

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN TASARIMI VE KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet YÜKSEK

Balıkesir, Şubat – 2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN TASARIMI VE KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet YÜKSEK

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ

Sınav Tarihi: 16/02/2011

Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ

(Danışman – BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Bayram ESEN

(BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Ayhan İSTANBULLU

(BAÜ)

Balıkesir, Şubat – 2011

ÖZET

MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN TASARIMI VE KONTROLÜ

Mehmet YÜKSEK

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

(YL Tezi / Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Metin DEMİRTAŞ)

Balıkesir, Türkiye, 2011

Günümüzde Manyetik Askı Sistemleri birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalara manyetik alanla çalışan yüksek hızlı yolcu trenleri, sürtünmesiz yataklar, maglev asansörler, ürün sergileme ve gösterimi, rüzgâr tüneli kalıplarının kaldırılması, harekete duyarlı makinelerinin titreşim yalıtımı, indüksiyon fırınların dökme metallerinin kaldırılması ve üretim aşamasında metal levhaların kaldırılması örnek olarak verilebilir.

Bu tez çalışmasında bu tür sistemlerinin temel ve basit bir tasarımına ait benzetim ve uygulama çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla küre şeklinde bir küçük kalıcı mıknatıs, bir elektromıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alan ile kontrol edilmektedir. Bu kontrol sonucunda yer çekimi, elektromıknatıs akımı ve bozucu etkenlere karşı kalıcı mıknatısın kararlı bir şekilde havada askıda tutulması sağlanmıştır.

Askıya alınan mıknatısın düşey pozisyonu doğrusal bir hall etkisi algılayıcısı kullanılarak ölçülmektedir. Bir mikrodenetleyiciye yüklenen PID ve kayan kip kontrolör programı tarafından geribesleme bilgisi değerlendirilerek; küre mıknatıs, elektromıknatıs akımı ile kararlı bir şekilde askıda tutulmaktadır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Manyetik Askı Sistemi / Levitasyon / PID / Kayan Kip / Otomatik Kontrol

ABSTRACT

DESIGN AND CONTROL OF MAGNETIC LEVITATION SYSTEM

Mehmet YUKSEK

**Balikesir University, Institute of Science,
Department of Electric-Electronic Engineering**

(M.Sc. Thesis / Supervisor: Assist.Prof.Dr. Metin DEMIRTAS)

Balikesir-Turkey, 2011

Today, Magnetic Levitation Systems are widely used in many engineering applications. Examples of these applications can be indicated high-speed passenger trains running on magnetic field, anti-friction bearings, maglev elevators, product merchandising and displaying, the removal of wind-tunnel patterns, vibration isolation of motion-sensitive instruments, the removal cast metals at the induction furnaces and the removal metal plates at production phase.

In this thesis, the simulation of such systems basic and simple design and application is studied. For this purpose, a small sphere shaped permanent magnet is controlled by the magnetic field generated by an electromagnet. As a result of this control, the permanent magnet suspended in the air is kept stable against gravity, electromagnetic current and disturbance factors.

Vertical position of the suspended magnet is measured using a linear Hall effect sensor. The spherical magnet is kept suspended via electromagnet current by evaluating feedback information from PID and sliding mode controller which is programmed by a microcontroller.

KEYWORDS: Magnetic Levitation Systems / Levitation / PID / Sliding Mode / Automatic Control

İÇİNDEKİLER	Sayfa
ÖZET, ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
ABSTRACT, KEYWORD	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	x
1.GİRİŞ	1
2.KULLANILAN KONTROL YÖNTEMLERİ.....	8
2.1 Kontrol Sistemlerinin Genel Yapısı.....	8
2.2 Oransal+Integral+Türevsel (PID) Kontrol	14
2.3 Kayan Kip Kontrol (KKK).....	17
3.MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN ELEKTROMEKANİK YAPISI	22
3.1 Elektromıknatıs	23
3.2 Hall Etkisi Algılayıcısı	25
3.3 Küre ve Disk Neodium Mıknatıs	27
3.4 Mikrodenetleyici Devre	29
3.5 Sürücü Devre	31
4.MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN KONTROLÜ	34
4.1 Sistemin Doğrusal Olmayan Durum Denklemleri.....	34
4.2 Sistemin Doğrusallaştırılmış Durum Denklemleri.....	38
4.3 PID Kontrolör Yapısı	41
4.4 Kayan Kip Kontrolör Yapısı	43
4.5 Analog Kontrolör İfadelerinin Sayısal Kontrolörde Karşılıkları.....	44
4.6 Manyetik Askı Sistemi Benzetim Çalışması.....	45
4.6.1 Sayısal Yaklaşımlı PID Kontrolör Benzetim Sonuçları	48
4.6.2 Sayısal Yaklaşımlı Kayan Kip Kontrolör Benzetim Sonuçları	53
4.7 Sisteme Dair Deneysel Çalışma.....	59
4.7.1 Sistemin PID ile Kontrolü.....	62
4.7.2 Sistemin Kayan Kipli Kontrolü	67
5.SONUÇ ve TARTIŞMA.....	70
EK A Tezde Kullanılan Yazılımlar	72
EK B Elde Edilen Grafiklerin Büyütülmüş Şekilleri.....	79
EK C Uygulamada Kullanılan PIC18F4550 Tümdevresi.....	89
6.KAYNAKLAR.....	91

SEMBOL ve KISALTMA LİSTESİ

<u>Sembol</u>	<u>Açıklama</u>	<u>Birimi</u>
l	Elektromıknatis nüve uzunluğu	mm
d	Elektromıknatis çapı	mm
r	Bobin teli çapı	mm
f	Elektromıknatis çekim kuvveti	N
u	Kontrol işareti	V
v	Hız	m/s
i	Akım	A
N	Bobin sarım sayısı	sarım
R	Direnç	Ω
L	Endüktans	H
e	Hata	V
e_k	Hatanın o anki değeri	V
e_{k-1}	Hatanın önceki değeri	V
m	Kütle	kg
y	Çıkış vektörü	-
x	Durum vektörü	-
K	Elektromıknatis katsayısı	Nm/A^2
h	Mıknatisin pozisyon değeri	m
h_e	Hall etkisi algılayıcısında oluşan gerilim	V
α	Hall etkisi algılayıcısına bağlı bir katsayı	-
β	Hall etkisi algılayıcısına bağlı bir katsayı	-
γ	Hall etkisi algılayıcısına bağlı bir katsayı	-
K_P	Oransal kazanç	-
K_I	Integral kazanç	-
K_D	Türevsel kazanç	-
c	Kayma yüzeyi eğimi	-
E	Saturasyon Bölgesi Eğim Katsayısı	-
Δt	Kontrol periyodu	ms
s	Anahtarlama yüzeyi	-
ϕ	Saturasyon bölgesi kalınlığı	-
PIC	Çevresel arabirim kontrolör	-
PID	Oransal-türevsel-İntegral	-
MAS	Manyetik askı sistemi	-
KKK	Kayan kip kontrol	-
DYKS	Değişken yapıllı kontrol sistemleri	-
DGM	Darbe genişlik modülasyonu	-
ADC	Analog-sayısal dönüştürücü	-
LCD	Likit kristal ekran	-

<u>Alt indisler</u>	<u>Açıklama</u>
or	oransal
int	integral
tür	türevsel
ölç	ölçülen
ref	referans
k	Hata sıra indisi
P	oransal
I	integral
D	türevsel

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 SS495A Ratiometric Lineer Hall Etkisi Algılayıcısı Özellikleri	27
Tablo 4.1 PID Katsayılarının Sistem Parametrelerine Cevabı	42

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Manyetik Askı Metoduna Ait Blok Diyagram	2
Şekil 2.1 James Watt'ın Döner Bilyalı Buhar Ayar Sistemi	8
Şekil 2.2 Açık Çevrim Kontrol Sistemi	9
Şekil 2.3 Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi	10
Şekil 2.4 Örnek Otomatik Kontrol Sistemleri	12
Şekil 2.5 İdeal Açık-Kapalı Kontrol Transfer Eğrisi	13
Şekil 2.6 Histerisiz Eğrili Açık-Kapalı Kontrol Transfer Eğrisi.	14
Şekil 2.7 Oransal Kontrol Tepki Eğrisi	15
Şekil 2.8 Oransal+İntegral Kontrol Tepki Eğrisi	16
Şekil 2.9 Oransal+Türevsel Kontrol Tepki Eğrisi	16
Şekil 2.10 Oransal+İntegral+Türevsel Kontrol Tepki Eğrisi	17
Şekil 2.11 KKK Altında Sistem Davranışı	19
Şekil 2.12 Kayma Yüzeyi ve Çatırtı	20
Şekil 3.1 Manyetik Askı Sistemi	22
Şekil 3.2 Manyetik Askı Sistemi Blok Diyagramı	23
Şekil 3.3 Elektromıknatıs	24
Şekil 3.4 Elektromıknatısta Akıma Bağlı Kutup ve Alan Çizgileri	24
Şekil 3.5 Hall Etkisi Algılayıcıda Manyetik Alana Bağlı Gerilim Oluşumu	26
Şekil 3.6 Honeywell SS495A Ratiometric Lineer Hall Etkisi Algılayıcısı	26
Şekil 3.7 Küre ve Disk Neodium Mıknatıslar	27
Şekil 3.8 Kontrolör Devresi	30
Şekil 3.9 Sürücü Devre	32
Şekil 3.10 Sürücü Devre Şeması	32
Şekil 4.1 Durum Uzay Temsilindeki Matris Yerleşimi	34

Şekil 4.2 Sistemin Elektriksel Modeli.....	35
Şekil 4.3 PID Kontrollü Bir Kontrol Sistemi.....	42
Şekil 4.4 Kayan kipli Kontrolör Blok Diyagramı	43
Şekil 4.5 Hall Etkisi Algılayıcısı ile Manyetik Askı Sistemi Elektriksel Modeli.....	46
Şekil 4.6 h , v , i , U , h_e Parametreleri Arasındaki Bağını.....	49
Şekil 4.7 Farklı K_D Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı.....	50
Şekil 4.8 Farklı K_P Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı.....	51
Şekil 4.9 Farklı K_I Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı.....	52
Şekil 4.10 $c=2000$ Olması Durumunda Kontrol İşareti ve Sistem Cevabı	54
Şekil 4.11 c Katsayısının Farklı Değerleri İçin Sistem Cevabı	55
Şekil 4.12 $c=60$ İken Saturasyonlu Kontrol İşareti ve Sistem Cevabı	56
Şekil 4.13 Farklı Eğim Katsayıları İçin Sistem Cevabı.....	57
Şekil 4.14 $c=100$, $E=200$ İken Saturasyonlu Sistem Cevabı.....	57
Şekil 4.15 Simetrik Olmayan Kontrol İşareti Kullanıldığında Kontrolör Cevabı	58
Şekil 4.16 Manyetik Askı Sistemi Kontrol Kartı.....	59
Şekil 4.17 DGM İşaretin Osilaskop Görüntüleri.....	60
Şekil 4.18 Disk Mıknatısın Askıda Tutulması	61
Şekil 4.19 Küre Mıknatısın Askıda Tutulması.....	61
Şekil 4.20 Küre ve Disk Mıknatısın Birlikte Askıda Tutulması.....	62
Şekil 4.21 Sayısal PID Kontrolör	63
Şekil 4.22 İki Farklı Referansa Bağlı Mıknatısların Denge Durumu	65
Şekil 4.23 İki Farklı Referansa Bağlı Pozisyon Bilgisinin Değişimi	66
Şekil 4.24 Referans 20 mm iken PID Kontrolörün Sistem Cevabı	67
Şekil 4.25 Kayan Kipli Kontrolör.....	68
Şekil 4.26 Klasik Kayan Kipli Kontrolörün Sistem Cevabı.....	69
Şekil 4.27 Kayan Kipli Kontrolöre Ait Kontrol İşareti.....	69

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmam boyunca her konuda yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Sayın, Yrd. Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmaya beni teşvik eden Balıkesir Meslek Yüksekokulu'nda başta Sayın Müdürümüz Prof. Dr. Cemal Okuyan'a, Sayın Müdür Yardımcımız Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Bulgurcu'ya, mesai ve oda arkadaşım Dr. Ersin AKYÜZ'e ve diğer bütün değerli çalışma arkadaşlarıma, tez çalışmamıza maddi olanaklar sağlayan BAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (2010/14 No'lu proje desteği), BAÜ MMF Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yardımlarını esirgemeyen öğretim üyesi hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve de aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Balıkesir, 2011 Mehmet YÜKSEK

1. GİRİŞ

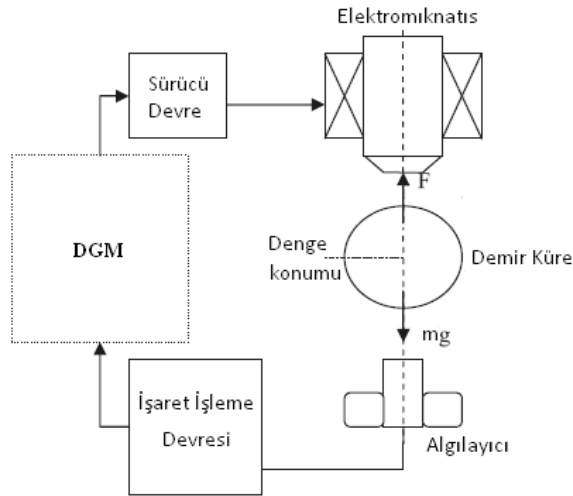
Manyetik askı herhangi bir metal nesneyi herhangi bir destek olmadan manyetik alanlar aracılığıyla temassız havada askıya alma, dengede tutma yöntemidir. Burada manyetik alan, yerçekimi etkisine karşı kullanılmaktadır.

Manyetik askı sistemi (MAS) yerçekimine karşı bir elektromıknatıs tarafından oluşturulan elektromanyetik alanın çekme kuvvetine göre manyetik süspansiyon sistemi (MSS) ve itme kuvvetine göre manyetik levitasyon sistemi (MLS) olarak adlandırılırlar [1].

1842'de Samuel Earnshaw kendi adıyla bilinen teoremiyle yalnızca statik ferromanyetizma kullanarak yer çekimine karşı kararlı bir askıda tutmanın olanaksız olduğunu ispatlamıştır [2]. Temassız kararlı denge durumu ancak diamanyetik materyaller, süper iletkenler kullanan servo makineler veya Eddy akımlarından faydalanan sistemler ile sağlanmaktadır.

1930'lardan beri bilinen, manyetik alan yardımıyla cisimleri havada tutma tekniği, bugünlerde birçok alanda uygulama alanı bulmaya başlamıştır. Mıknatısların bir diğerine dokunmadan karşılıklı kuvvet uygulamaları birçok kişinin ilgisini çeken bir olaydır. Buradan bir adım daha atıp, bir mıknatısın uyguladığı kuvvetin diğer bir mıknatısı, yerçekimine karşın havada asılı tutup tutmayacağı da merak edilebilir. Manyetik alanı ayarlayarak bir mıknatısın yerçekimini dengeleyip havada belli bir konumda asılı kalması sağlanabilir; ancak en küçük bir dış etki mıknatısın dengesini bozarak düşmesine yol açabilir. Sistemin doğasından kaynaklanan bu denge eksikliği, 1842'de ortaya atılan ve Earnshaw Teoremi olarak bilinen bir fizik yasasıyla açıklanmaktadır. Bu teorem, elektrik ve manyetizma için geliştirilmiş Maxwell denklemlerinin doğrudan bir sonucudur. Bilinmesi gereken yalnızca, bir mıknatısın davranışının manyetik potansiyel denilen, potansiyel enerjiye

(depolanan enerji) çok benzeyen bir kavram yardımıyla açıklanabileceğidir. Engebeli bir yüzey üzerinde bulunan bir bilye, potansiyel enerjisinin en hızlı azaldığı yöne doğru yuvarlanacak ve potansiyelin minimum olduğu yerde üzerine etkiyen kuvvet sıfır olacaktır. Bunun gibi, havaya yükseltlen bir mıknatıs da, manyetik potansiyelin minimum olduğu bir noktaya getirildiğinde havada dengeli bir şekilde asılı durabilir. Fakat Maxwell denklemleri bize, uzayın bir noktasındaki potansiyelin, bu noktayı kuşatan noktaların potansiyellerinin bir ortalaması olması gerektiğini söyler. Bu nedenle manyetik potansiyel, boş uzayda hiçbir yerde bir minimuma ulaşamaz. Bazı yakın noktaların manyetik enerjisi daha düşükken, bazılarınıninki daha yüksek olacaktır. Earnshaw Teoremi'nin açık anlamıyla karşı karşıya gelen araştırmacılar, cisimleri havaya kaldırmak için başka yollar aradılar. Şekil 1,1'de gösterilen Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) zamanla değişen alanların kullanılması yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, aktif geribildirimle kaldırma yönteminde, havaya yükseltilmiş cismin konumunu ölçmek için algılayıcılar kullanılır. Bunların yardımıyla cisimi havada tutmayı sağlayacak manyetik alan tam olarak ayarlanır.



Şekil 1.1 Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Manyetik Askı Metoduna Ait Blok Diyagram

Tren uygulamaları için Fransa ve İngiltere'de geliştirilen hava yastığı prensibine ek olarak, eksensel olarak dönen ve hareket halindeki cisimlerin kaldırılmasında kullanılan yöntemler [3];

Sabit ve ferromanyetik mıknatıslar arasında oluşturulan itme kuvvetinin kullanılması,

Diamanyetik maddeler ve itme kuvveti kullanarak havaya yükseltme,

Süper iletken yüzeyler ve süper iletken mıknatıslar kullanarak havaya yükseltme,

Güçlü frekanslarda, çoğunlukla süper iletken bir yüzey veya bir gövdede girdap (Eddy) akımlarının neden olduğu itme kuvvetini kullanarak havaya yükseltme,

Manyetik bir alanda, akım taşıyan doğrusal bir iletkene etki eden kuvveti kullanarak havaya yükseltme,

İki plaka arasında elektrostatik çekme kuvveti ve ayarlı bobin-kondansatör-direnç (LCR) devresi kullanarak askıya alma,

Bir ferromanyetik gövde ile bir elektromıknatıs arasındaki çekme kuvveti ve ayarlı LCR devresi kullanarak askıya alma,

Karma μ havaya yükseltme sistemi,

Mıknatıslanmış gövdeler arasındaki çekme kuvveti ve doğru akım kontrollü elektromıknatıs kullanarak askıya alma

şeklinde sıralanabilir.

Manyetik askı sistemleri yüksek hızlı manyetik alanla çalışan yolcu trenleri, sürtünmesiz yataklar, maglev asansörler, ürün sergileme ve gösterimi, rüzgâr tünel kalıplarının kaldırılması, harekete duyarlı makinelerinin titreşim yalıtımı, indüksiyon fırınların dökme metallerinin kaldırılması ve üretim aşamasında metal levhaların kaldırılması gibi birçok mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler klasik sistemlere nazaran daha farklı avantajlar da sunuyor. Örneğin; Maglev asansörleri daha sessiz ve konforlu olmanın haricinde normal asansörlere göre hızlıdır. Bu Maglev asansörler dakikada 300 metreye kadar

yükselebiliyor. Toshiba firmasının yaptığı başka bir asansör ise dakikada bin 10 metreye kadar çıkabiliyor. Bunun dışında Çin’de kullanılan yüksek hızlı trenler içinde yolcu taşıyabilen tek tren, Pudong Uluslararası Havaalanı’nı Şangay’a bağlıyor ve saatte 430 kilometre hızla yolcularına konforlu, sessiz ve rahat seyahat imkânı sağlıyor. Bu tür mühendislik uygulamalarında başarılı sonuçların alınması için kullanılan kontrol sistemlerinin de iyi olması gerekir.

Tang, manyetik askıda tutma literatür çalışması olarak, tek boyutlu, 2 boyutlu ve daha üst dereceden hem analog hem de sayısal kontrolü baz alan çeşitli çalışmalar yapmıştır [4].

Wong ve Edwards tarafından demir bir kürenin elektromanyetik süspansiyonu için tek bir doğru akım elektromıknatısıyla gerçekleştirilen deneysel amaçlı sistemler incelenmiştir. Sistemin kontrolünde kullanılan analog kontrolör, oransal ve türevsel kontrolör olarak işlem yapmaktadır. Bu çalışmalarda sistem için gerekli olan elektromıknatıs ile kontrol devresinin tasarım ve uygulama parametreleri kullanılarak sisteme yeniden kurulmuş ve başarı ile çalıştırılarak çok sayıda deney yapılmıştır [5-6].

Hurley gerçekleştirmiş olduğu “manyetik süspansiyon sisteminin elektromanyetik tasarımı” adlı çalışmasında sistemin, sayısal kontrol, bulanık mantık kontrolörü ve DGM anahtarlamalı güç devresi ile kontrol edilebileceğini tavsiye etmektedir [7].

Cho ve arkadaşları manyetik askı sisteminde kayan kipli kontrol (KKK-Sliding Mode Control-SMC) ve klasik faz ilerletici kontrol yöntemlerini kullanmıştır ve kayan kipli kontrol yöntemiyle elde edilen kontrol sisteminin farklı frekanslardaki referans işaretlerini, klasik faz ilerletici kontrolörlü sisteme göre daha az hatayla takip ettiğini gözlemlemiştir [8]. Bir başka çalışmada ise Lee ve arkadaşları doğrusal olmayan manyetik askı sistemini kaskat bağlı bir sistem olarak kabul etmiş ve geleneksel KKK yönteminden yola çıkarak tümleyici değişken yapılı kontrol yöntemini kullanmıştır [9]. Bu

yöntem ile sistem çıkışının referans işaretini daha az hatayla izlediği de gözlemlenmiştir.

Takeshi ve arkadaşları bir kalıcı mıknatıs, bir piezoelektrik eyleyici, bir küçük demir küre ve optik pozisyon sensörlerinden oluşan sistemlerinde, bir durum-uzay modeli oluşturmuş ve optimum regülatör teorisi ile geri besleme kazançlarını hesaplanmışlardır [10]. Bu mikromanipülasyon için hareket kontrolü sistemini tanımlamak için ilk rapordur. Demir küre başarıyla askıya alınmakla birlikte büyük genlikte aşmalar da (overshoot) gözlemlenmiştir. Daha iyi ve üstün sinyal – gürültü oranlarına sahip pozisyon sensörleri kullanılmadığı için daha geniş hız kazançlarında askıda tutma başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Kararlı bir askıda tutma için, üstün algılamalı bir metot zorunlu olacağı sonucuna varılmıştır.

Akad ve Efe dört farklı kontrol yöntemini kurdukları doğrusal olmayan manyetik askı sistemi üzerinde sınımışlar ve bu yöntemleri basitlik, yerleşme zamanı, kontrol sinyali uygulanabilirliği açısından karşılaştırmışlardır [11]. Erkal çalışmasında eğitim amacıyla tasarlanmış ve çelik bir bilyanın yerçekimine karşı havada asılı kalmasını sağlamak üzere bir elektromıknatısın ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Denetim Sistemi) ile kontrolünü gerçekleştiren bir sistemin tasarımını ve benzetimini yapmış, ayrıca sistemin bir modelini Matlab Simulink ortamında oluşturmuştur [12].

Açık çevrim kontrol sistemleri kararsız sistemler oldukları için kararlılığın ve istenen performansın sağlanması için geri beslemeli kontrol mekanizmalarının kullanılması şarttır. Bu anlamda en çok oransal+integral+türevsel (PID) ve türevi kontrolörler kullanılmıştır. PID kontrolörler farklı çalışma koşullarındaki iyi performansları ve uygulamaya yönelik kolaylıkları nedeniyle birçok tasarımda kullanılmıştır [13]. Shiao sistemin doğrusallaştırılması sonucu elde edilen model ile faz ilerletici tipte bir kontrolör tasarlamış ve kontrolörün performansını doğrusal olmayan sistem üzerinde göstermiştir [14]. Bir başka çalışmada Famo ve arkadaşları

sistemin davranışını ve sistemde kullanılan algılayıcıların dinamik modellerini çalışma noktalarında doğrusallaştırıp öngörülü kontrol yöntemini kullanmıştır [15]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda sistem modelinde doğrusal olmayan dinamiklerin de ele alındığı örneklere rastlamak mümkündür. KKK yöntemi doğrusal olmayan sistemlerin gürbüz kontrolü için etkili bir yaklaşımdır. Literatürde, füze güdüm kontrolü, doğrusal olmayan kimyasal süreçlerin kontrolü ve robotlarda yörünge kontrolü gibi geniş bir uygulama alanı bulan KKK yaklaşımı bu çalışmada da ele alınan yöntemlerden biridir [16-18].

Bu çalışmanın benzetim kısmında, Matlab M file ortamında sistemin doğrusallaştırılmış durum denklemleri kullanılarak manyetik askı sistemine ait benzetim çalışması Runge-Kutta Sayısal yaklaşımı ile PID ve kayan kip kontrolörler ile yapılmıştır. Sistemin çalışması ile birlikte u kontrol işareti, h küre pozisyon bilgisi, i elektromıknatis akım değeri, v mıknatis küre hız değerinin değişimi gözlemlenmiş ve sistemin kontrolör cevapları grafikler halinde elde edilmiştir. Kontrolörler farklı P, I, D, c, E katsayıları ve farklı başlangıç konumları ile çalıştırılarak sistem cevapları incelenmiş, deneysel çalışma devresindeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan uygulama çalışmasında manyetik askı sisteminin kontrolü PIC18F4550 mikrodenetleyicisi kullanılarak yapılmıştır. Önce pozisyon bilgisi algılama amaçlı laser mesafe ölçücü optik algılayıcılar denenmiş, fakat bu sensörlerin cevap zamanının 30–40 ms’lerde olması ve nesneyi görmedeki kararsız davranışları nedeniyle bundan vazgeçilmiştir. Daha sonra kızılötesi alıcı ve verici kullanmak suretiyle bu ihtiyaç giderilmeye çalışılmış ama ondan da Hall etkisi algılayıcılarının daha verimli olacağı düşüncesi ile vazgeçilmiştir.

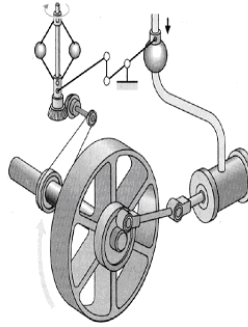
Yapılan çalışma; giriş, kullanılan kontrol yöntemleri, manyetik askı sisteminin elektromekanik yapısı, manyetik askı sisteminin kontrolü, sonuç ve tartışma bölümlerinden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, literatür taraması yapılmış, yapılan çalışmanın önemi açıklanmıştır. Bir sonraki bölümde

uygulamada kullanılan kontrol yöntemleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, manyetik askı sisteminin genel yapısı ve kullanılan malzemeler anlatılmış, gerekli devre düzeneklerinin açıklamaları yapılmıştır. Dördüncü bölümde manyetik askı sisteminin durum denklemleri, benzetim çalışmaları, devre düzeneği ve denetleyicilerin programlanması yapılmıştır. Elde edilen sonuçların grafikleri çizilmiş ve grafiklerin analizleri yapılmıştır. Sonuç ve tartışma bölümünde ise, elde edilen bilgiler irdelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

2. KULLANILAN KONTROL YÖNTEMLERİ

2.1 Kontrol Sistemlerinin Genel Yapısı

Otomatik Kontrol, insan müdahaleleri olmaksızın bir sistemde giriş ve çıkışlar arasında denge kuran, çalışmada devamlılığı sağlayan işlemler olarak tanımlanabilmektedir. Otomatik kontrol sistemleri insanların daha rahat yaşayabilmesi için kullandığı cihazların istenilen ayar değerlerinde çalışmasını sağlar. Ev kalorifer sistemi otomatik kontrol sistemine bir örnektir. Kalorifer sisteminden istenilen, oda sıcaklığını belli bir hararete sabit tutmaktır. Bunun için kalorifer bölümü çalışarak kazanı ısıtır. Kazandan sıcak olarak çıkan su, radyatörle odayı ısıtmaya başlar. Termostat, odadaki sıcaklık istenilen değere gelince brülörü durdurur. Yanma olmayınca kazan suyu soğumaya başlar. Oda sıcaklığı belli bir miktar düşünce, termostat tekrar brülörü ateşler. Böyle basit otomatik kontrol sisteminde termostata oda sıcaklığı olarak yapılan ilk ayar giriş; kalorifer radyatörünün odaya yaydığı ısı ise çıkıştır. Burada otomatik olarak kontrol edilen kıymet ise, odanın belli bir sıcaklıkta müdahalesiz sabit kalmasıdır. Bilinen ilk otomatik kontrol sistemi, Şekil 2.1’de gösterilen 1787 senesinde James Watt’ın buhar türbin dönme devrini ayarlayan döner bilyeli buhar ayar sistemidir.



Şekil 2.1 James Watt’ın Döner Bilyeli Buhar Ayar Sistemi

Dinamik sistemlerin temelini oluşturan geri besleme kavramının bilincine çok yakın zamanlarda varılmış olmasına rağmen bu düşüncenin eski çağlardan beri algılandığı ve başarı ile uygulandığı bilinmektedir.

Bir sistemin davranışının istenildiği şekilde değiştirilmesine yönelik çalışmalara kontrol denir. Davranışları kontrol edilen sistemler kontrol sistemidir. En genel anlamda hedeflere ulaşmak için stratejiler içeren sistemlere kontrol sistemleri denir.

Bir kontrol sisteminin üç temel ögesi vardır:

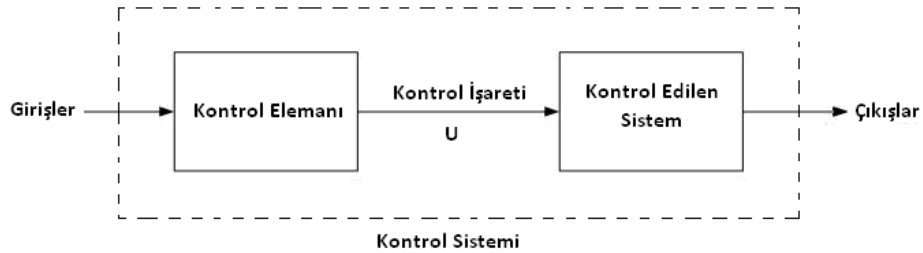
Amaçları belirleyen girişler

Kontrol sistemi (Kontrol elemanı - Kontrol edilen sistem)

Sonuçları belirleyen çıkışlar

Genel olarak kontrol sisteminin amacı, kontrol sisteminin elemanları aracılığı ile girişleri kullanarak, çıkışları önceden belirlenmiş bir şekilde kontrol etmektir.

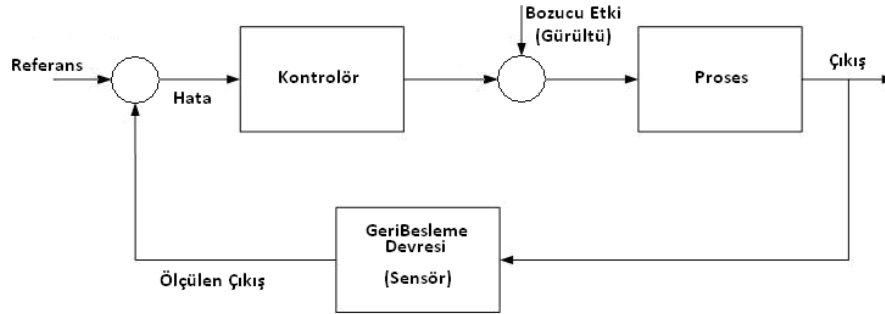
Açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere iki temel kontrol stratejisi bulunmaktadır.



Şekil 2.2 Açık Çevrim Kontrol Sistemi

Kontrol işareti, çıkış işaretinden etkilenmeyen sistemlere açık çevrim kontrol sistemleri denir. Açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Örnek: Çamaşır makinesi, ekmek kızartma makinesi, trafik ışıkları vb. Bir açık çevrim kontrol sistemi, sistem parametrelerindeki değişiklikler ya da sisteme etkiyen bozucular nedeniyle sistem çıkışında oluşabilecek olan değişiklikleri düzeltemez.

Sisteme etkiyen kontrol işaretinin sistem çıkışının da göz önüne alınarak üretildiği kontrol sistemlerine kapalı çevrim (geri beslemeli) kontrol sistemleri denir. Kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Çıkışın bu şekilde sistem girişine yansıtılması işlemine geri besleme denir.



Şekil 2.3 Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi

Otomatik kontrol sisteminde ilk ayar edilen değer, giriş sinyalidir. Sistem bu sinyali alır almaz harekete geçerek belli bir iş yapar, sistemin yaptığı bu iş çıkış sinyalidir. Otomatik kontrol sistemlerinde istenilen, çıkış sinyali ile referans girişinin birbirine eşit olmasıdır. Giriş ve çıkış sinyalinin birbirine eşit olmadığı durumda meydana gelen fark, hata sinyalidir. Hata sinyali giriş ve çıkış sinyalinin mukayese edildiği karşılaştırmacıdan elde edilir. Hata sinyali çoğu zaman çok küçük olduğu için yükseltilmesi icap eder. Bu maksatla yükseltici kullanılır. Yükselticiyle beraber çalışan ayrıca bir işlem

sırasını tayin eden kontrolör de bulunabilir. Çıkış sinyali, hareket, basınç, frekans hisseden bir eleman (algılayıcı) vasıtasıyla geri besleme olarak karşılaştırıcıya gönderilir.

Endüstriyel işlem ve imalat teknolojisindeki ısı, basınç, hız, rutubet, viskozluk vb. fiziksel büyüklüklerin, istenilen değer ve seviyede tutulması, uçakların otomatik pilot sistemleri, füze ve uzay araçlarının istenilen yerlere ulaştırılması gibi problemler, otomatik kontrol sistemlerinin bilim ve teknolojiadaki tatbikat sahalarıdır. Otomatik kontrol sistemleriyle ilgili örnekler Şekil 2.4'de verilmiştir.

Örnek – Elektromekanik Sist.



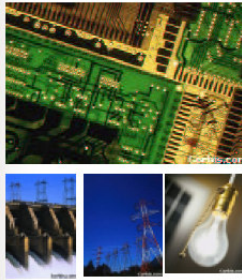
- Örnek sistem: Elektrik motoru
- Olası işaretler:
 - Armatür gerilimi,
 - armatür akımı,
 - motor milinin açısı,
 - açısal hız

Örnek – Mekanik Sistemler



- Örnek Sistem: Araba
- Olası İşaretler:
 - Arabanın konum, açı ve hızı
 - Direksiyonun konumu
 - Fren, gaz pedallarının konumu
 - Vites konumu
- Ayrıca
 - Balatalara uygulanan fren darbeleri (ABS fren sistemi)
 - Tekerlerin kayması ya da patınaj yapması

Örnek – Elektriksel Sistemler



- Sistem: Bir elektrik devresi
- Olası işaretler:
 - gerilim,
 - akım

Örnek – Trafik Yoğunluğu



- Sistem: Şehir trafiği
- Olası İşaretler:
 - Bir bölgede kırmızı ışıkta bekleyen araba sayısı
 - Bir sokaktaki ortalama araç hızı
 - Bir noktada kırmızı ışık yanma süresi



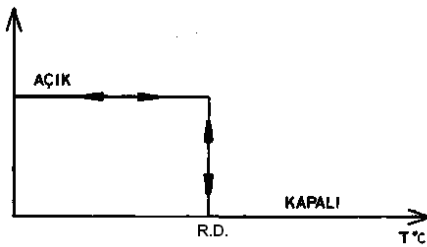
Şekil 2.4 Örnek Otomatik Kontrol Sistemleri

Otomatik kontrol döngüsünde kontrolör blok yerine yerleştirilecek herhangi bir kontrol cihazı istenen referans değeri etrafında çalışması gereken hassasiyette sistemi kontrol etmelidir. Sürecin gerektirdiği hassasiyetle çalışacak, hatayı gereken oranda minimuma indirecek çeşitli kontrol formları vardır. Bunlardan bazıları olarak;

- Açık-kapalı (on-off) kontrol
- Oransal + Integral + Türevsel kontrol (P+I+D)
- Kayan kipli kontrol (Sliding Mode Control-SMC)
- Bulanık mantık kontrol (Fuzzy Logic Control-FLC)
- Ve diğer türev kontrol şekilleri

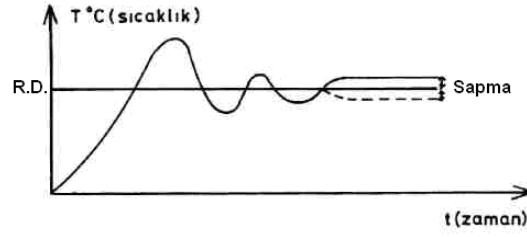
sayılabilir.

Açık-kapalı kontrol, cihazı istenen referans değerin üstünde veya altında ayar değişkenini açar veya kapar. Kontrol cihazının çıkışı iki konumdadır; ya tamamen açık, ya da tamamen kapalıdır. Örneğin ayar değişkeni elektrik enerjisi olan sistemde kontrol cihazı, referans değerinin altında elektrik enerjisini sisteme tamamen verir, referans değerinin üstünde ise tamamen keser veya tam tersi düşünülebilir.



Şekil 2.5 İdeal Açık-Kapalı Kontrol Transfer Eğrisi

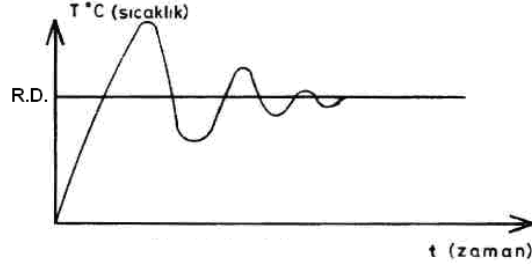
Açık-kapalı kontrolde kontrol altında tutulan değişken sürekli salınım halindedir ve referans değerinin etrafında salınır. Bu salınımda tepeden



Şekil 2.7 Oransal Kontrol Tepki Eğrisi

Referans değeri ile sistemin oturduğu ve sabit kaldığı sıcaklık arasındaki farka “sapma (offset)” denir. Oransal kontrol yapan bir sistemde sapma miktarı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Sapmayı azaltmak için oransal band küçültülebilir. Ancak, daha önce de belirtildiği gibi oransal band küçüldükçe, açık-kapalı kontrole yaklaşıldığı için referans değeri etrafında salınımlar artabilir. Geniş oransal bandda sapmanın büyük olacağı düşünülerek sürece en uygun oransal bandın seçilmesi gerekir. Bir süreçte tüm ayarlamalar yapıldıktan sonra örneğin artı oluşan sapma değeri süreçte birkaç küçük değişiklik olması ile eksi değere gidebilir veya artı olarak yükselebilir.

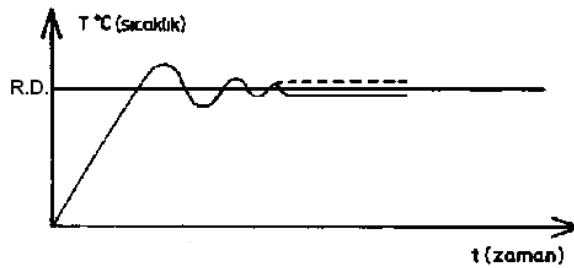
Oransal kontrolde oluşan sapma, manuel veya otomatik olarak kaldırılabilir. Otomatik resetleme için kontrol cihazı, elektronik integratör devresi kullanılır. Ölçülen değer ile referans değeri arasında fark sinyalinin zamana göre integrali alınır. Bu integral değeri, fark değeri ile toplanır ve oransal band kaydırılmış olur. Bu şekilde sisteme verilen enerji otomatik olarak artırılır veya azaltılır. Böylece süreç sıcaklığı referans değerine oturtulur. Integratör devresi gerekli enerji değişikliğine, referans değeri ile ölçülen değer arasındaki fark kalmayınca kadar devam eder. Fark sinyali sıfır olduğu anda artık integratör devresinin integralini alacağı bir sinyal söz konusu değildir. Herhangi bir şekilde bazı değişiklikler olup, sıcaklık değerinden uzaklaşacak olursa tekrar fark sinyali oluşur ve integratör devresi düzeltici etkiyi gösterir.



Şekil 2.8 Oransal+İntegral Kontrol Tepki Eğrisi

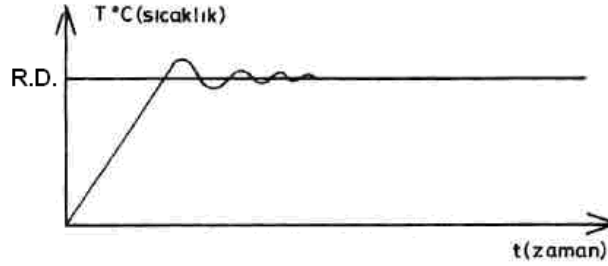
Oransal+integral kontrolün en belirgin özelliği sistemin sıcaklığı ilk başlatmada referans değerini geçer, önemli bir miktar yükselme yapar (Yukarı aşma - Overshoot). Referans değeri etrafında bir-iki salınım yaptıktan sonra referans değerine oturur. Bu durum Şekil 2.8'de gösterilmiştir.

Oransal kontrolde oluşan sapma oransal+türevsel kontrol ile de kaldırılmaya çalışılabilir. Ancak türevsel etkinin asıl fonksiyonu yukarı aşma - aşağı aşma'ları azaltmaktır. Yukarı aşma ve aşağı aşmalar azalırken bir miktar sapma olabilir. Oransal+türevsel kontrolde referans değeri ile ölçülen değer arasındaki fark sinyali, elektronik türev devresine gider. Türevi alınan fark sinyali tekrar fark sinyali ile toplanır ve oransal devreden geçer. Bu şekilde düzeltme yapılmış olur. Burada yukarı aşma ve aşağı aşmalar daha azdır. Türevsel etki düzeltici etkisini hızlı bir şekilde gösterir. Oransal+türevsel tepki eğrisi Şekil 2.9'da sunulmuştur.



Şekil 2.9 Oransal+Türevsel Kontrol Tepki Eğrisi

Kontrolü güç, karmaşık sistemlerde Oransal kontrol, Oransal+türevsel, Oransal+integral kontrolün yeterli olmadığı süreçlerde Oransal+integral+türevsel kontrol tercih edilmelidir. Kısaca bu kontrolü tanımlayacak olursak; oransal kontrolde oluşan sapma Oransal+İntegral kontrol ile giderilir. Ancak, meydana gelen yukarı aşmalar bu kontrole Türevsel etkinin de eklenmesi ile minimum seviyeye indirilir veya tamamen kaldırılır. Oransal-İntegral-Türevsel kontrolün diğer şekillerde verilen tepkisel eğrilerine göreceli olarak tepki eğrisi Şekil 2.10'da verilmektedir. Dikkat edilecek olursa diğerlerine nazaran hemen hemen yok denecek kadar az yukarı aşma (Overshoot) - aşağı aşma (Undershoot) ve sapma kaldırılmış durumdadır. P, I, D parametrelerinin iyi ayarlanıp ayarlanmamasına bağlı olarak elde edilen kontrol eğrisi değişebilir.



Şekil 2.10 Oransal+İntegral+Türevsel Kontrol Tepki Eğrisi

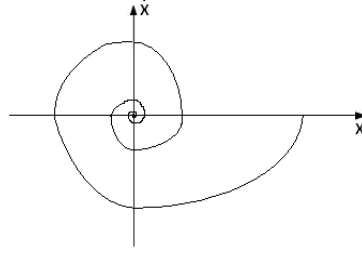
2.3 Kayan Kip Kontrol (KKK)

Değişken Yapılı Kontrol Sistemleri (DYKS)'nde KKK, dış bozucular ve sistem parametreleri değişimlerine karşı kontrol sistemine büyük dayanıklılık sağlayan oldukça özel bir yaklaşımdır. Ayrıca, temelde Lyapunov kararlılık koşullarına dayanan bu tasarım yöntemi, doğrusal ya da doğrusal olmayan sistemler için kontrolör tasarımına da büyük bir kolaylık sağlamaktadır.

KKK 1960'lı yıllardan beri üzerinde araştırma yapılan bir kontrol tekniğidir. KKK içeren geribeslemeli sistem bozuculara karşı gürbüz olduğu için araştırmacıların ilgisini çekmekte ve bu alanda her sene düzenlenen konferanslarda birçok müspet bulgu rapor edilmektedir. Çevreden sisteme karışabilecek parazitlere ve bozuculara karşı olan gürbüzlüğü sayesinde KKK yaklaşımı, robotik sistemler, otomotivde motor kontrol sistemleri ve manyetik askı sistemleri gibi çok çeşitli uygulama alanlarında başarılı biçimde uygulanabilmiştir [16-18].

KKK, sürücü sistemlerde kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir. Bu yöntem genellikle özel bilgilere sahip olmayan veya tahmin edilemeyen değişkenler tarafından etkilenen sistemler için kullanılmaktadır. Bu yöntemin belirgin avantajlarından biri sistemin değişkenlere ya da bozuculara karşı dayanıklılığını artırmaktır. Gerçekte kayan kip kontrolör karmaşık sistemler için tasarlanan Bang-bang kontrolör olarak ta adlandırılmaktadır. Kayan kipi tasarlamak için öncelikle kayma yüzeyi eğiminin belirlenmesi gerekir. Kayma yüzeyi eğimi durum uzay değişkenlerinin kararlı şartlara erişmek için onun etrafında dalgalandıkları bir eksendir.

Genellikle tek girdi ve tek çıktılı sistemlerin kontrolünde kullanılan yöntemlerden biri olan KKK, DYKS yaklaşımının özel bir halidir. Bu yaklaşımdaki ana amaç, durum uzayında uygun şekilde tanımlanan “anahtarlama yüzeyi (switching surface)” veya “kayma yüzeyi (sliding surface)” aracılığıyla seçilen kontrol değişkeninin referans ve ölçülen değerleri arasındaki fark (hata) ile bu hatanın zamana bağlı türevlerini sıfır yapmak veya durum değişkenlerini tanımlanan bir denge konumuna taşımaktır. KKK altında çalışan bir sistemin davranışı Şekil 2.11'de verilmiştir. x üzerinde herhangi bir konumda bulunan sistem durumları sonlu zamanda orijine ulaşmaktadır. Böylece sistem kararlı çalışmaktadır.



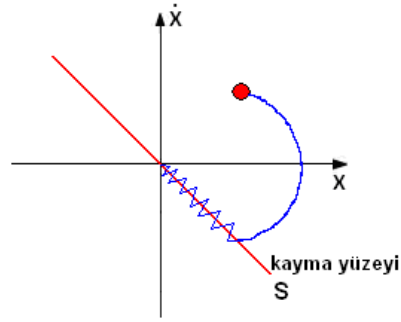
Şekil 2.11 KKK Altında Sistem Davranışı

Bundan sonra sistem “kayma rejimi”ndedir ve modelleme hataları ve/veya dış bozuculardan etkilenmez. Bahsedilen ilk durum takip sistemine karşılık gelirken, ikinci yaklaşım düzenleme sistemleri için uygulanmaktadır. Kayan kipli kontrolde sistemin durum değişkenleri buldukları ilk konumdan önce kayma yüzeyinin üzerine, buradan da belirlenen denge noktasına taşınırlar. Bahsedilen ilk aşama “ulaşma aşaması (reaching phase)” olarak adlandırılırken, ikinci safha “anahtarlama aşaması (switching phase)” olarak bilinmektedir. Burada kayma manifoldu üç durum değişkenli sistemlerde kayma yüzeyi ve iki değişkenli sistemlerde de kayma doğrusu halini almakta olup, eğimi; ulaşma aşaması için öngörülen süreye göre hesaplanmaktadır.

KKK yaklaşımında kontrol sinyali, durum uzayında kayma manifoldunu ifade eden denklemin karesinden oluşturulan Lyapunov fonksiyonunu enaza indirgeyecek şekilde belirlenir. Kontrol sinyalini oluştururken kullanılan bir diğer parametre olan kararlılık parametresi de, kontrol sisteminden beklenen yerleşme zamanı; dolayısıyla da bant genişliği değeri esas alınarak bulunur. KKK yöntemi, olası parametre değişiklikleri ve bozucu girişlere karşın kontrol sisteminin kararlılığını belirlenen hassasiyet sınırları içerisinde sağlayabilmektedir. Ayrıca sistem dinamiğini ifade eden denklemlerin doğrusallaştırılmış olmasını da zorunlu kılmamaktadır.

Öte yandan, işletim süresince sistemin kararlılığını koruyabilmek amacıyla hata veya durum değişkenlerini kayma manifoldu üzerinde tutmak için kontrol kuralının sürekli genlik ve yön değiştiren bir kontrol sinyali

üretmesi nedeniyle, uygulamada çatırtı (chattering) denilen istenmeyen bir durum ortaya çıkmaktadır. Bu durum Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Çatırtı, kontrol edilen sistemde yorulmalara sebep olmakta ve sistemin ömrü ciddi oranda kısalmaktadır. Ayrıca, sistemi istenildiği şekilde kontrol edebilmek için belirtilen değişken genlik ve yöndeki akım her zaman eğleticilerle sağlanamamaktadır.



Şekil 2.12 Kayma Yüzeyi ve Çatırtı

Çatırtının azaltılması için çeşitli önerilerde bulunulmuş olup, belirtilen öneriler; aslında çatırtı ile kontrol kararlılığı arasında bir uzlaşma sağlanması esasına dayanmaktadır. Bir başka deyişle sistemin kararlılık marjından bir miktar fedakârlık edilerek çatırtının şiddeti azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu durum, çatırtıyı hissedilir oranda sönmemesine karşın, kontrol sisteminin gürbüzlüğü azaltılmaktadır. Çatırtıyı enaza indirirken sistem kararlılığından fedakârlık etmemek amacıyla uygulanan bir diğer yöntem de kayma manifoldu eğiminin işletim süresince kontrol sisteminin bulunduğu konuma göre değiştirilmesidir. Ancak, belirtilen yaklaşım yüksek işlem hızları gerektirmesi dolayısıyla özellikle düşük çalışma frekanslı uygulamalarda gerçekleştirilememektedir. Bununla birlikte, göz önüne alınan durum değişkenlerinin tamamının ölçülmesi veya gerçek değerine en yakın şekilde kestirilmesi gerektiğinden ve kontrolcünün ayrık zamana çevrilmesi sırasında karşılaşılabilecek sorunlar, KKK yönteminin klasik kontrol yaklaşımlarına dezavantajını oluşturmaktadır. Diğer taraftan, başta güdümlü mühimmatlar

için geliştirilen güdüm ve kontrol algoritmaları olmak üzere KKK'ün uygulandığı önemli mekatronik çalışmaları da mevcuttur.

Bundan sonraki bölümde, çalışmada kullanılan MAS'nin yapısı ve kullanılan malzemeler incelenmiştir.

3. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN ELEKTROMEKANİK YAPISI

Elektromanyetik askı sistemi, küçük bir küre veya disk şeklinde kalıcı mıknatıs havada askıda tutmak amacıyla bir elektromıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanı kontrol etmektedir. Askıya alınan mıknatısın düşey pozisyonu doğrusal bir hall etkisi algılayıcısı kullanılarak ölçülmekte ve elektromıknatıs akımı kararlı bir askıda tutma için aktif olarak kontrol edilmektedir.



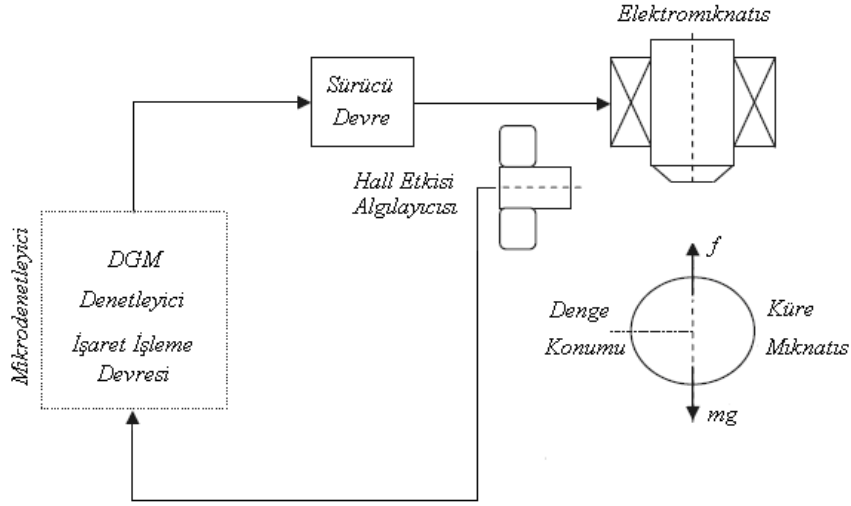
Şekil 3.1 Manyetik Askı Sistemi

Şekil 3.1'de gösterilen manyetik askı sistemi,

- Elektromıknatıs
- Hall etkisi Algılayıcı
- Küre veya Disk Sabit Neodim Mıknatıs
- Mikrodenetleyici Devresi
- Sürücü Devre

bileşenlerini içermektedir.

Bu çalışmaya temel teşkil eden Manyetik Askı Sisteminin genel yapısına ait blok diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Manyetik Askı Sistemi Blok Diyagramı

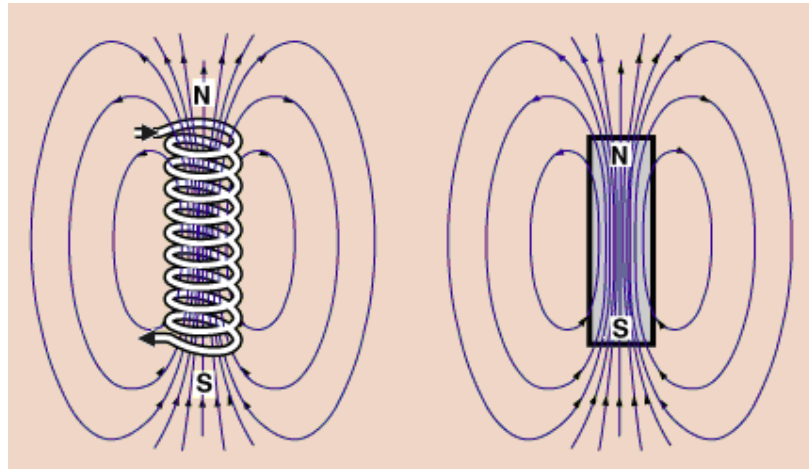
3.1 Elektromıknatıs

Bu çalışmada $\ell = 100$ mm uzunluğunda, etrafı kestamit kaplı $d = 12,5$ mm yarıçapında düşük karbonlu demir silindir etrafına $N = 1000$ sarımlı $r = 0,5$ mm yarıçapında izoleli bobin telinden yapılan $L = 35$ mH ekdüktans değerine sahip bir elektromıknatıs kullanılmıştır. Demir nüve üzerine sarılmış bobinle elde edilen elektromıknatıs Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Elektromıknatıs

Demir bir nüve üzerine sarmal bir şekilde sarılan telden geçen elektrik akımı, demir çubuğun bir ucunda çekme, bir ucunda itme kuvveti oluşturur. Bu, tıpkı bir mıknatısın gösterdiği özelliklerdir. Bu yüzden elektrik akımı yoluyla elde edilen mıknatıslara “elektromıknatıs” denir. Sistemde kullanılan elektromıknatıs çubuk mıknatısın bütün özelliklerini taşır. Çubuk mıknatıs gibi N ve S olmak üzere iki kutbu vardır ve bu kutuplar arasında manyetik alan kuvvet çizgileri yani manyetik alan oluşturur. Manyetik alan kuvvet çizgilerinin N'den S'ye doğrudur.



Şekil 3.4 Elektromıknatısta Akıma Bağlı Kutup ve Alan Çizgileri

Elektromıknatısın kutuplarının yönü iletkenden geçen akım yönüne bağlıdır. Elektromıknatısta meydana gelen alan çizgileri Şekil 3.4'te gösterilmiştir [19].

Elektromıknatısın bağlandığı üretcin kutupları değiştirilirse elektromıknatısın kutupları da dolayısıyla manyetik alanın yönü de değişir. Elektromıknatısın manyetik alanının çekim gücünü arttırmak için demir nüvenin üzerindeki iletken telin (bobinin) sarım sayısı veya elektrik akımının şiddeti arttırılmalıdır.

Elektromıknatısın kutupları SAĞ EL KURALI ile bulunur. Sağ el kuralında;

Sağ elin dört parmağı akım yönünü gösterirse, sağ elin başparmağı manyetik alan yönünü gösterir (Manyetik alan N'den S'ye doğrudur). Sağ elin başparmağı akım yönünü gösterirse (Akım yönü, çizilen elektromıknatıs şekline göre değişkenlik gösterebilir), sağ elin dört parmağının kapanma yönü manyetik alan yönünü gösterir (Manyetik alan N'den S'ye doğrudur).

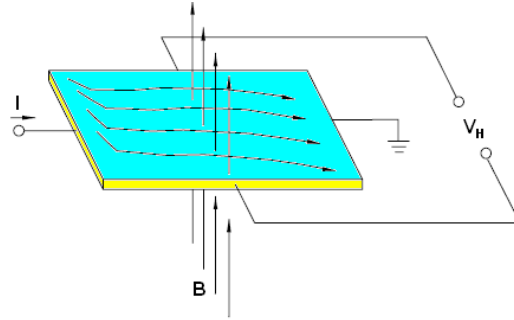
3.2 Hall Etkisi Algılayıcısı

Hall algılayıcısı hall etkisine dayanır. Manyetik alan içerisinde bulunan ve üzerinden akım geçen bir iletken boyunca gerilim (Hall gerilimi) oluşması olayına Hall etkisi denilmektedir. 1879'da Edwin Hall tarafından keşfedilmiştir. Gerilimin doğrultusu iletkenden geçen akımın ve manyetik alanın yönüne diktir.

Hall elemanı küçük, ince ve düz yarı iletken maddeden yapılmıştır. İki sürekli mıknatıs arasına iletken dikey olarak monte edildiğinde ve iletkene bu durumda besleme voltajı uygulandığında iletkendeki elektronlar besleme akımı ve mıknatıslara karşı dikey olarak saparlar ve ardından bir tarafta elektron fazlalığı oluşur diğer tarafta ise iki uçta potansiyel farkı oluşturacak şekilde elektron azlığı olur. Bu duruma hall etkisi denir. Üretilen gerilim,

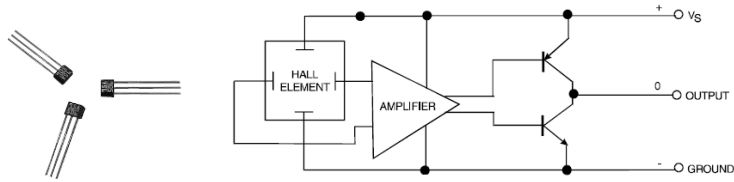
akım ve manyetik alan yoğunluğu ile orantılıdır. Akım sabit ise çıkış manyetik alan yoğunluğu ile orantılı olacaktır. Hall etkisi algılayıcıda manyetik alana bağlı gerilim oluşumu Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

Bununla birlikte bu gerilim yeteri kadar büyük değildir ve kullanımdan önce güçlendirilir.



Şekil 3.5 Hall Etkisi Algılayıcıda Manyetik Alana Bağlı Gerilim Oluşumu

Endüstrideki potansiyel kullanım uygulamaları; akım algılama, motor kontrol, pozisyonu algılama, manyetik kod okuma, enkoder, metal dedektörü, titreşim algılama, sıvı seviyesi ve akış algılama, basınç-ağırlık algılama sayılabilir.



Şekil 3.6 Honeywell SS495A Ratiometric Linear Hall Etkisi Algılayıcısı

Bu çalışmada Honeywell SS495A Ratiometric lineer Hall etkisi algılayıcısı kullanılmıştır. SS495A kodlu algılayıcının devresi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Yine bu algılayıcıya ait özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir [20].

Tablo 3.1 SS495A Ratiometric Lineer Hall Etkisi Algılayıcısı Özellikleri

SS495 SPECIFICATIONS, $V_s = 5.0\text{ V}$, $T_A = -40\text{ to }+125^\circ\text{C}$				
Catalog Listings		SS495A* Standard	SS495A1* High Accuracy	SS495A2* Basic
Supply Voltage (VDC)		4.5 to 10.5	4.5 to 10.5	4.5 to 10.5
Supply Current @ 25°C (mA)	Typ.	7.0	7.0	7.0
	Max.	8.7	8.7	8.7
Output Type (Sink or Source)		Ratiometric	Ratiometric	Ratiometric
Output Current (mA)	Typ. Source	$V_s > 4.5\text{V}$	1.5	1.5
	Min. Source	$V_s > 4.5\text{V}$	1.0	1.0
	Min. Sink	$V_s > 4.5\text{V}$	0.6	0.6
	Min. Sink	$V_s > 5.0\text{V}$	1.0	1.0
Magnetic Range	Typ.	-670 to +670 Gauss (-67 to +67 mT)		
	Min.	-600 to +600 Gauss (-60 to +60 mT)		
Output Voltage Span	Typ.	0.2 to $(V_s - 0.2)$	0.2 to $(V_s - 0.2)$	0.2 to $(V_s - 0.2)$
	Min.	0.4 to $(V_s - 0.4)$	0.4 to $(V_s - 0.4)$	0.4 to $(V_s - 0.4)$
Null (Output @ 0 Gauss, V)		2.50 ± 0.075	2.50 ± 0.075	2.50 ± 0.100
Sensitivity (mV/G)		3.125 ± 0.125	3.125 ± 0.094	3.125 ± 0.156
Linearity, % of Span	Typ.	-1.0%	-1.0%	-1.0%
	Max.	-1.5%	-1.5%	-1.5%
Temperature Error Null Drift (%/°C)		$\pm 0.06\%$	$\pm 0.04\%$	$\pm 0.07\%$
Sensitivity Drift (%/°C)	$\geq 25^\circ\text{C Max.}$	$-0.01\% + 0.05\%$	$-0.01\% + 0.05\%$	$-0.02\% + 0.06\%$
	$< 25^\circ\text{C Max.}$	$-0.00\% + 0.06\%$	$-0.00\% + 0.06\%$	$-0.01\% + 0.07\%$

3.3 Küre ve Disk Neodim Mıknatıs

Bu çalışmada 12,5 mm çapında ve 9 gr ağırlığında küre, ve 12,5 mm çapında, 2,5 mm kalınlıkta ve 3 gr ağırlığında disk neodim mıknatıslar kullanılmıştır. Küre ve disk mıknatısın yapısı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Küre ve Disk Neodim Mıknatıslar

Askıya alınan nesne olarak mıknatısın tercih edilmesi, elektromıknatıs akımının daha küçük değerlerde kontrol edilebilmesi ve pozisyon bilgisi

üreten devre elemanı olarak Hall etkisi algılayıcılarının kullanılabilmesi gibi iki önemli avantaj sağlamıştır.

Manyetik özellikleri açısından paramanyetik, ferromanyetik ve diyamanyetik olmak üzere üç madde çeşidi tanımlanır. Paramanyetik ve ferromanyetik sürekli dipol momentli atomlara sahiptir. Diamanyetik maddelerin atomları ise sürekli dipol momente sahip değildir. Daha açık olarak cisimler az veya çok şiddetli olmak üzere manyetik özellikler gösterirler. Maddeler manyetik alandaki mıknatıslanmalarına göre paramanyetik, ferromanyetik ve diyamanyetik olmak üzere üç kısımda toplanırlar.

Demir, kobalt, nikel, godyum ve dispozyum oldukça manyetik maddelerdir ve bunlara ferromanyetik madde denir. Ferromanyetik maddeler sabit (kalıcı) mıknatısların yapımında kullanılırlar. Bunlar zayıf bir manyetik alan içinde bile birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışan atomik manyetik dipollere sahiptirler. Bu tür maddeler bir manyetik alan içinde alan yönünde ve çok şiddetli olarak mıknatıslanırlar. Ferromanyetik maddeler bir mıknatısca kuvvetli olarak çekilirler ve çubuk şeklinde iseler asıldıklarında, çubuğun uzun eksenini alan doğrultusuna paralel oluncaya kadar bir moment etkisinde kalırlar.

Paramanyetik maddelerin mıknatıslanmaları çok zayıf ve bu mıknatıslanması da mıknatıslayıcı alan yönündedir. Bu tür, sıvı oksijen, azot oksit, ozon, platin, palladyum, alüminyum, krom, manganez, v.b. gibi maddeler kuvvetli bir mıknatıs tarafından hafifçe çekilirler.

Atomları sürekli manyetik dipol momente sahip olmayan maddeler diyamanyetik maddeler denir. Diamanyetik maddelerin mıknatıslanmaları çok zayıf ve mıknatıslanmasında mıknatıslayıcı alanla zıt yönlüdür. Bu maddeler kuvvetli bir mıknatıs tarafından hafifçe itilirler. Bakır, gümüş, kurşun, antimon, bizmut v.b. metaller, bütün yarı metaller ve organik maddelerin çoğu diyamanyetiklerdir. Çubuk halinde böyle bir madde manyetik alan içine

salınırsa, çubuk, büyük eksen manyetik alana dik oluncaya kadar bir moment etkisinde kalır. Bu madde atomlarının daimi bir manyetik momenti yoktur fakat bunların atomlarında dış bir manyetik alan etkisi manyetik bir dipol momenti oluşturulabilir.

Demir, nikel, kobalt gibi ferromanyetik maddeleri çekme özelliği gösteren cisimlere “mıknatıs” denir. Doğal ve yapay olmak üzere iki çeşit mıknatıs vardır. Doğal mıknatıs içerisinde manyetit adı verilen demir oksit bileşiği içeren kayaç doğal mıknatıstır. Kullandığımız mıknatıslar yapay mıknatıslardır. Mıknatıslar kullanım alanlarına göre farklı şekil ve büyüklükte yapılırlar. Yapay mıknatısların yapımında daha çok demir ve çelikten yararlanılır. Bir mıknatısın mıknatıslığı sıcaklıkla azalır.

Neodimium mıknatıslar yüksek çekim şiddetli çok amaçlı mıknatıslardır. Neodimium mıknatıslar NdFeB Neodimium-demir-bor elementlerinin alışımlama yöntemi ile üretilir. Üretilen alışımlara toz meterolijisi yöntemiyle presleme sinterleme ve ısı işlemlere tabii tutularak manyetik karakter kazandırılmaktadır.

Neodimium mıknatıslar yüksek manyetik şiddet, yüksek kuvarsivite gibi avantajlarının yanında kolay kırılması ısı karşısında manyetik özelliğini kaybetmesi gibi dezavantajlara sahiptir. Kullanım yerleri olarak separatörler, manyetik filtreler, tıbbi cihazlar, elektrik motorları, otomotiv, elektronik sektörü gibi birçok alan sayılabilir.

3.4 Mikrodenetleyici Devre

Küre veya disk şeklinde kalıcı mıknatısı havada askıda tutmak amacıyla bir elektromıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanı kontrol eden sisteme ilişkin mikrodenetleyici kullanılmış elektronik kontrolör devresi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

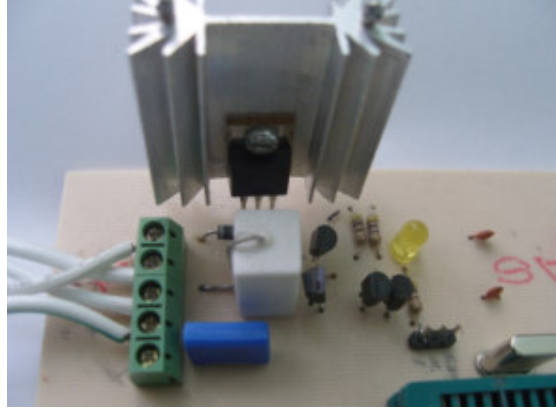
Askıya alınan mıknatısın düşey pozisyonu, doğrusal bir hall etkisi algılayıcısı aracılığıyla mutlak ve fark değeri olarak PIC18F4550 mikrodenetleyicisinin A0 ve A1 analog portlarından 10 bit çözünürlükle okunur. 0-1023 arasında okunan bu değerler işaret işleme algoritmasından geçirilerek mesafe bilgisine dönüştürülür. Mutlak bilginin yanısıra fark bilgisinin de oluşturulmasının nedeni alternatif olarak çözünürlük aralığı daha geniş bilginin kullanılmasına olanak sağlamaktır. Bu olanak elektromıknatıs akımını kontrol etmek için değiştirilen kaynak geriliminin değişim duyarlılığını arttırmaktadır. Alınan pozisyon bilgisi referans bilgisi de kullanılarak hata bilgisini oluşturmakta ve bu bilgi PID ve kayan kip kontrolör için bir giriş verisi olarak kullanılmaktadır.

Konumun referans değeri, ölçülen değeri ve ikisi arasındaki fark olan hata bilgisi ve türetilen çıkış değeri anlık olarak Likit Kristal Ekran (LCD) üzerinde okunup, yapılmak istenenle çıkan sonuç karşılaştırılmaktadır. Bu da sistem çalışmasının doğruluğu açısından bize gerekli veriyi oluşturmaktadır. Tabii ki gerçek kontrol aşamasında LCD ekran bir gecikme oluşturacağından devrede pasif konuma geçirilmektedir.

Sayısal PID ve KKK kontrolör yapısı aracılığıyla $u(t)$ çıkış işareti belirlenerek PIC18F4550'nin iki donanımsal DGM kanalından HPWM1 kanalı yoluyla 10Khz'lik bir karedalğanın darbe/boşluk oranını 8 bit çözünürlükle uygun değere ayarlanarak kontrol çıkışı elde edilir. Bu çıkış elektromıknatısı sürmede kullanılan sürücü devrenin de giriş sinyal işaretini oluşturur.

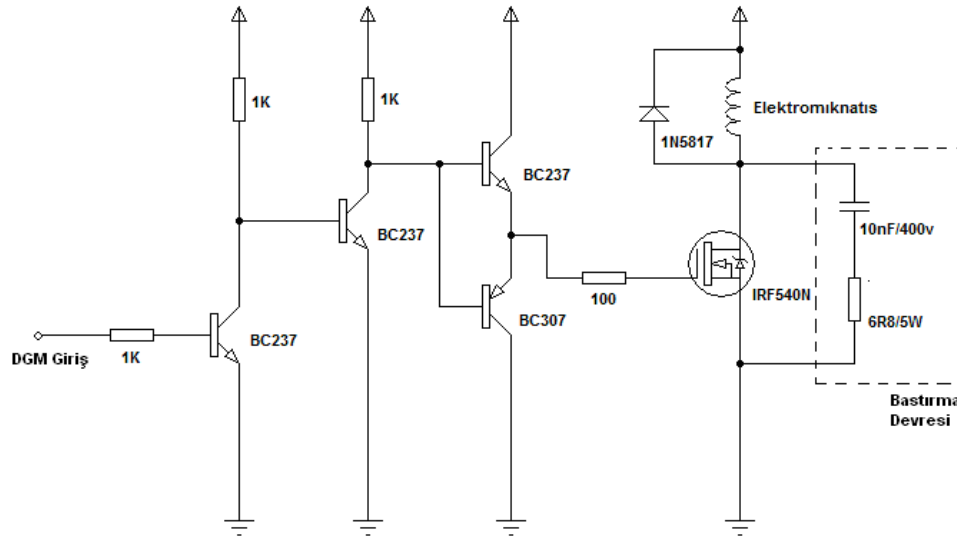
3.5 Sürücü Devre

Sürücü devre mikrodenetleyicinin HPWM çıkışındaki 8 bit çözünürlüklü 0-5v arası $u(t)$ kontrol çıkış işaretini elektromıknatısı sürmede kullanılabilecek uygun gerilim ve akım işaretine dönüştürmek için kullanılır. Devrede kullanılan IRF540N mosfet anahtarlama elemanı olarak kullanılmıştır. Sürücü devre Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Sürücü Devre

Bu sürücü devre katına ilişkin devre şeması Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 Sürücü Devre Şeması

Anahtarlama elemanları kesime girme esnasında anahtar uçlarında hızlı bir gerilim yükselmesine ve iletme girme esnasında hızlı bir akım

yükselmesine maruz kalırlar. İletim esnasında bastırma devresi olmadığı durumda, akımın yükselmesi anahtarın müsaade edilen di/dt 'sinden çok daha büyük olabilir. Bu durumda bir iletim bastırma devresi kullanılarak akımın yükselme hızı sınırlandırılabilir. Benzer olarak anahtar, kesim esnasında aşırı gerilimlere veya dv/dt 'ye maruz kalabilir. Bu durum da bir kesim ya da aşırı gerilim (overvoltage) bastırma devresi kullanılarak düzeltilebilir.

Bastırma devrelerinin kullanımı çok amaçlıdır. Bu devreler; koruma, akım ve gerilim dalga şekillerini biçimlendirme (anahtarlama kayıplarını azaltmak için) ve geçici rejim esnasındaki aşmaları (overshoot) azaltmak için kullanılır.

MOSFET'lerin anahtar-mod uygulamaları için sahip olduğu güvenli kare çalışma alanından dolayı, MOSFET devrelerindeki bastırma ihtiyacı güç transistörlerine nazaran oldukça azdır. Bununla birlikte, küçük bir R-C kesim bastırma devresi kesim esnasında MOSFET uçlarındaki gerilim osilasyonlarını ve gerilim sıçramalarını önlemek için kullanılabilir.

Bu tip bir bastırma devresi, yüksek anahtarlama frekanslarında ve akım komütasyon döngüsündeki büyük kaçak ve rasgele parazit (stray) indüktanslarında daha da gerekli hale gelir. Güç MOSFET'lerinin yüksek anahtarlama hızlarına sahip olmaları ve büyük tepe akımlarına dayanma kapasiteleri birçok durumlarda iletim bastırma devresi gereksinimini ortadan kaldırır. Üç temel bastırma (snubber) devresi mevcuttur:

- 1) Kesim bastırma devresi
- 2) İletim bastırma devresi
- 3) Aşırı gerilim (overvoltage) bastırma devresi

4. MANYETİK ASKI SİSTEMİNİN KONTROLÜ

4.1 Sistemin Doğrusal Olmayan Durum Denklemleri

Lineer diferansiyel denklem sistemlerini tanımlamak için birkaç farklı yol vardır. Durum uzayı temsili Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'de verilmiştir:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + Fw(t) \quad (4.2)$$

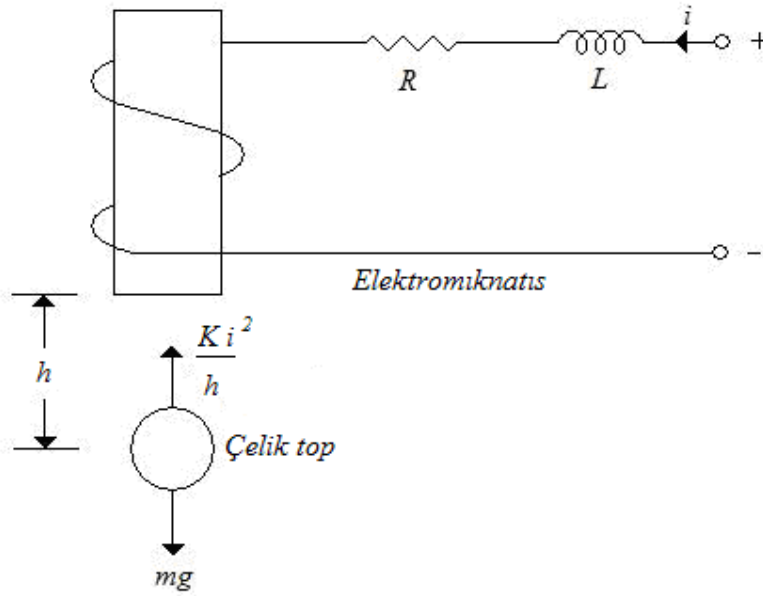
Burada x , durumu temsil eden ($n \times 1$) bir durum vektörünü, u kaynağı ifade eden ($p \times 1$) giriş vektörünü ve w ise bozucu etken ve gürültüyü ifade eden ($v \times 1$) bozucu vektörüdür. y ise çıkışı ifade ($q \times 1$) bir çıkış vektörüdür. A ($n \times n$), B ($n \times p$), C ($q \times n$), D ($q \times p$), E ($n \times v$) ve F ($q \times v$) matrisleri durum, giriş – çıkış ve bozucu etken değişkenleri arasındaki ilişkileri, bağıntıları tanımlayan katsayı matrisleridir. Durum uzay temsilindeki matris yerleşimi Şekil 4.1'de verilmiştir.

A	B	E
C	D	F

Şekil 4.1 Durum Uzay Temsilindeki Matris Yerleşimi

Doğrusal olmayan sistemlerin analiz ve sentezi genellikle zor olduğundan koşullar elverdiğince doğrusallaştırmaya başvurulması gerekir. Durum uzayı gösterimi (temsili) tek girişli tek çıkışlı sistemler için kullanılabilirdiği gibi, çok giriş çok çıkışlı sistemler içinde kullanılabilir.

Manyetik Askı Sisteminin durum uzayı gösterimi tek girişli tek çıkışlı bir sistem modeli olarak kullanılabilir. Tasarlanan sistemin elektriksel yapısı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Sistemin Elektriksel Modeli

Akım, manyetik bir materyalden yapılmış topu havada asılı tutacak ve topun yer çekimi kuvvetiyle dengelenebilen, bobin boyunca bir manyetik kuvvet indükler.

Bu sistemin modellenmesi birçok farklı çalışmada yapılmıştır [21].

Askiya alınacak demir küreye elektromıknatis tarafından uygulanan kuvvet için Denklem 4.3 yazılabilir.

$$F = K \frac{i^2(t)}{h(t)} \quad (4.3)$$

Burada;

F; Çekim kuvvetini, (N)

i(t); Elektromıknatıstan akan bobin akımını, (A)

K; Elektromıknatis katsayısını, (Nm/A²)

h(t); Küre ile elektromıknatis arasındaki mesafeyi (m)

temsil etmektedir.

Newton'un hareket yasaları olan ve bir cisim üzerine etki eden kuvvetler ve cismin hareketi arasındaki ilişkileri ortaya koyan üç yasa şu şekildedir [21]:

“Bir cisim üzerine dengelenmemiş bir dış kuvvet etkiledikçe, cisim hareket durumunu (durağanlık veya sabit hızlı hareket) korur”

“Bir cisim üzerindeki net kuvvet, cismin kütlesi ile ivmesinin çarpımına eşittir”

“Her etkiye karşılık eşit ve zıt bir tepki vardır”

Newton kuvvet ve Kirchooff gerilim yasaları gereği sisteme ilişkin diferansiyel denklemler Denklem 4.4 ve Denklem 4.5'teki gibi yazılabilir:

$$m \frac{d^2 h(t)}{dt^2} = mg - K \frac{i^2(t)}{h(t)} \quad (4.4)$$

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Burada;

$h(t)$; Topun düşey konumunu, (m)

$i(t)$; Elektromıknatıstan akan bobin akımını, (A)

$U(t)$; Uygulanan kaynak gerilimini, (V)

m ; Kürenin kütlesini, (Kg)

g ; Yerçekimi ivmesini, (m/s^2)

L ; Bobin endüktansını, (H)

R ; Bobin direncini, (Ω)

K ; Elektromıknatıs katsayısını (Nm/A^2)

temsil eder.

Durum değişkenleri konum, hız ve akım sırasıyla Denklem 4.6, Denklem 4.7 ve Denklem 4.8 deki gibi tanımlanır.

$$x_1(t) = h(t) \quad (4.6)$$

$$x_2(t) = \frac{dh(t)}{dt} \quad (4.7)$$

$$x_3(t) = i(t) \quad (4.8)$$

Bu durumda sistemin durum denklemleri sisteme ilişkin diferansiyel denklemler de kullanılarak Denklem 4.9, Denklem 4.10 ve Denklem 4.11'deki gibi elde edilir.

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \quad (4.9)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = g - \frac{Kx_3^2(t)}{mx_1(t)} \quad (4.10)$$

$$\frac{dx_3(t)}{dt} = -\frac{R}{L}x_3(t) + \frac{1}{L}u(t) \quad (4.11)$$

4.2 Sistemin Doğrusallaştırılmış Durum Denklemleri

Fiziksel sistemlerde bulunan birçok eleman ve sürücünün karakteristiği doğrusal değildir. Uygulamada bazı sistemlerdeki doğrusalsızlıkların ılımlı düzeyde olduğu ya da sadece belirli çalışma bölgelerinin dışına çıkıldığında etkili hale geldiği görülür. Bu düzenlerin kısmen belirli çalışma bölgelerinde, doğrusal sistem olarak modellenmesi, yeterli doğrulukta analitik sonuçlar verebilmektedir. Ancak doğrusal olmama mertebesi yüksek çok sayıda fiziksel sistem mevcuttur.

Denklem 4.4'deki durum denklemi doğrusal bir denklem değildir. Bu tür sistemler için türetilen doğrusal bir model sadece doğrusallaştırılma yapılan bir çalışma noktası ve çevresindeki çok sınırlı bir çalışma bölgesi için geçerlidir. Daha önemlisi, doğrusal olmayan bir sistem belirli bir çalışma noktası etrafı doğrusallaştırıldığında, oluşturulan doğrusal modelde zamanla değişen elemanları bulunabilmesidir. Doğrusallaştırmaya ilişkin bir yöntem şu şekilde verilebilir [21].

Doğrusal olmayan sistemimizde, doğrusal olmayan denklemler bir Taylor serisine açılır. Açılımda birinci mertebenin üzerindeki terimler atılır ve böylece doğrusal olmayan denklemin nominal nokta etrafındaki doğrusal yaklaşımı elde edilir.

Doğrusal olmayan bir sistem için durum denklemi Denklem 4.12'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t), r(t)] \quad (4.12)$$

Burada $x(t)$, $(n \times 1)$ boyutlu bir durum vektörü, $r(t)$, $(p \times 1)$ boyutlu bir giriş vektörü ve $f[x(t), r(t)]$ ise $(n \times 1)$ boyutlu genelde durum ve giriş vektörlerinin bir vektörel fonksiyonudur.

Belirli bir başlangıç durumu ve nominal $r_0(t)$ girişi için nominal çalışma yörüngesini $x_0(t)$ ile ifade edelim. Denklem 4.12 verilen doğrusal olmayan durum denklemi $\dot{x}(t) = f(x(t), r(t))$ etrafında bir Taylor serisine açılır ve yüksek mertebeden terimlerin tümü yok edilirse, $i = 1, 2, \dots, n$ olmak üzere Denklem 4.13 elde edilir.

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x_0, r_0) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial x_j} \right|_{x_0, r_0} (x_j - x_{0j}) + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial r_j} \right|_{x_0, r_0} (r_j - r_{0j}) \quad (4.13)$$

Ayrıca fark değerleri Denklem 4.14 ve Denklem 4.15 olarak tanımlandığında Denklem 4.16 ilişkisi sağlanır.

$$\Delta x_i = x_i - x_{0i}, \quad (4.14)$$

$$\Delta r_j = r_j - r_{0j} \quad (4.15)$$

$$\Delta \dot{x}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{0i} \quad (4.16)$$

Denklem (4.13)'te $\dot{x}_{0i} = f_i(x_0, r_0)$ olması sebebi ile Denklem 4.17 şu şekilde yazılabilir.

$$\Delta \dot{x}_i = \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial x_j} \right|_{x_0, r_0} \Delta x_j + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f_i(x, r)}{\partial r_j} \right|_{x_0, r_0} \Delta r_j \quad (4.17)$$

Denklem 4-17 vektör-matris biçiminde yazılırsa Denklem 4.18 elde edilir.

$$\Delta \dot{x} = A * \Delta x + B * \Delta r \quad (4.18)$$

Burada,

$$A^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

ve

$$B^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \frac{\partial f_1}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial r_p} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r_1} & \frac{\partial f_2}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial r_p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial r_1} & \frac{\partial f_n}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial r_p} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

olarak tanımlanır.

Sistem $h_0(t) = x_{01}$ sabit denge noktası etrafında doğrusallaştırıldığında, denge konumunda hız ve ivme teriminin sıfır olacağı Denklem 4.21 ve Denklem 4.22 ile belirlenebilir.

$$x_{02}(t) = \frac{dx_{01}(t)}{dt} = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{d^2 h_0(t)}{dt^2} = 0 \quad (4.22)$$

$i(t)$ 'nin denge konumundaki nominal değeri için Denklem 4.22, Denklem 4.4'te yerine konursa Denklem 4.23'teki akımın denge durumu için değeri bulunabilir.

$$i_0(t) = x_{03}(t) = \sqrt{\frac{mgx_{01}}{K}} \quad (4.23)$$

Tasarlanan sistem için Denklem 4.18'deki doğrusallaştırılmış durum denklemleri Denklem 4.25'teki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta \dot{x}(t) = A^* \Delta x(t) + B^* \Delta u(t) \quad (4.24)$$

Bu durumda doğrusallaştırılmış durum denklemlerindeki A^* ve B^* matrisleri Denklem 4.25 ve Denklem 4.26'daki biçimde elde edilir.

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2Kx_{03}^2}{mx_{01}^2} & 0 & \frac{-2Kx_{03}}{mx_{01}} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

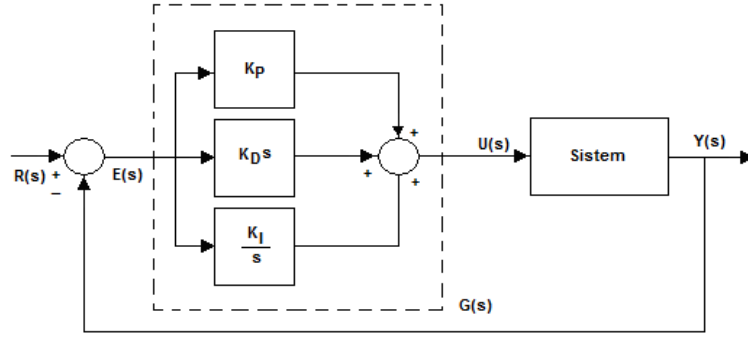
4.3 PID Kontrolör Yapısı

PID günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemidir. Endüstrideki uygulamaların büyük çoğunluğunda uygulanmıştır. PID kontrolörün transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$G(s) = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \quad (4.27)$$

Burada K_p oransal kazanç sabiti, K_D türevsel kazanç sabiti ve K_I integral kazanç sabitidir. Referans bilgi ile çıkış bilgisi arasındaki fark bilgisi

hata bilgisi olarak oluşturulur. Daha sonra hata bilgisinden PID transfer fonksiyonuyla belirlenen kontrol işareti sisteme uygulanır. Sistem uygun kazanç parametreleri ile düşük yükselme zamanlı, düşük yukarı ve aşağı taşmalı, kısa oturma zamanlı ve yok edilmiş kararlı hal hatası ile denge konumuna getirilir. PID kontrolör yapısına sahip bir kontrol sistemi Şekil 4.3'de verilmektedir.



Şekil 4.3 PID Kontrollü Bir Kontrol Sistemi

Sisteme uygulanacak kontrol işaretini zaman domeninde incelersek Denklem 4.28'deki sonuca ulaşırız.

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.28)$$

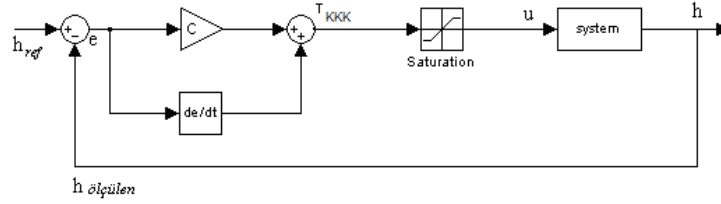
Sistem için uygun PID katsayılarının belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. PID katsayılarının sistem parametrelerine cevabı Tablo 4.1'de özetlenmiştir [22].

Tablo 4.1 PID Katsayılarının Sistem Parametrelerine Cevabı

	Kararlı Hal Hatası	Yükselme Zamanı	Aşım	Oturma Zamanı
Kp	Azalır	Süre azalır	Aşım artar	Küçük bir değişim
Ki	Ortadan kalkar	Süre azalır	Aşım artar	Artar
Kd	Küçük bir değişim	Küçük bir değişim	Aşım azalır	Azalır

4.4 Kayan Kip Kontrolör Yapısı

Değişken yapıli kontrol sistemlerinin bir biçimi olan kayan kip kontrolör sistemleri en belirgin özellikleri olarak dayanıklı, değişmez sistemler olmasıdır. Burada dayanıklılık ve değişmezlikten kasıt dış bozuculara, parametre belirsizliklerine ve modelleme hatalarına karşı tümüyle duyarsız olmasıdır. KKK'ün blok şeması Şekil 4.4'de sunulmuştur.



Şekil 4.4 Kayan kipli Kontrolör Blok Diyagramı

Hata bilgisinin bir kazanç katsayısı ile çarpımı ile hata bilgisinin türevinin toplamı bize Denklem 4.29'daki Kayan Kip kontrol elemanı çıkışını verir.

$$T_{KKK} = c \cdot e(t) + \frac{de(t)}{dt} \quad (4.29)$$

Burada c kayma yüzeyinin eğimi, e hata, de/dt ise hatanın türevidir. Kayan kipli kontrolörün kontrol işaretine ait temel kural Denklem 4.31'deki gibi yazılabilir.

$$u(t) = U_0 \text{sign}(s) \quad (4.30)$$

Burada U_0 pozitif bir katsayı, s ise anahtarlama fonksiyonudur. Sistemde oluşan çatırtıları gidermek için $sat(s/\phi)$ fonksiyonu kullanılmıştır. Buradaki ϕ sınır tabakasının kalınlığını belirlemektedir. Saturasyon fonksiyonu Denklem 4.31'de tanımlanmaktadır.

$$sat(s/\phi) = \begin{cases} \left| \frac{s}{\phi} \right| \leq 1 & \text{ise } s/\phi \\ \left| \frac{s}{\phi} \right| > 1 & \text{ise } sign(s/\phi) \end{cases} \quad (4.31)$$

4.5 Analog Kontrolör İfadelerinin Sayısal Kontrolörde Karşılıkları

Sistemimize ilişkin benzetim ve uygulama çalışmalarının ayrık işaretlerle yapılacak olması daha önce verilen PID ve KKK kontrol ifadelerinin de sayısal sisteme uygun yeniden oluşturulmasını gerektirir. Bu dönüşüm metodu şöyle olabilir [23].

Denklem 4.28'deki PID kontrol işaretindeki türev teriminin sayısal karşılığı olarak Denklem 4.32 yazılabilir.

$$\frac{de(t)}{dt} = [e(n) - e(n-1)]/T_s \quad (4.32)$$

Yine Denklem 4.28'deki integral teriminin sayısal karşılığı olarak da Denklem 4.33 yazılabilir.

$$\int_0^t e(t)dt = T_s \sum_{n=0}^N e(n) \quad (4.33)$$

Sonuç olarak Denklem 4.28'in PID kontrol işaretinin sayısal karşılığı olarak Denklem 4.34 veya Denklem 4.35 yazılabilir.

$$u(n) = K_P e(n) + K_I T_s \sum_{n=0}^N e(n) + K_D [e(n) - e(n-1)] / T_s \quad (4.34)$$

$$u(n) = K(e(n) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{n=0}^N e(n) + \frac{T_D}{T_s} [e(n) - e(n-1)]) \quad (4.35)$$

Burada,

$$K = K_P,$$

$$K_I = K / T_I,$$

$$K_D = K T_D$$

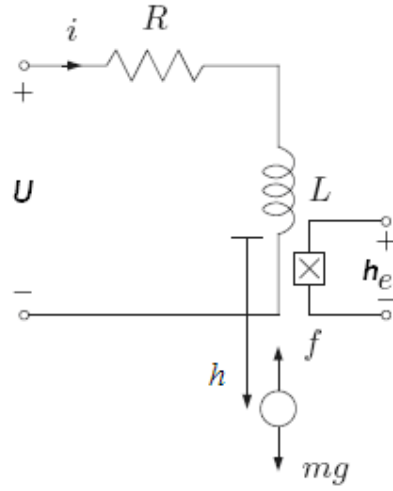
değerlerine karşılık gelmektedir.

Aynı şekilde Denklem 4.29'daki analog KKK işaretinin sayısal karşılığı da Denklem 4.36'da şu şekilde verilebilir.

$$T_{KKK}(n) = C e(n) + [e(n) - e(n-1)] / T_s \quad (4.36)$$

4.6 Manyetik Askı Sistemi Benzetim Çalışması

Şekil 4.2'de verilen sistemin modeline Hall etkisi algılayıcısı da eklendiği takdirde oluşan yeni sistemin elektriksel modeli Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Hall Etkisi Algılayıcısı ile Manyetik Askı Sistemi Elektriksel Modeli

Burada h_e Hall etkisi algılayıcısında indüklenen gerilim olmaktadır. Mıknatıs ve bobin tarafından Hall etkisi algılayıcısında indüklenen bu gerilim için Denklem 4.37 yazılabilir [24].

$$h_e = \alpha + \beta \frac{1}{h^2} + \gamma i + n \quad (4.37)$$

Burada α , β , ve γ Hall etkisi algılayıcısına bağlı sabitler ve n de ölçüm bozulmalarını ifade eden gürültüdür.

Doğrusallaştırılmış bu denklemlerin sisteme uygun olarak kullanılması halinde aşağıdaki Denklem 4.38 ve Denklem 4.39'daki A^* ve B^* matrisleri elde edilir.

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1962 & 0 & -35.8214 \\ 0 & 0 & -160.346 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 66.5336 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Çıkış fonksiyonu için Δh (pozisyon bilgisinin denge durumu arasındaki fark) seçildiğinde C ve D matrisleri Denklem 4.40 ve Denklem 4.41'deki gibi elde edilir.

$$C = [1 \ 0 \ 0] \quad (4.40)$$

$$D = [0 \ 0] \quad (4.41)$$

Çıkış fonksiyonu için Δh_e (pozisyon bilgisinin Hall etkisi algılayıcısındaki gerilim karşılığının denge durumu karşılık gelen gerilimle arasındaki fark) seçildiğinde ise C ve D matrisleri Denklem 4.42 ve Denklem 4.43'deki gibi elde edilir.

$$C = [-72.9965 \ 0 \ 0.48] \quad (4.42)$$

$$D = [1 \ 0] \quad (4.43)$$

Türetilen denklemlerdeki askıdaki mıknatıs hareketiyle indüklenen zıt emk çok küçük olduğundan gözardı edilmiştir.

Bu doğrusallaştırılmış durum denklemleri kullanılarak manyetik askı sistemine ait benzetim çalışması, Matlab M.File ortamında Runge-Kutta Sayısal yaklaşımı ile PID ve kayan kipli kontrolör ile yapılmıştır. Sistemin çalışması ile birlikte u kontrol işareti, h küre pozisyon bilgisi, i elektromıknatıs akım değeri, v mıknatıs küre hız değerinin değişimi gözlemlenebilmekte ve grafikleri elde edilebilmektedir. Kontrolörler farklı P, I, D, c, E katsayıları ve

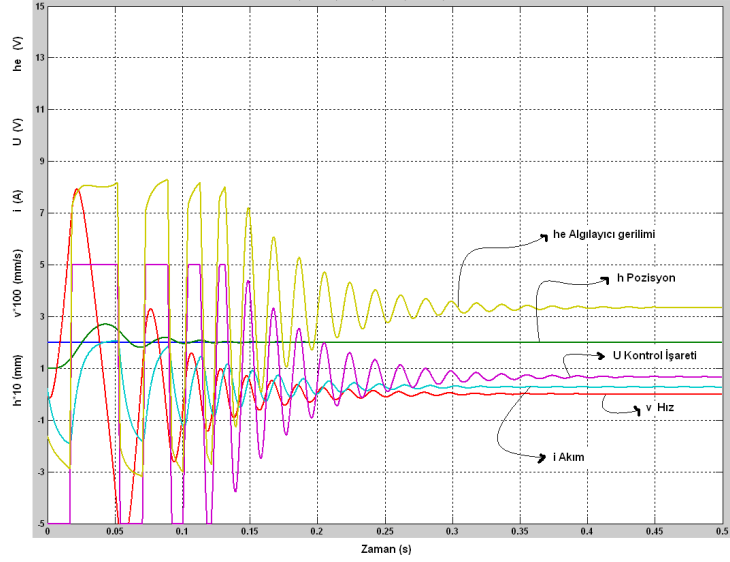
farklı başlangıç konumları için çalıştırılarak sistem cevapları incelenmiş, uygulama devresindeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

4.6.1 Sayısal Yaklaşımlı PID Kontrolör Benzetim Sonuçları

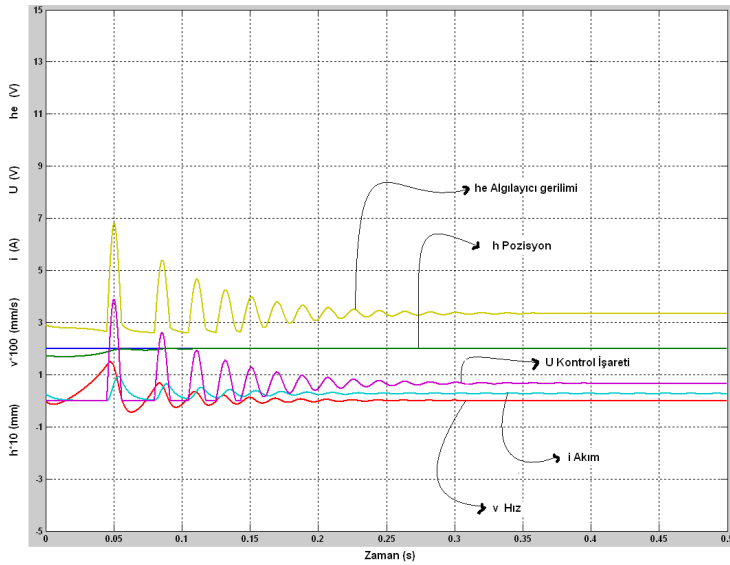
Bu benzetim çalışmasında daha önce belirtilen doğrusallaştırılmış durum denklemlerine göre sistemin $h=20$ mm denge konumundaki kontrol geriliminin değeri $u=0,66$ V, elektromıknatıs akım değeri $i=0,27$ A mıknatıs hızı ve hız değişimi olan ivme değeri 0 olmalıdır. Kontrolör parametreleri gözlem sonucu belirlenmiş ve davranışlarını anlatabilmek amacıyla genelde bir parametre değiştirilirken diğerleri sabit tutulmuştur.

PID kontrol işareti terimi olarak mikrodenetleyici yazılımında $u=K_p*y_0+K_d*(y_0-e_{10})/dt+(e_{10}+y_0)*dt*K_i$ kullanılmıştır. Buradan elde edilecek u değerleri iki ayrı saturasyon bölgesine göre sınırlandırılmıştır. Sisteme uygulanacak kontrol işaretindeki bu sınırlamalar $(-5,+5)$ ve $(0,+5)$ V olarak yapılmıştır. Bu bölümde yer alan benzetim grafiklerinin (a) ile gösterilen şekiller $(-5,+5)$, (b) ile gösterilen şekiller ise $(0,+5)$ V sınırlandırılması ile oluşturulmuştur. Yine benzetim grafiklerinin (a) ile gösterilen şekillerinde mıknatısın ilk bırakıldığı konum $h=10$ mm, (b) ile gösterilen şekillerinde ise konum $h=17$ mm'dir. Bu başlangıç şartları grafikten de anlaşılabilir.

Sistemin istenilen şekilde çalışabilmesi için P,I,D parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekir. Yapılan benzetim çalışmasında P,I,D katsayılarından iki tanesi sabit tutularak üçüncü parametrenin sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir.



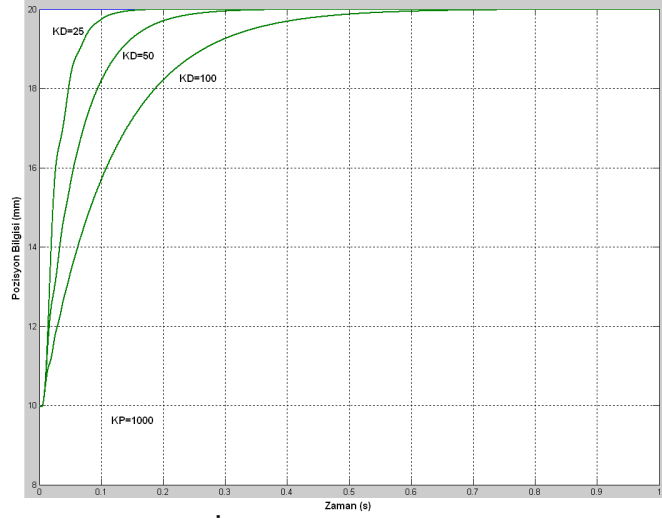
a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V



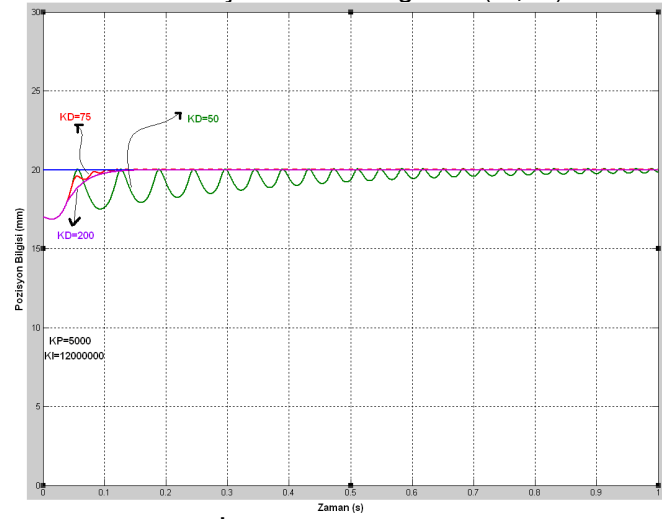
b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V

Şekil 4.6 h, v, i, U, h_e Parametreleri Arasındaki Bağıntı

Şekil 4.6 bütün sistem parametrelerinin aynı grafik altında toplandığı dolayısıyla birbirlerine göre ilişkilerinin en iyi görülebildiği çizimlerdir.



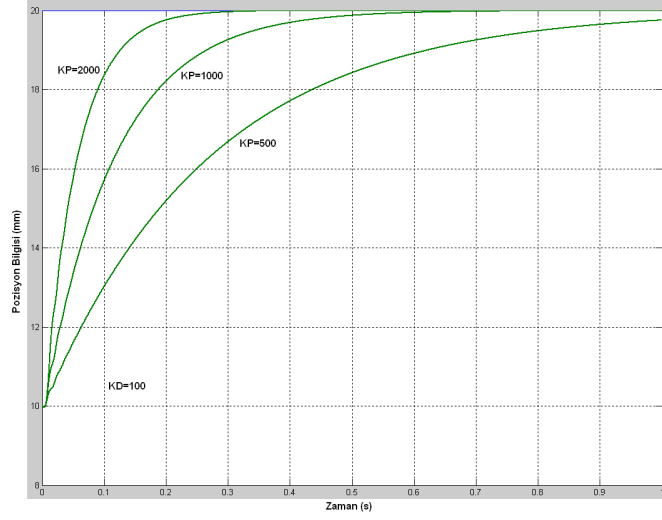
a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V



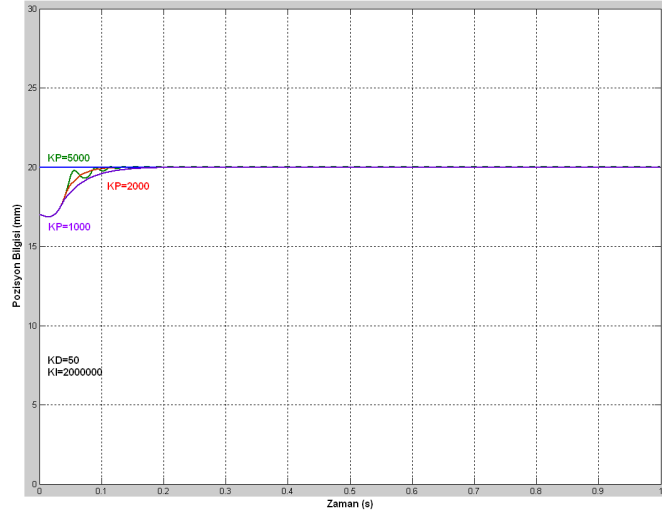
b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V

Şekil 4.7 Farklı K_D Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı

Şekil 4.7'de K_P ve K_I katsayıları sabit tutulmuş, K_D farklı katsayılarla belirlenip sistem cevabı incelenmiştir. Şekil 4.7a incelendiğinde sistemin $K_D=25$ değerindeki cevabının hızlı olduğu ve bu katsayının diğer katsayılarla ($K_D=50$ ve $K_D=100$) göre daha iyi çözüm ürettiği gözükmektedir.



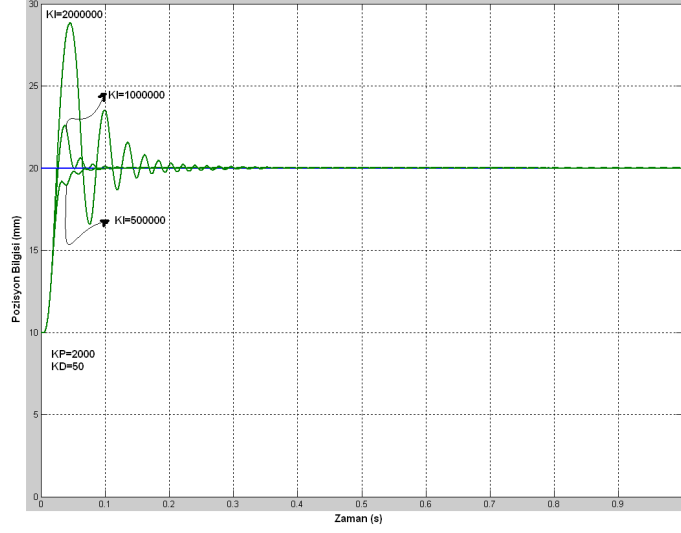
a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V



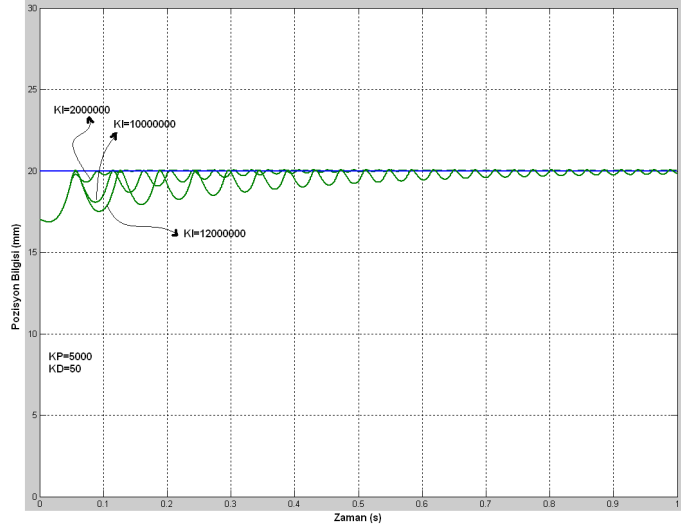
b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V

Şekil 4.8 Farklı K_P Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı

Şekil 4.8'de K_P katsayısının artışının yükselme zamanına olan pozitif etkisi açıkça görülebilmektedir. Şekil 4.8a'da $K_P=2000$ olması durumunun diğer K_P katsayılarına göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.



a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V



b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V

Şekil 4.9 Farklı K_I Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı

Şekil 4.9'da ise farklı K_I katsayılarının sistemin cevabı üzerindeki etkileri incelenmiştir. K_I 'ni büyük değerleri için yükselme zamanı kısalırken istenmeyen bir durum olarak da yukarı ve aşağı aşım değerlerinin arttığı da gözlemlenmektedir.

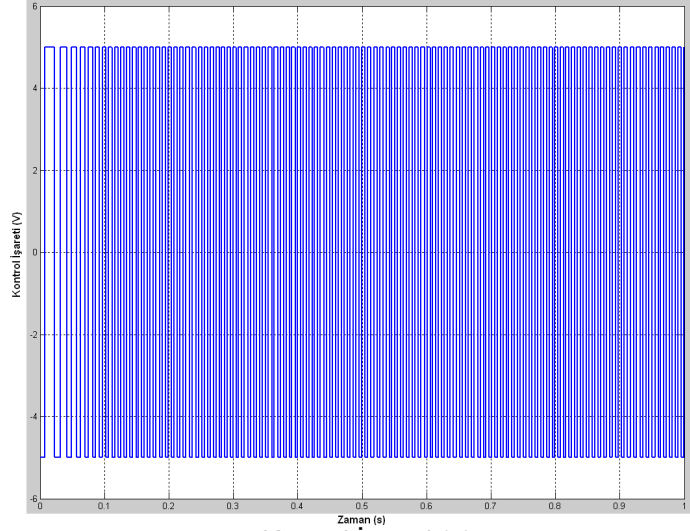
Bu grafikler yorumlanırken bir parametrede değişimin tek başına bir anlam ifade etmediği, diğer parametrelerin de ona göre oranlarının cevapta etkili olduğu unutulmamalıdır.

Türevsel kontrol olmadığı veya K_D katsayısının çok büyük olduğu durumlarda sistemin kararsız olduğu gözlemlenmiştir.

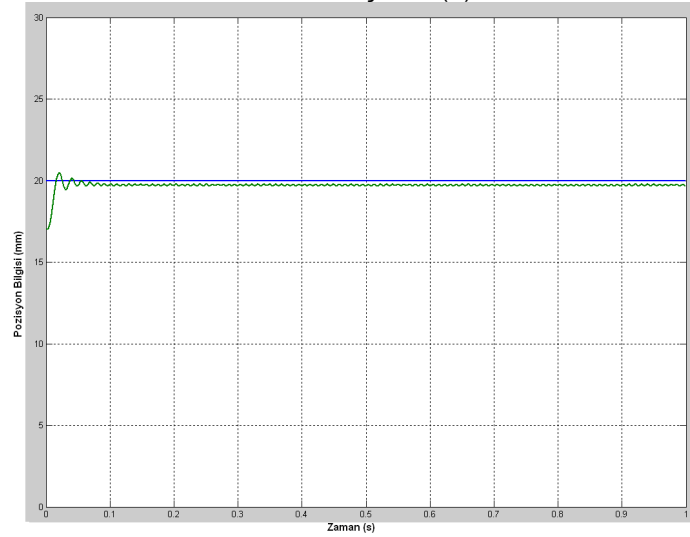
Bir diğer önemli gözlem de (0,+5) V sınırlandırması olduğu takdirde mıknatısı denge konumuna getirebilmek için (-5,+5) V daha yakın konumdan bir başlangıç hatası verilmesinin gerekliliğidir. 10 mm'lik bir başlangıç hatası olması durumunda (-5,+5) V sınırlaması yapılan benzetim çalışmasında iyi sonuçlar alınabilirken, (0,+5) V sınırlaması yapılan çalışmada kararsız bir sistem davranışı görülmektedir. Bu yüzden bu durum için başlangıç hatası kararlı durumun gözlenebildiği 3mm'ye alınmıştır. Kısacası buradaki kontrol diğerine göre daha da zordur.

4.6.2 Sayısal Yaklaşımli Kayan Kip Kontrolör Benzetim Sonuçları

Bu benzetim çalışmasında da daha önce belirtilen doğrusallaştırılmış durum denklemlerine göre sistemin $h=20$ mm denge konumundaki kontrol geriliminin değeri $u=0,66$ V, elektromıknatıs akım değeri $i=0,27$ A mıknatıs hızı ve hız değişimi olan ivme değeri 0 olmalıdır.



a. Kontrol İşareti (u)

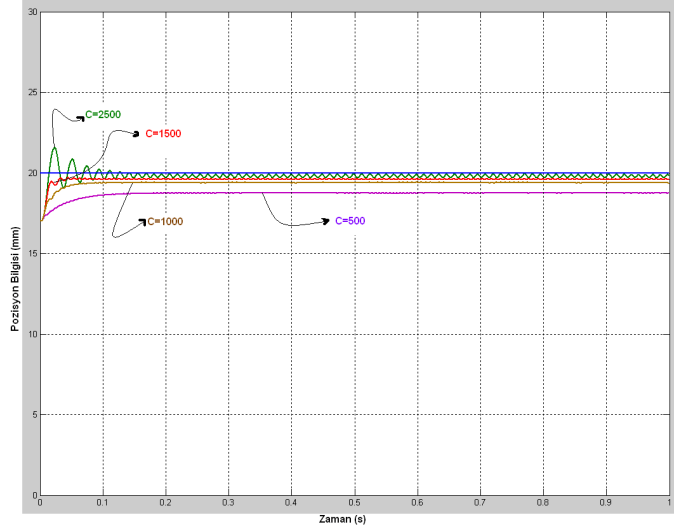


b. Sistem Cevabı (h)

Şekil 4.10 $c=2000$ Olması Durumunda Kontrol İşareti ve Sistem Cevabı

KKK kontrol terimi olarak $u=c*y_0+(y_0-e^{10})/dt$ kullanılmıştır. Matlab M. File programı çıkış fonksiyonları esasında denge konumuyla var olan o anki durum arasındaki farkı vermektedir. Grafikler çizdirilirken gerçek konum durumuna ilişkin değerler denge şartları kadar bir öteleme yapılarak elde edilmiştir. Şekil 4.10, c katsayısının 2000 olması durumunda sisteme uygulanan kontrol işaretini ve çıkış fonksiyonunun değişimini göstermektedir. Uygulanan kontrol işaretinde meydana gelen yüksek oranda çatırtı

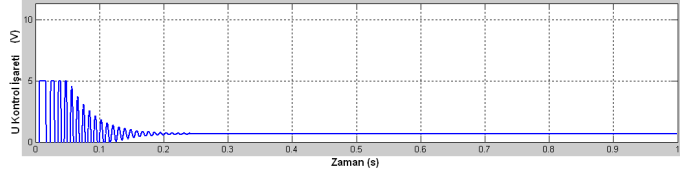
oluşmaktadır. Sistemin çıkış işareti referans değere oturmadığı görülmektedir.



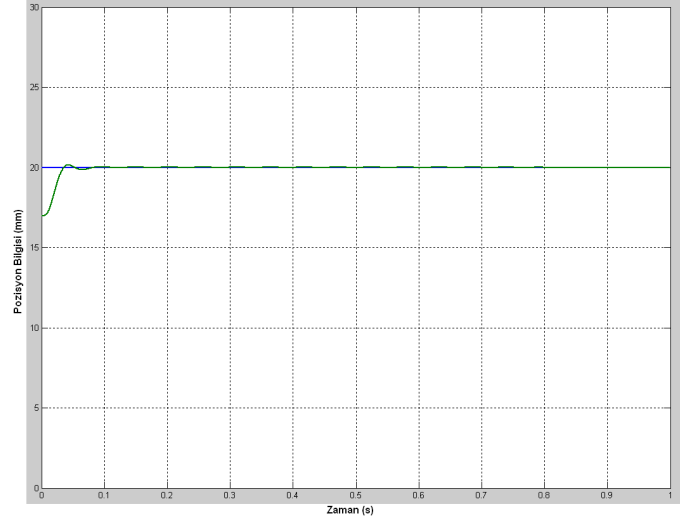
Şekil 4.11 c Katsayısının Farklı Değerleri İçin Sistem Cevabı

Farklı c katsayıları için sistem cevabı Şekil 4.11'de gösterilmiştir. c'nin küçük değerleri için sistem cevabında salınım küçük olduğu, kararlı hal hatasının ise büyük olduğu görülmektedir. c arttırıldığında kararlı hal hatası azalırken salınımlar artmakta ve sistem kararsız bir davranışa gitmektedir. Kısacası bir davranış iyileşirken diğer davranış kötüleşmektedir.

Klasik kayan kip kontrol yerine $U_0 sign(s)$ doyma fonksiyonunun kullanıldığı duruma ilişkin sistem cevabına ilişkin u kontrol işareti ve h pozisyon değeri değişimi Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu durumda sistem referans değere oturmaktadır. Kararlı hal hatası giderilmiş ve salınımlar oldukça sınırlandırılmıştır. Kontrol işaretindeki çatırtı da yok denilebilecek bir seviyede azaltılmıştır.



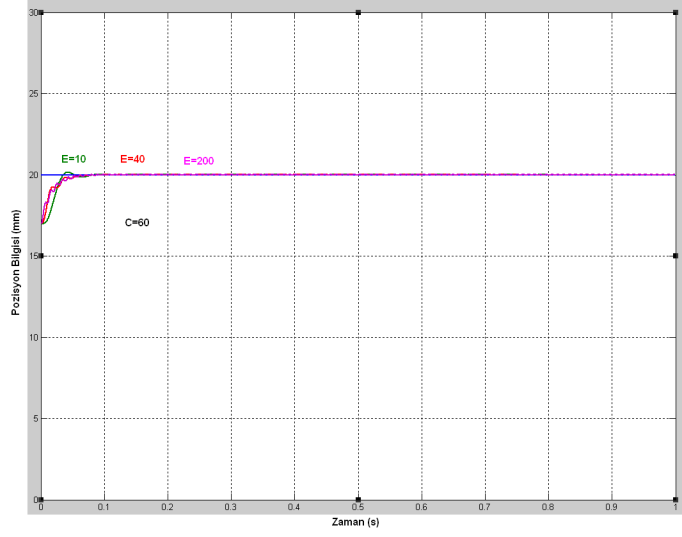
a. Kontrol İşareti (u)



b.

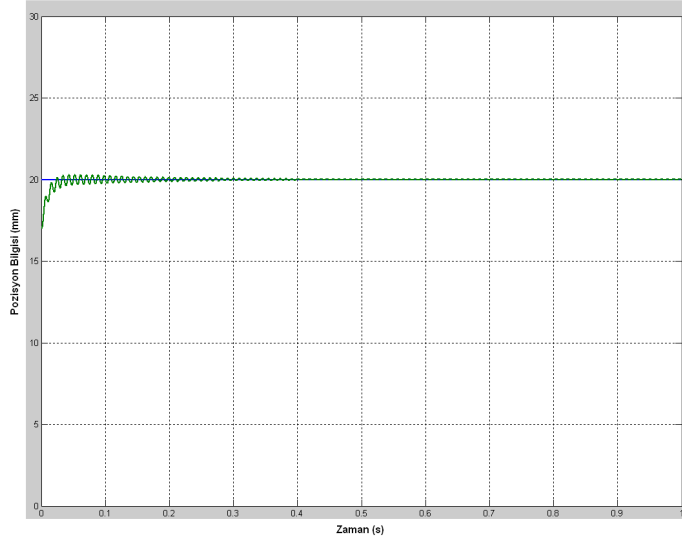
Şekil 4.12 $c=60$ İken Saturasyonlu Kontrol İşareti ve Sistem Cevabı

Şekil 4.13'te ise saturasyon bölgesinin eğimi farklı değerlerle oluşturulmuş, kontrolör cevabı incelenmiştir. Eğim katsayısının (E) düşük olması durumunda cevapta salınımsız ama küçük aşmalar görülmekte, düşük eğimlerde ise referans değerine daha temkinli ama salınımlı bir yaklaşım gözlemlenmektedir.

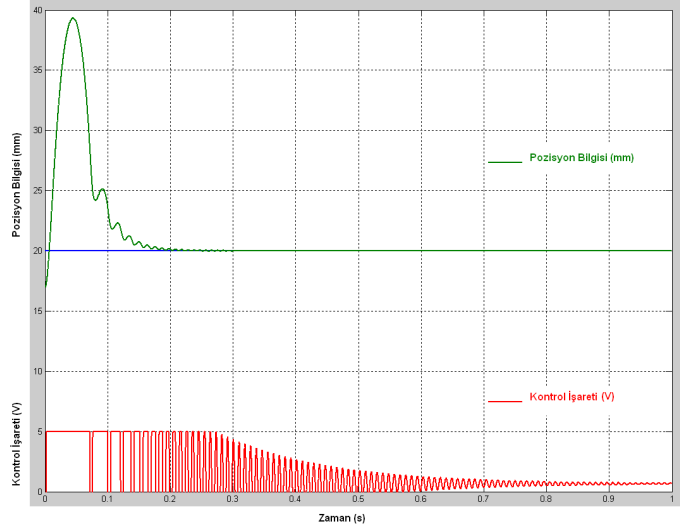


Şekil 4.13 Farklı Eğim Katsayıları İçin Sistem Cevabı

Şekil 4.14'te eğimin çok yüksek olması durumunda bir çeşit çaptırıya benzer salınımlar görülmüştür.



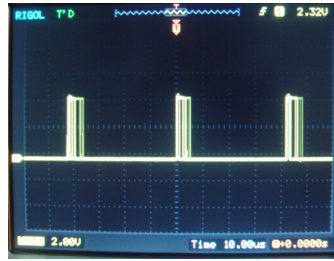
Şekil 4.14 $c=100$, $E=200$ İken Saturasyonlu Sistem Cevabı



Şekil 4.15 Simetrik Olmayan Kontrol İşareti Kullanıldığında Kontrolör Cevabı

Buraya kadar olan benzetim çalışmalarında saturasyonlu veya saturasyonsuz işaret fonksiyonu (-5,5) V aralığında sınırlandırmış idi. Şekil 4.15' te ise (0,5) V aralığında sınırlandırılmış saturasyon bölgesi bir kontrol bir işareti elde edilmiştir. Klasik KKK benzetim çalışmasının (0,+5) V aralığında çalışmaya uyarlanması kararlı bir sistem cevabı verememiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere aşımının yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Mıknatıs, bulunduğu konumdan referans konumunda altına inerek ancak yaklaşık 40 mm mesafeden tekrar çekilerek denge konumuna getirilebilmektedir.

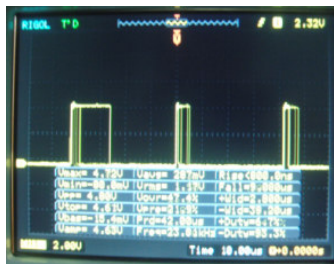
mikrodenetleyicinin analog girişine verilir, entegre ADC tarafından sayısal bir değere dönüştürülmüştür. Bu geribesleme bilgisi mikrodenetleyiciye yüklenen sayısal kontrolör tarafından değerlendirilerek ve kararlı bir askıda tutma için elektromıknatis akımı aktif olarak kontrol edilmiştir. Hall etkisi algılayıcısından elde edilen konuma karşılık doğrusal gerilim değişimleri kullanılarak Proton PicBasic dilinde 10 bit giriş çözünürlüğü ve 8 bit çıkış çözünürlüğü veren sayısal bir kontrolör sistem geliştirilmiştir. Çıkış kontrol işareti (0,5) V aralığında analog değişime karşılık gelen 10 KHz'lik DGM işaretinin görev zamanının 8 bit çözünürlükte 0–255 arasında değiştirilebilmiştir. Kontrol işaretini belirleyen DGM işaretin Rigol 1102E Sayısal Osilaskobunda elde edilen görüntüleri Şekil 4.17'de verilmiştir.



a.



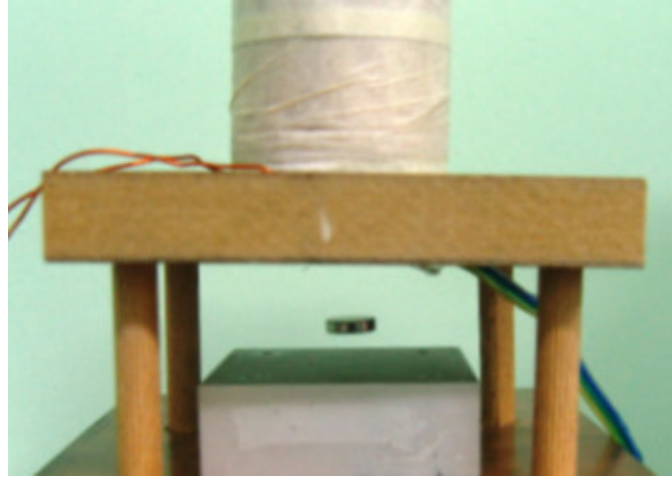
b.



c.

Şekil 4.17 DGM İşaretin Osilaskop Görüntüleri

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da görülebileceği gibi tasarlanan kontrolörlerle mıknatıs küre ve disk havada daha önceden tanımlanan bir referans pozisyon değerinde askıda tutulmuştur.

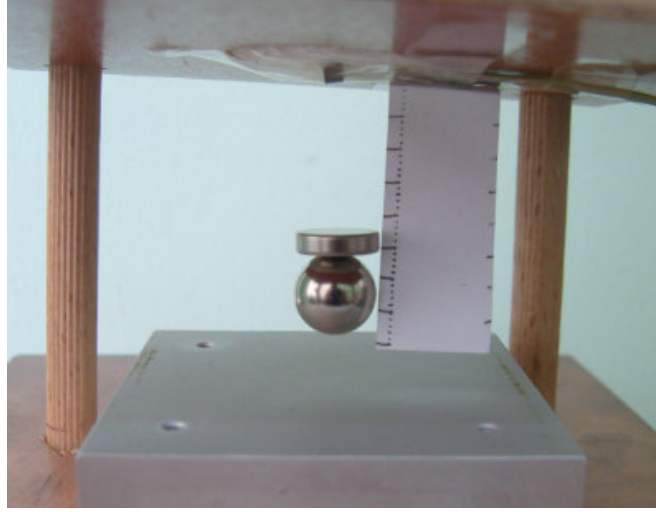


Şekil 4.18 Disk Mıknatısın Askıda Tutulması



Şekil 4.19 Küre Mıknatısın Askıda Tutulması

Şekil 4.20 Küre ve disk mıknatıs birlikte askıda tutulmasına ait durumu göstermektedir.

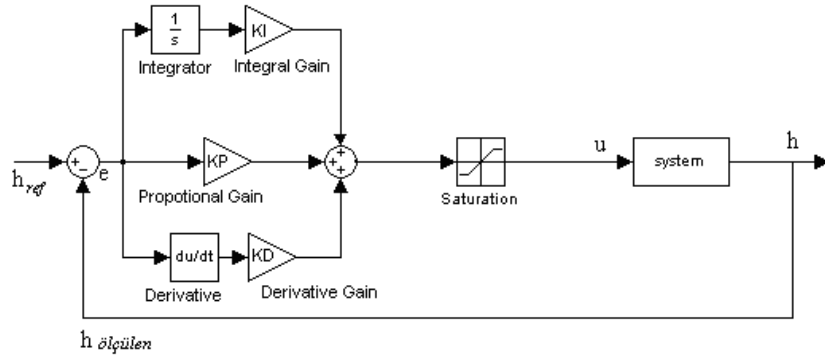


Şekil 4.20 Küre ve Disk Mıknatısın Birlikte Askıda Tutulması

4.7.1 Sistemin PID ile Kontrolü

Mikrodenetleyicinin analog girişinden veya program içerisinde bir fonksiyonun sonucu olarak referans konumu değiştirme imkânı olmakla birlikte benzer değerler üzerinden karşılaştırma yapmayı mümkün hale getirmek için çalışma boyunca referans konum değeri 20 mm'de (h_{referans}) sabit olarak tutulmuştur.

Manyetik askı sistemimize ilişkin PID kontrolörlü blok diyagram Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 Sayısal PID Kontrolör

Denklem 4.28'deki $u(t)$ kontrol işaretinin değeri PIC18F4550'deki ECCP modülündeki DGM'nin işaretinin görev zamanını (duty cycle) belirleyecektir. Oradaki analog sistemi sayısal sistemimize uyarladığımızda çıkış fonksiyonu bir ADC tarafından ölçülür.

Sistemin kontrolü neodim mıknatısın referans noktasından 10–15 mm uzakta bir konumda tutulup başlangıç hatasının belirlenmesi ile başlanmaktadır. Mıknatısın askıda durması istenen denge konumunda 10 bit çözünürlükte karşılık bulacağı değere dönüştürülüp program içerisinde tanımlanmaktadır. Hall etkisi algılayıcısı çıkışındaki gerilim değeri, mikrodenetleyicinin analog girişine verilerek, konum bilgisi ADC tarafından 0–5 V analog gerilim aralığında 10 bit çözünürlük sonucu 0-1023 arasında bir değer olarak algılanmakta ($h_{ölç}$), aralarındaki farktan Denklem 4.44'de verildiği gibi hata değeri e , mikrodenetleyici tarafından hesaplanmaktadır.

$$e = h_{ölç} - h_{ref} \quad (4.44)$$

Hata bilgisinin K_P katsayısı ile çarpımı ile oluşturulan oransal kontrol elemanı çıkışı Denklem 4.45'te verildiği gibi bulunmaktadır.

$$T_{or} = K_P \cdot e \quad (4.45)$$

Hatanın önceki değeri (e_{k-1}) ile hatanın şimdiki değerinin (e_k) ortalaması, kontrol periyodu ile çarpılarak integral kontrol elemanı çıkışı Denklem 4.46'daki hesaplanmaktadır.

$$T_{\text{int}} = K_I \cdot \frac{(e_{k-1} + e_k)}{2} \cdot \Delta t \quad (4.46)$$

Basit olması sebebi ile iki noktalı sayısal türev yaklaşımı olarak geri fark yönetiminin kullanılması suretiyle hatanın o anki değeri (e_k) ile hatanın önceki değeri (e_{k-1}) arasında fark, kontrol periyoduna bölünerek türev kontrol elemanı çıkışı Denklem 4.47'de hesaplanmaktadır. Çok noktalı sayısal türev yaklaşımları kullanılarak daha kararlı ve iyi performanslı sistem yanıtlarına ulaşılabileceği de tahmin edilmektedir.

$$T_{\text{tör}} = K_D \cdot \frac{(e_k - e_{k-1})}{\Delta t} \quad (4.47)$$

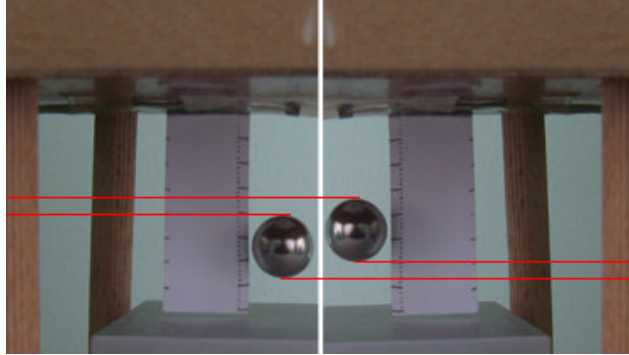
Sistemin her geri besleme çevrimi sırasında, üretilen yeni değerlerin kullanıldığı kontrol periyodunu gösteren Δt süresi, bir sayıcı kullanılarak sabit tutulmadığından, elemanların çalışma gecikmesi ve programın çevrim süresinden kaynaklanan gecikme de dikkate alınarak 0,1 ms olarak alınmış ve kullanılmıştır. Sonuç olarak kontrol işaretinin toplam değeri olarak Denklem 4.48 bulunur.

$$T_{DGM} = T_{or} + T_{\text{int}} + T_{\text{tör}} \quad (4.48)$$

Denklem 4.48'den, DGM sinyali üreticinin boşluk doluluk oranı belirlenerek sayısal olarak 8 bitlik maksimum değeri aşmayacak biçimde sınırlandırılma gerçekleştirilir. Artık T_{DGM} değeri 0-255 değerleri arasında bir değer alabilir. 10 kHz anahtarlama frekansına sahip bu DGM işareti elektromıknatısı sürmede kullanılacak uygun akım değerini üretmek için

kullanılmaktadır. Bu durumda elektromıknatısa uygulanan gerilimin değeri için Denklem 4.49 kullanılabilir.

$$U = \frac{T_{DGM}}{255} \times 12V \quad (4.49)$$

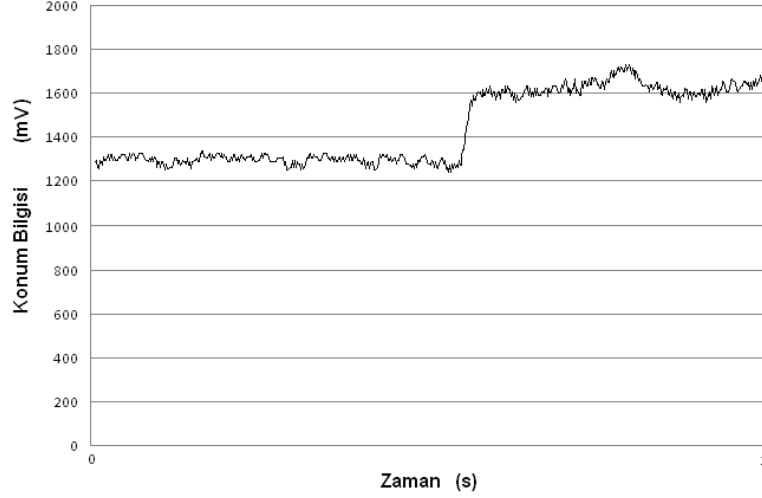


Şekil 4.22 İki Farklı Referansa Bağlı Mıknatısların Denge Durumu

Şekil 4.22’de referansın iki farklı değeri olarak kullanılması sonucu dengedeki mıknatıs küreler görülmektedir. Referans₁ değeri 280, referans₂ değeri ise 340 sayısal mutlak çözünürlük değerine sahiptir. Bu konum değerlerinin mikrodenetleyici analog girişindeki Hall etkisi algılayıcısı gerilimi karşılığı, sırasıyla $5 \cdot 280 / 1024 = 1367 \text{ mV}$ ve $5 \cdot 340 / 1024 = 1660 \text{ mV}$ ’dur. Şekil 4.23 bu iki farklı referans durumuna ait Rigol 1102E sayısal osilaskop görüntüsünü göstermektedir. İki konum arasında yaklaşık 4 mm’lik bir fark olduğu da gözlemlenmektedir.

Kullanılan osiloskobun veri kaydetme (data logger) özelliği vardır. Bu özellik sayesinde veriler bilgisayara aktarılmış ve Excel tablolarında veri olarak kullanılmıştır. İstenen grafiklerin çizimi bu tablolardan seçilen parametre değerleri ile yapılmıştır. Bu osilaskop bilgisinden elde edilmiş çıkış pozisyonunun gerilim değerlerinin ortalaması da referans₁ için 1,3 V, referans₂ için ise yaklaşık 1,6 V olduğu görülmüştür. Görüldüğü gibi

tanımlanan referans değerleri ile elde edilen referans değerleri birbirleri ile uyumludur.

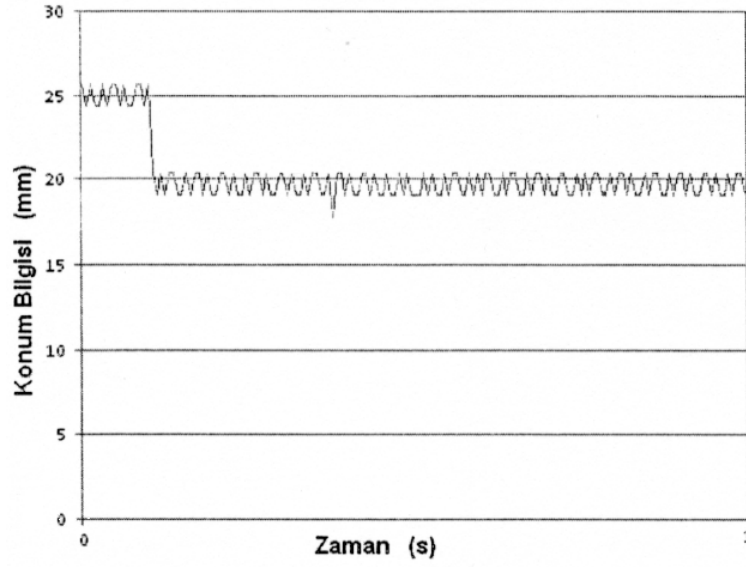


Şekil 4.23 İki Farklı Referansa Bağlı Pozisyon Bilgisinin Değişimi

Bu verilerden yola çıkılarak pozisyon bilgisinin değişimi yaklaşık doğrusal kabul edildiğinde pozisyondaki bir bitlik değişimin 5 mV'a karşılık geldiği, bunun da mesafe cinsinden karşılığının 66.7 μm olduğu bulunur. Buradan yaklaşık olarak referans₁'in 22,67 mm'ye ve referans₂'nin de 18,67 mm'ye karşılık geldiği görülür.

Bu durumda benzetim çalışmasında seçilen referans seviyesi olan 20 mm'lik konum değerinin, gerilim karşılığı 1500 mV, sayısal çözünürlük karşılığının ise 300 olduğu tespit edilebilir.

Şekil 4.24 referansın 20 mm olarak seçildiği bu duruma ait sistem cevabını göstermektedir.



Şekil 4.24 Referans 20 mm iken PID Kontrolörün Sistem Cevabı

4.7.2 Sistemin Kayan Kipli Kontrolü

Mikrodenetleyicide bir program döngüsü sırasında ölçülen pozisyon bilgisi ile referans pozisyon bilgisi arasındaki fark ile Denklem 4.50'deki hata bilgisi oluşturulur. Hata bilgisinin c gibi bir kazanç katsayısı ile çarpımı ile hata bilgisinin türevinin toplamı bize Denklem 4.51'deki KKK elemanı çıkışı verir.

$$e = h_{ölç} - h_{ref} \quad (4.50)$$

$$s = c \cdot e + \frac{(e_k - e_{k-1})}{\Delta t} \quad (4.51)$$

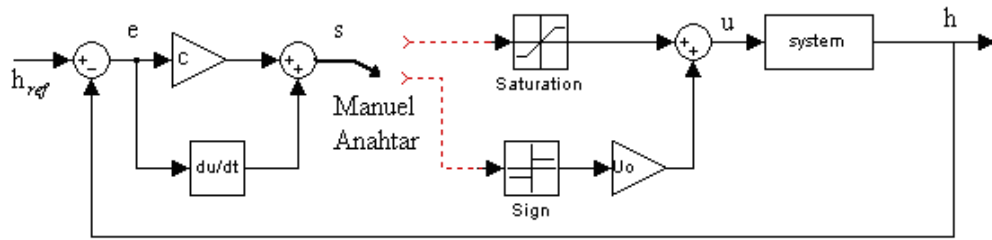
KKK'nin temel kontrol kuralı gereğince u kontrol işareti Denklem 4.52'deki gibi yazılabilir.

$$U = \begin{cases} s > 0 & \text{ise } U_0 \\ s = 0 & \text{ise } 0 \\ s < 0 & \text{ise } -U_0 \end{cases} \quad (4.52)$$

Burada U_0 pozitif bir katsayı, s ise anahtarlama fonksiyonudur. Sistemde oluşan çattırtıları gidermek için $\text{sat}(s/\phi)$ fonksiyonu da kullanılmıştır. Buradaki ϕ sınır tabakasının kalınlığını belirlemektedir. Saturasyon fonksiyonu Denklem 4.53'de tanımlanmaktadır.

$$\text{sat}(s/\phi) = \begin{cases} \left| \frac{s}{\phi} \right| \leq 1 & \text{ise } s/\phi \\ \left| \frac{s}{\phi} \right| > 1 & \text{ise } \text{sign}(s/\phi) \end{cases} \quad (4.53)$$

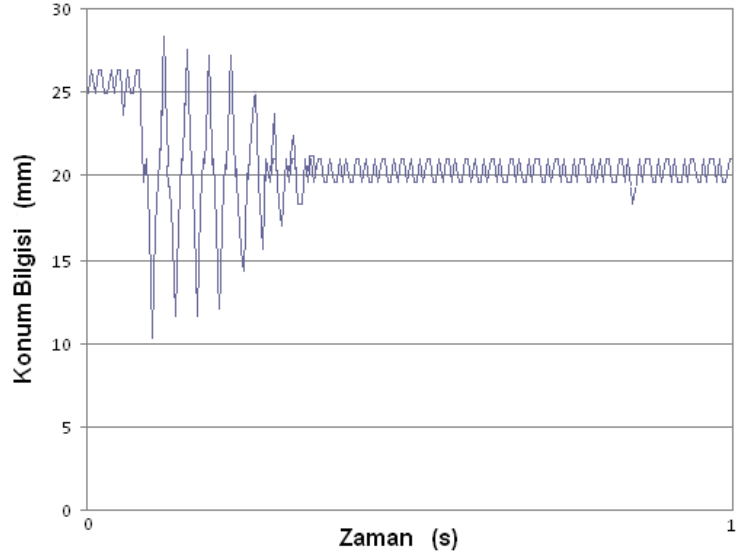
Uygulaması yapılan kayan kipli kontrolörün blok diyagram Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25 Kayan Kipli Kontrolör

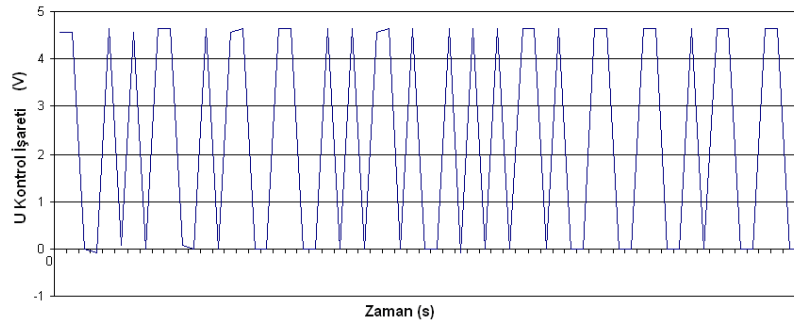
Şekil 4.25'de görüldüğü gibi sistem iki farklı fonksiyonla çalıştırılabilmektedir. Yazılımda signum fonksiyonu saturasyon fonksiyonu ile değiştirilerek çattırtısız bir sonuç alınabilmektedir [25]. Şekil 4.26 klasik KKK'ün deneysel çalışmasına ait sistem cevabını gösteren bir osilaskop görüntüsüne aittir. Burada kaynak gerilimi (0,+5) V aralığında

sınırlandırılmıştır. Kaynağın negatif değerlerini yerçekiminin dengelediği kabulü yapılmıştır.



Şekil 4.26 Klasik Kayan Kipli Kontrolörün Sistem Cevabı

Şekil 4.27’da Kayan Kipli kontrolörün ürettiği kontrol işaretine ait örnek bir osilaskop görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.27 Kayan Kipli Kontrolöre Ait Kontrol İşareti

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada 12,5 mm çapında, 9 gr ağırlığında küre, ve 12,5 mm çapında, 2,5 mm kalınlıkta, 3 gr ağırlığında disk neodim mıknatısı elektromanyetik olarak havada tutan bir elektromıknatısın kontrolü yapılmıştır. Kontrol yöntemi olarak, PID ve KKK yöntemleri kullanılmıştır.

Elektromanyetik askı sistemleri doğrusal olmayan, kararsız sistemlerdir. İlk olarak sistemin doğrusallaştırılmış modeline ait elektriksel modeli incelenmiş ve bu modelin benzetim çalışması Matlab M file ortamında PID ve Kayan kipli kontrolör yapıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem daha sonra uygulama düzeneğinde PIC18F4550 mikrodenetleyici kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu kontrolde mikrodenetleyici kullanılması analog kontrolörlere nazaran sistemi karmaşık ve değiştirilmesi güç, zaman alıcı durumdan kurtarmıştır. Sistem daha basit bir şekilde ve değişime açık olarak sayısal kontrolör yapısı ile kontrol edilmiştir.

Sistem denge konumunda iken çevrede var olan bozucu etkilere ek olarak bir takım bozucu müdahaleler yapılmış, kontrolörün sistemi kararlı bir şekilde kontrol ettiği gözlemlenmiştir.

Proton PicBasic dilinde yazılan programın PID ve Kayan kipli kontrolör algoritması basit bir yapıya sahip olup uygulaması kolaydır. Mikrodenetleyicide 10 bit giriş çözünürlüğü ve 8 bit çıkış çözünürlüğü veren sayısal bir kontrolör sistem geliştirilmiştir.

Benzetim ve uygulamada elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tasarlanan manyetik sistemlerin uyumları, kontrol edilebilirlikleri, daha iyi performans için tasarım bileşenlerinin seçiminde dikkat edilecek hususlar ve ayrıık işaretli kontrolör verimleri araştırılmıştır.

Sistem tasarımında askıya alınacak nesnenin pozisyon bilgisini oluşturacak algılayıcı seçiminin büyük önem arz ettiği görülmüştür. Bu algılayıcının gürültüsüz ve doğrusal cevapla çalışması sistem tasarımının performansını belirlemede etkin rol oynamaktadır. Aynı şekilde kontrolör seçimi ve bu kontrolöre ait parametrelerin seçimi de başarılı bir askı düzeneği için çok önemlidir.

EK A Tezde Kullanılan Yazılımlar

MATLAB (MATrix LABoratory); ilk defa 1985'de C.B Moler tarafından matematik ve özellikle de matris esaslı matematik ortamında kullanılmak üzere geliştirilmiş etkileşimli bir paket programlama dilidir.

MATLAB mühendislik alanında; sayısal hesaplama, veri çözümleri ve grafik işlemlerinde kullanılabilecek genel amaçlı bir program olmakla beraber özel amaçlı modüler paketlere de sahiptir. CONTROL TOOLBOX, SIGNAL TOOLBOX gibi paket programlar CACSD (Bilgisayar Destekli Kontrol Sistem Tasarımı) paketler olup bunlar kontrol sistemlerinin tasarımında çok etkili araçlardır. Ayrıca WINDOWS ortamında çalışan SIMULINK, etkileşimli benzetim programlarının hazırlanması ve çalıştırılmasında büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

MATLAB tüm mühendislik alanında, sayısal hesaplamalar, veri çözümlenmesi ve grafik işlemlerinde kolaylıkla kullanılabilen bir programlama dilidir. Yüksek seviyeden programlama dilleri ile yapılabilen hesaplamaların pekçoğunu MATLAB ile yapmak mümkündür. Gerçekte MATLAB, M-dosyaları (M-files) olarak bilinen pek çok sayıda fonksiyon dosyalarından (altprogramlardan) ibarettir. M-dosyaları ASCII formatında olup okunabilirliği olan, MATLAB programlama dili kodlarından oluşmuştur. Bu yüzden M-dosyaları kütüphanesi kullanıcı tarafından müdahale edilebilirdir. Ancak bu kodlara zorunlu olunmadıkça müdahale edilmemesi, değiştirilmesi gerekir. MATLAB ortamına dışarıdan çağırılacak tüm programlar ".m" uzantılı dosyalar (M-file) olarak bilinir. MATLAB'ın kendi hazır program algoritmaları M-dosyaları şeklinde olabileceği gibi MATLAB için yazılan programlar da M-dosyaları şeklinde saklanıp MATLAB içinde çağrılabilir. Benzer şekilde veriler de M-dosyaları şeklinde oluşturup saklanarak daha sonra MATLAB içinde kullanılabilir.

MATLAB'ın kullanım yerleri olarak;

Denklemlerin çözümü,

Doğrusal ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin çözümü,

İntegral hesabı gibi sayısal hesaplamalar,

Veri çözümleme işlemleri,

İstatistiksel hesaplamalar ve çözümler,

Grafik çizimi ve çözümler,

Bilgisayar destekli kontrol sistemi tasarımı

sayılabilir.

A1 Matlab M File Oransal-Integral-Türevsel Kontrol Yazılımı

```
clear;clc;clf;
ze=0.02; ye=3.34; we=0; x3e=0.27; x2e=0; x1e=0.02;
%Başlangıç Değerleri
A=[0 1 0;1962 0 -35.8214;0 0 -160.346];
C=[1 0 0;-72.9965 0 0.48];
D=[0 0;1 0];
x10=-0.01; x20=0; x30=0;
u1=0;u2=0;u3=1;
dt=0.0001; tend=1;
U0=5; t0=0; i=0; y0=-0.01; e10=-0.01;
r0=0.02;Kp=1000;Kd=25;Ki=0;
while t0<tend-dt
i=i+1;
U=Kp*y0+Kd*(y0-e10)/dt+(e10+y0)*dt*Ki;
e10=y0;
if U>4.34
U=4.34;
elseif U<-5.66
U=-5.66;
end
U0=U;

B=[0;0;U*66.5336];
x11=x10;x21=x20;x31=x30;
a1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
a2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
a3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x11=x10+a1/2;
x21=x20+a2/2;
x31=x30+a3/2;
b1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
b2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
```

```

b3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x11=x10+b1/2;
x21=x20+b2/2;
x31=x30+b3/2;
c1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
c2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
c3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x11=x10+c1;
x21=x20+c2;
x31=x30+c3;
d1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
d2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
d3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x1(i)=x10+(a1+2*b1+2*c1+d1)/6;
x2(i)=x20+(a2+2*b2+2*c2+d2)/6;
x3(i)=x30+(a3+2*b3+2*c3+d3)/6;
x10=x1(i);
x20=x2(i);
x30=x3(i);
gb0=-72.9965*x10+0.48*x30+U0;
t(i)=t0+dt;
t0=t(i);
y(i)=x10;
y0=y(i);
gb(i)=gb0+3.34;
yy(i)=1000*x10+20;
r(i)=r0;
v(i)=U0+0.66;
end;
plot(t,r*1000,t,yy,'LineWidth',2)
xlabel('zaman sn');ylabel('Pozisyon Degeri mm');
grid;

```

A2 Matlab M File Kayan Kip Kontrol Yazılımı

```

clear;clc;clf;
ze=0.02;
ye=3.34;
we=0;
x3e=0.27;
x2e=0;
x1e=0.02;
Alfa=2.48;
Beta=2.92*10^(-4);
Gama=0.48;
ue=0.66;
n=1*10^(-9);
%Başlangıç Değerleri
A=[0 1 0;1962 0 -35.8214;0 0 -160.346];
C=[1 0 0;-72.9965 0 0.48];
D=[0 0;1 0];
x10=-0.003;

```

```

x20=0;
x30=0;
u1=0;u2=0;u3=1;
dt=0.0001;
tend=.5;
U0=5;
t0=0;
i=0;
y0=-0.003;
e10=-0.003;
r0=0.02;Kp=100;Kd=50;Ki=0;
while t0<tend-dt
%while t0<10000*dt
i=i+1;
U=Kp*y0+Kd*(y0-e10)/dt+(e10+y0)*dt*Ki;
e10=y0;
if U>4.34
U=4.34;
elseif U<-5.66
U=-5.66;
end
U0=U;
B=[0 ;0;U*66.5336];
x11=x10;x21=x20;x31=x30;
a1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
a2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
a3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x11=x10+a1/2;
x21=x20+a2/2;
x31=x30+a3/2;
b1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
b2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
b3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x11=x10+b1/2;
x21=x20+b2/2;
x31=x30+b3/2;
c1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
c2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
c3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x11=x10+c1;
x21=x20+c2;
x31=x30+c3;
d1=dt*(A(1,1)*x11+A(1,2)*x21+A(1,3)*x31 +B(1)*u1);
d2=dt*(A(2,1)*x11+A(2,2)*x21+A(2,3)*x31 +B(2)*u2);
d3=dt*(A(3,1)*x11+A(3,2)*x21+A(3,3)*x31 +B(3)*u3);
x1(i)=x10+(a1+2*b1+2*c1+d1)/6;
x2(i)=x20+(a2+2*b2+2*c2+d2)/6;
x3(i)=x30+(a3+2*b3+2*c3+d3)/6;
x10=x1(i);
x20=x2(i);
x30=x3(i);
gb0=-72.9965*x10+0.48*x30+U0;
t(i)=t0+dt;
t0=t(i);

```

```

y(i)=x10;
y0=y(i);
gb(i)=gb0+3.34;
yy(i)=1000*x10+20;
r(i)=r0;
v(i)=U0+0.66;
end;
title('R, h, v, i, U, fb');
subplot(3,2,1);
plot(t,r*1000,'LineWidth',2)

```

A3 Proton Ide Program Geliştirme–Proton Basic Derleyici Yazılımı ve UsBurn PIC Programlama Kartı ve Yazılımı

Proton IDE, Proton Plus derleyici için tasarlanmış Basic programlama dilini baz alan, profesyonel, güçlü ve görsel bir program geliştirme yazılımıdır. ProtonIDE performans, esneklik ve kontrolden ödün vermeden rahat bir kullanım ve geliştirme ortamında ürün geliştirmeyi hızlandırmak için özel olarak tasarlanmıştır. Burada yazılan programlar entegre derleyici sayesinde mikrodenetleyicilere yüklenebilecek HEX uzantılı dosyalara çevrilmektedir.

Oluşturulan HEX uzantılı dosyalar USBurn PIC Programlama kartı ve yazılımı sayesinde PIC18F4550 tümdevresine yüklenmektedir. Daha sonra bu mikrodenetleyici tümdevremiz manyetik askı sistemimize yerleştirilmektedir.

A4 Mikrodenetleyicide Kullanılan Program 1

```

Device 18F4550
Xtal 20
TRISC=%00000000
TRISB=%00000000
TRISA=%00000011
ADCON0=%10000011
ADCON1=%10000011
ADCON2=%10000111
Declare Adin_Res 10
Declare Adin_Tad FRC
Declare Adin_Stime 0
'-----
'Symbol TMR1F=PIR1.0
'-----
Dim REF As Word
Dim FB As Word

```

```
Dim FB1 As Word
Dim FB2 As Word
Dim FB3 As Word
Dim FB4 As Word
Dim FB5 As Word
Dim FE As Dword
Dim E As Float
Dim E0 As Float
Dim U As Float
Dim KP As Float
Dim KD As Float
```

```
-----
Declare CCP1_Pin PORTC.2 'HPWM port ve bit CCP1-kanal 1
REF = 300
KP=100
KD=50
U = 255
```

```
-----
basla:
FB = ADIn 1
E=REF - FB
U=KP*E
FE= KD*(E - E0)
U=U + FE/0.0001
If U>255 Then
U=255
Elseif U<0 Then
U=0
End If
E0=E
HPWM 1 , U , 10000
GoTo basla
```

A5 Mikrodenetleyicide Kullanılan Program 2

```
Device 18F4550
Xtal 20
TRISC=%00000000
TRISB=%00000000
TRISA=%00000011
ADCON0=%10000011
ADCON1=%10000011
ADCON2=%10000111
Declare Adin_Res 10
Declare Adin_Tad FRC
Declare Adin_Stime 0
```

```
-----
'Symbol TMR1F=PIR1.0
```

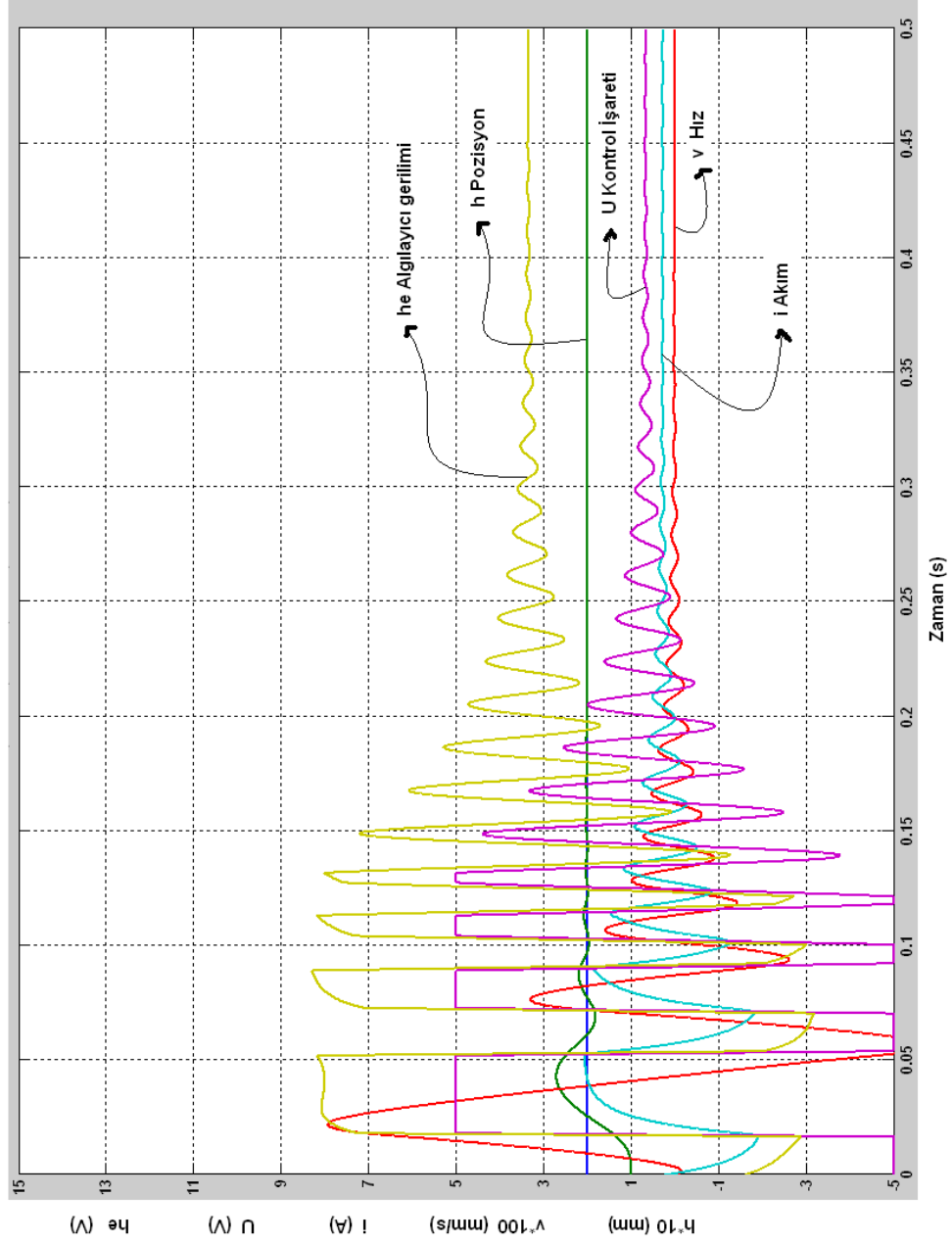
```
-----
Dim REF As Word
Dim FB As Word
Dim FB1 As Word
```

```
Dim FB2 As Word
Dim FB3 As Word
Dim FB4 As Word
Dim FB5 As Word
Dim FE As Dword
Dim E As Float
Dim E0 As Float
Dim U As Float
Dim KP As Float
Dim C As Float
Dim T As Float
Dim TS As Float
```

```
-----
Declare CCP1_Pin PORTC.2
REF = 280
KP=6
C=10
U = 255
FB1 = 0
FB2 = 1
TS=2
-----
```

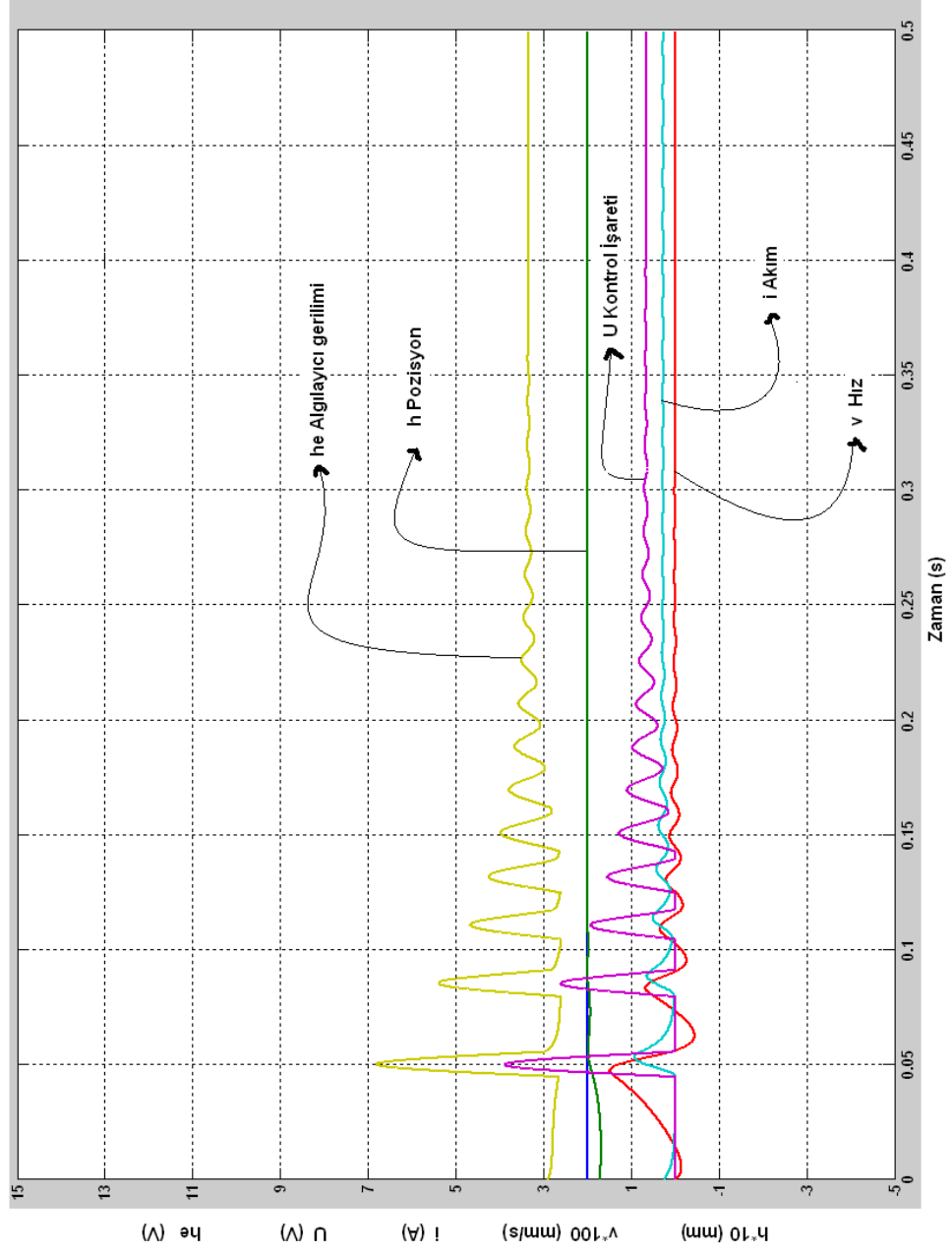
```
basla:
FB = ADIn 1
E=REF - FB
E=Abs(E)
U=C*E
T=E-E0
T=T/TS
U=U+T
If U>0 Then
U=255
Elseif U<0 Then
U=0
End If
If E<0 Then U=0
E0=E
HPWM 1 , U , 10000
GoTo basla
```

EK B Elde Edilen Grafiklerin Büyütülmüş Şekilleri

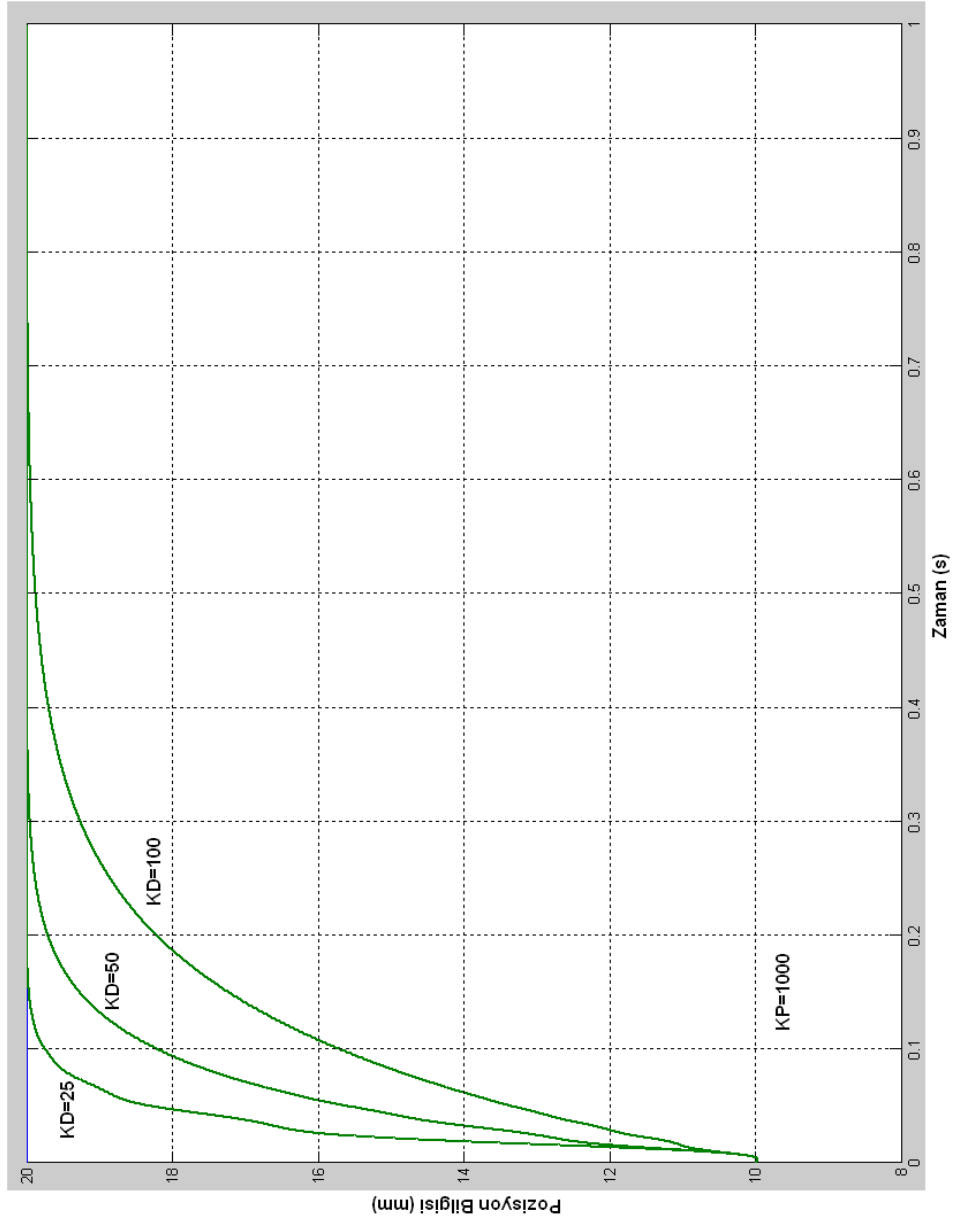


a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V

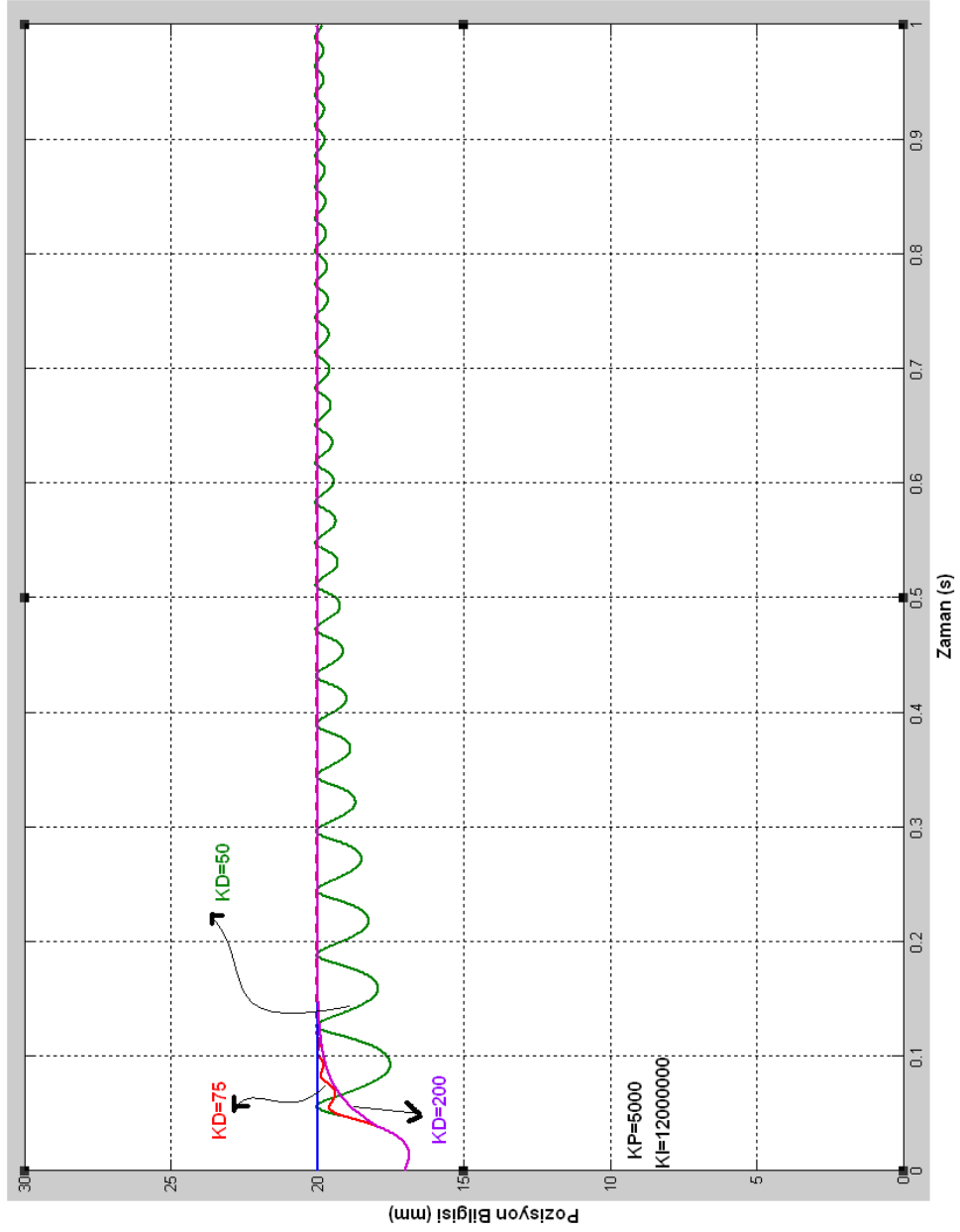
Şekil 4.6 h, v, i, U, h_e Parametreleri Arasındaki Bağlantı



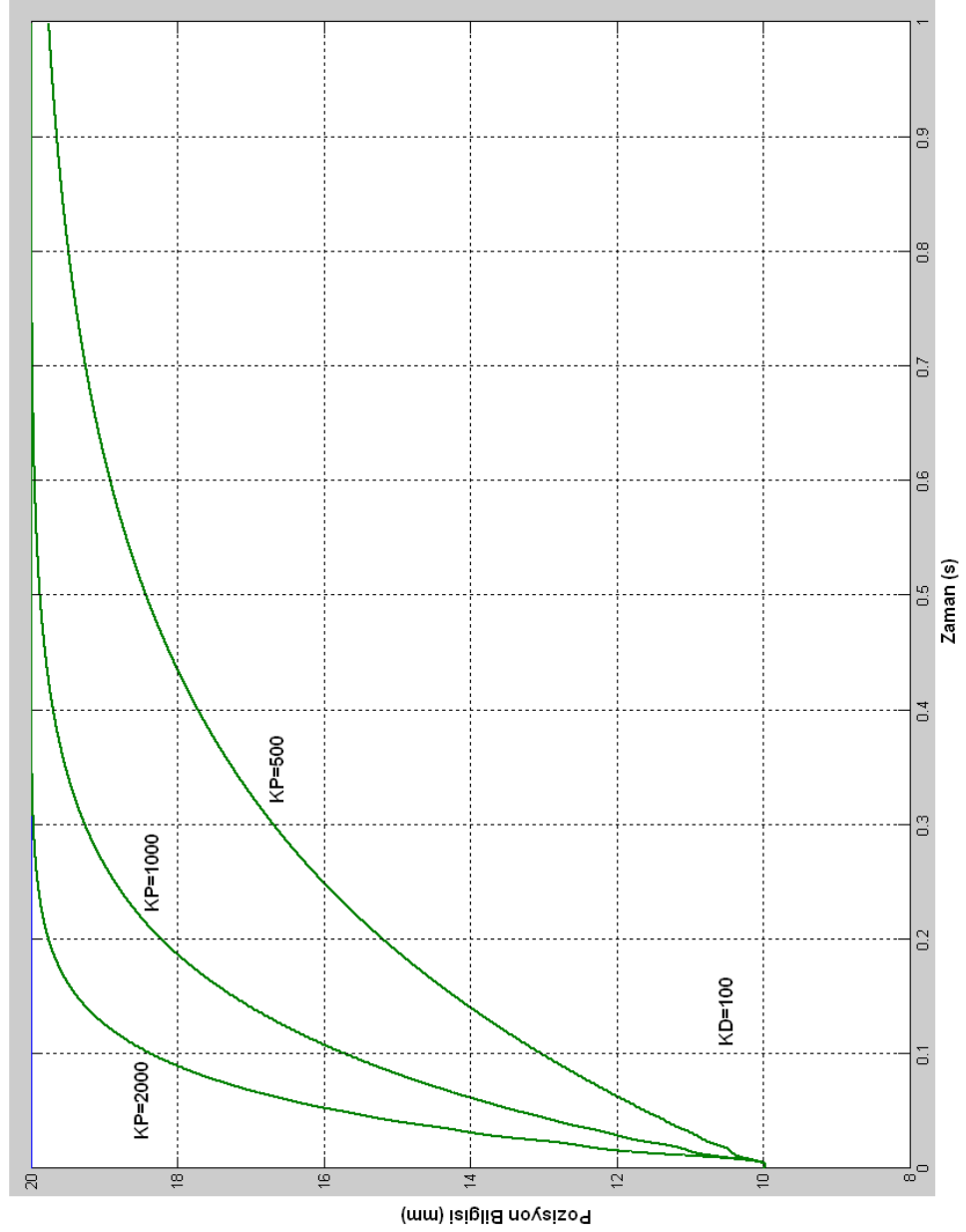
b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V
 Şekil 4.6 h, v, i, U, h_e Parametreleri Arasındaki Bağını



a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V
Şekil 4.7 Farklı K_D Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı

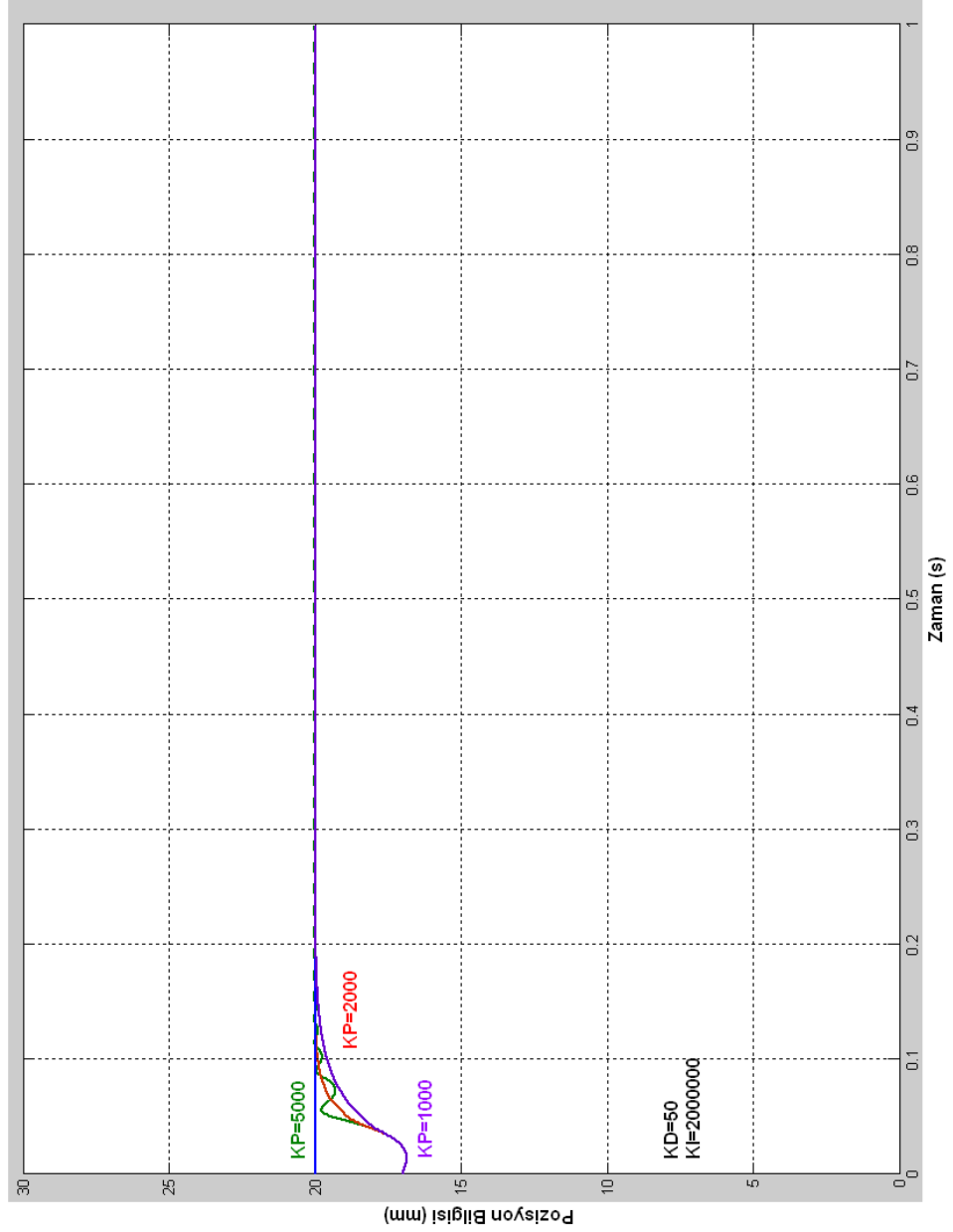


b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V
 Şekil 4.7 Farklı K_D Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı



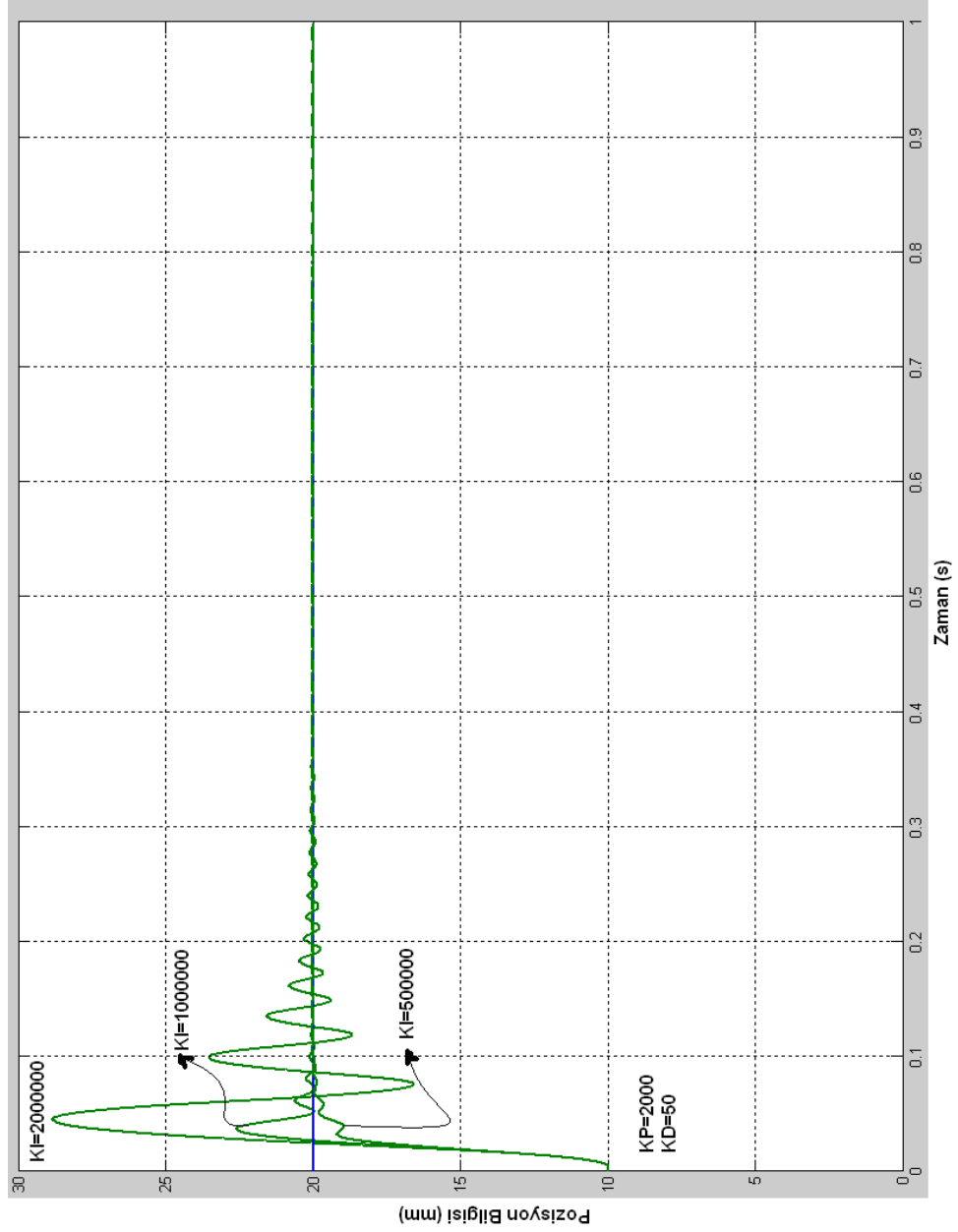
a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V

Şekil 4.8 Farklı K_P Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı



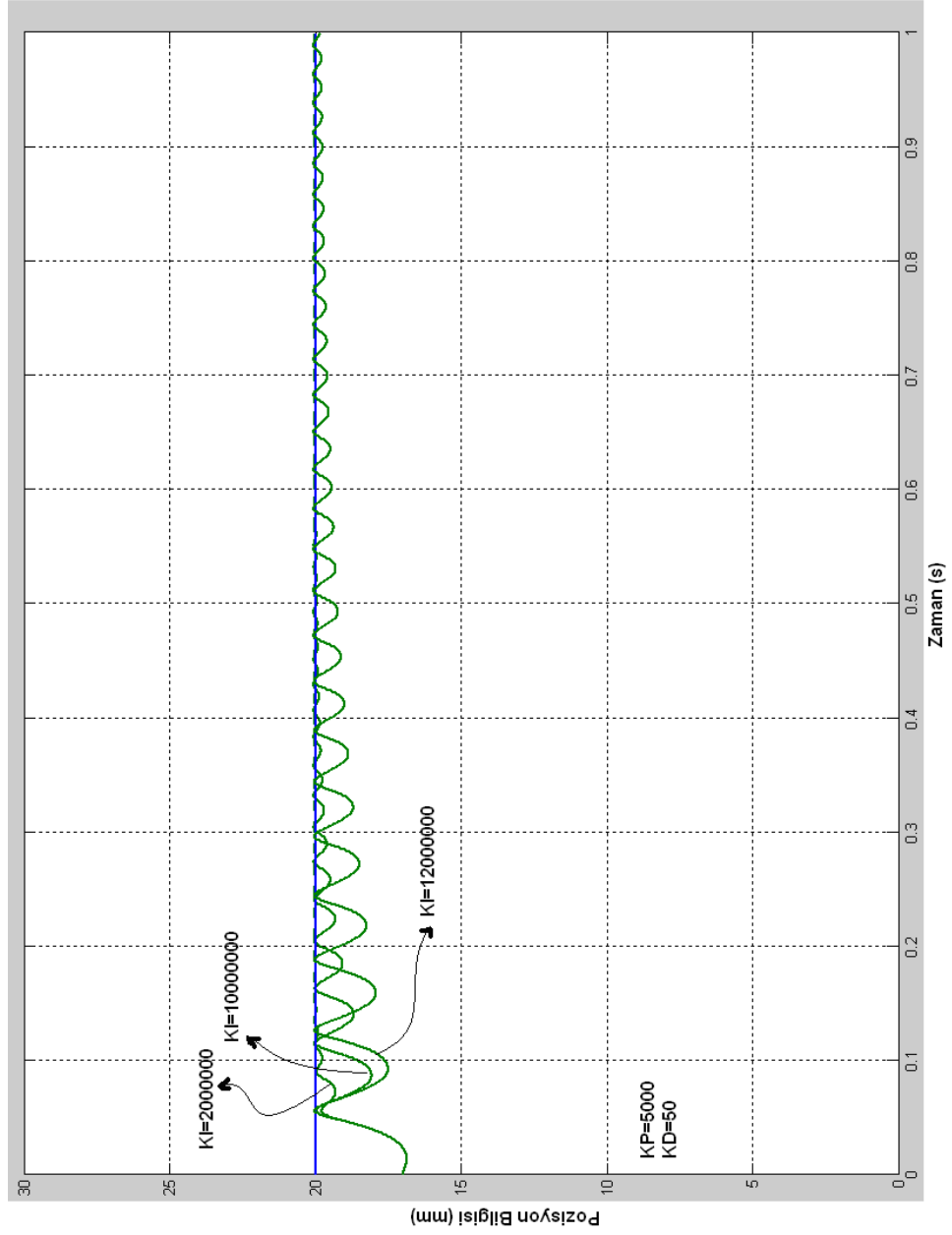
b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V

Şekil 4.8 Farklı K_P Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı



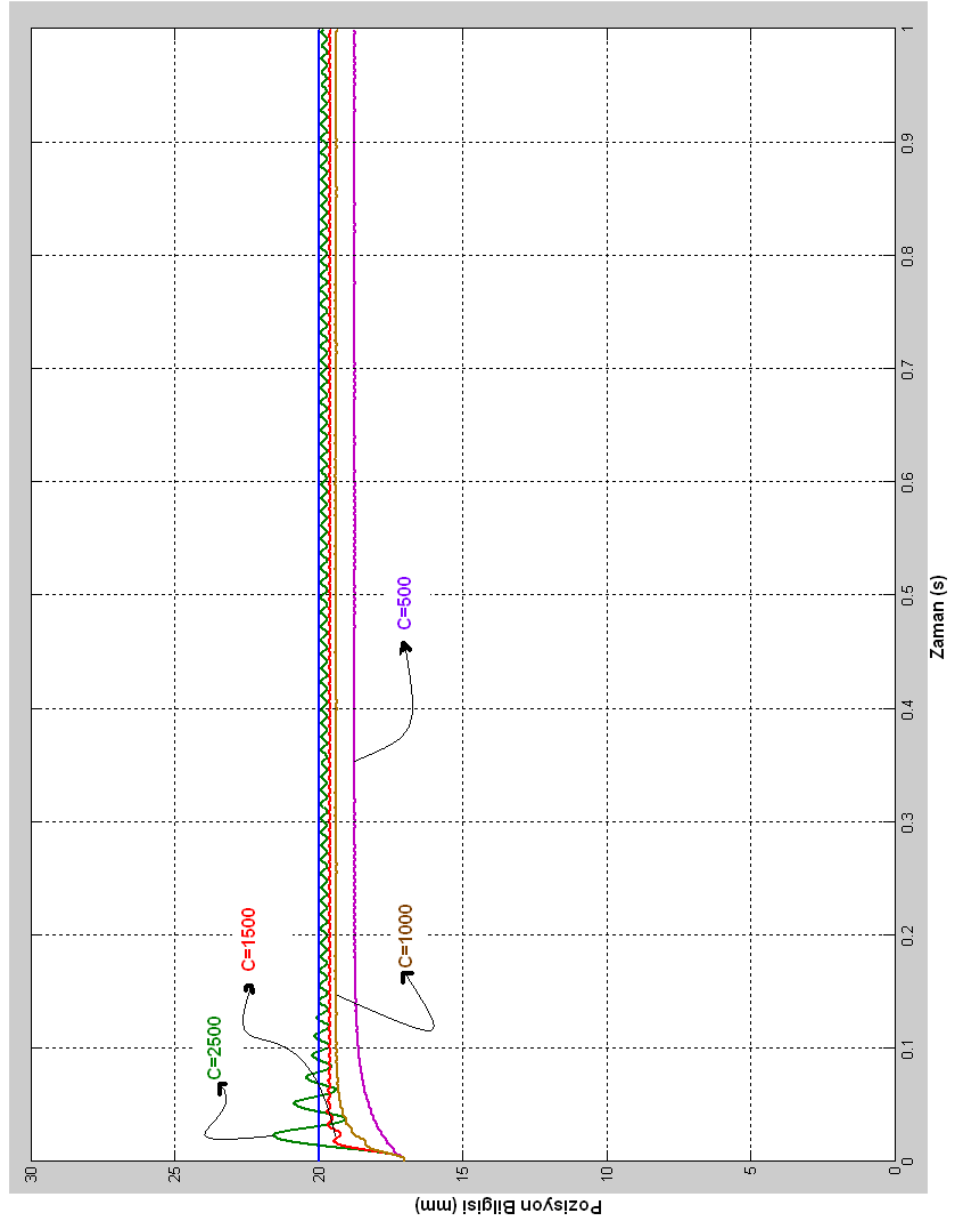
a. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (-5,+5) V

Şekil 4.9 Farklı K_I Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı

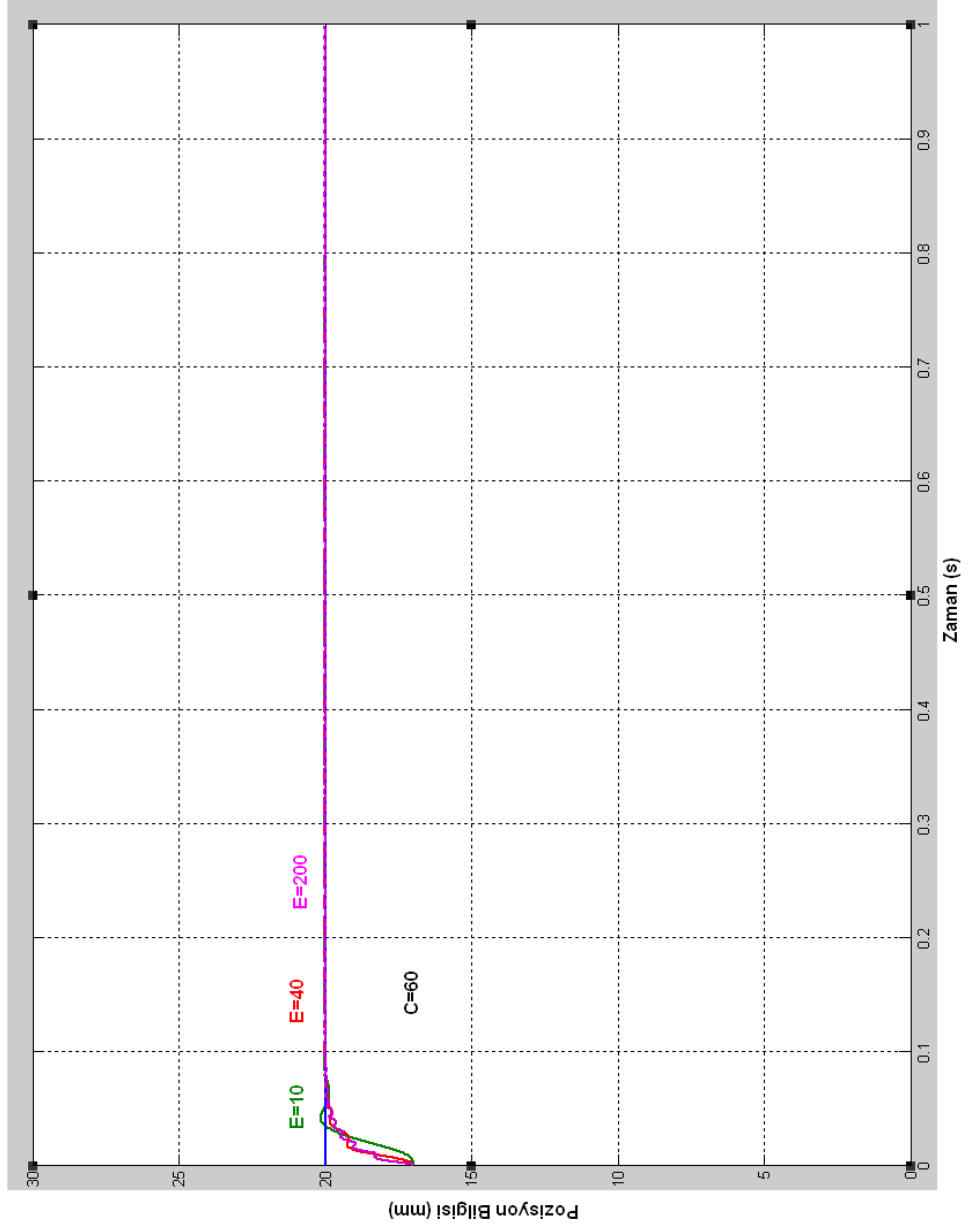


b. Kontrol İşareti Sınır Değerleri (0,+5) V

Şekil 4.9 Farklı K_p Katsayılarına Karşılık Sistem Cevabı



Şekil 4.11 c Katsayısının Farklı Değerleri İçin Sistem Cevabı



Şekil 4.13 Farklı Eğim Katsayıları İçin Sistem Cevabı

EK C Uygulamada Kullanılan PIC18F4550 Tümdevresi

Bir bilgisayar içinde bulunması gereken hafıza, giriş/çıkış nitesi gibi elemanların CPU ile birlikte tek bir entegre içerisinde üretilmiş haline Mikrodenetleyici denir. Böylece hem yer tasarrufu yapılıp maliyet düşürülürken hem de tasarım kolaylaştırılmış ve programlama işlemi basitleştirilmış olur.

Günümüzde mikrodenetleyiciler otomobillerden kameralara, cep telefonlarından oyunculara kadar sayılamayacak alanlarda kullanılır. Bir Mikrodenetleyici içinde bulunabilen bazı özellikler şunlardır;

- Programlanabilir Dijital Giriş / ıkış (I / O)
- Programlanabilir Analog Giriş
- Seri Giriş / ıkış (I / O)
- DGM işaret ıkışı
- Harici hafıza bağlanabilme
- Dhili hafıza seçenekleri (ROM, PROM, EPROM, EEPROM, Flash vb)

Bunların dışında, PIC komutları bellekte çok az yer kaplarlar. 18FXXX ailesinde 16 bit uzunluğundadır. PIC' te CALL, GOTO ve bit test eden BTFSS ve INCFSZ gibi komutlar dışında diğer komutlar 1 işlem süresi alır. Belirtilen komutlar ise 2 işlem süresi alır. PIC ailesinde her türlü ihtiyaçların karşılanacağı çeşitli hız, sıcaklık, kılıf, I/O hatları, zamanlama fonksiyonları, seri iletiim portları, A/D ve bellek kapasite seçenekleri bulunur.

Tablo B.1 PIC18F4550'e ait özellikler:

Parametre Adı	Değer
Program Bellek Türü	Flash
Program Belleği (KB)	32
İşlemci Hızı (MIPS)	12
RAM (bayt)	2,048
Veri EEPROM (bayt)	256
Dijital İletişim Çevre Birimleri	1-A/E/USART, 1-MSSP (SPI/I2C)
Yakalama/Karşılaştırıcı/PWM Çevre Birimleri	1 CCP, 1 ECCP
Zamanlayıcılar	1 x 8-bit, 3 x 16-bit
ADC	13 kanal, 10-bit
Karşılaştırıcılar	2
USB (kanal hız, uyum)	1, Full Speed, USB 2.0
Sıcaklık aralığı (°C)	(-40) – (+85)
Çalışma voltajı (V)	2 – 5,5
Pin sayısı	40

6. KAYNAKLAR

- [1] Jayawant, B., “Electromagnetic Suspension and Levitation Techniques”, University of Sussex, School of Engineering & Applied Sciences, Edward Arnold (Publishers), Brighton, UK, (1981)
- [2] Earnshaw, S., “On the Nature of the Molecular Forces which regulate the Constitution of the Luminiferous”, Ether. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 3(1), (1842), 97 – 112
- [3] Erdem, Z., “Bulanık Mantık Denetleyici ile Bir Demir Kürenin Elektromanyetik Olarak Boşlukta Tutulması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, (1998)
- [4] Tang, J., “Magnetic Levitation Systems Using Analog and Digital Phase-Lead Controllers”, American Society for Engineering Education Annual Conference, Honolulu, Hawaii, (2007)
- [5] Wong, T., H., “Design of A Magnetic Levitation Control System”, IEEE Transactions on Education, 29(4), (1986), 196 – 200
- [6] Edwards, J., D., “Electromechanics Laboratory Documents”, University of Sussex, School of Engineering & Applied Sciences, Brighton, UK, (1995)
- [7] Hurley, W. G., Wöfle W. H., “Electromagnetic Design of A Magnetic Suspension System”, IEEE Transactions on Education, 40(2), (1997), 124 – 130
- [8] Cho, D., Kato, Y., Spilman, D., “Sliding Mode and Classical Control Magnetic Levitation System,” IEEE Control Systems Magazine, 13(1), (1993), 42 – 48
- [9] Lee, T. E., Su, J. P., Yu, K. W., “Nonlinear Robust Control of a Magnetic Levitation System”, Proc. of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 1(42), (2006), 517 – 521
- [10] Takeshi, M., Katsumi, S., Masayuki H., Koichi, O., Toshiro, H. “A Miniaturized Levitation System With Motion Control Using a Piezoelectric Actuator”, IEEE Transactions On Control Systems Technology Magazine, 10(5), (2002), 666 – 670
- [11] Akat, S. B., Efe, M. Ö., “Bir Manyetik Askı Sisteminin Kontrolünde Dört Yöntemin Karşılaştırılması”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK’07, İstanbul, Türkiye, (2007)

- [12] Erkal, B., "Eğitim Amaçlı Sinirsel Bulanık Denetimine Dayalı Bir Manyetik Askı Sisteminin Tasarlanması Ve Simulink Ortamında Benzetimi", International Advanced Technologies Symposium İATS'09, Karabük, Türkiye, (2009)
- [13] Astrom, K.J., Hagglund, T., "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", 2nd Edition, International Society for Measurement and Control, North Carolina, USA, (1995)
- [14] Shiao, Y., "Design and Implementation of a Controller for a Magnetic Levitation System," Proceedings of National Science Council, 11(2), (2001), 88 – 94
- [15] Fama, R. C., Lopes, R. V., Milhan, A. de P., Galvao, R. K. H., Lastra, B. A. D., "Predictive Control of a Magnetic Levitation System with Explicit Treatment of Operational Constraints," ABCM Symposium Series in Mechatronics, 2, (2006), 1–8
- [16] Shkolnikov, I. A., Shtessel, Y. B., Lianos, D. P., Thies, A.T, "Robust Missile Autopilot Design via High-order Sliding Mode Control," Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Denver, USA, (2000)
- [17] Camacho, O., Smith, C.A., "Sliding Mode Control: An Approach to Regulate Nonlinear Chemical Process," ISA Transactions, 39(14), (2000), 205 – 218
- [18] Guldner, J., Utkin, V. I., "Sliding Mode Control for Gradient Tracking and Robot Navigation Using Artificial Potential Fields," IEEE Transactions on Robotics and Automation, 11(2), (1995), 247 – 254
- [19] İnternet Website: "A solenoid and a bar magnet and their magnetic fields", <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/imgmag/barsol.gif>, HyperPhysics, 05.01.2011 tarihinde erişilmiştir.
- [20] İnternet Website: "Sensing and Control Interaktif Catalog", <http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/catalog/c20020.pdf>, Honeywell Inc., 05.01.2011 tarihinde erişilmiştir.
- [21] Kuo, B. "Otomatik Kontrol Sistemleri", 7. Basım, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye, (1999), 192 – 195
- [22] İnternet Website: "Control Tutorials for Matlab", <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/>, Carnegie Mellon University 16.12.2010 tarihinde erişilmiştir.
- [23] Charais, J., Lourens, R., "Software PID Control of an Inverted Pendulum Using the PIC16F684" MicroChip Technology Inc., (2004), 3 – 6
- [24] İnternet Website: http://zeltom.com/Documents/emls_um.pdf, Zeltom LLC, 25.10.2010 tarihinde erişilmiştir.

[25] Demirtaş M., Yüksek M., “Mikrodenetleyici Kullanarak Servo Motorun Kayan Kipli Konum Denetimi”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'09, İstanbul, Türkiye, 2009.