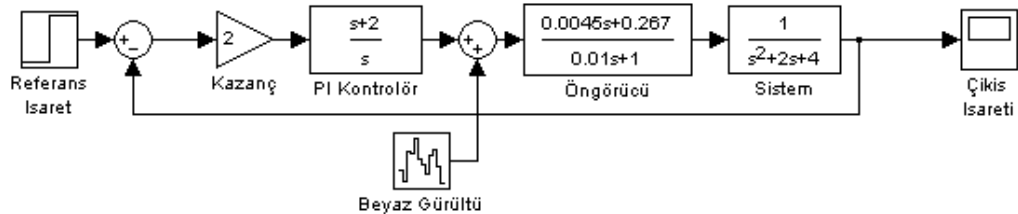
Şekil A.5 : Birinci derece sistemde beyaz gürültü biçimindeki bozucu işareti için Wiener öngörücüsünün uygulanması.

#### EK A.6



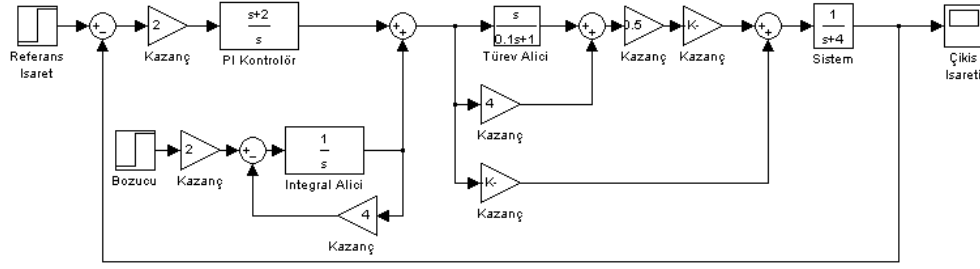
Şekil A.6 : İkinci derece sistemde basamak işareti biçimindeki bozucu işareti için Wiener öngörücüsünün uygulanması.

#### EK A.7



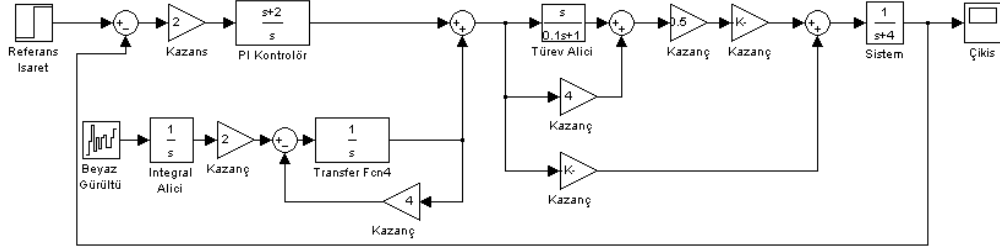
Şekil A.7 : İkinci derece Sistemde beyaz gürültü biçimindeki bozucu işareti için Wiener öngörücüsünün uygulanması.

### EK A.8



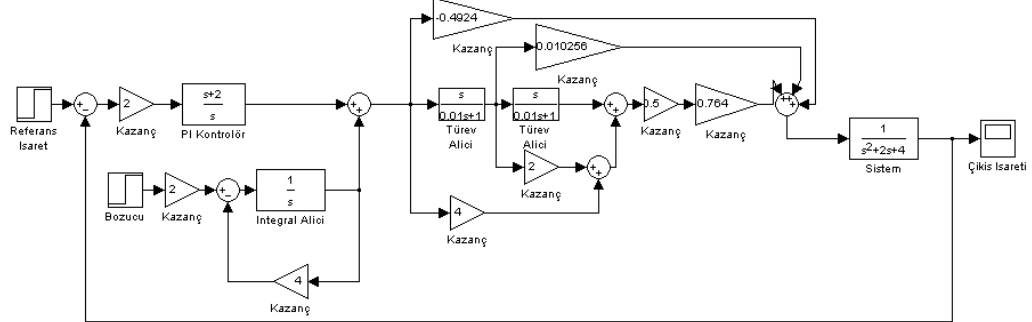
**Şekil A.8 :** Birinci derece sistemde basamak işareti biçimindeki bozucu işareti için Kalman öngörücüsünün uygulanması.

### EK A.9



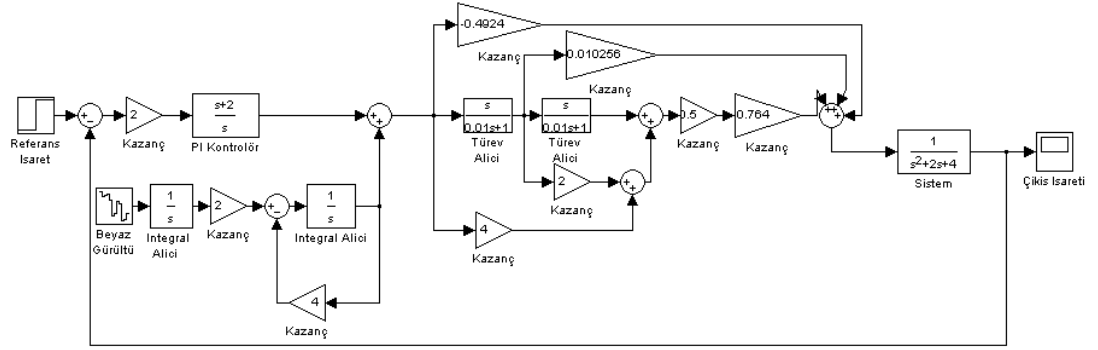
**Şekil A.9 :** Birinci derece sistemde beyaz gürültü biçimindeki bozucu işareti için Kalman öngörücüsünün uygulanması.

### EK A.10



**Şekil A.10 :** İkinci derece sistemde basamak işareti biçimindeki bozucu işareti için Kalman öngörücüsünün uygulanması.

## EK A.11



**Şekil A.11** : İkinci derece sistemde beyaz gürültü biçimindeki bozucu işareti için Kalman öngörücüsünün uygulanması.

## **ÖZGEÇMİŞ**

25.09.1982 tarihinde Kastamonu'da doğdu. 2000 yılında Kastamonu Abdurrahman Paşa Lisesini bitirdi. Kırıkkale Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden 2004 yılında bölüm ikincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliğinde yüksek lisans eğitimine başladı. 2007 yılından itibaren özel bir firmada mühendis olarak görev yapmaktadır.