T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATSAYI DİYAGRAM METODUNUN HAREKET KONTROL SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

ADEM AVCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. SEMİH SEZER

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATSAYI DİYAGRAM METODUNUN HAREKET KONTROL SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

Adem AVCU tarafından hazırlanan tez çalışması 02.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Semih SEZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Kadir ERKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Semih SEZER

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Meral BAYRAKTAR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. İlker Murat KOÇ

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması sırasında derin bilgi ve donanımlarıyla yardımcı olan Doç. Dr. Semih SEZER ve Dr. Öğr. Üyesi Kadir ERKAN hocalarıma; manevi destekleriyle bana moral veren aileme teşekkür ederim.

Mayıs, 2018

Adem AVCU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ x

ÖZET xi

ABSTRACT xii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 6

BÖLÜM 2

KONTROL YÖNTEMLERİ VE KATSAYI DİYAGRAM METODU 7

2.1 Klasik Kontrol Yöntemi 8
2.2 Modern Kontrol Yöntemi 8
2.3 Polinom Yaklaşımı Yöntemi 8
2.3.1 Katsayı Diyagram Metodunun Yapısı 8
2.3.2 Standart Manabe Yapısı 10

BÖLÜM 3

DC MOTOR PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK BULUNMASI 11

3.1 K_b ve R Değerlerinin Bulunması 12
3.2 K_t Değerinin Bulunması 13
3.3 Sürtünme Sabitinin Bulunması 16
3.4 Atalet Momentinin Bulunması 18

3.5 Yay Sabitinin Bulunması 20

BÖLÜM 4

DC MOTOR MODELLEME VE KONTROL ÇALIŞMALARI 22

4.1 DC Motorun Hız PID VE IPD Katsayılarının Bulunması 24
4.1.1 DC Motorun Açısal Hız PID Katsayılarının Bulunması 24
4.1.2 DC Motorun Açısal Hız IPD Katsayılarının Bulunması 26
4.1.3 DC Motorun Açısal Konum IPD Katsayılarının Bulunması 27

BÖLÜM 5

ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE IPD İLE KONTROL ÇALIŞMALARI 36

5.1 Deney Sistemi 36
5.2 Matematiksel Denklemlerin Elde Edilmesi 39
5.3 Sistemde IPD Hız Kontrolü 41
5.4 Sistemde IPD Konum Kontrolü 47

BÖLÜM 6

ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN DURUM UZAY GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ 53

6.1 Sistemin Durum Uzay İntegral Geri Besleme ile Hız Kontrolü 53
6.2 Sistemin Durum Uzay İntegral Gözlemci Geri Besleme ile Hız Kontrolü 57

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 61

KAYNAKLAR 65

ÖZGEÇMİŞ 68

SİMGE LİSTESİ

B_L	Yük sürtünme katsayısı
B_m	Motor sürtünme katsayısı
E	Zıt EMK gerilimi
i	Akım
J_L	Yük ataleti
J_m	Motor ataleti
K_b	Zıt EMK sabiti
K_S	Yay katsayısı
K_t	Tork sabiti
L	Endüktans
R	Direnç
T_2	Yay torku
T_L	Yük torku
T_m	Motor torku
V	Giriş gerilimi
W_L	Yük açısal hızı
W_m	Motor açısal hızı
θ_s	Yay açısal yer değişimi

KISALTMA LİSTESİ

3B	Üç boyutlu çizim
BDK	Baskı Devre Kartı
CDM	Coefficient Diagram Method
DC	Direct Current
EMK	Elektromotor kuvvet
IPD	Integral Oransal Türev Kontrol
KDM	Katsayı Diyagram Metodu
LQR	Linear quadratic regulator
PID	Oransal İntegral Türev Kontrol
SSI	Durum Uzay İntegral Kontrol
SSIO	Durum Uzay İntegral Gözlemci Kontrol

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Tez konu içerik bilgilendirmesi 5
Şekil 2. 1 Kontrol edilecek geri beslemeli sistemin blok gösterimi 9
Şekil 3. 1 DC motor parametre belirleme deney düzeneği 12
Şekil 3. 2 100W DC motor K_b ve R parametre grafiği 13
Şekil 3. 3 140W DC motor K_b ve R parametre grafiği 13
Şekil 3. 4 100W DC motor K_t parametre grafiği 14
Şekil 3. 5 140W DC motor K_t parametre grafiği 14
Şekil 3. 6 100W DC motor K_t parametre grafiği 15
Şekil 3. 7 140W DC motor K_t parametre grafiği 15
Şekil 3. 8 100W DC motor sürtünme sabiti grafiği 17
Şekil 3. 9 140W DC motor sürtünme sabiti grafiği 17
Şekil 3. 10 Küçük kasnağın 3B çizimi 19
Şekil 3. 11 Büyük kasnağın 3B çizimi 20
Şekil 4. 1 DC motor fiziksel gösterimi 22
Şekil 4. 2 PID kontrol yapısı 25
Şekil 4. 3 IPD kontrol yapısı 26
Şekil 4. 4 Açısal hız transfer fonksiyon bode diyagramı 29
Şekil 4. 5 Açısal hız transfer fonksiyon IPD bode diyagramı 30
Şekil 4. 6 Açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası 30
Şekil 4. 7 Açısal hız transfer fonksiyon IPD kutup haritası 31
Şekil 4. 8 Konum transfer fonksiyon bode diyagramı 31
Şekil 4. 9 Konum transfer fonksiyon IPD bode diyagramı 32
Şekil 4. 10 Konum transfer fonksiyon kutup haritası 32
Şekil 4. 11 Konum transfer fonksiyon IPD kutup haritası 33
Şekil 4. 12 100W DC motor açısal hız simülasyon grafiği 33
Şekil 4. 13 100W DC motor açısal hız deney grafiği 34
Şekil 4. 14 100W DC motor açısal konum simülasyon grafiği 34
Şekil 4. 15 100W DC motor açısal konum deney grafiği 35
Şekil 5. 1 Esnek kayışlı DC motor sisteminin fiziksel gösterimi 37
Şekil 5. 2 Esnek kayışlı DC motor sisteminin 3B gösterimi 37
Şekil 5. 3 Deney sisteminin ön görünümü 38
Şekil 5. 4 Deney sisteminin arka görünümü 38
Şekil 5. 5 Voltaj bölücü ve baskı devre kartı 39
Şekil 5. 6 Deney sisteminin açısal hız bode diyagramı 43

Şekil 5. 7 Deney sisteminin açısal hız IPD bode diyagramı 44
Şekil 5. 8 Deney sisteminin açısal hız kutup haritası 44
Şekil 5. 9 Deney sisteminin açısal hız IPD kutup haritası 45
Şekil 5. 10 Deney sisteminin yük açısal hız simülasyon grafiği 45
Şekil 5. 11 Deney sisteminin yük açısal hız deney grafiği 46
Şekil 5. 12 Deney sisteminin motor açısal hız simülasyon grafiği 46
Şekil 5. 13 Deney sisteminin motor açısal hız deney grafiği 47
Şekil 5. 14 Deney sisteminin açısal konum bode diyagramı 50
Şekil 5. 15 Deney sisteminin açısal konum IPD bode diyagramı 50
Şekil 5. 16 Deney sisteminin açısal konum kutup haritası 51
Şekil 5. 17 Deney sisteminin açısal konum IPD kutup haritası 51
Şekil 5. 18 Deney sistem 100W DC motor açısal konum simülasyon grafiği 52
Şekil 5. 19 Deney sistem 100W DC motor açısal konum deney grafiği 52
Şekil 6. 1 Sistemin durum uzay blok gösterimi 54
Şekil 6. 2 Durum uzayı integral kontrolü simulink modeli 56
Şekil 6. 3 Deney sisteminin açısal hız simülasyon grafiği 56
Şekil 6. 4 Deney sisteminin açısal hız deney grafiği 57
Şekil 6. 5 Bozucu gözlemci durum geri beslemesi integral kontrolü blok şeması 58
Şekil 6. 6 Sistem modeli 59
Şekil 6. 7 Bozucu gözlemci alt sistemi 59
Şekil 6. 8 Deney sistemin gözlemci açısal hız simülasyon grafiği 60
Şekil 6. 9 Deney sistemin gözlemci açısal hız deney grafiği 60
Şekil 7. 1 Kontrolcülerin akım karşılaştırma grafiği 62
Şekil 7. 2 Kontrolcülerin tork karşılaştırma grafiği 62
Şekil 7. 3 Kontrolcülerin volt karşılaştırma grafiği 63
Şekil 7. 4 Kontrolcülerin hız karşılaştırma grafiği 63

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Standart manabe formu 10
Çizelge 3. 1 Kasnak atalet momentinin belirlenmesi 19
Çizelge 3. 2 Yay sabitinin belirlenmesi..... 20
Çizelge 3. 3 DC motorların parametreleri 21
Çizelge 4. 1 100W DC motor değerleri 28
Çizelge 4. 2 DC motorun PID hız ve konum kontrol katsayıları 29
Çizelge 5. 1 Sistem motor ve yük parametre değerleri 42
Çizelge 5. 2 Deney sisteminin açısal hız kontrolcü katsayıları 43
Çizelge 5. 3 Deney sisteminin parametre değerleri 49
Çizelge 5. 4 Deney sisteminin açısal konum kontrolcü katsayıları 49

ÖZET

KATSAYI DİYAGRAM METODUNUN HAREKET KONTROL SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

Adem AVCU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Semih SEZER

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kadir ERKAN

Bu tez çalışmasında, polinom yaklaşımı yönteminden olan Katsayı Diyagram Metodu (KDM) ile hareket kontrol sistemlerine uygulanması için kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Hareket kontrolünde kullanılan DC motorların parametreleri deneyler ve 3B çizimlerle belirlenmiştir. Hız ve konum kontrol uygulamalarının yapılacağı esnek kayışlı DC motor sistemi oluşturulmuş, kontrol katsayılarının belirlenmesinde kullanılacak olan transfer fonksiyonu ve durum uzay denklemleri çıkarılmıştır. KDM'nin DC motor hız ve konum kontrolünde PID ve IPD kontrolcülerinin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Esnek kayışlı DC motor sisteminin IPD, SSI ve SSIO kontrolcüleri tasarlanarak, kontrol çalışmalarının simülasyon ve deneysel sonuçları paylaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katsayı Diyagram Metodu, Aktif kontrol, Sistem modelleme, DC motor, IPD kontrol

ABSTRACT

APPLICATION OF COEFFICIENT DIAGRAM METHOD TO MOTION CONTROL SYSTEMS

Adem AVCU

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Semih SEZER

Co-Adviser: Assist. Prof. Dr. Kadir ERKAN

In this study, controller are designed for motion control with Coefficient Diagram Method (KDM) which is polynomial approach method. The parameters of the DC motors are determined with experimental studies and 3D drawings. A flexible belt DC motor system is established for speed and position control applications, it's transfer function and state space equations are derived from mathematical model. The results of (Coefficient Diagram Method) CDM PID and IPD controllers in the DC motor speed and position control are compared. The IPD, SSI and SSIO controllers for the flexible belt DC motor system are designed and simulation and experimental results of controllers are shared.

Keywords: Coefficient Diagram Method, Active control, System modelling, DC motor, IPD control

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

İnsanoğlu eski çağlardan günümüze kadar gelen süreç içerisinde kullanmış olduğu makineleri kontrol etmek için çeşitli çalışmalar yapmıştır. Basit sistemlerle başlayan bu denetleme ve kontrol etme ihtiyacı günümüzde sistemlerin karmaşık bir hal almasıyla daha da önemli hale gelmiştir. Sanayi Devriminin başlamasıyla ilk olarak Hollandalı C. Drebeelin (1572-1633) sıcaklık düzenleyicisi, Fransız D. Papin'in (1647-1712) buhar kazanları için bulduğu basınç düzenleyicisi ile açık çevrim kontrol sistemlerinden kapalı çevrim kontrol sistemlerine giriş yapılmıştır. Endüstriyel olarak geri beslemeli sistem ise James Watt'ın 1769'da geliştirdiği toplu hız düzenleme mekanizmasıdır. Teknik olarak yapılan uygulamalardan sonra kuramsal çalışmalara yönelik çalışmalar 19.yüzyılda James Clerk Maxwell'in regülatörün diferansiyel denklem modeli ile başlamıştır. Bu çalışma Minorsky, Nquist gibi bilim adamları tarafından referans alınarak denetim kuramı oluşturulmuştur. Bu çalışmalar günümüze kadar geliştirilerek kontrol metotlarının temeli atılmıştır. [1-2]

Geri beslemeli kontrol tasarımlarının kontrolü için klasik kontrol metotları 1940'lı yıllarda frekans-cevap metodu ile başlayan ve günümüze kadar gelen süreç içerisinde 1950'li yıllarda kök-yer metodu ve Bode diyagramı geliştirilmiştir. Modern kontrol teknikleri 1960'lı yıllarda durum-uzay gösteriminin geliştirilmesiyle ayrı bir yaklaşımın temelleri atılmıştır. 1960'li yılların ortalarında optimal kontrol olarak kutup-yerleştirme ve LQR geliştirildi. 2000'li yıllara doğru dayanıklı kontrol metotları ile daha sağlıklı kontrol mümkün hale gelmeye başlamıştır. 1980'li yıllarda ise lineer cebrik yaklaşım

metotları geliştirilmiştir. Bu metotlardan olan Katsayı Diyagram Metodu (KDM) ise 1991 yılında Prof. Dr. Shunji Manabe tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Manabe'nin 1998 yılında yayınlamış olduğu makalede KDM'nin kriterleri ve tasarım aşaması detaylı bir şekilde anlatılmıştır. [3-4] Manabe bu çalışmanın yanında KDM ile iki ataletli rezonant sistemlerin kontrolü için çalışmalar yapmıştır. [5] Ülkemizde ise bu konuda 2002 yılında Prof. Dr. Serdar Hamamcı doktora tezi yayınlamıştır. Yayınlamış olduğu tezde Katsayı Diyagram Metodu'nun ortaya çıkışı, diğer kontrol metotları ve KDM'nin sahip olduğu üstünlükleri, tasarım aşamaları, çok girişli ve çok çıkışlı sistemlere nasıl uygulanabileceği ve KDMCAD adını vermiş oldukları bir program geliştirerek bilgisayar ortamında kontrol için çözüm üretmiştir. Dijital kontrolcü tasarımında D-CDM çalışması yapılarak KDM'nin sanayiye yönelik uygulamaları yapılmıştır. [4] Üretim endüstrisinde, robot kol kontrolünde KDM ve geri adımlama yönteminin harmanlanmasıyla robot kol hareket kontrolü yapılabilir. Farklı bir uygulama olarak bilye-kiriş düzeneği modelinde KDM'nin Ziegler Nichols metoduna göre daha başarılı olduğu gösterilmiştir. [5-8]

İki atalet momentli rezonant sistemler için yapılan çalışmalarda sistemin tork, titreşim, hız ve konum değerlerini istenen seviyede tutmaya yönelik kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Tork kontrolünde Katsayı Diyagram Metodunun Manabe tarafından yayınlandığı zamanlarda PID-P kontrolcü kullanarak gerçekleştirilmiştir.[9]

Mekanik rezonantlı sistemlerde en çok karşılaşılan bir diğer problem ise titreşimin sıfırlanmasıdır ya da titreşimin istenen değer aralıklarında tutulmasıdır. İki ataletli rezonant sistemlerde motor ve yük arasındaki elastik şaft ya da aynı özelliği gösteren bir materyalden dolayı hız farkı burulma titreşimlerine sebep olur. [10-13]

Sistemin doğru bir şekilde modellenmesi ve sistemdeki atalet momentine ve sürtünmeye sahip nesnelerin sürtünme değerinin doğru olarak bulunması ve iki ayrı atalet momentinin arasında enerji aktarmak için kullanılan materyalin esnekliğine ait parametrelerin sağlıklı bir biçimde belirlenmesi mekanik rezonansın düşürülmesini sağlar ve sistemin başarılı bir şekilde kontrolündeki başarıyı arttırır. [14] İki atalet momentli bir sistem için KDM kullanılarak PID kontrolcü için gereken parametreler

belirlenmiştir. PID, PID-P ve IPD kontrolcü tasarlanıp karşılaştırmalı sonuçları gösterilmiştir. [15-16]

1997 yılında, iki atalet momentine sahip rezonant bir sistemde parametrelerin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Çoğu sistemde yaygın olarak kullanılan DC motorların parametrelerinin belirlenmesi ve değerlerinin gerçeğe yakın olarak elde edilebilmesi ve değerlerin iyileştirilmesi kontrol edilmek istenen sistemin sağlıklı bir şekilde kontrolünü mümkün kılar. [17-21]

DC motor PID kontrol katsayılarının belirlenmesi, belirlenen K_p, K_i, K_d değerlerinin Matlab ortamında yapılan simülasyon sonuçları ve sisteme etkisinin nasıl olduğu incelenmiştir. [9-22-23]

Kontrol edilmek istenen sistemler için transfer fonksiyon ile kontrolcü tasarlanabilir ayrıca durum uzay denklemleri ile kontrolcü tasarımı yapılabilir. Durum uzay değişkenleri ile kontrol edilmek istenen sistemin, sahip olduğu değişkenlerden istenen bir değişken üzerinden alınabilmesi, sistemin bozucu girişlere dayanıklı olması ve veri alımı zor olan ya da pahalı olduğu durumlarda gözlemci tasarlanarak daha verimli bir şekilde sistem kontrolü yapılabilir. [24-27]

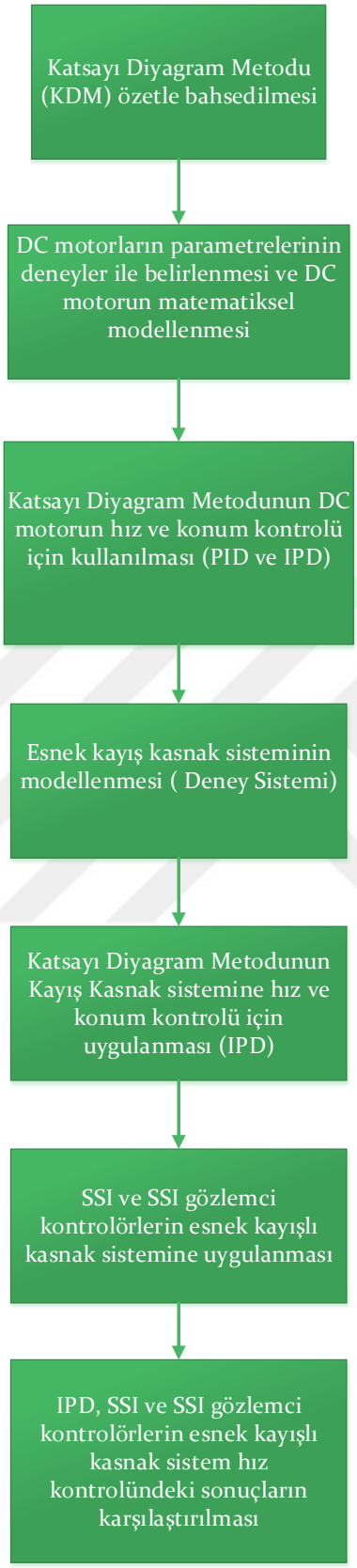
1.2 Tezin Amacı

Kontrol günümüzde sanayilerin her alanında iç içe ayrılmaz bir bütün olarak sistemleri tamamlamaktadır. Hayatımızın her aşamasında kullanılan cihazların ve makinelerin yaygınlaşmasıyla, cihazların ve makinelerin kontrol edilme ihtiyacı artmaya devam etmektedir. Havacılık ve uzay sanayisinde, fabrikaların üretim kısımlarında, akıllı ev sistemlerinde, belli amaçlar için üretilmiş robotlarda ya da günlük kullandığımız araçlarda kontrol uygulamaları geliştirilmeye devam etmektedir.

Esnek kayışlı DC motor sistemi bir esnek kayış, iki adet kasnak, kasnakların bağlı olduğu iki adet DC motor ve hız ve konum ölçümlerinin alınması ve kontrolcünün geri besleme girişi için DC motorlara 2 adet enkoder ile iki ayrı atalet momentine sahip bir sistem olan deney düzeneği oluşturulmuştur. Deney düzeneğindeki DC motorların, kasnak ve esnek kayış katsayı parametrelerinin belirlenmesi için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Öncelikle DC motorun hız ve konum kontrolü için gereken K_p, K_i, K_d değerleri

sonrasında ise esnek kayışlı DC motor sisteminin hız ve konum kontrolü için gereken K_p, K_i, K_d değerlerinin Katsayı Diyagram Metodu ile bulunmasıyla deney düzeneğinin hız ve konum kontrolü uygulamalı olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Bu çalışma ile Katsayı Diyagram Metodu(KDM)'nun kontrol parametreleri K_p, K_i, K_d olan değerlerin belirlenmesi aşamalı olarak anlatılmış ve örneklerle daha anlaşılır hale gelmesi sağlanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda ise KDM'nin kontrol için nasıl kolaylıklar getirdiği ve sahip olduğu üstünlükler yadsınamaz bir şekilde görülmüş olacaktır. Tez çalışmasında takip edilen sıraya göre içerik bilgilendirmesi Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1. 1 Tez konu içerik bilgilendirmesi

1.3 Hipotez

Esnek kayışlı DC motor sistemi tasarlanacak ve sistemde kullanılacak DC motorların parametreleri deneyler ile ayrı ayrı belirlenecektir. Kontrol çalışmalarında başarılı sonuçlar veren ve kolay kontrolör tasarlama olanağı sağlayan Katsayı Diyagram Metodu (KDM)'nin DC motorun hız ve konum kontrolünde PID ve IPD kontrolcü tasarımları yapılarak Matlab simulink programında simülasyonları ve uygulamalı olarak deney sonuçları karşılaştırılacaktır. DC motorun hız ve konum kontrolü başarılı olarak yapıldığında esnek kayışlı DC motor sisteminin hız ve konum kontrolü için Katsayı Diyagram Metodu ile kontrol parametrelerini oluşturan K_p, K_i, K_d değerleri belirlenerek hız ve konum kontrolünde vermiş olduğu sonuçlar gösterilecektir. Durum uzay denklemleri ile Katsayı Diyagram Metodu ile SSI ve SSI gözlemci kontrolcü tasarlanarak IPD, SSI ve SSI gözlemci kontrolcülerin deney sisteminin hız kontrolündeki performansları karşılaştırılacaktır.

BÖLÜM 2

KONTROL YÖNTEMLERİ VE KATSAYI DİYAGRAM METODU

İnsanlar var olduğundan beri etrafındaki nesneleri ihtiyaçları doğrultusunda kullanarak hayatlarını kolaylaştırmak istemişlerdir. Kullanmış oldukları sistemleri kontrol etmeye başlamasıyla, kontrol çalışmaları insanların hayat standartlarını daha üst noktalara taşımıştır. Buna örnek olarak (MÖ 430) Taretumlu Achytas'ın tasarladığı otomatik güvercin ya da İskenderiyeli Heron'un yapmış olduğu su saati gibi sistemler verilebilir.

Fabrikalaşmanın başladığı sanayi devriminde ise üretimin kolaylaşması kadar hızlı üretimin kesin doğrulukla kontrolü önem kazanmaya başlamıştır, böylelikle açık döngü sistem kontrolü kapalı döngü geri beslemeli sistem kontrolüne dönüşmeye başlamıştır. James Watt'ın 1769 yılında tasarladığı toplu hız düzenleyicisi mekanik olarak buhar akışının kontrolüyle sistemin sabit hızda çalışmasını mümkün kılmıştır. [1]

Kontrol edilmek istenen sistemler ve kontrolün sürekliliğinin sağlanması doğrultusunda çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Genel anlamda kontrol yöntemleri 3 grup olarak sınıflandırılabilir. Bunlar Klasik Kontrol, Modern Kontrol ve Polinom Yaklaşımıdır.[2-4]

2.1 Klasik Kontrol Yöntemi

Frekans-cevap (bode) esasına dayalı olan bu yöntem sinüs dalga kullanarak sistem çıkışındaki genlik ve faz değerleri ile kontrolcü tasarımını sağlamaktadır. Bu yöntem basit olan ve referans girişinin tek olduğu ya da tek giriş-tek çıkışlı sistemlerde daha çok rağbet görmektedir. Transfer fonksiyonu ile parametre belirlenmeye çalışılır ve deneme yanılma ile kontrolcü tasarlanır.

2.2 Modern Kontrol Yöntemi

Zaman domeni esası üzerine kurulu olan modern kontrol yöntemi ise çok giriş-çok çıkışa sahip ve farklı birçok referans girişinin olması durumunda sistemin kontrolünü mümkün kılmaktadır. Denklemler durum-uzay formatında gösterilmektedir. Bu yaklaşım ile deneme yanılma yapılmadan belirlenen kriterler ile kontrol edilmek istenen sistem için kontrol sağlanabilmektedir.

2.3 Polinom Yaklaşımı Yöntemi

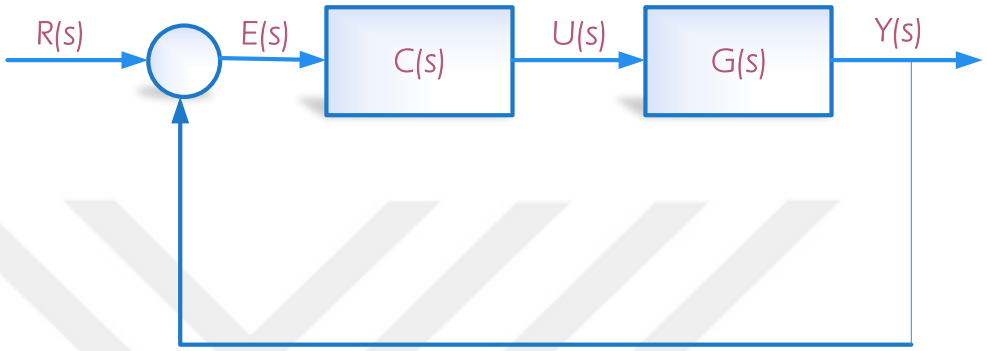
Polinom yaklaşımı ya da diğer adıyla lineer cebrik yaklaşım, klasik ve modern kontrol yöntemlerinin avantajlı kısımlarını birleştirerek daha sağlam bir kontrolcü tasarlanmasını esas alıp gürbüz bir kontrolü sağlar. Polinom yaklaşımında temel olarak istenen performans doğrultusunda polinom şeklinde bir kontrolün tasarlanmasıdır. Ayrıca klasik ve modern kontrol yöntemlerine göre tasarlanmasının daha kolay olması, kontrolör derecelerinin diğer yöntemlerden düşük olması polinom yaklaşımını ön plana çıkarmaktadır. Bu özellikleri ile her alanda rahatlıkla kullanılabilmektedir. Katsayı Diyagram Metodu (KDM) da bir polinom Yaklaşımı olup sahip olduğu avantajlar nedeniyle hız ve konum kontrol çalışmalarında kullanılacaktır.[4]

2.3.1 Katsayı Diyagram Metodunun Yapısı

Katsayı Diyagram Metodu (KDM), polinom yaklaşımının kullanılarak kontrolcü tasarlanması esasına dayanmaktadır. S. Manabe tarafından geliştirilip 1991 yılında kullanıma sunulmuştur. KDM kontrol yöntemleri içerisinde aşımsız cevaba sahip

olması, kolay bir şekilde tasarlanabilmesi ve kontrol için beklenenleri diğer yöntemlere göre daha iyi verebilmesi sayesinde oldukça iyi durumdadır. [3-4]

Katsayı Diyagram Metodunun aşağıdaki şematik gösterimde referans girişi R(s), hatayı E(s), sistem cevabı U(s), sistem çıkışı Y(s) ve kontrolör transfer fonksiyonunu C(s), kontrol edilecek sistemin transfer fonksiyonu ise G(s) ile ifade edilmiş olup kapalı çevrim yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kontrol edilecek geri beslemeli sistemin blok gösterimi

Sistemin transfer fonksiyonu:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s).G(s)}{1+C(s).G(s)} \tag{2.1}$$

Sistemin transfer fonksiyonu diğer gösterimi:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + b_0}{a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \cdots + a_0} \tag{2.2}$$

Sistemin karakter polinomunun gösterilmesi:

$$P(s) = 1 + C(s).G(s) = \sum_{i=0}^{n} a_i s_i \tag{2.3}$$

Sistemin karakter polinomunun açık şekilde gösterimi:

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_n s + a_0 \tag{2.4}$$

Eşdeğer zaman sabiti:

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{2.5}$$

Performans parametreleri (indis):

$$\gamma_i = \frac{{a_i}^2}{(a_{i+1})(a_{i-1})} \tag{2.6}$$

Kararlılık sınırı:

$$\gamma^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \tag{2.7}$$

Lipatov- Sokolov kriterine göre kararlılık:

$$\gamma_i > 1.12375\gamma_i^* \tag{2.8}$$

2.3.2 Standart Manabe Yapısı

Standart Manabe Formunun katsayıları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Denklem (2.6)'da verilmiş olan performans parametreleri (indis) Çizelge 2.1'de belirtilen katsayıların karakter polinoma uygulanmasıyla elde edilen denklemlerin çözülmesi ile kontrol katsayıları bulunabilmektedir.

Kontrol yapılarında genellikle Routh-Hurtwiz kriterleri kullanılmaktadır. KDM ise Lipatov-Sokolov kriterlerini kullanmaktadır. Lipatov-Sokolov kriteri derecesi büyük karakteristik polinomlarda bile doğrusallığı sağlaması ile Routh kriterlerinden daha üstündür. Bu sebeple KDM kararlılığı için Lipatov-Sokolov kriterleri kullanılmıştır.[4]

Çizelge 2. 1 Standart manabe formu

FORM	n	γ_i	γ_{i+1}	γ_{i+2}	γ_{i+3}	γ_{i+4}
MANABE	4	2.5	2	2		
	5	2.5	2	2	2	
	6	2.5	2	2	2	2

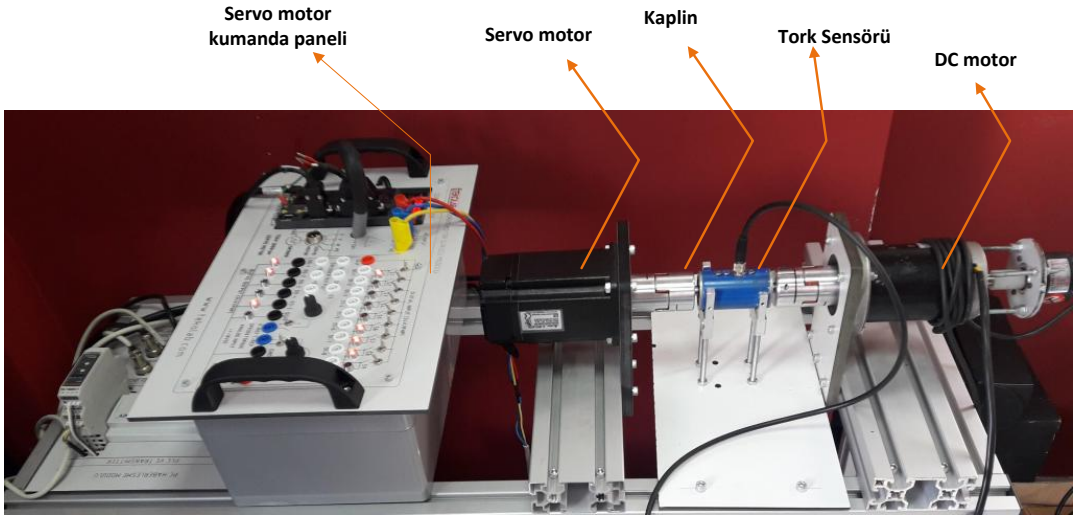
BÖLÜM 3

DC MOTOR PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK BULUNMASI

Kontrol edilmek istenen sistemin giriş ve çıkış değerlerinin bilinmesi kontrol edilecek olan sistemin doğru ve istenen sonuçları vermesi için temeldir. Sistem değişkenlerinin değerlerinin belirlenmesi için esnek kayışlı DC motor sisteminde bulunan motorun parametreleri, deneysel ve 3B modelleme ile belirleme çalışmaları yapılmıştır.

DC motorun parametreleri belirlenecek değişkenler sırasıyla Zıt emk sabiti (K_b), Direnç (R) , Tork sabiti (K_t), Sürtünme (B) ve Atalet Momenti (J)'dir. Bu parametrelere ek olarak esnek kayışlı DC motor sisteminde güç aktarımında kullanılan esnek kayışın yay sabiti (K_s) deneysel olarak belirlenmiştir.

DC motor parametrelerini belirlemek için Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği kurulmuştur. Bu düzenekte servo motor, servo motor kumanda paneli, tork sensörü, kaplin ve DC motor bulunmaktadır. Frenleme amacıyla servo motor ve servo motorun frenleme miktarını ayarlamak için kumanda paneli, tork ölçümü amacıyla tork sensörü, tork sensörü ve DC motor arası bağlantıyı sağlamak amacıyla kaplinler, karakteristik değerleri belirlenecek DC motor ve güç kaynağı ile oluşturulmuştur. DC motorun hız değeri servo motor kumanda panelinden okunmuştur. Ayrıca takometre ile ölçülen hızın doğru olup olmadığı kontrol edilmiştir. Tork sensöründen alınan veriler analog olarak Matlab-Simulink üzerinden veri olarak değerleri alınmıştır.



Şekil 3. 1 DC motor parametre belirleme deney düzeneği

3.1 K_b ve R Değerlerinin Bulunması

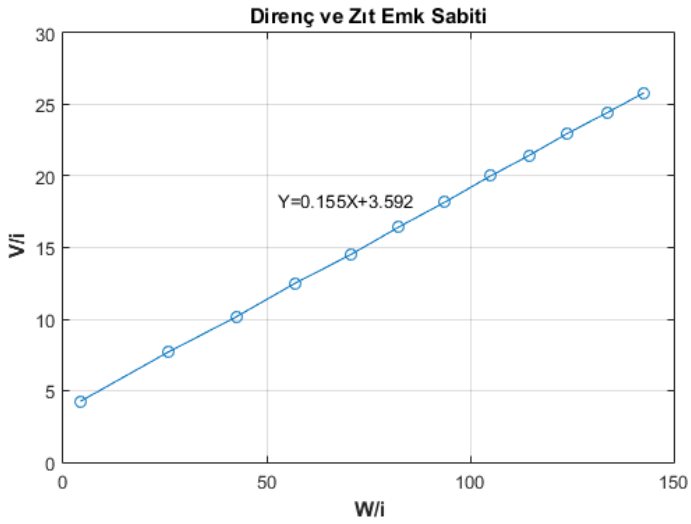
Zıt EMK sabiti (K_b) ve direnç (R) değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3.1'de kurulan deney düzeneği ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. DC motora sıfır volt değerinden başlanarak kademeli olarak arttırılmış ve DC motora verilen volt multimetre ile okunmuştur. Her volt değerinde DC motorun güç kaynağından çektiği akım multimetre ile okunmuş ve servo motor kumanda panelinden DC motorun devir sayısı ölçülmüştür. Ayrıca enkoderden devir sayısının doğru okunup okunmadığı takometre ile teyit edilmiştir. [18] Denklem (3.1)'de volt (V) ile devir sayısı (ω) olarak ifade edilmiştir. Denklem (3.1)'de her tarafın akıma bölünmesi ile Denklem (3.2) elde edilir.

$$V = i * R + K_b * \omega \tag{3.1}$$

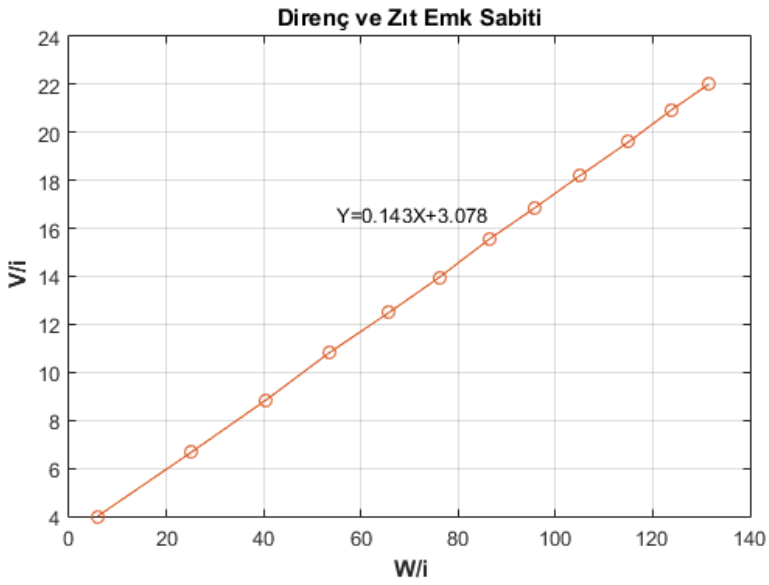
$$\frac{V}{i} = R + K_b * \frac{\omega}{i} \tag{3.2}$$

Denklem (3.2)'de volt (V), devir sayısı (ω) ve akım (i) değerleri ile lineer bir grafik elde edilir. Denklem (3.2)'de volt (V), devir sayısı (ω) ve akım (i) değerleri yerine yazıldığında K_b ve R değerleri elde edilmiş olur. Şekil 3.2'de 100W DC motor için elde edilen grafik verilmiştir.

Şekil 3.2'de belirtildiği gibi y=0,155x+3,592 grafiğin eğiminden k_b=0,155 ve R=3,592 değerleri belirlenmiştir. Şekil 3.3'te 140W DC motor için verilen grafikte belirtildiği gibi y=0,143x+3,078 ile k_b=0,143 ve R=3,078 değerleri belirlenmiş olur.



Şekil 3. 2 100W DC motor K_b ve R parametre grafiği



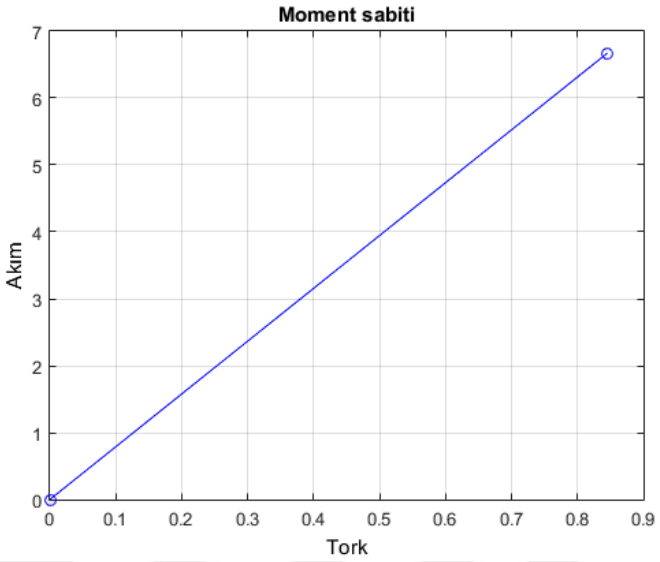
Şekil 3. 3 140W DC motor K_b ve R parametre grafiği

3.2 K_t Değerinin Bulunması

Tork sabitinin (K_t) bulunması için denklem (3.3) ve Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Denklem (3.3)'te tork ve akım doğru orantılı olarak artmaktadır. Tork (T) ve akımın (i) oranı ile tork sabiti (K_t) sabiti bulunur. Tork sabitinin bulunması temelinde aynı mantık doğrultusunda iki farklı yöntemle bulunmuştur. [18]

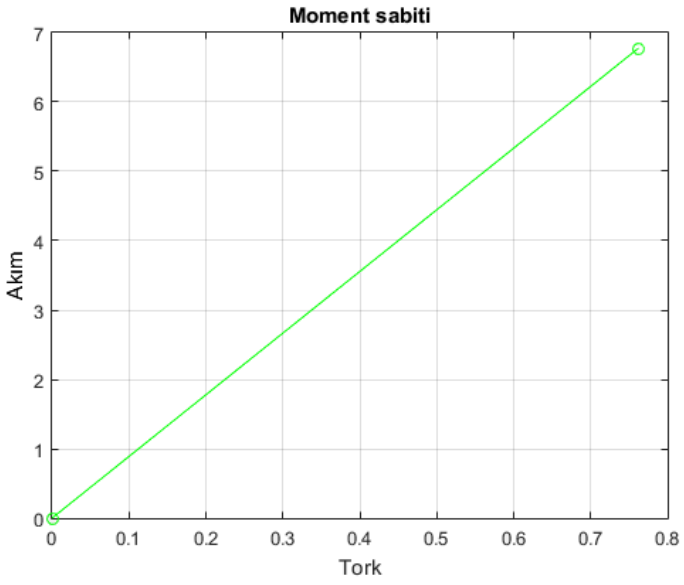
$$T = K_t * i \tag{3.3}$$

İlk yöntemde stall tork ve stall akım denilen durma torku ve durma sırasında motor tarafından çekilen akım değerleri ölçülür. Bu değerlere bağlı grafiğin çizdirilmesi ve denklem (3.3) ile 100W DC motorun tork sabiti K_t =0,127 bulunur. Şekil 3.4'te 100W DC motorun K_t grafiği verilmiştir.



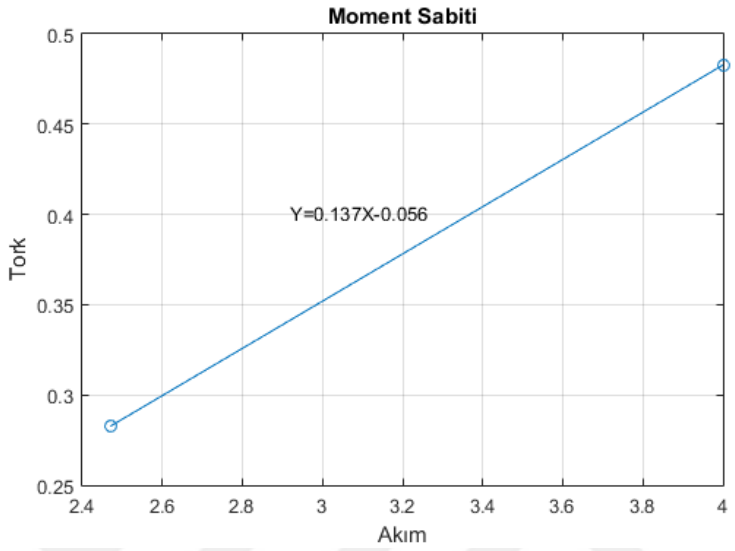
Şekil 3. 4 100W DC motor K_t parametre grafiği

Durma momenti (tork) ve durma sırasında motor tarafından çekilen akım değerlerine bağlı grafiğin çizdirilmesi ve denklem (3.3) ile 140W DC motorun tork sabiti K_t =0,112 bulunur. Şekil 3.5'te 140W DC motorun K_t grafiği verilmiştir.



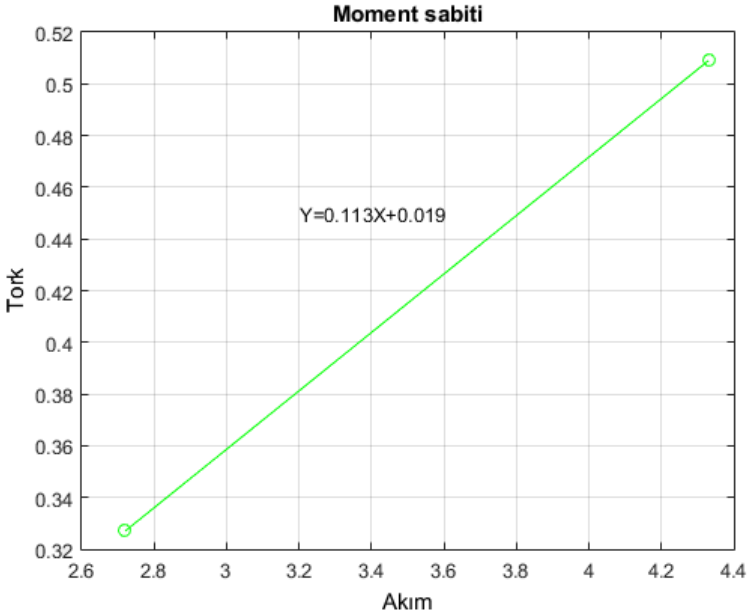
Şekil 3. 5 140W DC motor K_t parametre grafiği

İkinci yöntemde ise parametresi belirlenecek motor nominal değerinde çalıştırılır sonra yük momenti kademe kademe arttırılıp uygulanarak akım ve mil momenti ölçülür. Bu değerler ile grafik çizilerek oran elde edilir. [18] Şekil 3.6'da 100W DC motorun K_t değerine ait grafik verilmiş olup ve K_t =0,137 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. 6 100W DC motor K_t parametre grafiği

Şekil 3.7'de 140W DC motorun K_t değerine ait grafik verilmiş olup ve K_t =0,113 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. 7 140W DC motor K_t parametre grafiği

3.3 Sürtünme Sabitinin Bulunması

Sürtünme sabitinin belirlenmesi için Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Sürtünme momentinin değeri iki farklı metotla bulunmuştur. Metotlardan ilkinde DC motor nominal gerilim değerinde çalıştırılır ve boşta çalışırken güç kaynağından çektiği akım multimetre ile okunur. Sürtünme momenti (M_r), tork katsayısı (K_t) ve DC motorun boşta çalışırken güç kaynağından çekmiş olduğu akım (I_o) değerleri denklem (3.4)'te yerine yazılmasıyla M_r bulunur. Bulunan M_r ve nominal devir sayısı (ω) denklem (3.5)'te kullanılmasıyla sürtünme sabiti (B) elde edilir. [19-20]

$$M_r = K_t * I_o \tag{3.4}$$

$$M_r = B * \omega \tag{3.5}$$

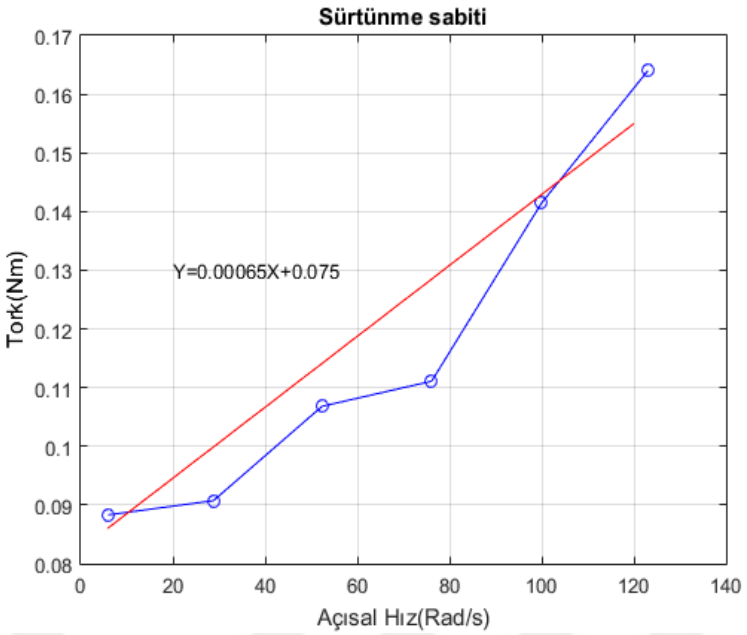
100W DC motorun boşta çektiği akım 0,93 Amper olarak multimetre ile ölçülmüştür. Denklem (3.4) ve denklem (3.5) kullanılmasıyla B= 0,00086 bulunur. 140W DC motorun boşta çektiği akım 1,08 Amper ölçülmüştür. Denklem (3.4) ve denklem (3.5)'in kullanılmasıyla B= 0,00095 bulunur.

İkinci metot ise ölçüm yapılacak DC motor sabit hız ile çalıştırılır. Sabit hız değerinde çalışırken hız değişimi olmadığından denklem (3.6)'dan denklem (3.7)'ye dönüşmüş olur. [18]

$$T(t) = J.\frac{d\omega}{dt} + B.\acute{\emptyset} + T_l \tag{3.6}$$

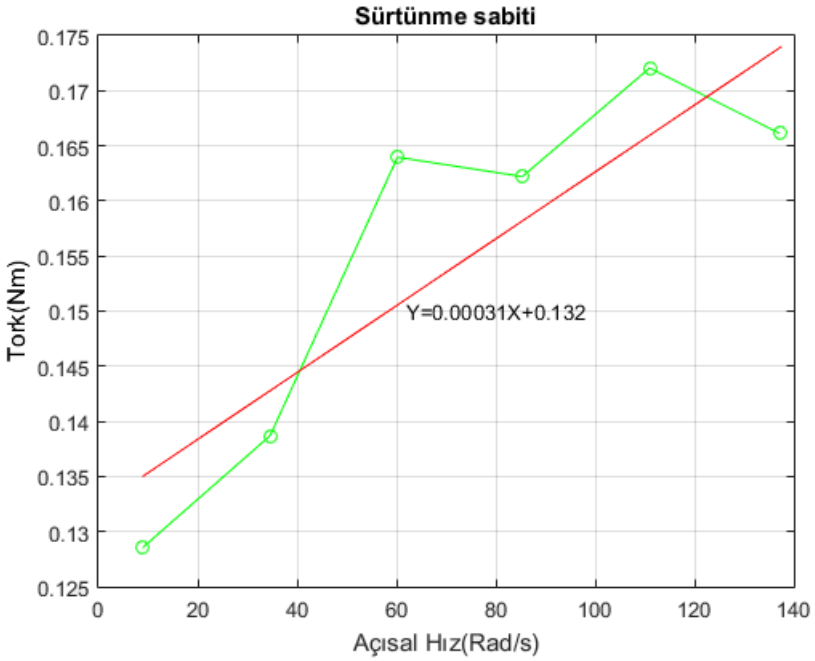
$$T(t) = B.\omega + T_l \tag{3.7}$$

Denklem (3.7)'de belirlenen bir yük momentinde motorun mil torku (T), yük momenti (T_l) açısal hız değerine (ω) bağlı grafik çizimiyle 100W DC motor için Şekil 3.8'deki grafik elde edilir. 100W DC motorun sürtünme sabiti değeri B= 0,00065 olarak elde edilir.



Şekil 3. 8 100W DC motor sürtünme sabiti grafiği

Belirlenen bir yük momentinde motorun mil momenti (T) ve açısal hız değerine (ω) bağlı grafik çizimiyle 140W DC motor için Şekil 3.9'daki grafik elde edilir. 140W DC motorun sürtünme sabiti değeri B=0,00031 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3. 9 140W DC motor sürtünme sabiti grafiği

3.4 Atalet Momentinin Bulunması

Atalet momentinin bulunması için Şekil 3.1'de verilen deney düzeneği kullanılmıştır. Atalet momentinin bulunması için iki ayrı yöntem kullanılabilir. Yöntemlerin ilkinde DC motorun atalet momenti bulunurken denklem (3.8) tork ve ivmenin elde edilmesi için sırasıyla denklem (3.9) ve denklem (3.10) kullanılmıştır. [18]

$$J = \frac{T}{a} \tag{3.8}$$

$$T = K_t * i_{max} \tag{3.9}$$

$$a = \frac{\omega}{t} \tag{3.10}$$

Denklem (3.8) atalet momentinin (J) elde edilmesi için aşamalı olarak denklem (3.9)'daki ivmelenme torkunun (T) bulunması için motorun ilk çalışma anında çekilen çekilen maksimum akımın (i_{max}) bilinmesi gereklidir ve bu değer akım sensörü veya multimetre ile ölçülür. Denklem (3.10)'da ivmelenme ise açısal hız (ω) ve zaman oranının alınması ile bulunur. Denklem (3.8)'de 100W ve 140W DC motorların atalet momenti değerleri sırası ile 0,00005 ve 0,000055 Nm/Rad/s^2 olarak bulunmuştur.

İkinci yöntem ile atalet momenti bilinen ($J_{bilinen}$) bir kasnak ya da motor vasıtasıyla atalet moment değeri bilinmeyen ($J_{bilinmeyen}$) kasnağın ya da DC motorun atalet momenti değeri bulunur. Bu yöntem ile ataleti bilinen DC motorun durma süresi ve atalet değeri bulunmak istenen kasnak denklem (3.11)'de zaman oranı kullanılmasıyla atalet moment oranı elde edilir. Yapılan deney ile kasnaklar takılmadan 140W DC motor nominal volt (V) verilerek nominal hız değerine (ω) ulaştığında durdurulmuş ve durma zamanı ($t_{bilinen}$) olarak elde edilmiştir. 140W DC motora küçük kasnak takılmış ve durma süresi alınmış ve bu süre denklem (3.11)'de (t_{top}) olarak yazılarak atalet momenti bilinmeyen küçük kasnağın atalet moment değeri elde edilmiştir. [21]

$$J_{bilinmeyen} = J_{bilinen} * \left(\frac{t_{top} - t_{bilinen}}{t_{bilinen}}\right) \tag{3.11}$$

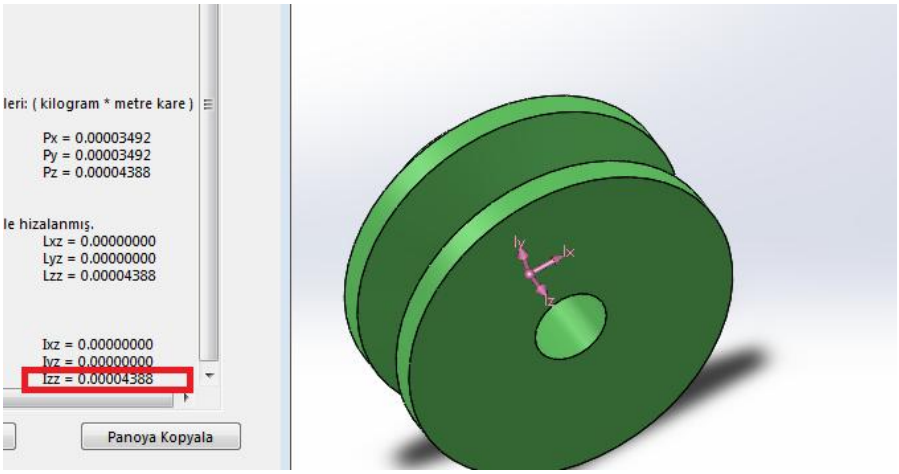
140W DC motorun atalet moment değeri 0,000055 Nm/Rad/s^2 olarak bilinmektedir. 140W DC motorun kasnaklı ve kasnaksız durma süreleri ölçülüp küçük kasnağın atalet değeri elde edilmiştir. Çizelge 3.1'de 140W DC motorun kasnaksız durma süresi ve DC

motora küçük kasnak takıldığında durma süresi verilmiş ve denklem (3.11)'in kullanılmasıyla küçük kasnağın elde edilen atalet momenti değeri verilmiştir. Küçük kasnağın atalet moment değeri Çizelge 3.1'de 0,00003 olduğu görülmüştür. Şekil 3.10'da verilen kasnağın üç boyutlu çizimindeki atalet momenti değeri 0,000044 olduğu görülmüştür.

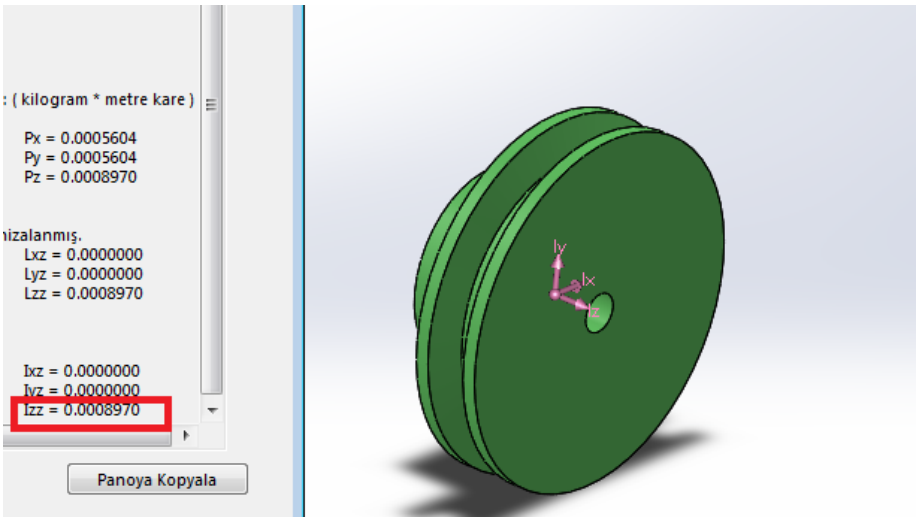
Çizelge 3. 1 Kasnak atalet momentinin belirlenmesi

	DURMA SÜRELERİ (s)	ATALET DEĞERLERİ (Nm/Rad/s^2)
140W DC MOTOR	0,587	0,000055
KÜÇÜK KASNAK	0,903	0,00003

Deneysel olarak bulunan parametre sonuçları, deneyde kullanılacak olan 100W ve 140W DC motorların ve kasnakların atalet moment değerleri ayrı ayrı deneysel çalışmalarla bulunmuştur. Kasnakların atalet moment değerleri küçük kasnak için Şekil 3.10'daki 0,00004 ve büyük kasnak için Şekil 3.11'deki 0,00089 esas alınmıştır. DC motor ve esnek kayışlı DC motor sisteminin hız ve konum kontrolünde, 100W DC motor ve büyük kasnak beraber, 140W DC motor ise küçük kasnak ile beraber kullanılmıştır. Bu değerler yuvarlatılmış değerleri ile yazılmış olup, atalet momenti değerleri DC motor ve üzerindeki kasnak için toplam değeri ile Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3. 10 Küçük kasnağın 3B çizimi



Şekil 3. 11 Büyük kasnağın 3B çizimi

3.5 Yay Sabitinin Bulunması

Esnek kayışlı DC motor sisteminde iki DC motordan biri motor olarak, diğeri yük olarak kullanılmıştır. Esnek kayışlı DC motor sistemi Şekil 5.2'de verilmiştir. Motordan yüke güç aktarımında esnek kayış kullanılmıştır. Yay sabitinin bulunması için denklem (3.12)'de moment (M) ve esnek kayış yer değişimi (θ) oranı ile yay sabiti (K_s) elde edilmiştir. Çizelge 3.2'de verilen moment ve konum denklem (3.12)'de kullanıldığında yay sabiti değeri (K_s)=1,09 olarak bulunur.

$$M = K_s * \theta \tag{3.12}$$

Çizelge 3. 2 Yay sabitinin belirlenmesi

	MOMENT DEĞERİ (M)	KONUM DEĞERİ (θ)
ORTALAMA ÖLÇÜM DEĞERİ	0,702	0,644

Yay sabiti (K_s)'nin bulunması için Şekil 5.2'deki deney sisteminde küçük kasnak sabit tutulup, tork sabiti (K_t)'si bilinen DC motorun akım sensöründen okunan akım değeri ile moment (tork) ve açısal konum değeri ise DC motor miline bağlanan enkoder ile elde edilmiştir.

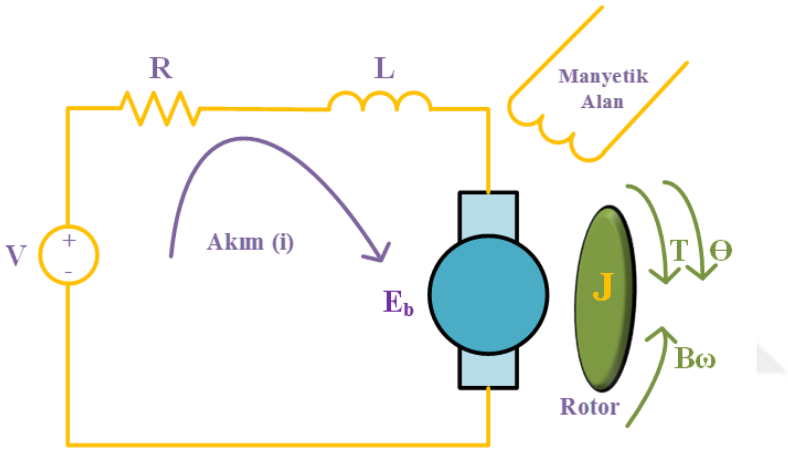
Çizelge 3. 3 DC motorların parametreleri

100W MOTOR	BULUNAN DEĞER	BİRİMİ	140W MOTOR	BULUNAN DEĞER	BİRİMİ
K_b	0,155	V.s/Rad	K_b	0,143	V.s/Rad
K_t	0,137	N.m/A	K_t	0,113	N.m/A
B	0,00095	N.m.s/rad	B	0,00086	N.m.s/rad
R	3,592	Ohm(Ω)	R	3,078	Ohm(Ω)
L	0,1	Henry (H)	L	0,01	Henry (H)
$J_{motor100W}$	0,001	$Kg.m^2$	$J_{motor140W}$	0,0001	$Kg.m^2$
K_s	1,09	Nm/rad			

Not: Endüktans (L) değerleri ölçüm yapılmadan kabul değerleri kullanılmıştır.

BÖLÜM 4

DC MOTOR MODELLEME VE KONTROL ÇALIŞMALARI



Şekil 4. 1 DC motor fiziksel gösterimi

DC motorun modellenmesi için kullanılan fiziksel gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir. Denklem (4.1) ve denklem (4.15) arasındaki denklemlerde değişkenler zıt EMK sabiti (K_b), direnç (R), tork sabiti (K_t), sürtünme sabiti (B), atalet momenti (J), açısal hız (ω), açısal konum (θ), tork (T), zıt EMK voltajı (E_b), akım (i), volt (V), ve endüktans (L) olarak ifade edilmiştir.

Kirchoff Voltaj Kuralından (KVK):

$$V = i * R + L * \frac{di}{dt} + E_b \tag{4.1}$$

Elektromotor voltaj denklemi:

$$E_b = K_b * \frac{d\theta}{dt} = K_b * \omega \quad (4.2)$$

Tork akım katsayı denklemi:

$$T = K_t * i \quad (4.3)$$

Tork denklemi:

$$T = J * \frac{d^2\theta}{dt^2} + B * \frac{d\theta}{dt} = J * \dot{\omega} + B * \omega \quad (4.4)$$

Denklemler giriş voltaj çıkış açısal hız olmak üzere Laplace dönüşümleriyle yazıldığında,

$$V(s) = i(s) * (L * s + R) + E_b(s) \quad (4.5)$$

$$E_b = K_b * \omega(s) \quad (4.6)$$

$$T = K_t * i(s) \quad (4.7)$$

$$T = (J * s + B) * \omega(s) \quad (4.8)$$

Denklem (4.7)'nin denklem (4.8) ile eşitlenmesiyle,

$$T = K_t * i(s) = (J * s + B) * \omega(s) \quad (4.9)$$

Akımın denklemden çekilmesiyle,

$$i(s) = \frac{(J*s+B)*\omega(s)}{K_t} \quad (4.10)$$

Denklem (4.5)'de denklem (4.10)'un yazılmasıyla,

$$V(s) = \frac{(J*s+B)*\omega(s)}{K_t} * (L * s + R) + E_b(s) \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'de istenen ifadeler olan volt (V) ve açısal hız (ω) denklemden çekilmesiyle, DC motorun açısal hıza bağlı transfer fonksiyonu denklem (4.12) ve açısal konuma bağlı transfer fonksiyonu denklem (4.13) olarak elde edilir.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(L*s+R)*(J*s+B)+K_t*K_b} \quad (4.12)$$

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{s*((L*s+R)*(J*s+B)+K_t*K_b)} \quad (4.13)$$

DC motorun diferansiyel denklemlerine bağlı olarak durum uzay denklemleri açısal hız ve konum sırasıyla (4.15) ve (4.16)'de verilmiştir.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \tag{4.14}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\omega \\ i\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-\frac{B}{J} & \frac{Kt}{J} \\ -\frac{Kb}{L} & -\frac{R}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\omega \\ i\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 \\ 1/L\end{bmatrix}V \qquad Y = [1 \quad 0]\begin{bmatrix}\omega \\ i\end{bmatrix} \tag{4.15}$$

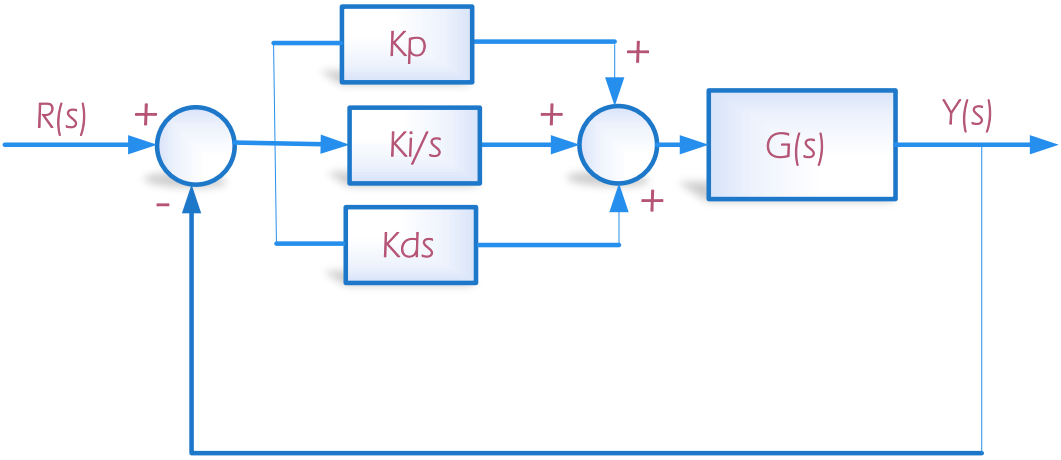
$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\theta \\ \omega \\ i\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & \frac{Kt}{J} \\ 0 & -\frac{Kb}{L} & -\frac{R}{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta \\ \omega \\ i\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 \\ 0 \\ 1/L\end{bmatrix}V \qquad Y = [1 \quad 0 \quad 0]\begin{bmatrix}\theta \\ \omega \\ i\end{bmatrix} \tag{4.16}$$

4.1 DC Motorun Hız PID VE IPD Katsayılarının Bulunması

Yaygın bir kontrolcü olarak kullanılan PID ile DC motorun kontrolü için gereken K_p, K_i, K_d katsayıları öncelikle manabe formu uygulanarak bulunur. Bulunan katsayılar Matlab simulink programı ile Şekil 5.2'de verilen deney düzeneğindeki 100W DC motor simülasyonunda ve DC motorun gerçek zamanlı açısal hız kontrol çalışmalarında kullanılmıştır.

4.1.1 DC Motorun Açısal Hız PID Katsayılarının Bulunması

Şekil 4.2'de PID kontrol tasarımında kullanılan kapalı çevrim yapı gösterilmiştir. Referans giriş R(s), kontrol edilecek sistem G(s), sistem çıkışı Y(s), oransal kontrol katsayısı (K_p), integral kontrol katsayısı (K_i) ve türev kontrol katsayısı (K_d) ile belirtilmiştir.



Şekil 4.2 PID kontrol yapısı

PID kontrol yapısında G(s) yerine DC motorun açısal hız transfer fonksiyonunun yazılması ile PID kontrol düzeni oluşur. Denklem (4.12)'nin PID katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (4.17) ve karakter polinomu denklem (4.18) olarak elde edilir.

$$TF = \frac{K_t*(Kd*s^2+Kp*s+Ki)}{(K_i*K_t+B*R*s+K_b*K_t*s+K_p*K_t*s+B*L*s^2+J*L*s^3+K_d*K_t*s^2+J*R*s^2)} \quad (4.17)$$

$$KP = J*L*s^3 + (B*L+K_d*K_t+J*R)*s^2 + (B*R+K_b*K_t+K_p*K_t)*s + K_i*K_t \quad (4.18)$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti (τ) ve indisler (γ_1, γ_2) sırasıyla denklem (4.19), denklem (4.20), denklem (4.21)'de verilmiştir.

$$\tau = \frac{(B*R+K_b*K_t+K_p*K_t)}{K_i*K_t} \; ; \qquad \tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (4.19)$$

$$\gamma_1 = \frac{(B*R+K_b*K_t+K_p*K_t)^2}{K_i*K_t} \; ; \qquad \gamma_1 = \frac{{a_1}^2}{a_2*a_0} \quad (4.20)$$

$$\gamma_2 = \frac{(B*L+K_d*K_t+J*R)^2}{(J*L)*(B*R+K_b*K_t+K_p*K_t)} \; ; \qquad \gamma_2 = \frac{{a_2}^2}{a_3*a_1} \quad (4.21)$$

Denklem (4.19), denklem (4.20) ve denklem (4.21)'in τ , γ_1 , γ_2 ortak çözümü ile elde edilen K_p, K_i ve K_d denklemleri sırasıyla denklem (4.22), denklem (4.23) ve denklem (4.24)'de verilmiştir.

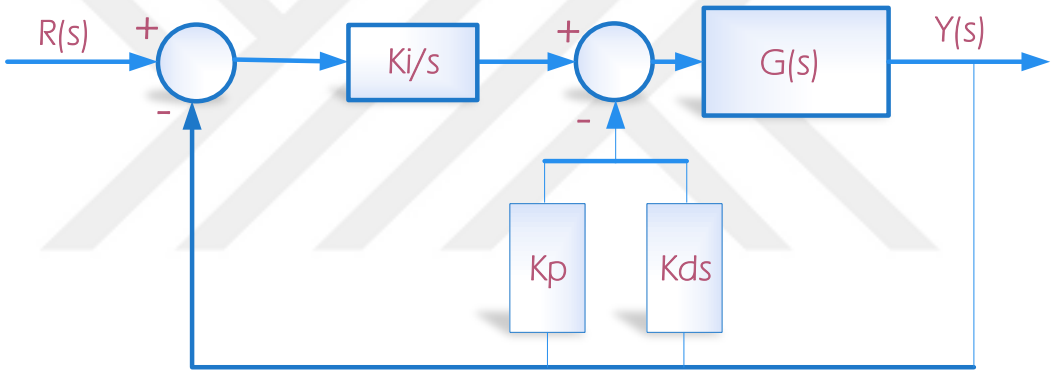
$$K_p = (J * L * \gamma_1^2 * \gamma_2^2 - K_b * K_t * \tau^2)/(K_t * \tau^2) \quad (4.22)$$

$$K_i = (J * L * \gamma_1^2 * \gamma_2)/(K_t * \tau^3) \quad (4.23)$$

$$K_d = (J * L * \gamma_1 * \gamma_2 - J * R * \tau)/(K_t * \tau) \quad (4.24)$$

4.1.2 DC Motorun Açısal Hız IPD Katsayılarının Bulunması

PID kontrolörler günümüzde kontrol uygulamalarında çok sık olarak kullanılmaktadır. PID Kontrolör yapılarında yapılan değişiklikler ile farklı kontrolcü (kontrolör) tasarımları yapılmıştır. Bu yapılardan birisi olan IPD kontrolör kapalı çevrim blok şeması Şekil 4.3'te verilmiştir. Referans giriş R(s), kontrol edilecek sistem G(s), sistem çıkışı Y(s), oransal kontrol katsayısı(K_p), integral kontrol katsayısı (K_i) ve türev kontrol katsayısı (K_d) ile belirtilmiştir.



Şekil 4. 3 IPD kontrol yapısı

IPD kontrol yapısında G(s) yerine DC motorun açısal hız transfer fonksiyonunun yazılması ile IPD kontrol düzeni oluşur. Denklem (4.12)'nin IPD katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (4.25) ve karakter polinomu denklem (4.26) olarak elde edilir.

$$TF = \frac{K_t * Ki}{\left(K_i * K_t + B * R * s + K_b * K_t * s + K_p * K_t * s + B * L * s^2 + J * L * s^3 + K_d * K_t * s^2 + J * R * s^2\right)} \quad (4.25)$$

$$KP = J * L * s^3 + (B * L + K_d * K_t + J * R) * s^2 + \left(B * R + K_b * K_t + K_p * K_t\right) * s + K_i * K_t \quad (4.26)$$

Elde edilen karakter PID ve IPD karakter polinomlarının aynı olduğu denklem (4.18) ve denklem (4.26)'da görülmektedir. Bu sebeple elde edilecek olan PID katsayıları IPD ile aynı olmaktadır.

4.1.3 DC Motorun Açısal Konum IPD Katsayılarının Bulunması

PID kontrolör karakter polinomu katsayıların aynı olması nedeniyle PID ya da IPD kapalı çevrim kontrolör katsayılarının belirlenmesinde PID kontrolör için tasarım yapılmıştır. Bulunan PID kontrolör katsayıları IPD kontrolöre de uygulanarak DC motorun açısal konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. DC motorun açısal konum transfer fonksiyonu denklem (4.13)'ün ve Şekil 4.2'de verilen PID kontrolör yapısının kullanılmasıyla kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (4.27) ve karakter polinomu denklem (4.28) elde edilir.

$$TF = \frac{K_t*(Kd*s^2+Kp*s+Ki)}{(K_i*K_t+B*R*s^2+K_b*K_t*s+K_b*K_t*s^2+K_p*K_t*s+B*L*s^3+J*L*s^4+K_d*K_t*s^2+J*R*s^3)} \quad (4.27)$$

$$KP = J*L*s^4 + (B*L+J*R)*s^3 + (B*R+K_b*K_t+K_d*K_t)*s^2 + (K_p*K_t)*s + K_i*K_t \quad (4.28)$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti (τ) ve indisler (γ_1, γ_2) sırasıyla denklem (4.29), denklem (4.30), denklem (4.31)'te verilmiştir.

$$\tau = \frac{(K_p*K_t)}{K_i*K_t} \; ; \qquad \tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (4.29)$$

$$\gamma_1 = \frac{(K_p*K_t)^2}{(B*R+K_b*K_t+K_d*K_t)*(K_i*K_t)} ; \qquad \gamma_1 = \frac{{a_1}^2}{a_2*a_0} \quad (4.30)$$

$$\gamma_2 = \frac{(B*R+K_b*K_t+K_d*K_t)^2}{(B*L+J*R)*(K_p*K_t)} \; ; \qquad \gamma_2 = \frac{{a_2}^2}{a_3*a_1} \quad (4.31)$$

Denklem (4.29), denklem (4.30) ve denklem (4.31)'un τ , γ_1 , γ2 ortak çözümü ile elde edilen K_p, K_i ve K_d denklemleri sırasıyla denklem (4.32), denklem (4.33) ve denklem (4.34)'de verilmiştir.

$$\mathrm{K_p} = (\mathrm{B}*\mathrm{L}*\gamma_1^2*\gamma_2 + \mathrm{J}*\mathrm{R}*\gamma_1^2*\gamma_2)/(K_t*\tau^2) \quad (4.32)$$

$$\mathrm{K_i} = (\mathrm{B}*\mathrm{L}*\gamma_1^2*\gamma_2 + \mathrm{J}*\mathrm{R}*\gamma_1^2*\gamma_2)/(K_t*\tau^3) \quad (4.33)$$

$$\mathrm{K_d} = (\mathrm{B}*\mathrm{L}*\gamma_1^2*\gamma_2 + \mathrm{J}*\mathrm{R}*\gamma_1^2*\gamma_2 - \mathrm{B}*\mathrm{R}*\tau*\gamma_2 - K_b*K_t*\tau*\gamma_2)/(K_t*\tau*\gamma_1) \quad (4.34)$$

Çizelge 4. 1 100W DC motor değerleri

100W MOTOR	DEĞER
K_b	0,155
K_t	0,137
B	0,00095
R	3,592
L	0,1
J_{motor}	0,001

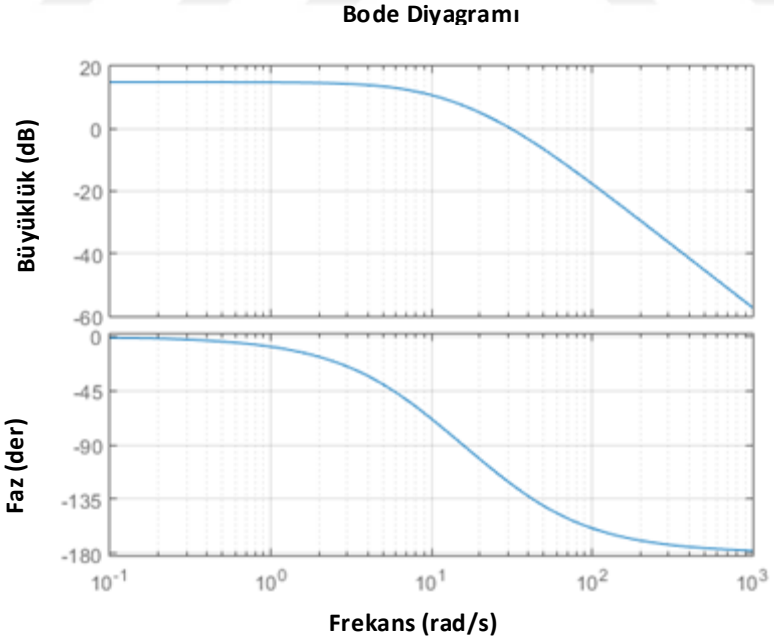
Çizelge 4.1'deki 100W DC motorun parametre değerleri PID K_p, K_i ve K_d katsayıları denklem (4.22), denklem (4.23) ve denklem (4.24)'te yazıldığında, DC motorun açısal hız IPD ve PID katsayıları $\tau = 0{,}15, \gamma_1 = 2{,}6, \gamma_1 = 2$ alınması sonucunda K_p=0,284; K_i = 2,92; K_d =-0,0009 elde edilir.

Konum PID K_p, K_i ve K_d katsayıları denklem (4.32), denklem (4.33) ve denklem (4.34)'te yazıldığında $\tau = 0{,}3, \gamma_1 = 2{,}5, \gamma_1 = 2$ alınması ile K_p =3,74; K_i = 12,46; K_d =0,27 elde edilir. Katsayı Diyagram Metodu (KDM) ile hesaplanan PID kontrolcü katsayıları, Matlab simulink programında gerçekleştirilen 100W DC motor simülasyon ve deneysel kontrol çalışma sonuçları Çizelge 4.2'te verilmiştir.

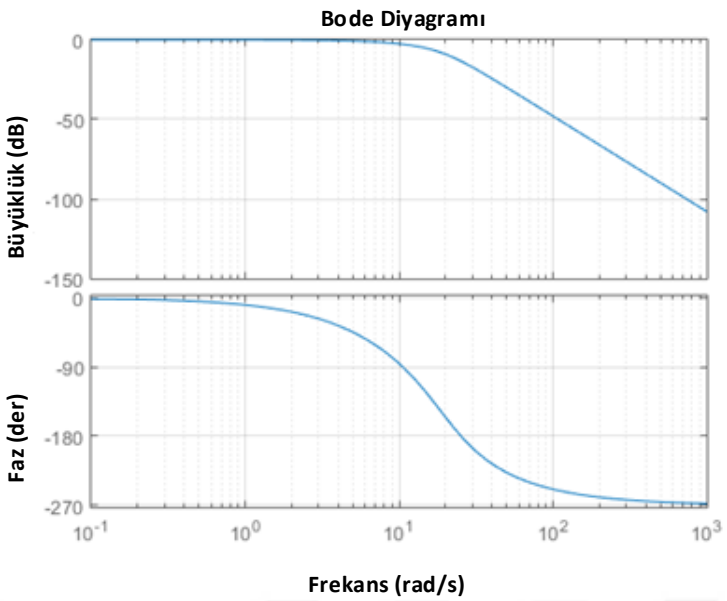
Çizelge 4. 2 DC motorun PID hız ve konum kontrol katsayıları

HIZ	K_P	K_i	K_d
HESAPLANAN	0,284	2,92	-0,0009
SİMÜLASYON	0,284	2,92	-0,0009
GERÇEK ZAMANLI	0,35	2	-0,0009
KONUM	K_P	K_i	K_d
HESAPLANAN	3,74	12,46	0,27
SİMÜLASYON	3,74	12,46	0,27
GERÇEK ZAMANLI	3,70	9,60	0,40

100W DC motorun açısal hız transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.4'te ve açısal hız IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.5'te verilmiştir.

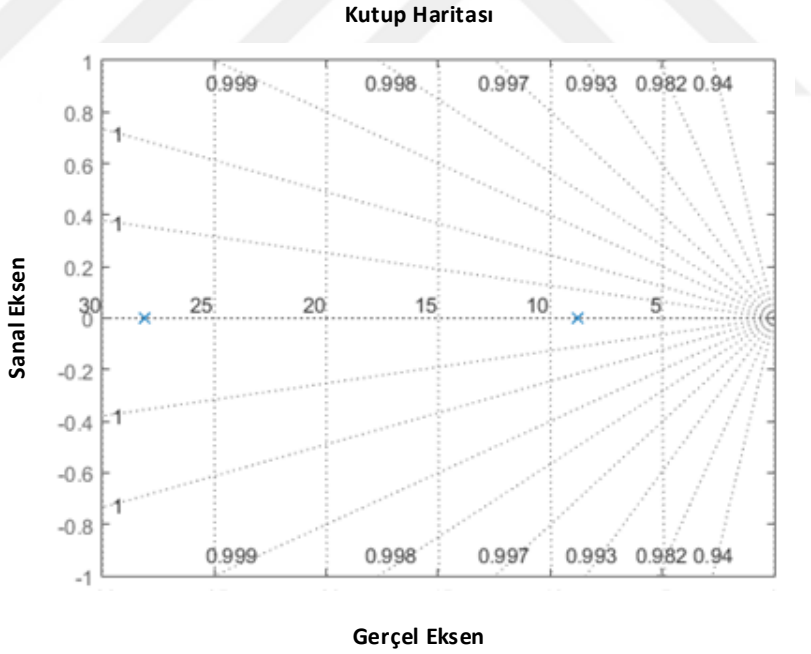


Şekil 4. 4 Açısal hız transfer fonksiyon bode diyagramı

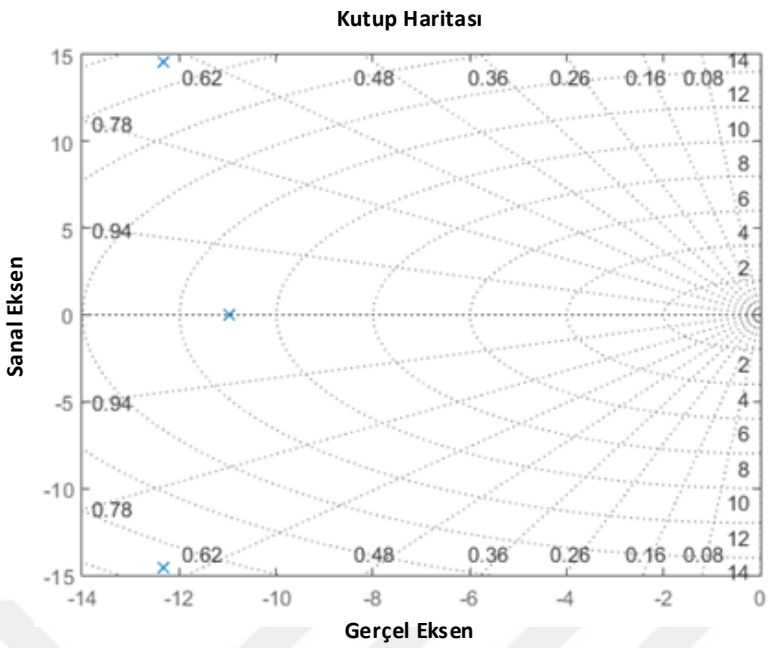


Şekil 4. 5 Açısal hız transfer fonksiyon IPD bode diyagramı

100W DC motorun açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.6'da ve açısal hız IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.7'de verilmiştir.

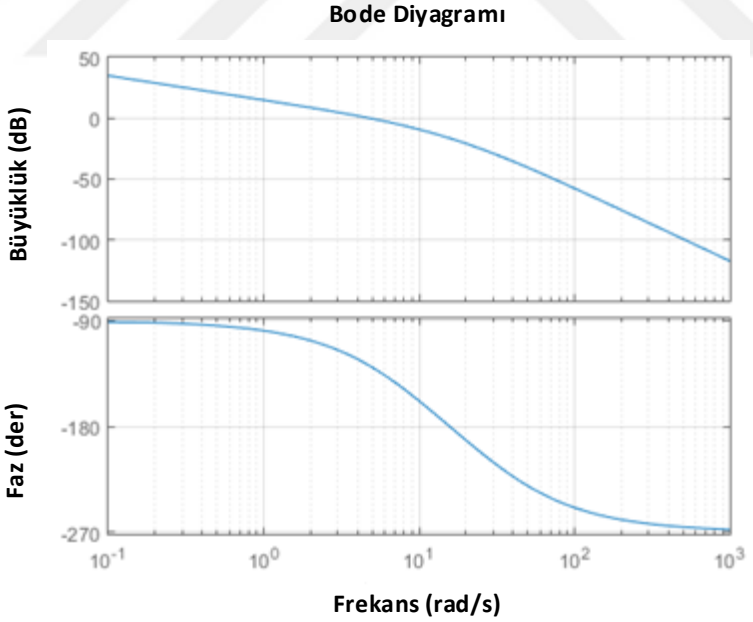


Şekil 4. 6 Açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası

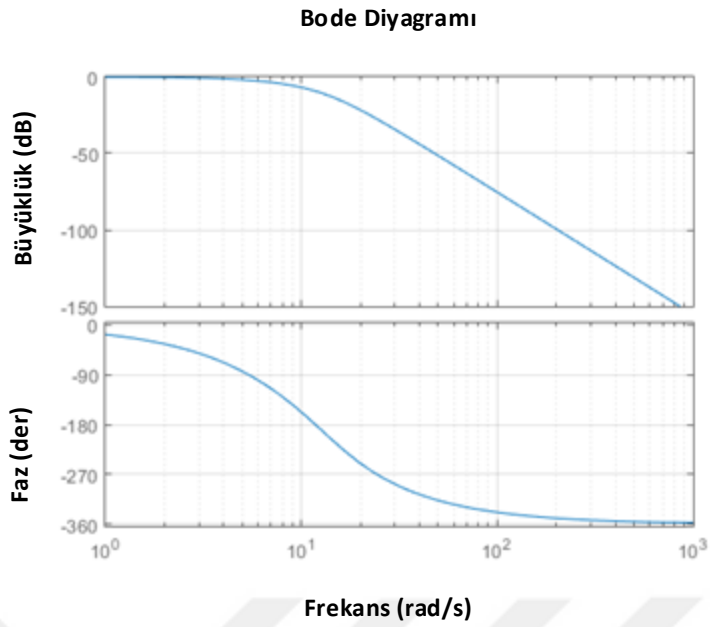


Şekil 4. 7 Açısal hız transfer fonksiyon IPD kutup haritası

100W DC motorun açısal konum transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.8'de ve açısal konum IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 4.9'da verilmiştir.

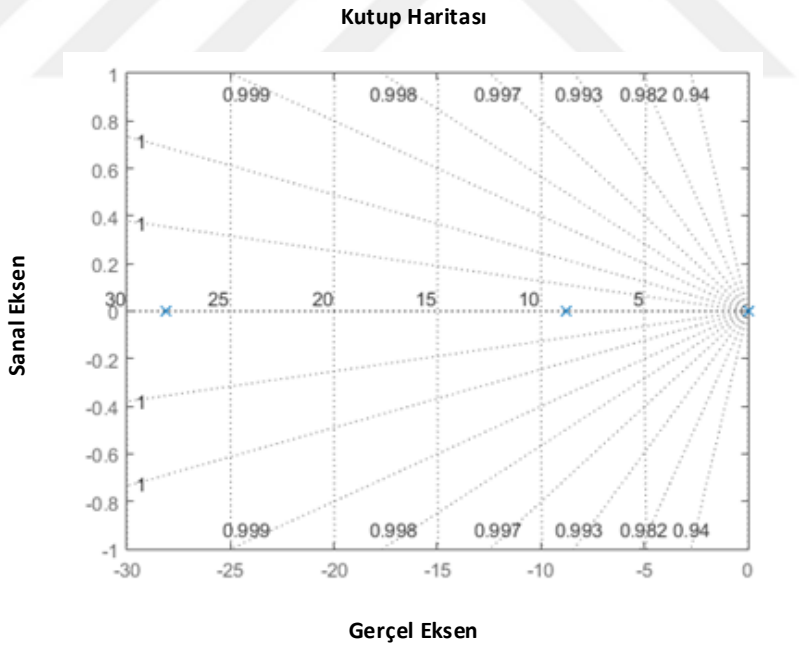


Şekil 4. 8 Konum transfer fonksiyon bode diyagramı

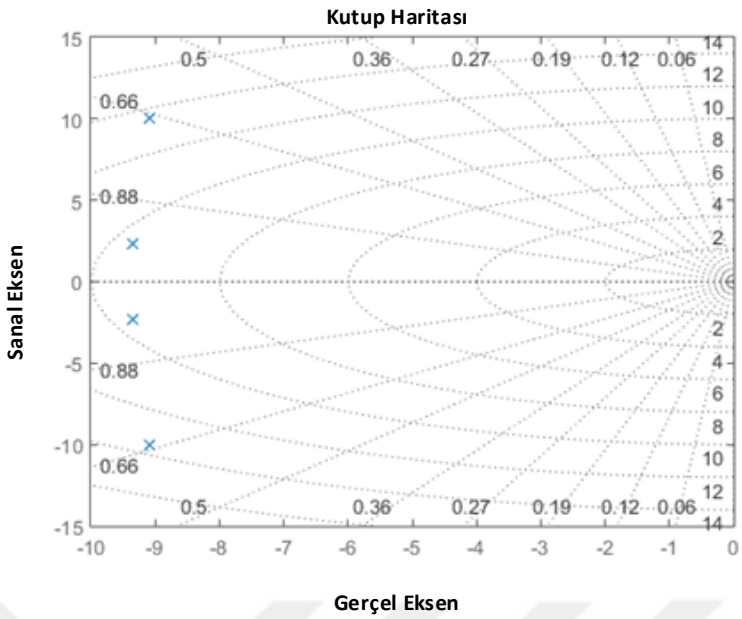


Şekil 4. 9 Konum transfer fonksiyon IPD bode diyagramı

100W DC motorun açısal konum transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.10'da ve açısal konum IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 4.11'de verilmiştir.

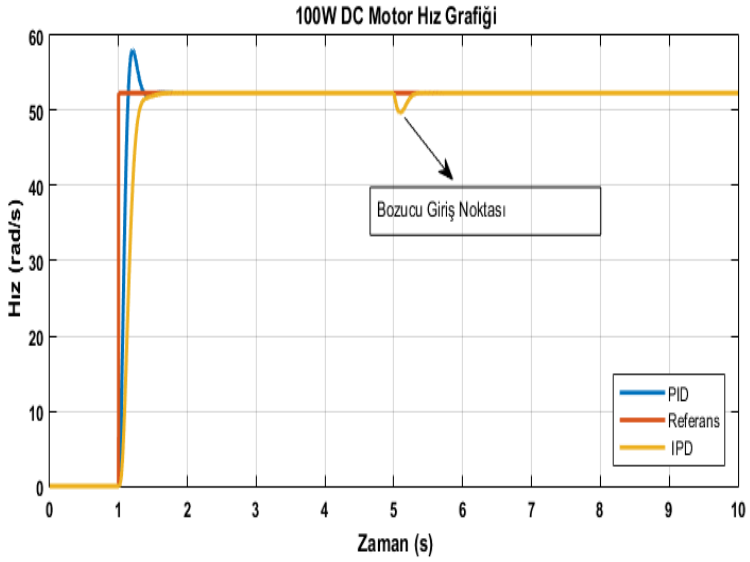


Şekil 4. 10 Konum transfer fonksiyon kutup haritası



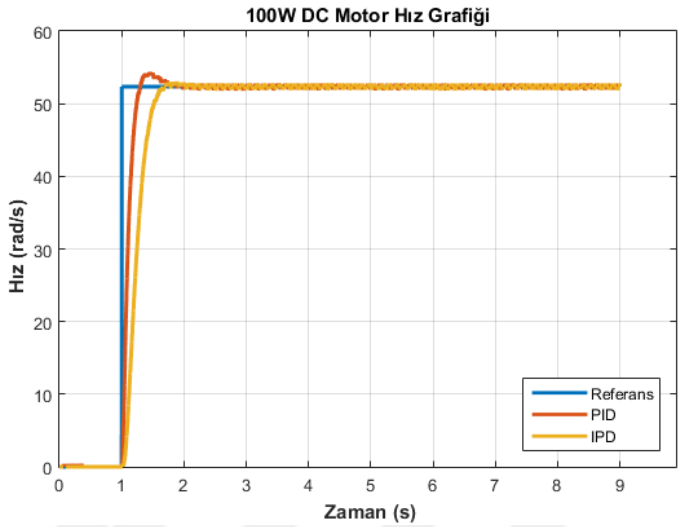
Şekil 4. 11 Konum transfer fonksiyon IPD kutup haritası

100W DC motorun açısal hız kontrolünde PID ve IPD kontrolör simülasyon grafiği Şekil 4.12'te verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



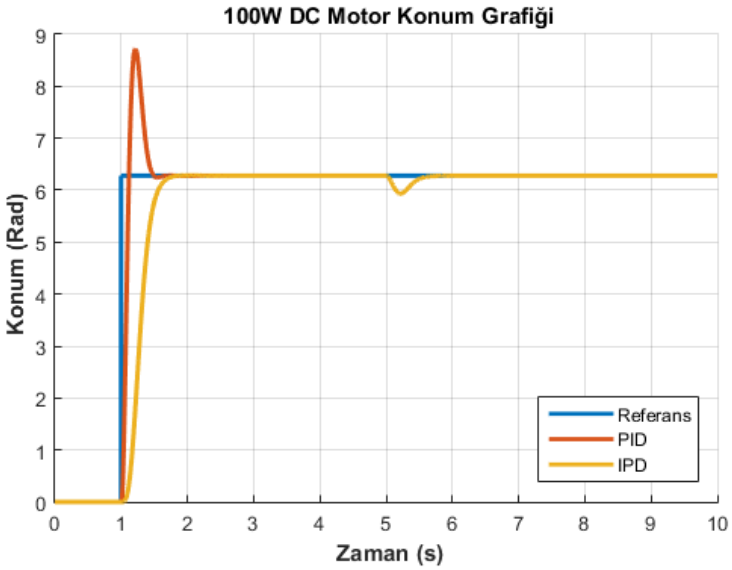
Şekil 4. 12 100W DC motor açısal hız simülasyon grafiği

100W DC motorun açısal hız kontrolünde PID ve IPD kontrolör deney grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir. IPD kontrolörün PID kontrolöre göre performansının daha iyi olduğu görülmektedir.



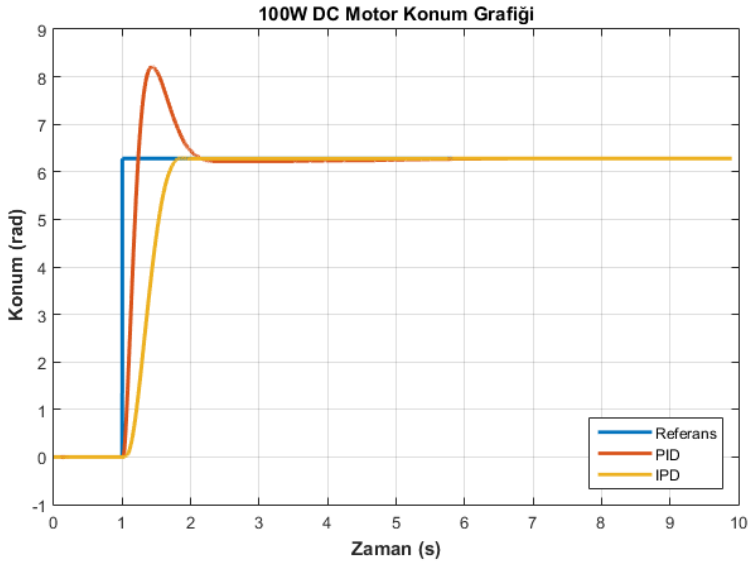
Şekil 4. 13 100W DC motor açısal hız deney grafiği

100W DC motorun açısal konum kontrolünde PID ve IPD kontrolör simülasyon grafiği Şekil 4.14'te verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



Şekil 4. 14 100W DC motor açısal konum simülasyon grafiği

100W DC motorun açısal konum kontrolünde PID ve IPD kontrolör deney grafiği Şekil 4.15'de verilmiştir. IPD kontrolörün PID kontrolöre göre performansının daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 15 100W DC motor açısal konum deney grafiği

BÖLÜM 5

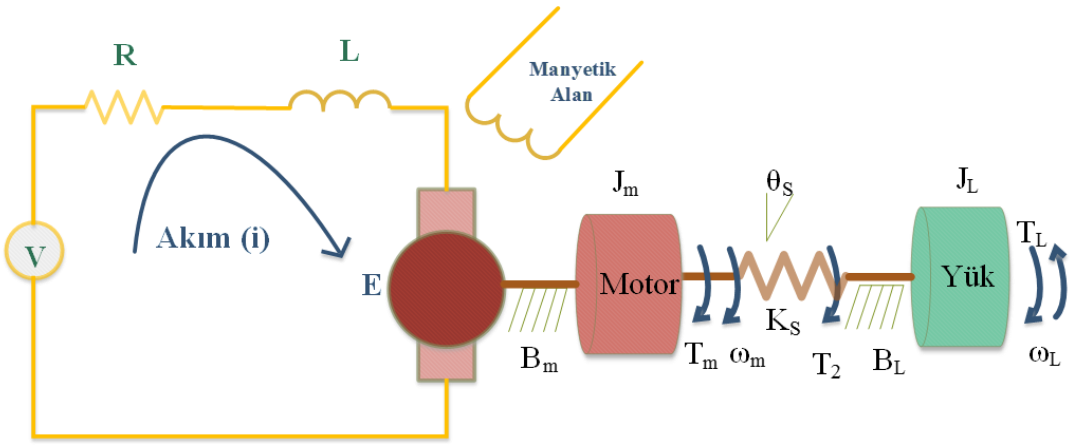
ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ VE IPD İLE KONTROL ÇALIŞMALARI

5.1 Deney Sistemi

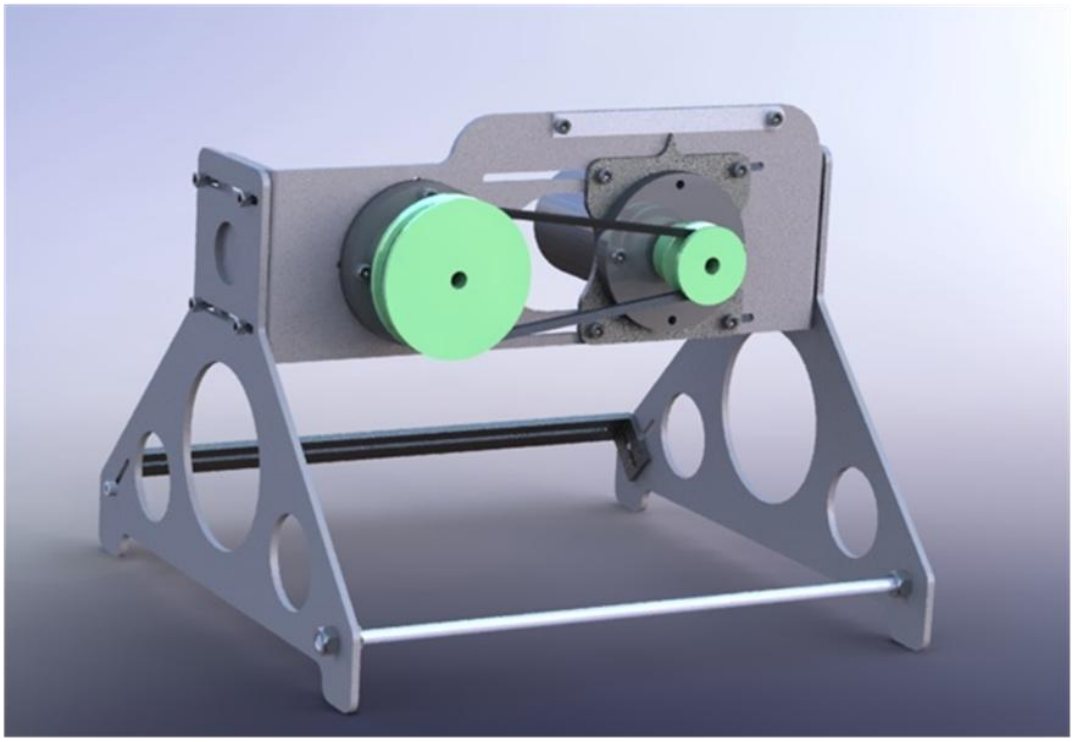
Fiziksel sistemleri dinamik olarak ifade eden denklemlere matematiksel model denir. Sistemin kontrolü için kullanılacak temel esasları bu denklemler oluşturur. Denklemlerde kullanılan değişkenler ile istenen özelliklerin kontrolü sağlanır. Esnek kayışlı DC motor sistemi fiziksel olarak DC motor, esnek kayış ve kasnak mekanizmalarının birleşiminden oluşur. Deney sisteminin açısal konum/volt ve açısal hız/volt transfer fonksiyonları kullanılarak açısal hız ve konum kontrolü hedeflenmiştir.

Esnek kayışlı DC motor sisteminde kullanılan 100W DC motor ve büyük kasnak atalet momenti (J_L), 140W DC motor ve küçük kasnak atalet momenti (J_m), direnç (R), tork katsayısı (K_t), zıt EMK katsayısı (K_b), motor sürtünme katsayısı (B_m), yük sürtünme katsayısı (B_L), motor torku (T_m), yük torku (T_L), esnek kayış torku (T_2), esnek kayışın yay sabiti (K_s), motor açısal hızı (ω_m), yük açısal hızı (ω_L), yay yer değişimi (θ_s), endüktans (L), volt (V), akım (i) olarak Şekil 5.1'de belirtilmiştir. Deneyler yapılarak elde edilen DC motor ve esnek kayış parametreleri Bölüm 3'te Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Esnek kayışlı DC motor sistemi sıfırdan başlanarak aşamalı olarak Şekil 5.2'deki tasarım yapılarak deney sistemi temel olarak oluşturulmuştur. Bu düzenekte biri 100W diğeri 140W iki DC motor ve çapları oranı 2,48 olan iki kasnak ve aktarma elemanı olarak esnek kayış kullanımıyla robot kol düzeneğine yakın bir benzetim yapılmıştır.



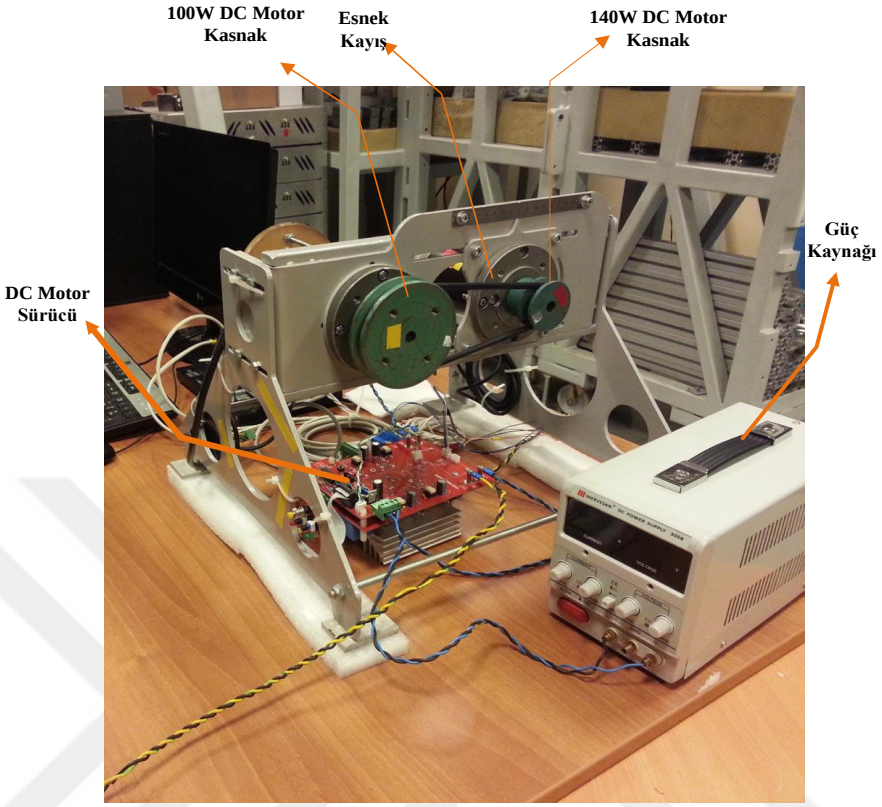
Şekil 5. 1 Esnek kayışlı DC motor sisteminin fiziksel gösterimi



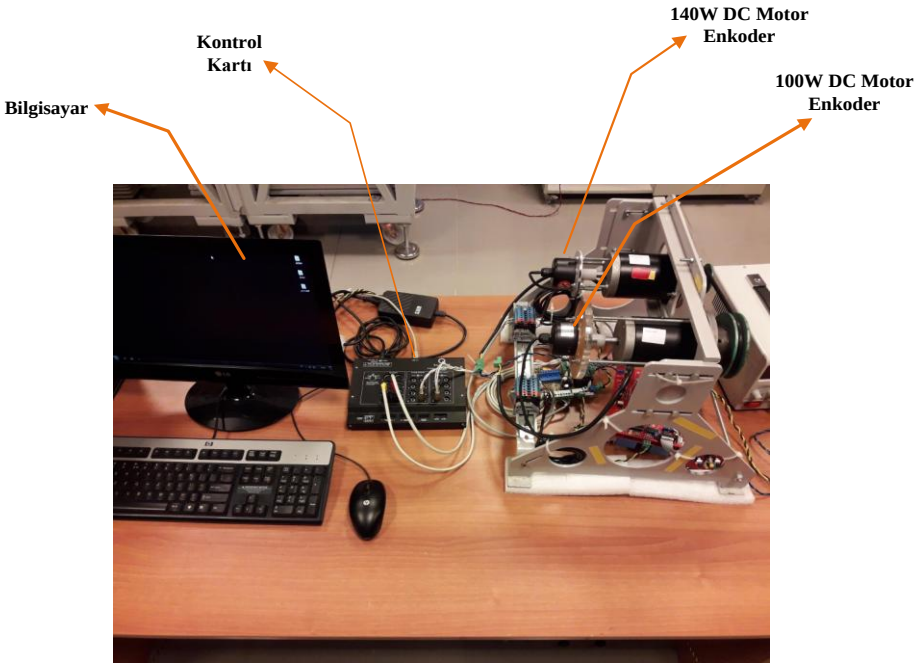
Şekil 5. 2 Esnek kayışlı DC motor sisteminin 3B gösterimi

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 verilmiş esnek kayışlı DC motor sisteminde 100W ve 140W iki kasnaklı DC motor, bir esnek kayış, bir derece hassasiyete sahip artımlı iki enkoder, 5V analog çıkışlı kontrol kartı, H-köprü DC motor sürücü devresi, bir bilgisayardan oluşmaktadır. Sistemde 140W kasnaklı DC motor, 100W kasnaklı DC motor ise yük olarak kullanılmıştır. Motordan yüke kinetik enerji aktarımı esnek kayış kullanılarak sağlanmıştır. Sistemdeki 140W DC motorun kontrolü için H-Köprü motor sürücü

devresi kullanılmıştır. Kontrol kartının vereceği analog çıkış kalibre edilerek deney sisteminde kullanılan aralığa uygun olarak ayarlanmıştır.

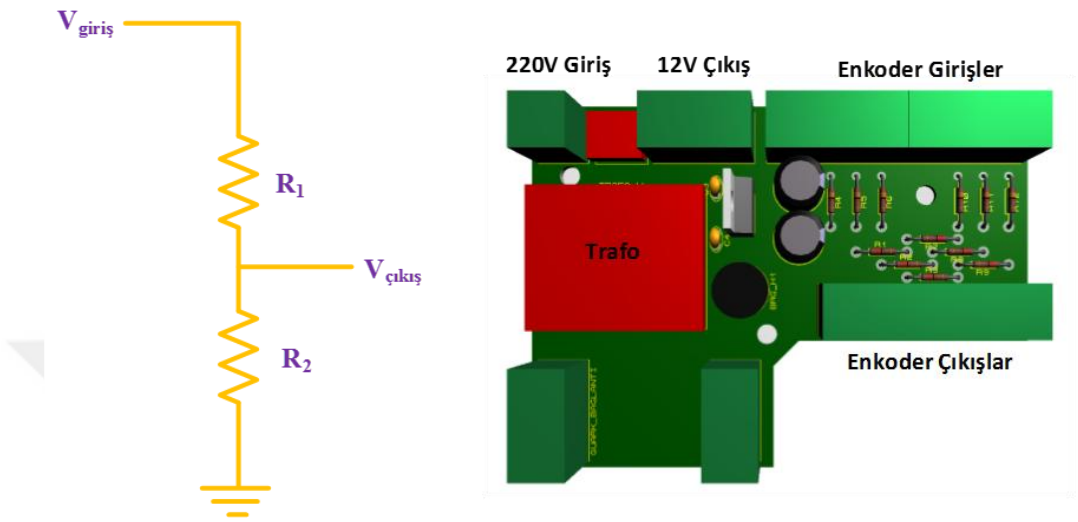


Şekil 5. 3 Deney sisteminin ön görünümü



Şekil 5. 4 Deney sisteminin arka görünümü

Sistemdeki enkoderlerin 12V gerilim ve kontrol kartının 5V gerilim aralığında çalışması nedeniyle Şekil 5.5'te verilen voltaj bölücü baskı devre kartı (BDK) ile enkoderlerin A-B-Z çıkışları 5V kontrol kartıyla uyumlu hale getirilmiştir. Ayrıca enkoderlerin besleme gerilimi, 220V trafo ile 12V gerilime dönüştürülerek sağlanmıştır.



Şekil 5. 5 Voltaj bölücü ve baskı devre kartı

5.2 Matematiksel Denklemlerin Elde Edilmesi

DC motor transfer fonksiyonu:

$$\frac{\theta_m(s)}{v(s)} = \frac{k_t}{s((j_m s+B_m)*(Ls+R)+k_t\, k_b)} \tag{5.1}$$

İki kasnak için tork denklemleri yazıldığında ,

$$T = k_s\theta_m - k_s * \theta_L \tag{5.2}$$

İkinci kasnak için tork denklemleri yazıldığında,

$$T = J_L\ * \frac{d_2\,\theta_L}{dt^2} + B_L\ * \frac{d\,\theta_L}{dt} \tag{5.3}$$

Denklem(5.2) ve denklem (5.3) birbirine eşitlendiğinde,

$$k_s\theta_m - k_s * \theta_L = J_L\ \frac{d_2\,\theta_L}{dt^2} + B_2\ \frac{d\,\theta_L}{dt} \tag{5.4}$$

$$k_s\theta_m = J_L\ \frac{d_2\,\theta_L}{dt^2} + B_2\ \frac{d\,\theta_L}{dt} + k_s * \theta_L \tag{5.5}$$

$$k_s\theta_m(s) = J_L\ \theta_L(s)s^2 + B_L\ \theta_L(s)s + k_s * \theta_L(s) \tag{5.6}$$

Denklem (5.6)'dan birinci kasnağın konum denklemi:

$$\theta_m(s) = \frac{J_L\ \theta_L(s)s^2+B_L\ \theta_L(s)s+k_s*\theta_L(s)}{k_s} \tag{5.7}$$

Denklem (5.7)'de $\theta_m(s)$ yerine denklem (5.1)'de yazılırsa,

$$\frac{\theta_L(s)(J_L\ s^2+B_L\ s+k_s)}{v(s)*k_s} = \frac{k_t}{s((j_m s+B_m)*(Ls+R)+k_t\ k_b)} \tag{5.8}$$

Sistemin konum ve volt olarak transfer fonksiyonu:

$$\frac{\theta_L(s)}{v(s)} = \frac{k_t*k_s}{s\big((j_m s+B_m)*(Ls+R)+k_t*\ k_b\big)*(J_L\ s^2+B_L\ s+k_s)} \tag{5.9}$$

Sistemin açısal hız ve volt olarak transfer fonksiyonu:

$$\frac{\omega_L(s)}{v(s)} = \frac{k_t*k_s}{\big((j_m s+B_m)*(Ls+R)+k_t*\ k_b\big)*(J_L\ s^2+B_L\ s+k_s)} \tag{5.10}$$

Ayrıca deney sistemin hız olarak durum uzay denklemi 5.11'deki gibidir.

$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_M$; $\frac{d\theta_L}{dt} = \omega_L$;

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} & 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{K_s}{J_m} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{K_s}{J_L} & -\frac{B_L}{J_L} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/J_L \end{bmatrix} T_L$$

$$Y = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]\begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \omega_L \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

Deney sistemin konum olarak durum uzay denklemi 5.12'deki gibidir.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \theta_L \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{K_b}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J_m} & 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{K_s}{J_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_s}{J_L} & 0 & -\frac{B_L}{J_L} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \theta_L \\ \omega_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/Jl \end{bmatrix} T_L$$

$$Y = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} i \\ \theta_m \\ \omega_m \\ \theta_s \\ \theta_L \\ \omega_L \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

5.3 Sistemde IPD Hız Kontrolü

IPD kontrolör ile PID'nin 100W DC motorun hız ve konum kontrolünde vermiş olduğu yanıtlarda IPD'nin daha iyi bir performansa sahip olması ve aşımsız kontrolü sağlaması nedeniyle deney sisteminin açısal hız ve açısal konum kontrolü için kullanılmıştır. Katsayı Diyagram Metodunun deney sisteminin açısal hız ve konum kontrolünde Matlab simulink ortamında simülasyonları hem uygulamalı deney çalışmaları yapılmıştır. Denklem (5.13)'ün IPD katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (5.14) ve karakter polinomu denklem (5.15) olarak elde edilir.

$$\frac{\omega_L(s)}{v(s)} = \frac{k_t * k_s}{(j_m s + B_m) * (Ls + R) + k_t * k_b) * (J_L s^2 + B_2 s + k_s)} \tag{5.13}$$

$$TF = \frac{K_i K_s K_t}{K_i K_s K_t + J_m J_L L s^5 + K_b K_s K_t s + J_m J_L R s^4 + J_m L K_s s^3 + J_m R K_s s^2 + J_L K_b K_t s^3 + K_d K_s K_t s^2 + K_p K_s K_t s} \tag{5.14}$$

$$KP = J_m J_L L s^5 + + J_m J_L R s^4 + (J_m L K_s + J_L K_b K_t)\, s^3 + (J_m R K_s + K_d K_s K_t) s^2 + (K_p K_s K_t + K_b K_s K_t) s + K_i K_s K_t \tag{5.15}$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti (τ) ve indisler (γ_1, γ_2) sırasıyla denklem (5.16), denklem (5.17), denklem (5.18)'de verilmiştir.

$$\tau = \frac{(K_p K_s K_t + K_b K_s K_t)}{K_i K_s K_t}; \qquad \tau = \frac{a_1}{a_0} \tag{5.16}$$

$$\gamma_1 = \frac{(K_p K_s K_t + K_b K_s K_t)^2}{(J_m R K_s + K_d K_s K_t) * (K_i K_s K_t)}; \qquad \gamma_1 = \frac{{a_1}^2}{a_2 * a_0} \tag{5.17}$$

$$\gamma_2 = \frac{(J_m R K_s + K_d K_s K_t)^2}{(J_m L K_s + J_L K_b K_t) * (K_p K_s K_t + K_b K_s K_t)}; \qquad \gamma_2 = \frac{{a_2}^2}{a_3 * a_1} \tag{5.18}$$

Denklem (5.16), denklem (5.17) ve denklem (5.18)'in τ , γ_1 , γ_2 ortak çözümü ile elde edilen K_p, K_i ve K_d denklemleri sırasıyla denklem (5.19), denklem (5.20) ve denklem (5.21)'de verilmiştir.

$$K_i = (J_m * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_s + J_L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_b * K_t)/(\tau^3 * K_s * K_t) \quad (5.19)$$

$$K_p = (J_m * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_s - \tau^2 * K_b * K_s * K_t + J_L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_b * K_t)/(\tau^2 * K_s * K_t) \quad (5.20)$$

$$K_d = (J_m * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_s - J_m * R * \gamma_1 * \gamma_2 * K_s + J_L * \gamma_1^2 * \gamma_2 * K_b * K_t)/(\tau * \gamma_1 * K_s * K_t) \quad (5.21)$$

Çizelge 5.1'deki DC motor ve esnek kayış parametre değerleri IPD K_p, K_i ve K_d katsayıları denklem (5.19), denklem (5.20) ve denklem (5.21)'de yazıldığında, deney sisteminin açısal hız IPD katsayıları $\tau = 0{,}1$; $\gamma_1 = 2{,}4$; $\gamma_2 = 2$ yazılmasıyla K_i= 2,53 ; K_p= 0,11 ; K_d= 0,008 olarak bulunur. Çizelge 5.2'de deney sisteminin açısal hız kontrolünde simülasyon ve deneysel çalışmalarında kullanılmış olan K_p, K_i ve K_d katsayıları verilmiştir.

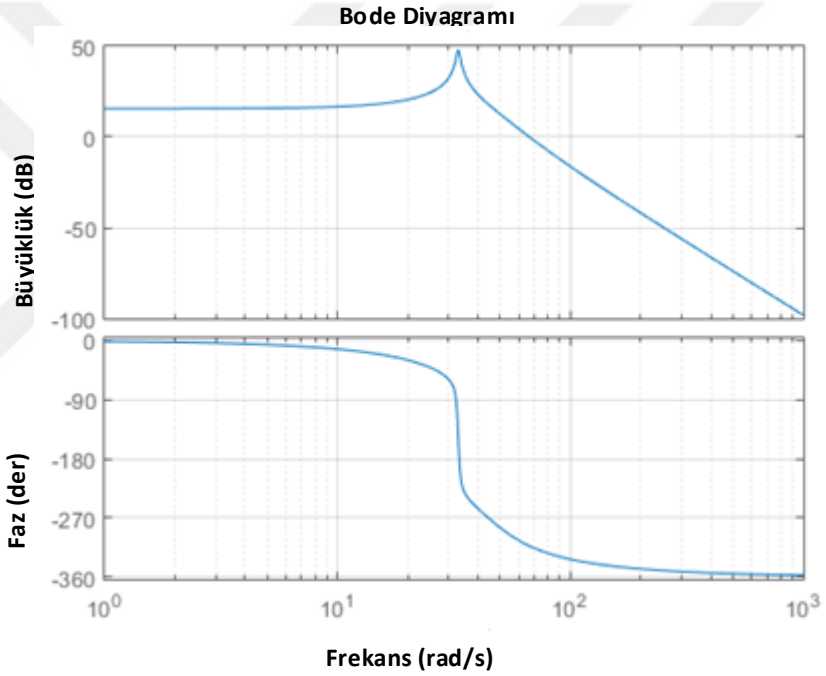
Çizelge 5. 1 Sistem motor ve yük parametre değerleri

140W MOTOR	DEĞER	100W MOTOR	DEĞER
K_b	0,143	B	0,00095
K_t	0,113	R	3,592
B	0,00086	J_L	0,01
R	3,078	K_s	1,09
L	0,1		
J_M	0,0001		

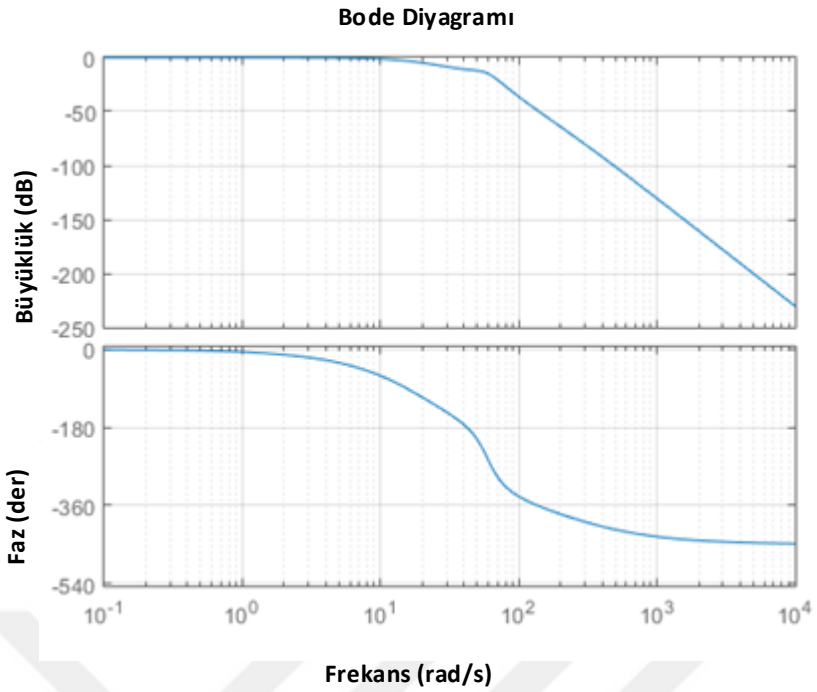
Çizelge 5. 2 Deney sisteminin açısal hız kontrolcü katsayıları

HIZ	K_p	K_i	K_d
HESAPLANAN	0,11	2,53	0,008
SİMÜLASYON	0,198	1,375	0,008
DENEY	0,2	2,45	0,008

Deney sisteminin açısal hız transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.6'da ve açısal hız IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.7'de verilmiştir.

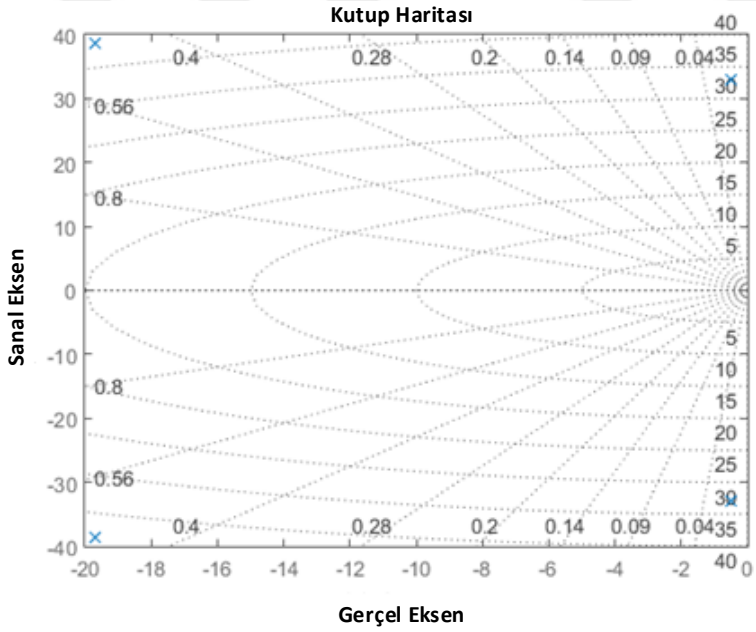


Şekil 5. 6 Deney sisteminin açısal hız bode diyagramı

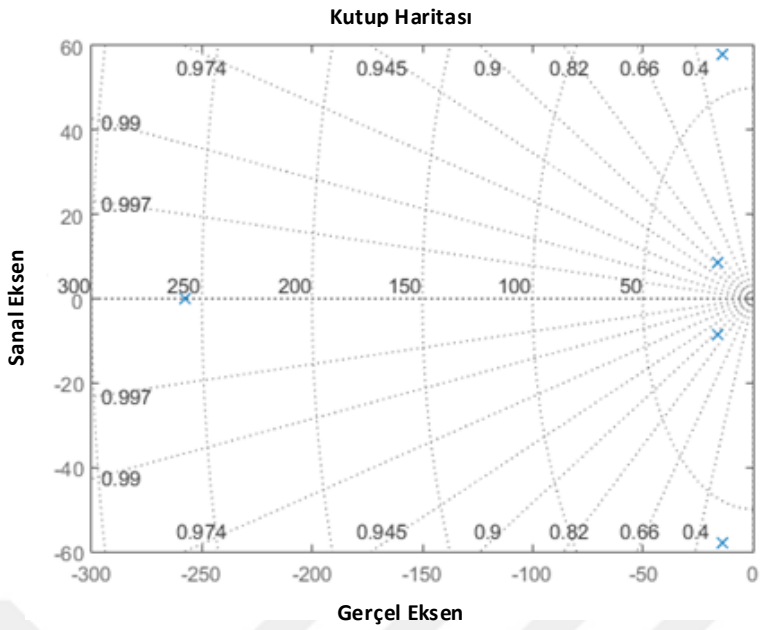


Şekil 5. 7 Deney sisteminin açısal hız IPD bode diyagramı

Deney sisteminin açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.8'de ve açısal hız IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.9'da verilmiştir.

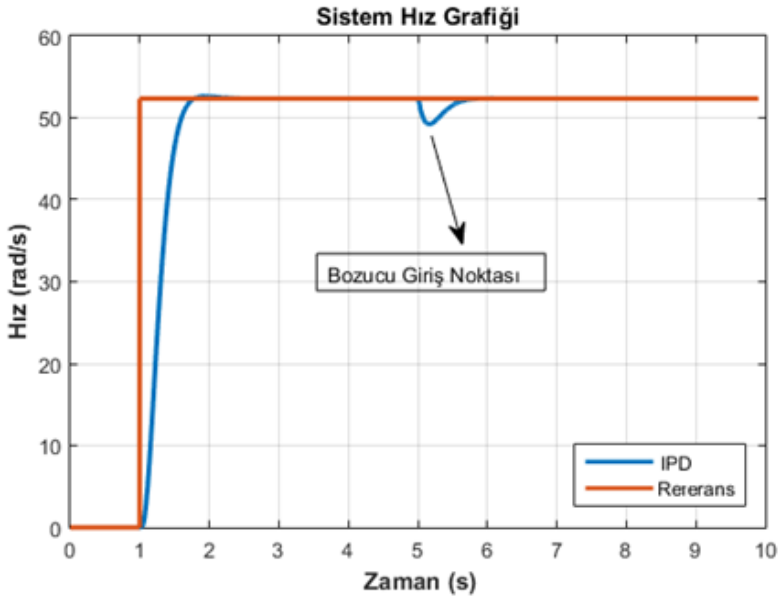


Şekil 5. 8 Deney sisteminin açısal hız kutup haritası



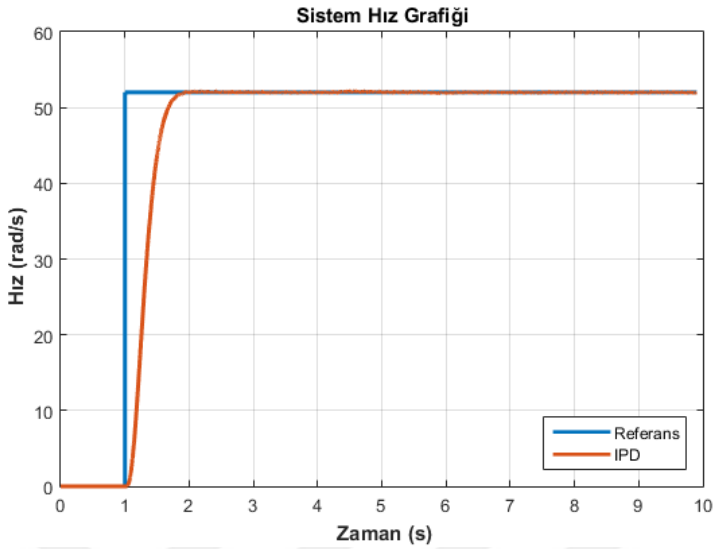
Şekil 5. 9 Deney sisteminin açısal hız IPD kutup haritası

Deney sisteminin açısal hız kontrolünde IPD kontrolör yük simülasyon grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



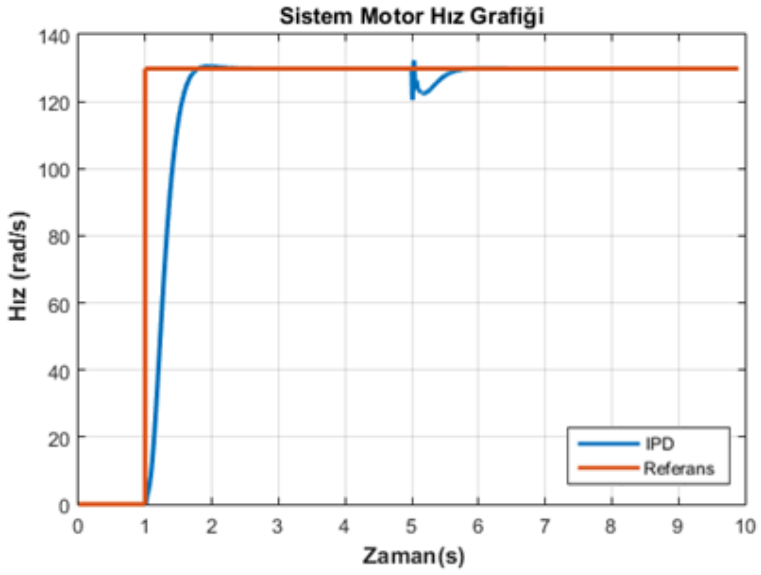
Şekil 5. 10 Deney sisteminin yük açısal hız simülasyon grafiği

Deney sisteminin açısal hız kontrolünde IPD kontrolör yük deney grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir.



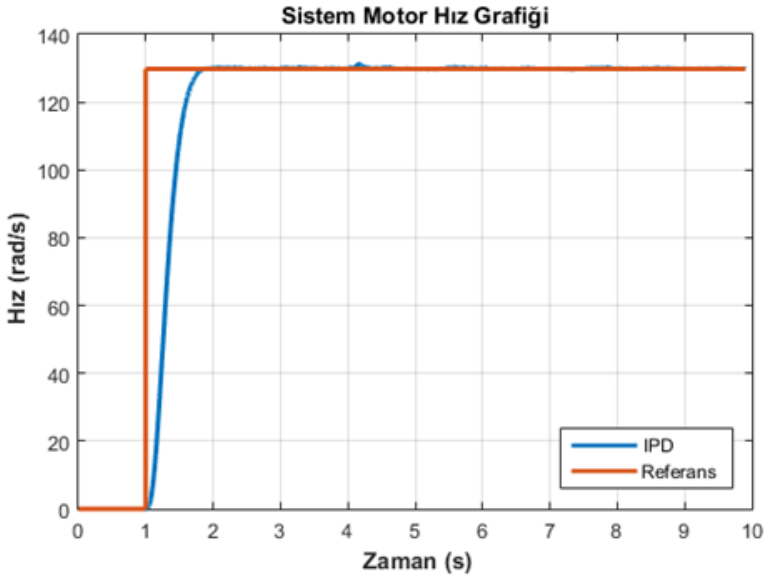
Şekil 5. 11 Deney sisteminin yük açısal hız deney grafiği

Deney sisteminin açısal hız kontrolünde IPD kontrolör motor simülasyon grafiği Şekil 5.12'de verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



Şekil 5. 12 Deney sisteminin motor açısal hız simülasyon grafiği

Deney sisteminin açısal hız kontrolünde IPD kontrolör motor deney grafiği Şekil 5.13'de verilmiştir.



Şekil 5. 13 Deney sisteminin motor açısal hız deney grafiği

5.4 Sistemde IPD Konum Kontrolü

Açısal konum kontrolü, Şekil 5.3'te verilen deney düzeneğinde bulunan iki DC motorun atalet momentleri, kinetik enerji denklemi (5.22) ile tek atalet momentine indirgenmiştir. Kasnakların hız oranı kasnakların çaplarıyla ters orantılıdır. Denklem (5.22)'de hız oranı 2,48'in yazılmasıyla denklem (5.23) elde edilmiştir. Çizelge 3.4'te DC motorların atalet moment değerleri denklem (5.24)'te yazıldığında, deney düzeneğinin indirgenmiş atalet momenti değeri bulunmuştur. Deney düzeneğinin sürtünme sabiti ise Bölüm 3 Çizelge 3.3'teki DC motorların sürtünme sabiti toplamı olarak denklem (5.26)'da verilmiştir.

$$0{,}5 * J_{eş} * {\omega_{eş}}^2 = 0{,}5 * J_m * {\omega_m}^2 + 0{,}5 * J_L * {\omega_L}^2 \quad (5.22)$$

$$0{,}5 * J_{eş} * {\omega_{eş}}^2 = 0{,}5 * J_m * {\omega_m}^2 + 0{,}5 * J_L * (2{,}48\omega_m)^2 \quad (5.23)$$

$$J_{eş} = J_m + J_L * (2{,}48\omega_m)^2 \quad (5.24)$$

$$J_{eş} = 0{,}001 + 0{,}0001 * (2{,}48)^2 = 0{,}001615 \quad (5.25)$$

$$B_{eş} = B_m + B_L = 0{,}00095 + 0{,}00086 = 0{,}00181 \quad (5.26)$$

Not: Sistem DC motor gibi düşünüldüğü için K_s ihmal edilmiştir.

Denklem (5.27)'in IPD katsayıları çarpımı ile DC motorun kapalı çevrim transfer fonksiyonu denklem (5.28) ve karakter polinomu denklem (5.29) olarak elde edilir.

$$\frac{w_2(s)}{v(s)} = \frac{k_m * k_s}{((j_1 s + B_1) * (Ls + R) + k_m * k_b) * (J_2 s^2 + B_2 s + k_s)} \quad (5.27)$$

$$TF = \frac{K_t * Ki}{(K_i * K_t + B * R * s^2 + K_b * K_t * s + K_b * K_t * s^2 + K_p * K_t * s + B * L * s^3 + J * L * s^4 + K_d * K_t * s^2 + J * R * s^3)} \quad (5.28)$$

$$KP = J * L * s^4 + (B * L + J * R) * s^3 + (B * R + K_b * K_t + K_d * K_t) * s^2 + (K_p * K_t) * s + K_i * K_t \quad (5.29)$$

Manabe formunun kullanılacağı eşdeğer zaman sabiti (τ) ve indisler (γ_1, γ_2) sırasıyla denklem (5.30), denklem (5.31), denklem (5.32)'da verilmiştir.

$$\tau = \frac{(K_p * K_t)}{K_i * K_t}; \qquad \tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (5.30)$$

$$\gamma_1 = \frac{(K_p * K_t)^2}{(B * R + K_b * K_t + K_d * K_t) * (K_i * K_t)}; \qquad \gamma_1 = \frac{{a_1}^2}{a_2 * a_0} \quad (5.31)$$

$$\gamma_2 = \frac{(B * R + K_b * K_t + K_d * K_t)^2}{(B * L + J * R) * (K_p * K_t)}; \qquad \gamma_2 = \frac{{a_2}^2}{a_3 * a_1} \quad (5.32)$$

Denklem (5.30), denklem (5.31) ve denklem (5.32)'in τ , γ_1 , γ_2 ortak çözümü ile elde edilen K_p, K_i ve K_d denklemleri sırasıyla denklem (5.33), denklem (5.34) ve denklem (5.35)'de verilmiştir.

$$K_p = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2)/(K_t * \tau^2) \quad (5.33)$$

$$K_i = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2)/(K_t * \tau^3) \quad (5.34)$$

$$K_d = (B * L * \gamma_1^2 * \gamma_2 + J * R * \gamma_1^2 * \gamma_2 - B * R * \tau * \gamma_2 - K_b * K_t * \tau * \gamma_2)/(K_t * \tau * \gamma_1) \quad (5.35)$$

Çizelge 5.3'deki DC motor parametre değerleri IPD K_p, K_i ve K_d katsayıları denklem (5.33), denklem (5.34) ve denklem (5.35)'de yazıldığında, deney sisteminin açısal hız IPD katsayıları $\tau = 0.3, \gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = 2$ yazılmasıyla K_i= 13.96; K_p= 4.19; K_d= 0.3 olarak bulunur. Çizelge 5.4'de deney sisteminin açısal hız kontrolünde simülasyon ve deneysel çalışmalarında kullanılmış olan K_p, K_i ve K_d katsayıları verilmiştir.

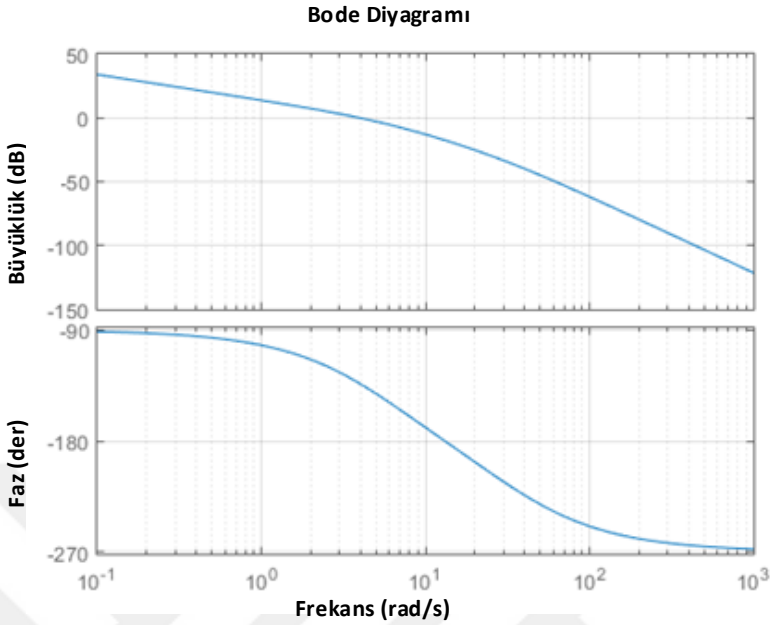
Çizelge 5. 3 Deney sisteminin parametre değerleri

SİSTEM DEĞİŞKENLER	DEĞER
K_b	0,155
K_t	0,137
B	0,00181
R	3,592
L	0,1
$J_{eş}$	0,001615

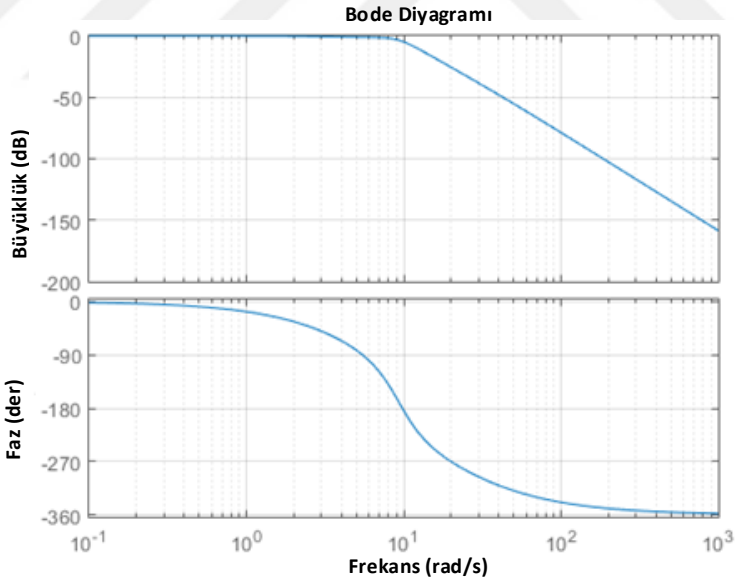
Çizelge 5. 4 Deney sisteminin açısal konum kontrolcü katsayıları

KONUM	K_p	K_i	K_d
HESAPLANAN	4,19	14	0,3
SİMÜLASYON	4,19	14	0,3
GERÇEK ZAMANLI	5	11,75	0,5

Deney sisteminin açısal konum transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.14'de ve açısal konum IPD transfer fonksiyon bode diyagramı Şekil 5.15'de verilmiştir.

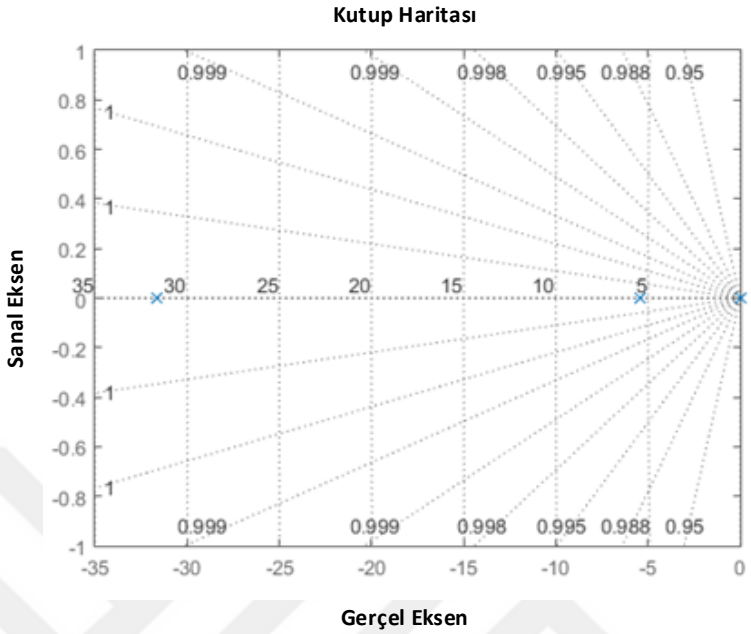


Şekil 5. 14 Deney sisteminin açısal konum bode diyagramı

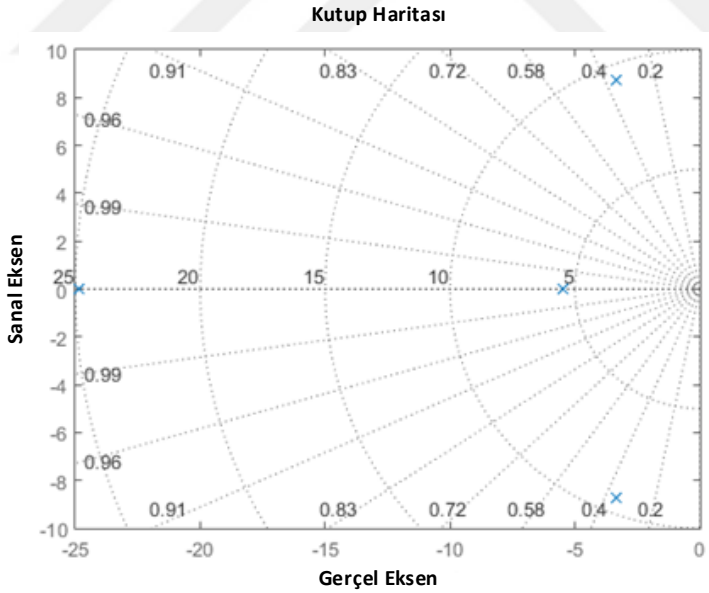


Şekil 5. 15 Deney sisteminin açısal konum IPD bode diyagramı

Deney sisteminin açısal hız transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.16'da ve açısal hız IPD transfer fonksiyon kutup haritası Şekil 5.17'de verilmiştir.

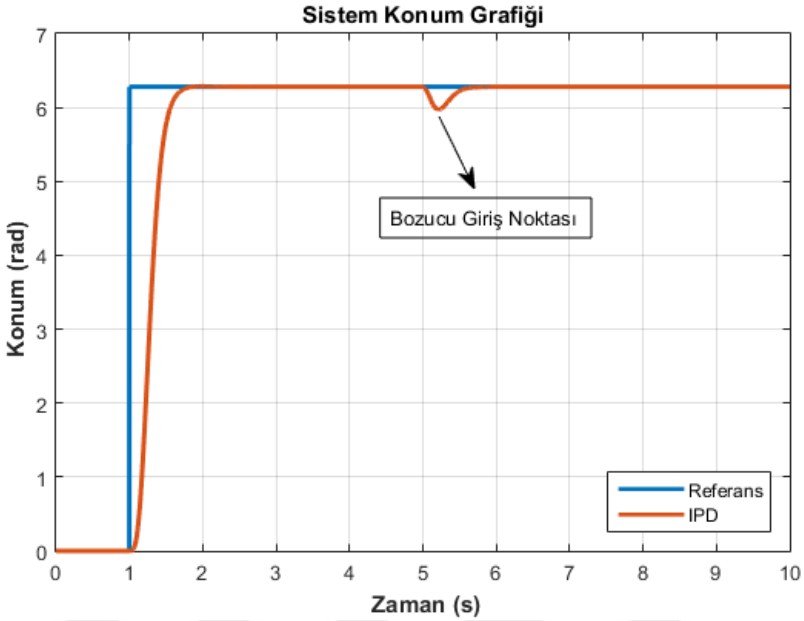


Şekil 5. 16 Deney sisteminin açısal konum kutup haritası



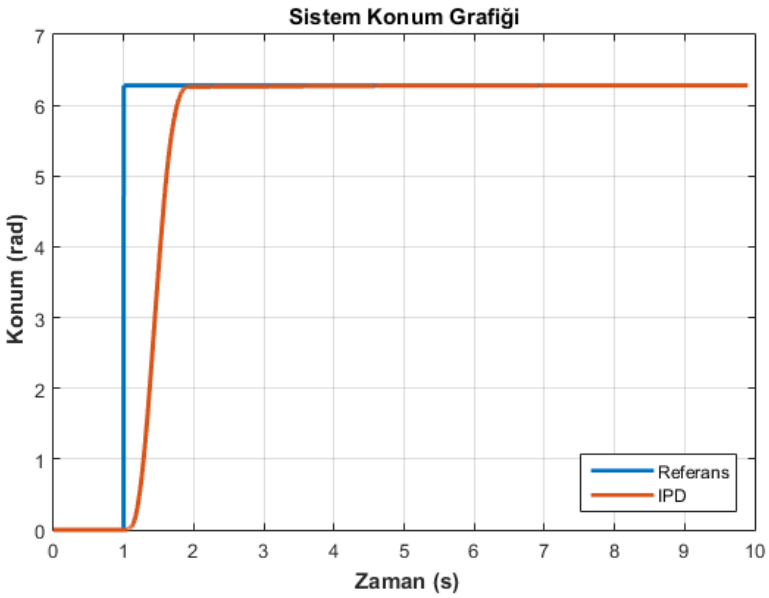
Şekil 5. 17 Deney sisteminin açısal konum IPD kutup haritası

Deney sisteminin açısal konum kontrolünde IPD kontrolör simülasyon grafiği Şekil 5.18'de verilmiştir. Simülasyonda 5. Saniyede gürültü uygulandığında tekrar referans değerine oturduğu görülmüştür.



Şekil 5. 18 Deney sistem 100W DC motor açısal konum simülasyon grafiği

Deney sisteminin açısal konum kontrolünde IPD kontrolör deney grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5. 19 Deney sistem 100W DC motor açısal konum deney grafiği

BÖLÜM 6

ESNEK KAYIŞLI DC MOTOR SİSTEMİNİN DURUM UZAY GERİ BESLEMELİ KONTROLÜ

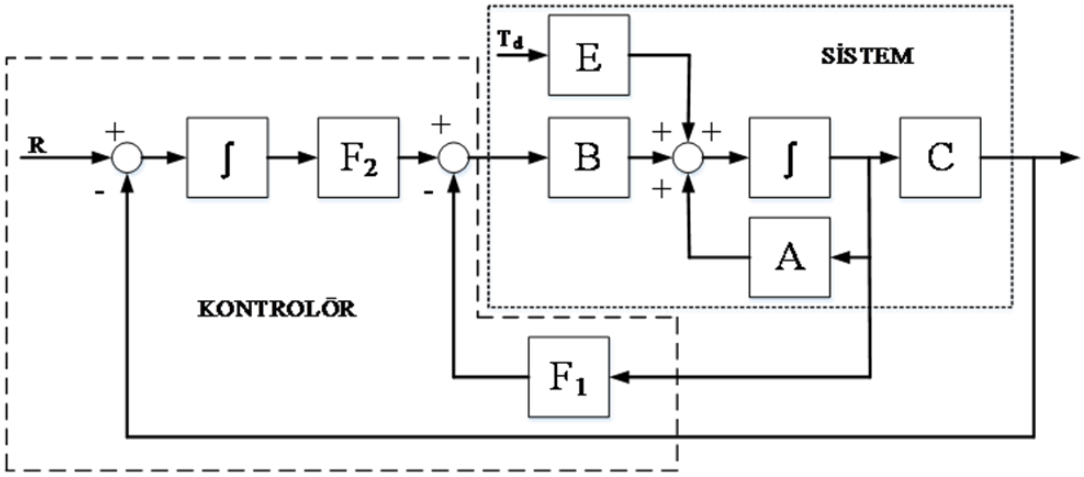
6.1 Sistemin Durum Uzay İntegral Geri Besleme ile Hız Kontrolü

Sistemlerin kontrolü için diferansiyel denklemler ve transfer fonksiyonlar ile kontrolcü tasarlanabileceği gibi n'nci dereceden bir sistemi oluşturan n tane durum değişkeni ve n tane durum denklemi ile kontrolcü tasarımı yapılabilir ve sistemin durum değişkenleri üzerinden istenen çıkış alınır. Kontrol edilecek sistemler durum uzayında A,B,C,D matrisleri ile gösterilir. Sistemlerin kontrol edilebilirliği A_{nxn}, B_{nxn} matris çifti denklem (6.1) ile belirlenir.

$$[B\ AB\ A^2B \ldots \ldots\ A^{n-1}B] \tag{6.1}$$

Denklem (6.1)'deki matrisi rankı n değerine eşit ise sistem kontrol edilebilir demektir.

Sistemin blok diyagramları ile oluşturulmuş gösterimi Şekil 6.1'de verilmiştir. R referans olmak üzere, A, B, C sistemin durum uzay matrislerini, E sisteme uygulanan gürültü matrisi, F_1 ve F_2 ise kontrol katsayılarını ve Td ise sisteme uygulanan bozucu torku ifade etmektedir.



Şekil 6. 1 Sistemin durum uzay blok gösterimi

Sistemin durum ifadeleri denklem (6.2)'de verilmiştir. Sistemin hata denklemi (6.3) olarak ifade edilir.

$$\dot{X} = Ax + Bu \quad Y = Cx \quad u = \Delta e_w = -F_1 x + F_2 x\varsigma \quad \varsigma = r - y = r - Cx \tag{6.2}$$

$$e = \hat{A}e + \hat{B}u_e \qquad u_e = -\widehat{K}e \tag{6.3}$$

Sistemin kontrol edilebilirlik analizinden sonra Şekil 6.1'te belirtilen F_1 ve F_2 katsayıların belirlenmesi yapılmıştır. Kontrol katsayılarının belirlenmesinde Manabe formu kullanılarak hesaplanmıştır. Sistemin kontrol katsayıları Kessler kanonik formu gibi diğer formların kullanılmasıyla da bulunabilir. Sistemin derecesine göre ve kutup atama ile referans polinom oluşturularak zaman sabiti ile kutup ataması yapılır. [24]

Sistemin A matrisi denklem (5.11)'de 4x4 olarak verilmiştir. Sisteme gürültü verildiğinde sistemin kalıcı durum hatasına düşmemesi için integral katsayısı eklenmiştir. Sistemin kontrol katsayıları bulunurken 5x5 matris formuna dönüştürülür. Deney sisteminin SSI matrisleri denklem (6.4)'te verilmiştir. Geri besleme kazanç matrisi ($\widehat{K}$) denklem (6.5)'te verilmiştir.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{Kb}{L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Kt}{Jm} & -\frac{Bm}{Jm} & -\frac{Ks}{Jm} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Ks}{Jl} & -\frac{Bl}{Jl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6.4}$$

$$\hat{K} = [F_1 \qquad -F_2] \tag{6.5}$$

$\hat{K}$ kazanç matrisi olup kutup atama metodu ile hesaplanır. Genişletilmiş sistem kontrol edilebilirliği sağlamalıdır. Matlab programı ile kutup atamaları yapılabilmektedir. Genişletilmiş sistemin referans polinomu denklem (6.6)'da verilmiştir. Referans polinomunun katsayıları denklem (6.7) kullanılarak hesaplanır.

$$P_r(s) = a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \tag{6.6}$$

$$\frac{a_1^2}{a_2 a_0} = \gamma_1 \qquad \frac{a_2^2}{a_3 a_1} = \gamma_2 \qquad \frac{a_3^2}{a_4 a_2} = \gamma_3 \qquad \frac{a_4^2}{a_5 a_3} = \gamma_4 \qquad \frac{a_1}{a_0} = \tau \tag{6.7}$$

Manabe formunda kararlılık indeksleri $\gamma_1 = 2.5 \quad \gamma_2 = 2 \quad \gamma_3 = 2 \quad \gamma_4 = 2$ olarak kullanılır. Referans polinomunun sıfıra eşitlenmesi ile 5 kök bulunur. Bulunan bu kökler geri beslemeli denetleyicinin köklerini oluşturur. Zaman sabiti $\tau = 0.06$ alınması ile referans polinomunun katsayıları denklem (6.8)'in kullanılmasıyla bulunur.

$$P_r(s) = \frac{a_5 s^5}{a_0} + \frac{a_4 s^4}{a_0} + \frac{a_3 s^3}{a_0} + \frac{a_2 s^2}{a_0} + \frac{a_1 s}{a_0} + \frac{a_0}{a_0} \tag{6.8}$$

$b_0 = 1 \qquad \mathrm{b}_1 = \tau = \frac{a_1}{a_0} = 0.06$

$\frac{b_1^2}{b_2 b_0} = \frac{\tau^2}{b_2} = \gamma_1 \qquad b_2 = \frac{\tau^2}{\gamma_1} = 0.0014$

$\frac{b_2^2}{b_3 b_1} = \gamma_2 \qquad b_3 = \frac{b_2^2}{b_1 \gamma_2} = 1.728 * 10^{-5}$

$\frac{b_3^2}{b_4 b_2} = \gamma_3 \qquad b_4 = \frac{b_3^2}{b_2 \gamma_3} = 1.037 * 10^{-7}$

$\frac{b_4^2}{b_5 b_3} = \gamma_4 \qquad b_5 = \frac{b_4^2}{b_3 \gamma_4} = 3.11 * 10^{-10}$

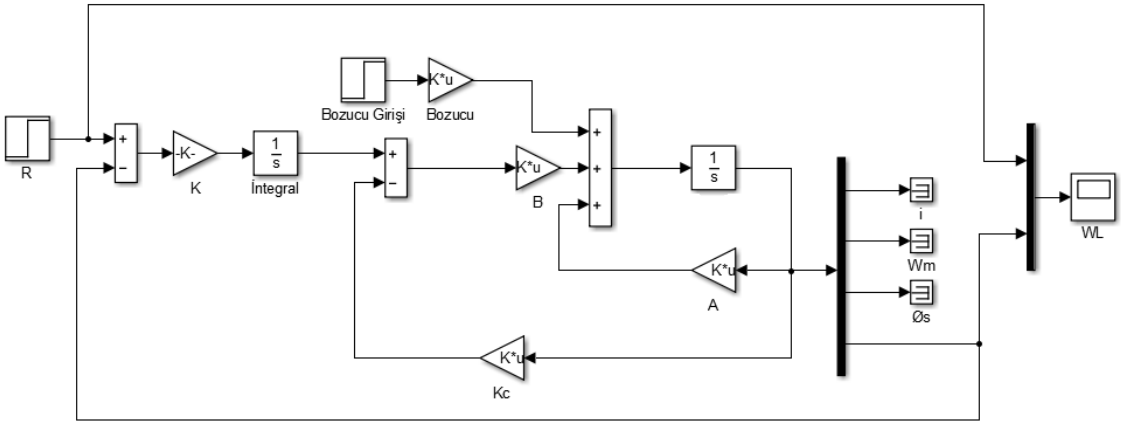
Polinom katsayıları bulunduktan sonra denklem (6.8)'in sıfıra eşitlenip çözülmesi ile 5.dereceden bir sistemin kökleri ($P_5(s)$) kutupları ($P_{1\text{-}2}$=-92.61+-106.6i, $P_{3\text{-}4}$=-50.35+-29.4i, P_5=-47.4) bulunur. Kutup atama yöntemi ile geri besleme kazancı (Kc) ve başlangıç (integral) kazancı (K) bulunur. Şekil 6.2'de deney sisteminin Matlab simulink

modeli verilmiştir. Matlab programında acker komutunun kullanılması ile yapılarak geri besleme ve integral kazancı denklem (6.9) ile bulunmuş olur.

$$\widehat{K} = acker\left(\hat{A}, \hat{B}, [p1\ p2\ p3\ p4\ p5]\right) \quad (6.9)$$

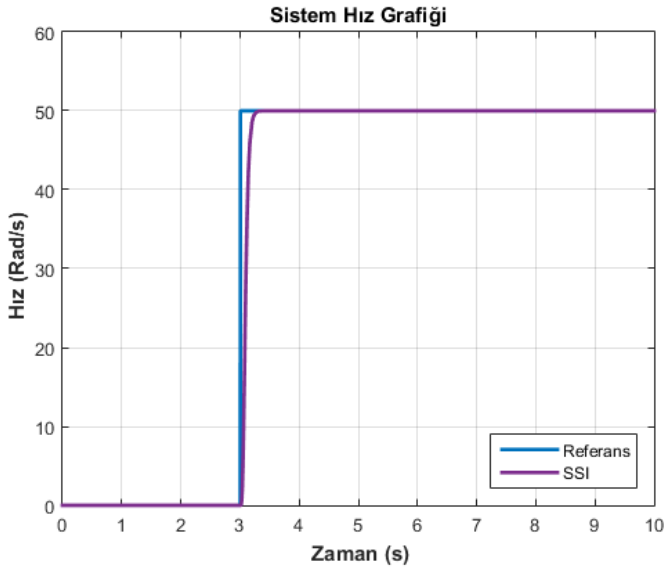
$$\widehat{K} = [F_1 \quad -F_2] = [0.15 \quad 0.21 \quad 6.08 \quad 1.15 \quad -26]$$

$$F_1 = [0.15 \quad 0.21 \quad 6.08 \quad 1.15] \quad F_2 = [-26]$$

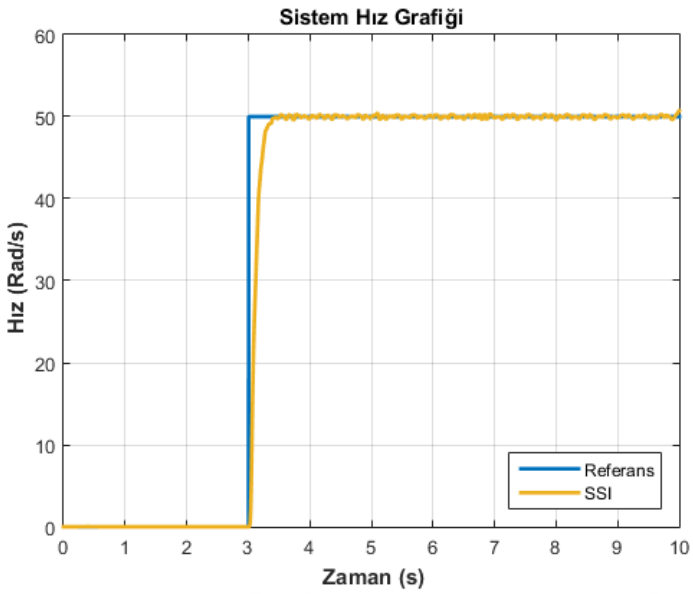


Şekil 6. 2 Durum uzayı integral kontrolü simulink modeli

Deney sisteminin açısal hız kontrolünde SSI kontrolör simülasyon grafiği Şekil 6.3'te verilmiştir. Deney sisteminin açısal hız kontrolünde SSI kontrolör deney grafiği Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6. 3 Deney sisteminin açısal hız simülasyon grafiği



Şekil 6. 4 Deney sisteminin açısal hız deney grafiği

6.2 Sistemin Durum Uzay İntegral Gözlemci Geri Besleme ile Hız Kontrolü

Durum uzay integral kontrolünde tüm durum değişkenlerinden veri alındığı düşünülüp hesaplamalar yapılır. Tüm durum değişkenlerinin ölçülemediği ya da ölçme cihazlarının maliyetinin fazla olduğu durumlarda gözlemci tasarlanarak çözüme gidilir. Böylelikle ölçümün sağlıklı olmayacağı elverişsiz ortamlarda, insanların hayatları için tehlikeli alanlarda veya mevsim şartlarının değişmesinden dolayı ölçümlerin değişken olduğu durumlarda daha stabil bir biçimde gözlemci üzerinden ölçüm değerleri okunabilir.

Sistemlerin kontrolü için gözlemci tasarımında durum uzay denklemlerini oluşturan A,B,C,D matrislerinden, sistemin gözlenebilirliği A_{nxn}, C_{nxn} matris çifti denklem (6.10) ile belirlenir. Denklem (6.10)'nun rank sayısı n değerine eşit ise gözlenebilirdir.

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \tag{6.10}$$

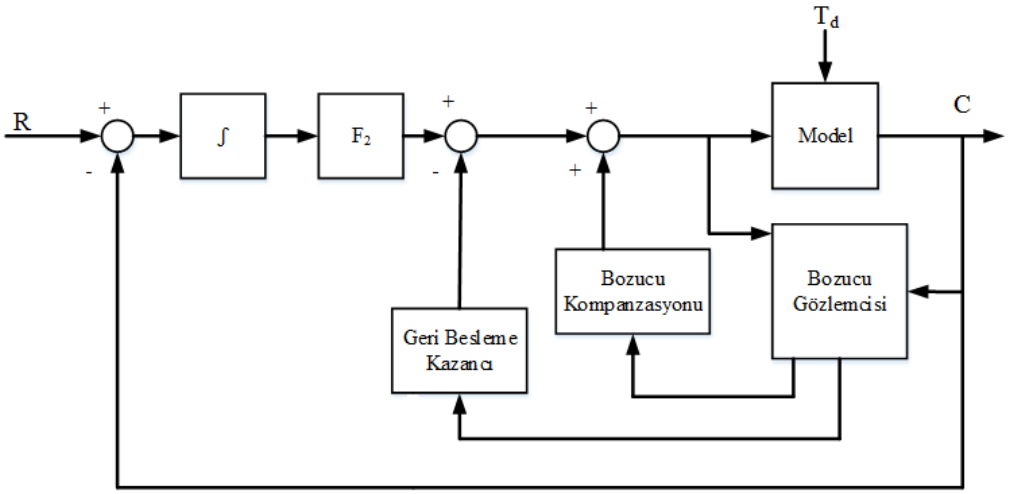
Sistemin kontrolünde integral kullanımı sistem kontrolünde kalıcı durum hatalarının oluşmasını engeller. Sisteme dışarıdan bir gürültü verildiğinde sistemin gürültüden dolayı kalıcı durum hatasına girmemesi için gürültü sisteme durum değişkeni olarak

eklenir. Böylelikle sisteme dışarıdan verilen gürültüler, sistemin kontrolünde kalıcı durum hataları oluşumu önlenmiş olur.

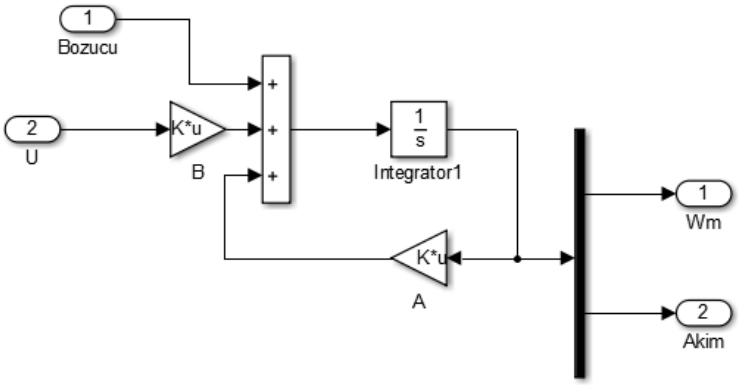
Sisteme bozucu gözlemci tasarlanırken sistem durum değişkenleri Şekil 6.5'te verildiği gibi sistem modeli ve sistemin bozucu (gürültü) gözlemcisi ayrı bir blok olarak eklenir. Sistem modelinde basitleştirmeye gidilerek DC motor gibi modelleme yapılmıştır. Denklem sistemin modeli Şekil 6.6'te ve sistemin bozucu gözlemci alt sistemi Şekil 6.7'de verilmiştir. Denklem (6.11)'da verildiği gibi sisteme uygulanacak olan bozucu tork (Td) matris denklemine eklenmiş olur.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\omega\\ i\\ Td\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{B}{Jm} & \frac{Kt}{Jm} & -\frac{1}{Jm}\\ -\frac{Kb}{L} & -\frac{R}{L} & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}W\\ i\\ Td\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ \frac{1}{L}\\ 0\end{bmatrix} \qquad \hat{Y}=[C \quad 0]\hat{x}=[1 \quad 0 \quad 0]\hat{x} \qquad (6.11)$$

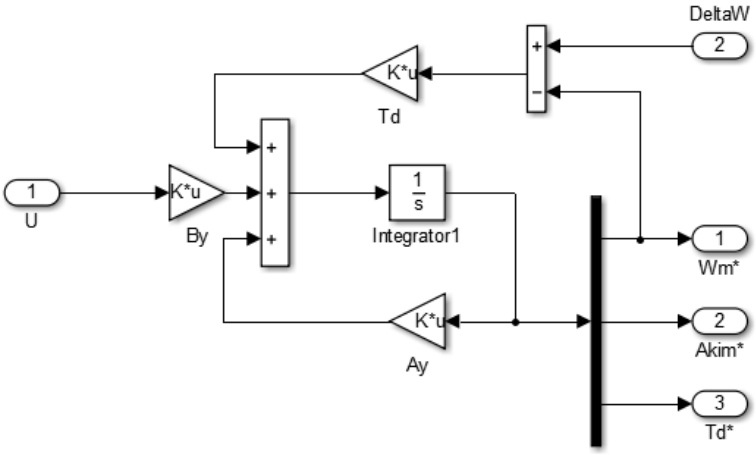
Gözlemci tasarımında kök atamaları, sistem köklerinin 2 ile 10 kat arası seçilir. Böyle bir kök atamasının yapılması gözlemcinin sistemden daha hızlı olmasını sağlamaktır. Bu sayede gözlemci istenen ölçüm çıkışlarını sağlayıp kontrol mümkün hale gelmiş olur.



Şekil 6. 5 Bozucu gözlemci durum geri beslemesi integral kontrolü blok şeması

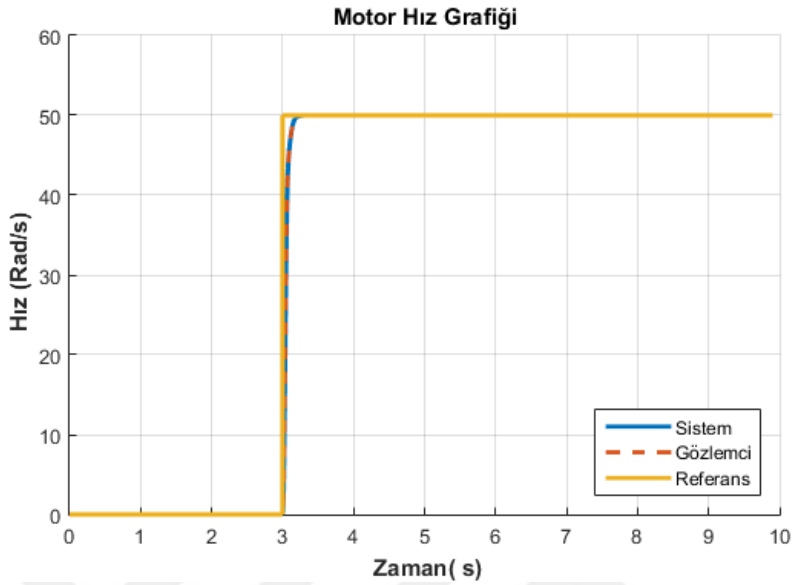


Şekil 6. 6 Sistem modeli

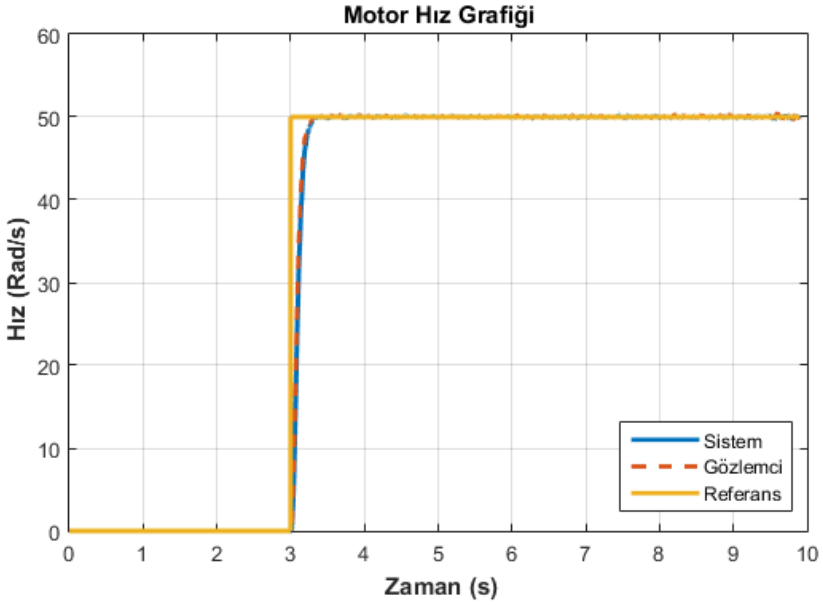


Şekil 6. 7 Bozucu gözlemci alt sistemi

Deney sistem modeli tasarlandıktan sonra gözlemciden alınan veriler simülasyon ve gerçek zamanlı deney sonuçları sırasıyla Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da verilmiştir. Deney sistem hız çıkışı ve gözlemci hız çıkışlarının aynı olduğu görülmüştür.



Şekil 6. 8 Deney sistemin gözlemci açısal hız simülasyon grafiği

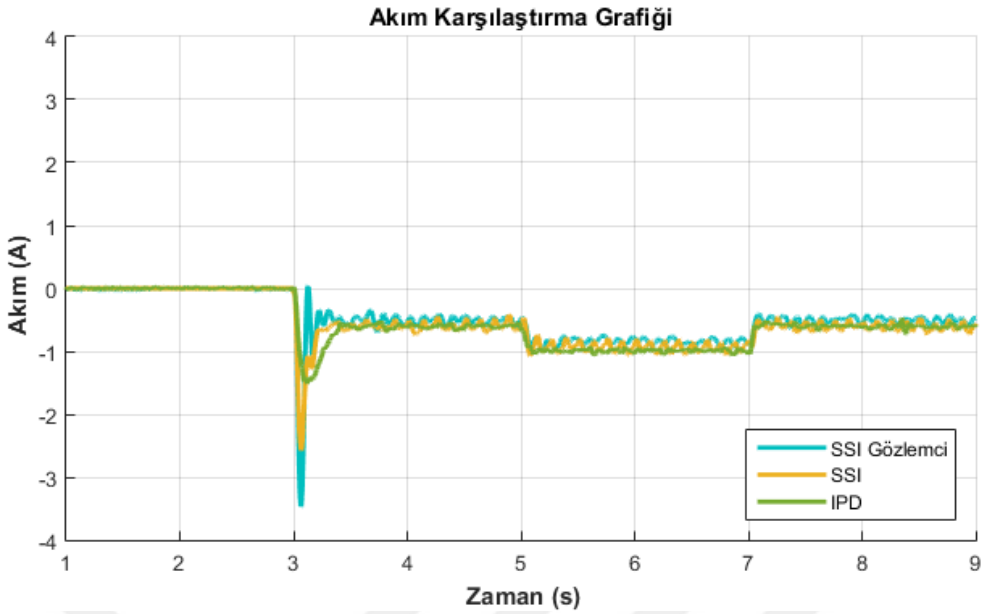


Şekil 6. 9 Deney sistemin gözlemci açısal hız deney grafiği

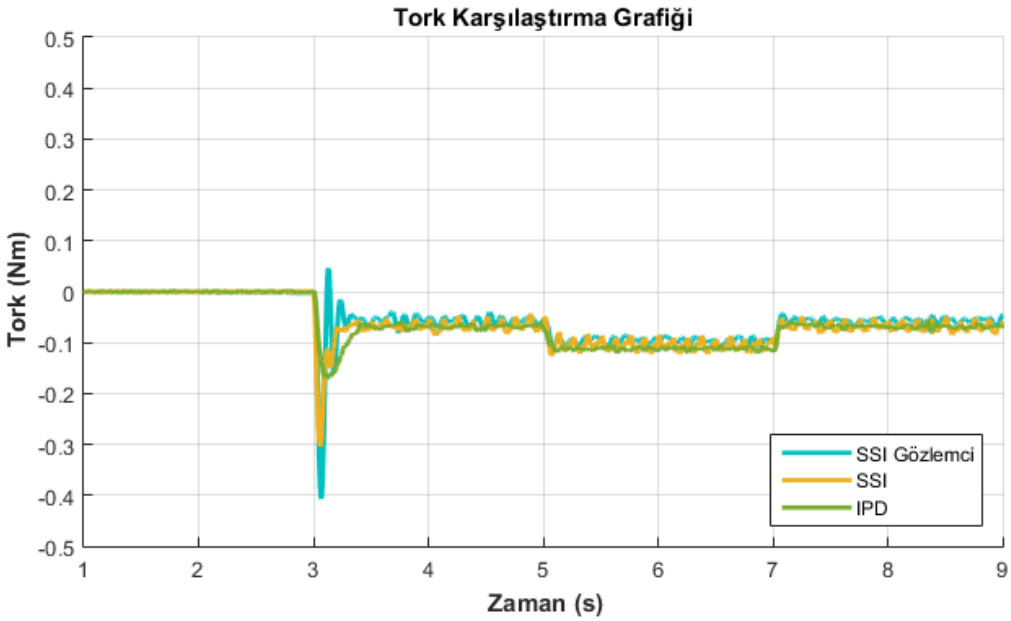
BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

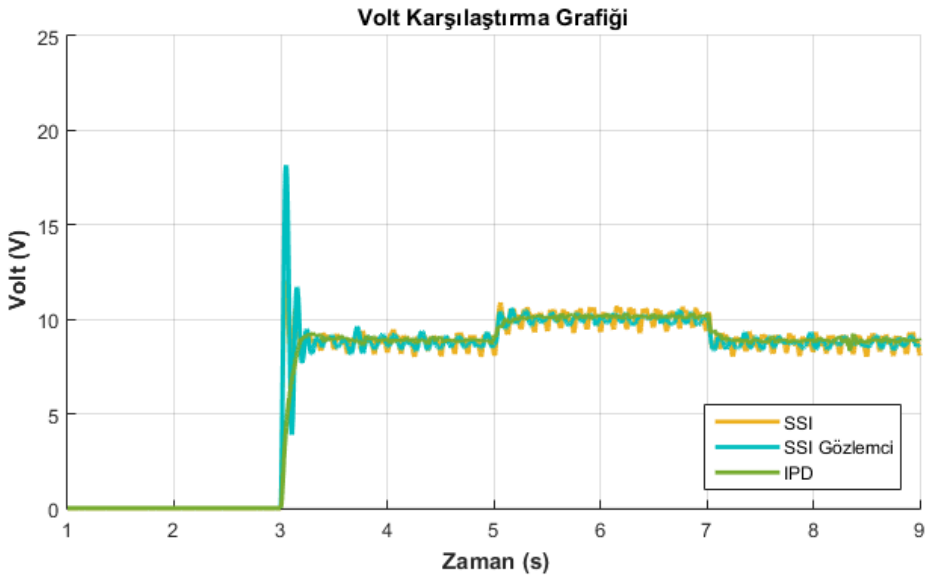
Deney sistem açısal hız kontrolü için ayrı ayrı IPD kontrolcü, durum uzay integral kontrolcüsü (SSI) ve bozucu gözlemci durum geri beslemesi integral kontrolcüsü (SSIO) tasarlanmıştır. Deney sisteminde yük olarak kullanılan motorun enkoderinden alınan hız bilgisi ve motorun akım, voltaj ve tork bilgisi alınmıştır. Bozucu gözlemcisinden tahmin edilen akım ve ölçülen akım aynı değerde olduğu için tahmin edilen akım değeri kullanılmıştır. Akım değerinin ve tork katsayısının bilinmesi ile DC motorun tork ölçümü gerçekleştirilmesiyle günümüzde pahalı olan tork sensörü kullanımına gerek kalmadan tork ölçümünü sağlamıştır. IPD, SSI ve SSIO kontrolcülerinde kullanılan akım sensöründen alınan verilerlerden elde edilen akım grafiği Şekil 7.1'de, deney sisteminde motordan alınan akım ve DC motorun tork katsayısı ile okunan torklar Şekil 7.2'de, deney sisteminde motordan çekilen voltaj Şekil 7.3'de ve deney sisteminde yük olarak kullanılan DC motorun açısal hız değerleri Şekil 7.4'te görülmektedir.



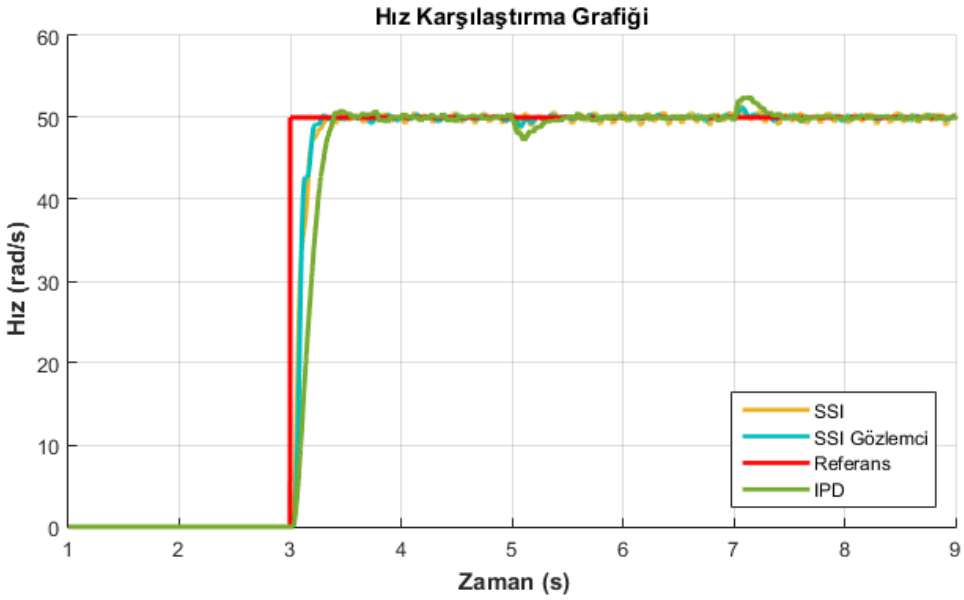
Şekil 7. 1 Kontrolcülerin akım karşılaştırma grafiği



Şekil 7. 2 Kontrolcülerin tork karşılaştırma grafiği



Şekil 7. 3 Kontrolcülerin volt karşılaştırma grafiği



Şekil 7. 4 Kontrolcülerin hız karşılaştırma grafiği

Bu tez çalışmasında, esnek kayışlı deney düzeneği öncelikle tasarımı yapılmış sonra imalat ve montajı yapılarak deney düzeneği hazır hale getirilmiştir. Sistem üzerinde mevcut olan 100W ve 140W DC motorların karakteristik değerleri ayrı ayrı yapılan deney ve ölçümlerle belirlenmiştir. Bu karakteristik değerlerin belirlenmesiyle sistemin matematiksel modellemeleri yapılarak sistemin hareket kontrolünde tasarlanacak olan kontrolcülerin hesaplanmaları yapılmıştır. Hareket kontrol uygulamalarında deney düzeneğine Katsayı Diyagram Metodu ve Manabe Formu kullanarak önce sadece DC

motora PID ve IPD kontrolcüleri tasarlanarak simülasyon ve gerçek zamanlı kontrolcü sonuçları paylaşılmıştır. IPD kontrolcünün performansının PID'den daha iyi olması nedeniyle deney sisteminde IPD kontrolcü tasarımları hız ve konum kontrolleri için yapılmış ve uygulamalı olarak deneyleri başarıyla yapılmıştır.

Sistem hız kontrolünde transfer fonksiyonu yaklaşımı ile kontrolcü tasarlanabileceği gibi durum uzay denklemleri ile de kontrolcü tasarlanabilir. Deney düzeneğinin hız kontrolünde durum uzay integral kontrolcüsü tasarlanarak simülasyon ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Deney düzeneğinde kullanmış olduğumuz 140W DC motorun tork ölçümlerini Durum Uzay İntegral Gözlemci Geri Besleme ile Hız Kontrolcüsü tasarlayarak motor enkoderinden ve gözlemciden alınan hız ölçüm değerleri karşılaştırılmış ve gözlemcinin başarılı olduğu görülmüştür. Pahalı olan tork sensörlerine alternatif olarak kullanılabilecek gözlemci üzerinden alınan akım bilgisi ve tork katsayısı bilinen bir motorun tork ölçümleri alınmış ve IPD, SSI ve SSIO ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Yüksel, İ., (2016). Otomatik kontrol sistem dinamiği ve denetim sistemleri, 10. Baskı, Dora Basım-Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Bursa.

[2] Özkan, B., (2009). "Mekatronik Sistemlerde Uygulanan Belli Başlı Kontrol Yöntemleri", Tübav Bilim Dergisi, 2 (3): 302-316.

[3] Manabe, S., (1994). "Coefficient Diagram Method", IFAC Automatic Control in Aerospace, 12-16 September 1994, California.

[4] Hamamcı, S.E., (2002). "Zaman Gecikmeli Kararsız Sistemler için Katsayı Diyagram Metodu ile Kontrolör Tasarımı", Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6 (3): 135-142.

[5] Manabe, S., (1998). "Controller Design of Two-Mass Resonant System by Coefficient Diagram Method", IEEJ Transactions on Industry Applications, 118 (1):58-66.

[6] Hamamcı, S.E., (2004). "İntegratörlü sistemler için Katsayı Diyagram Metodu ile kontrolör tasarımı" , İTÜ Dergisi, 3 (6): 3-12.

[7] Öcal, Ö., Bir, A. ve Tibken, B., (2009). "Digital Design of Coefficient Diagram Method" , American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, 10-12 June 2009, Missouri.

[8] Haouari, F., Nourdine, B., Boucherit, M. ve Tadjine, M., (2015). "A Coefficient Diagram Method controller with backstepping methodology for robotic manipulator" , Journal of Electrical Engineering, 66 (5):270-276.

[9] Wu, Y., Fujikawa, K. ve Kobayashi, H., (1998). "A Torque Control Method of Two-Mass Resonant System with PID-P Controller", Advanced Motion Control, 29 June-1 July 1998, Coimbra.

[10] Sugiura, K. ve Hori, Y., (1996). "Vibration Supression in 2 and 3 Mass System Based on the Feedback of Imperfect Derivative of the Estimated Torsional", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 43 (1): 56-64.

[11] Szabat, K. ve Orlowska, T., (2007). “Vibration Suppression in a Two-Mass Drive System Using PI Speed Controller and Additional Feedbacks—Comparative Study”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54 (2): 1193-1206.

[12] Meetei, V., Shimray, B. ve Malemnganbi, R., (2015). “ Vibration Suppression of a 2-Mass Drive System with Multiple Feedbacks”, International Journal of Scientific and Research Publications, 5 (11): 168-175.

[13] Li, Q., Xu, Q. ve Wu, R., (2016). “Low-frequency Vibration Suppression Control in a Two-mass System by Using a Torque Feed-forward and Disturbance Torque Observer”, Journal of Power Electronics, 16 (1): 249-258.

[14] Dhaouadi, R., Kubo, K. ve Tobise, M., (1993). “Two-Degree-of-Freedom Robust Speed Controller for High-Performance Rolling Mill Drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, 29 (5): 919-926.

[15] Shahgholian, G., (2013). “Modeling and Simulation of a Two-Mass Resonant System with Speed Controller”, International Journal of Information and Electronics Engineering, 3 (5): 448-452

[16] Singh, A.P., Narayan, U. ve Verma, A., (2013). “Speed Control of DC Motor using Pid Controller Based on Matlab.”, Innovative Systems Design and Engineering, 4 (6): 22-28.

[17] Iwasaki, M., Hiroe, T. ve Matsui, N., (1998). “Measurement of mechanical parameter two-mass resonant system using disturbance observer”, Electrical Engineering in Japan, 118 (2): 19-29.

[18] Erdal, H. ve Doğan, B., (2012). “DC Motor Parametrelerinin Deney Tabanlı Belirlenmesi ve Parametre Belirleme Sonuçlarının İyileştirilmesi.”, Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27 (3): 589-598.

[19] Maxon motor ag., maxon DC motor and maxon EC motor key information, www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8815460712478/DC-EC-Key Information-14-EN-42-50.pdf?attachment=true, 10 Ağustos 2017.

[20] Massachusetts Institute of Technology, Understanding D.C. Motor Characteristics, http://lancet.mit.edu/motors/motors3.html, 9 Ağustos 2017.

[21] Kutay, G., (2011), Sürtünmeli Kavramalar, http://www.guven-kutay.ch/ozet-konular/14_04_Sürtünmeli_Kavramalar.pdf, 15 Ağustos 2017.

[22] Özlük, M.F. ve Sayan, H.H., (2013). “Matlab GUI ile DA Motor İçin PID Denetleyicili Arayüz Tasarımı.”, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 2 (3): 10-18.

[23] Meenakshipriya, B. ve Kalpana, K., (2014). “ Modelling and Control of Ball and Beam System using Coefficient Diagram Method (CDM) based PID controller.”, Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems, 13-15 March 2014, Kanpur.

[24] Ertuğrul, H.F., (2014). 4 Kutuplu 3 Serbestlik Dereceli Karma Elektromıknatısın Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[25] Erkan, K., Yalçın, B.C. ve Garip, M., (2017). “Three-axis gap clearance I-PD controller design based on coefficient diagram method for 4-pole hybrid electromagnet”, Automatika, 58 (2): 147-167.

[26] Comnac, V., Coman, C. ve Boldişor, A.A., (2009). “Sensorless State-Space Control of Elastic Two-Inertia Drive System Using a Minimum State Order Observer”, Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures, 6 (23): 52-59.

[27] Ogata, K., (2010). Modern Control Engineering, Fifth Edition, Pearson Education Inc., New Jersey.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Adem AVCU

Doğum Tarihi ve Yeri : 12.02.1987/ Pozantı

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ademavcu01@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2018
Lisans	Makine Mühendisliği	Gaziantep Üniversitesi	2013
Lise	Sayısal	Ali ve Rukiye Özgören Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-2017	Bogaziçi Beton San. Tic. Aş.	Makine Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. Avcu, A., Bozkurt, A.F., Erkan, K., Sezer, S. ve Kurt, İ., (2018). “Comparison of IPD and Fuzzy Logic Velocity Control In Two Degree of Freedom DC Motor System”, International Journal of Engineering Science and Application (IJESA), 2 (1): 1-7.