

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI BİLİM DALI**

**ADIM MOTORUNUN SENSÖRSÜZ
POZİSYON KONTROLÜ**

Ali BAKBAK

**Danışman
Yrd.Doç. Dr. Fadıl KUYUCUOĞLU**



MANİSA-2016

TEZ ONAYI

Ali BAKBAK tarafından hazırlanan "**Adım motorunun sensörsüz pozisyon kontrolü**"adlı tez çalışması 11/01/2016 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	Yrd. Doç. Dr. Fadıl KUYUCUOĞLU
	Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Jüri Üyesi	Yrd. Doç. Dr. Özkan AKIN
	Ege Üniversitesi
Jüri Üyesi	Yrd. Doç. Dr. Mustafa NİL
	Manisa Celal Bayar Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ali BAKBAK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	III
TABLO DİZİNİ	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1. GİRİŞ	1
2. ADIM MOTORLARI	4
2.1. Tanıtım	4
2.2. Çalışma İlkesi	6
2.3. Adım Motorları Çeşitleri	7
2.3.1. Değişken Relüktanslı Adım Motorları	8
2.3.2. Kalıcı Mıknatıslı Adım Motorları	9
2.3.3. Hibrit Adım Motorları	9
2.5. Adım Motorları Sürme Yöntemleri	11
3. MOTOR MODELİ	13
4. KALMAN FİLTRESİ	18
4.1. Ayrık Zamanlı Kalman Filtresi Karşılaştırılması	18
4.2. Filtre Ayarı	21
5. DENEY DÜZENİĞİ VE KONTROL YÖNTEMİ	22
5.1. Adım Motoru	24
5.2. Mikrodenetleyici	24
5.2.1. Arduino	25
5.3. Motor Sürücüsü	28
5.4. Veri Toplama Kartı	29
5.5. PID Kontrol	30
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	32
KAYNAKLAR	44
EKLER.....	48
EK A (Simulink Matlab Fonksiyonu kodları)	48
ÖZGEÇMİŞ	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CNC	Bilgisayar sayımlı yönetim
COM	Haberleşme portu
CPU	Merkezi işlem birimi
DC	Doğru akım
DSP	Sayısal işaret işleyici
EEPROM	Elektronik olarak silinebilen programlanabilen sadece okumalı hafıza
FPGA	Alanda programlanabilir kapı dizileri
ICSP	Devre üzerinde seri programlama
LCD	Sıvı kristal ekran
LED	Işık yayan diyot
MATLAB	Matris laboratuvarı
PID	Oransal-Integral-Türev (Proportional-Integral-Derivative)
PPS	Saniyedeki darbe sayısı
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
SRAM	Durağan rastgele erişimli bellek
TTL	Transistör-transistör mantığı
TWI	İki telli arabirim
UART	Evrensel asenkron alıcı verici
USB	Evrensel seri veriyolu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Adım motoru sistemi.....	4
Şekil 2.2. Adım motorunun temel hareket gösterimi	7
Şekil 2.3. Değişken relüktanslı bir adım motoru	8
Şekil 2.4. Kalıcı mıknatıslı bir adım motoru.....	9
Şekil 2.5. İki fazlı hibrit adım motorun stator ve rotoru	10
Şekil 2.6. Farklı sürme yöntemlerine ait faz akımları	12
Şekil 3.1. İki fazlı kalıcı mıknatıslı adım motorunun elektriksel eşdeğeri.....	15
Şekil 4.1. Kalman filtresi algoritması	20
Şekil 5.1. Deney düzeneğinin blok diyagramı	22
Şekil 5.2. Deney düzeneği.....	23
Şekil 5.3. Yük momenti eğrisi.....	24
Şekil 5.4. Arduino MEGA 2560 ve pim tanımlamaları	26
Şekil 5.5. EasyDriver adım motor sürücüsü.....	28
Şekil 5.6. A3987 motor sürücüsüne uygulanan adım komutlarına göre oluşan faz akımları	29
Şekil 5.8. Geri beslemeli kontrol sistemi blok şeması	30
Şekil 6.1. Açık çevrim hız ve pozisyon değerleri	32
Şekil 6.2. Ölçülen akım değerleri.....	33
Şekil 6.3. A fazına ait ham ve filtrelenmiş akım değerleri.....	34
Şekil 6.4. Gerçek ve tahmin edilen konum değerleri	35
Şekil 6.5. MATLAB/Simulink ortamında kurulan düzene (1. Kısım).....	36
Şekil 6.6. MATLAB/Simulink ortamında kurulan düzene (2. Kısım).....	36
Şekil 6.7. Bir faza ait ölçülen ve filtrelenen akım bilgileri	37
Şekil 6.8. NI USB 6009 kartından alınan akım bilgileri	37
Şekil 6.9. Farklı hızlarda çalıştırılan motorun konum bilgisi	38
Şekil 6.10. MATLAB/Simulink ortamında kurulan benzetim düzeneği	39
Şekil 6.11. P kontrol benzetim sonucu.....	39
Şekil 6.12. PI kontrol benzetim sonucu	40
Şekil 6.13. Yük momenti ve konum zaman grafiği	41
Şekil 6.14. PI kontrol deney sonucu	42
Şekil 6.15. Farklı Kp değerleri için P kontrol deney sonucu	42

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Adım motoru parametreleri	24
Tablo 5.2. K_p , K_i ve K_d katsayı değişimlerinin sisteme etkisi.....	31

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fadıl KUYUCUOĞLU' na, yüksek lisans eğitimim sırasında desteğini ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Sezai TAŞKIN hocama, çalışmalarım sırasında maddi manevi desteklerini her zaman hissettiğim değerli bölüm hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma, hayatım boyunca hep yanımda olan, tüm düşünce ve eylemlerimi saygıyla karşılayan aileme yürekten teşekkür ederim.

Ali BAKBAK
Manisa, 2016

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Adım Motorunun Sensörsüz Pozisyon Kontrolü

Ali BAKBAK

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Fadıl KUYUCUOĞLU

Adım motorları, hassas konum kontrolü gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Açık çevrim kontrol edildiklerinde sınırlı şartlarda tatmin edici sonuçlar verseler de yüksek performans gerektiren uygulamalarda genellikle bir hız algılayıcısıyla beraber, kapalı çevrim kontrol edilirler. Kontrol yöntemleri ve yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle beraber motor kontrollerinde pahalı birer parça olan kodlayıcıları elimine etmek için çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, mekanik bir algılayıcı kullanılmadan deneysel olarak iki fazlı kalıcı mıknatıslı bir adım motorunun sürücü sistemi kurulmuştur. Mikrodenetleyici yardımıyla motor, diğer sürüş yöntemlerine nazaran daha iyi performans gösteren mikroadım yöntemi ile sürülmüştür. Motor fazlarının çektiği akımlar bir veri toplama kartı ile ölçülüp, veriler MATLAB ortamına aktarıldıktan sonra motorun matematiksel modeli kullanılarak, Kalman filtresi yardımıyla konum tahmini yapılmıştır. Konum bilgisine ulaşıldıktan sonra, önce benzetim olarak, daha sonra deneysel olarak motorun P ve PI kontrolörle kapalı çevrim konum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Adım motoru, mikroadım, konum kontrol, algılayıcısız konum tahmini, Kalman filtresi.

2016, 50 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Sensorless Position Control of Stepper Motor

Ali BAKBAK

Celal Bayar University

Graduate School of Applied and Natural Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fadıl KUYUCUOĞLU

Stepper motors are widely used to perform accurate position control. Even if they provide satisfactory solutions in open-loop control under limited conditions, they are commonly controlled by a closed-loop system with a speed sensor for high performance dynamic operation. With the development of control methods and semiconductor technology, there have been a lot of research to eliminate encoders which are the expensive part of motor control applications.

In this study, two phase permanent magnet stepper motor drive system is experimentally established without using any mechanical sensor. Motor is driven by microstepping technique with the aid of a microcontroller. Phase currents are measured by a data acquisition card and obtained datas are transferred into MATLAB software, then the position of motor is estimated by Kalman filter, using mathematical model of motor. After position information is reached, experimental studies of closed-loop position control of motor were carried out with P and PI controller, following simulation of same system.

Keywords: Stepper motor, microstepping, position control, sensorless control, Kalman filter.

2015, 50 pages

1. GİRİŞ

Adım motoru sayısal giriş işaretini ayırık mekanik harekete dönüştüren elektromekanik bir sistemdir. Uygun aralıklarla elektriksel darbeler uygulandığı takdirde adım motorunun mili adım adım döner. Adım motorları bilgisayar çevre birimleri, robotlar ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda kullanılan bir motordur. Ucuz olması ve iyi konumlanabilmesi sebebiyle hareket kontrolü uygulamalarındaki kullanımı da gittikçe artmaktadır. Çoğu zaman adım motorları açık çevrim kontrol edilirler ki böyle kontrol yöntemleri beraberinde birçok dezavantajı da getirir. Aşırı yüklenme durumlarında konumda kaymalar ve kilitlenmeler olması, çalışma aralığındaki hızlarda dönme momentinin düşmesi, yüksek güç kaybı, dinamik yüklerde kararlılığının azalması bunlara örnek olarak verilebilir [1]. Bu sorunları çözmek için günümüzde kapalı çevrim kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Rotor konumunun geri beslemesini yapan kodlayıcılı bir kontrol sistemi buna örnek olarak verilebilir. Böyle sistemlerin en pahalı parçası kodlayıcılardır. Kontrol teknolojisindeki yöntemleri, mikrodenetleyiciler ve yarıiletken anahtarlama elemanları yardımıyla kullanarak, kodlayıcı maliyetini algılayıcısız bir kontrol sistemi kurarak giderebiliriz.

Farklı tip kontrol teorisi uygulamaları robotik, havacılık ve motor kontrolü gibi alanlarda güçlü mikroişlemciler sayesinde başarıyla uygulanmıştır. Karmaşık uygulamalar farklı kontrol yöntemlerinin temel esasları kullanılarak gerçekleştirilebilir. Genelde daha iyi kontrol sonuçları elde edebilmek için algılayıcı ya da dönüştürücüler (transducer) kullanılır. Ancak algılayıcılar, fiyatlarının fazla olmasının yanı sıra yeterli çözünürlük de sağlayamayabilirler ya da hata oranları yüksek olabilir. Düşük maliyet gerektiren uygulamalarda sistemin düzgün bir modeli sayesinde ölçülmeyen parametrelerin bilgisi, gözlemci ya da filtre kullanılarak elde edilebilir.

Kalman filtreleme tekniği ölçülen gerilim ya da akım bilgilerinden, hız veya rotor akısını kestirmek için uygulanan, iyi sonuç veren yöntemlerden bir tanesidir. Kullanılan motorunun dinamiklerini ortaya koyan bir matematiksel modeli temel alır. Model ve ölçüm bozunumları dikkate alınarak başlangıçta uygun kovaryans matrisleri seçildiği takdirde, filtrenin ölçüm ve süreç hatalarına karşı gösterdiği

direnç oldukça güçlüdür. Matematiksel hesaplar gerektirdiği için pratik uygulamalarda filtre kullanmak bir sorundur. Bu sorun işlem yeteneği güçlü mikroişlemci veya DSP'lerle kolayca aşılabılır.

Literatürde adım motorlarıyla ilgili yapılmış çok sayıda çalışma vardır. Hem endüstrinin hem de akademinin ilgisini çeken adım motorunun hız kontrolüne ve pozisyon kontrolüne yönelik çalışmalar yapılmıştır. 1982'de C. S. Chen tarafından adım motorunun hız kontrolü için mikroişlemcili bir uygulama yapılmıştır. Uygulamada mikroişlemci, ayarlanabilir bir kare dalga frekans kaynağı olarak kullanılmıştır [2]. Kalıcı mıknatıslı adım motorunun pozisyon takip hatasını gidermek için dinamik bir kontrolörün tasarımı ve pozisyon kontrol uygulaması [3]'de görülebilir. Ayrıca adım motorunun açık çevrim ve kapalı çevrim kontrolleri tartışılmıştır [4]. Sürüş yöntemi olarak yarım adım veya tam adım yerine daha yüksek performans gösteren mikroadım (microstepping) tekniği kullanılmaya başlanmıştır [5].

Adım motorunun konum kontrolüne yönelik olarak geri beslemesini mekanik bir algılayıcıdan yapan kapalı döngü kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bunlara örnek olarak adım motorunun konum kontrolünü PID ile yapan [6] ve kendi kendini ayarlayan Fuzzy PID kontrolörlü sistemler verilebilir [7].

Daha sonra literatürde, algılayıcı maliyetini azaltmak adına, motorun dinamik performansını bozmadan, şaftından hız algılayıcıları elimine etmek için çalışmalar yapılmıştır [8]. Bu çalışmalarda durum tahmini konusunda iyi performans gösterdiği için Kalman filtresi geniş uygulama alanı bulmuştur [9,10]. Kalman filtresiyle hız algılayıcısız konum kontrolü asenkron motorlarda [11] ve hibrit adım motorlarında uygulanmıştır [12,13]. Kalıcı mıknatıslı adım motorları için algılayıcısız hız ve konum tahmini simülasyon olarak [14]'de yapılmıştır. Yine aynı motorun hız algılayıcısız pozisyon kontrolü için MATLAB ortamında kontrolör tasarımı [15]'de yapılmıştır.

Bu çalışmada, mekanik bir algılayıcı kullanılmadan deneysel olarak iki fazlı bir adım motorunun sürücü sistemi kurulmuş ve konum tahmini için kalman filtresi uygulanmıştır. Mikrodenetleyici yardımıyla kalıcı mıknatıslı iki kutuplu bir adım

motoru, mikroadım yöntemi ile sürülmüş ve fazlarının çektiği akımlar bir veri toplama kartıyla ölçülmüştür. Motorun matematiksel modeli kullanılarak konumu hesaplanmıştır. Hesaplanan konumla geri besleme yapılarak P ve PI kontrolör ile adım motorunun konum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

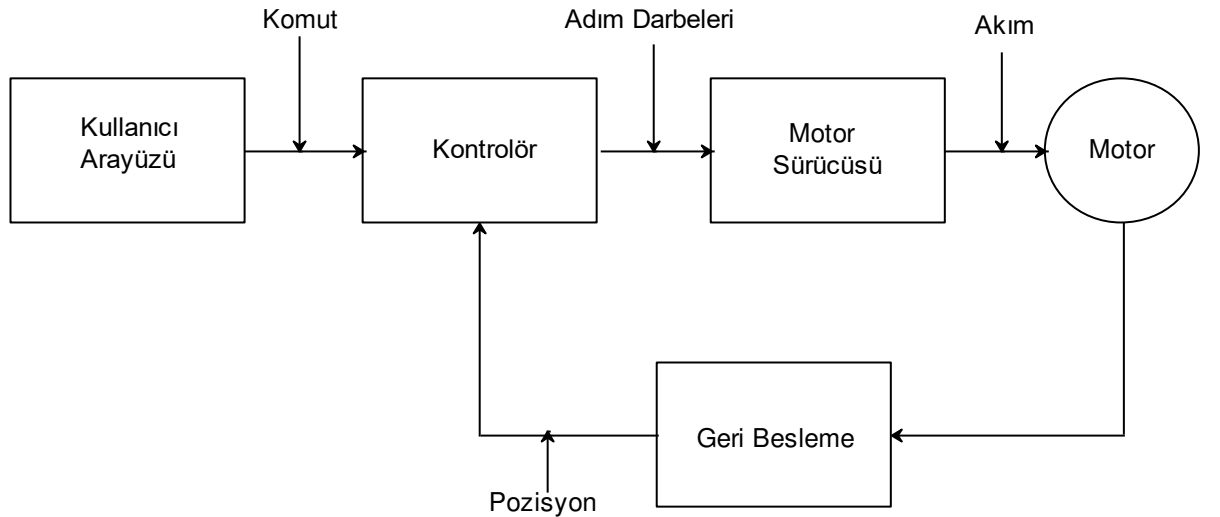
Bölüm 2'de adım motorları hakkında genel tanıtım yapılmış, çalışma ilkeleri anlatılmış, adım motoru çeşitleri hakkında bilgi verilmiş ve sürme yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bölüm 3'de adım motorunun durum değişkenleri cinsinden dinamik denklemleri elde edilmiştir. Bölüm 4'de Kalman filtresi hakkında bilgi verilmiş, ayrık zamanlı kalman filtresi denklemleriyle beraber anlatılmış ve filtre ayarından bahsedilmiştir. Bölüm 5'de kurulan deney düzeneği hakkında bilgi verilmiş, deneyde kullanılan malzemeler tanıtılmış ve konum kontrolü için uygulanan kontrol yöntemi açıklanmıştır. Bölüm 6'da deneysel ve benzetim çalışmalarından elde edilen veriler paylaşılmış, değerlendirilmiş ve konu hakkında ileride yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. ADIM MOTORLARI

2.1. Tanıtım

Adım motorları fazlarına uygulanan elektriksel darbeleri ayırık mekanik harekete çeviren elektromekanik cihazlardır. Konum kontrolünde yüksek çözünürlük ve hassasiyet elde etmek için tasarlandıkları ve optimize edildikleri için genellikle asgari hata gerektiren, hassas konum kontrolü uygulamalarında kullanılırlar. Adım motorları sargılarına uygun sinyaller gönderilerek kontrol edilirler [16]. Herhangi bir uyarımda rotorun açısal konumunu ne kadar değiştireceği, motorun adım açısına bağlıdır. Adım açısı, motorun yapısına bağlı olarak 90, 45, 18, 7.5, 1.8 derece veya başka açılarda da olabilir. Motorun dönüş yönü uygulanan sinyallerin sırası değiştirilerek saat yönünde veya saat yönünün tersine olabileceği gibi, hızı da uygulanan sinyallerin frekansı ile değiştirilebilir.

Bir adım motoru sistemi genellikle üç temel bileşenden oluşur: Kontrolör, sürücü ve motor. Genellikle bir kullanıcı arayüzü de eklenir. Açık çevrim denetiminin yeterli performans gösteremediği hassas konumlandırma gerektiren uygulamalar söz konusu olduğu zamanlarda da geri besleme yapılır. Şekil 2.1'de klasik bir adım motoru sisteminin blok şeması görülebilir.



Şekil 2.1. Adım motoru sistemi

Kullanıcı arayüzü, sıradan bir kullanıcının hedef konumu seçebilmesi, hareket kontrol profillerini komuta edebilmesi gibi amaçlara yönelik olarak hazırlanmış bir yazılımdır. Kontrolör, kullanıcı arayüzünden ve varsa geri besleme ünitesinden gelen bilgileri işleyip adım ve yön dizilerini üretir. Motor sürücüsü ise kontrolörden aldığı komutlara göre motoru sürmek için gerekli akımı üretir. Fazlarına gelen elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren motor da yükü istenilen hedefe taşımak için gerekli momenti üretir. Geri besleme cihazı ise motor konumunu algılar ve kontrolöre bilgi verir.

Adım motorları bilgisayar çevre birimleri, robotlar, biyomedikal uygulamalar, sayısal kontrol sistemleri ve CNC tezgahları gibi birçok alanda kullanılan bir motordur. Adım motorunun bu kadar çok kullanım alanı bulmasının sebebi sahip olduğu bazı avantajlardan ötürüdür. Bu üstünlüklerden bazılarını sıralamak gerekirse:

- Sayısal giriş işaretleriyle sürülebildiği için bilgisayar veya mikrodenetleyicilerle kolayca kontrol edilebilirler.
- Adım motorlarının yön ve devir sayısı gibi değerlerinin mikrodenetleyici veya bilgisayarla kontrol edilebilmesi, motorun konumunun bilinebilmesini sağlamaktadır. Bu özelliği de hassas konum kontrolüne izin verir.
- Açık çevrim olarak çalıştırıldıklarında bile tatmin edici sonuç vermesi, daha basit ve az maliyetle hız, ivme veya konum kontrolünün gerçekleştirilebilmesine olanak tanır.
- Hız aralıkları geniştir.
- Sürekli dur-çalış yapması, çalışma esnasında aniden durdurulması, aniden ters yönde sürülmesi veya aşırı yüklenmesi motora herhangi bir zarar vermez.
- Mekanik yapısı basit olduğundan bakım gerektirmezler.

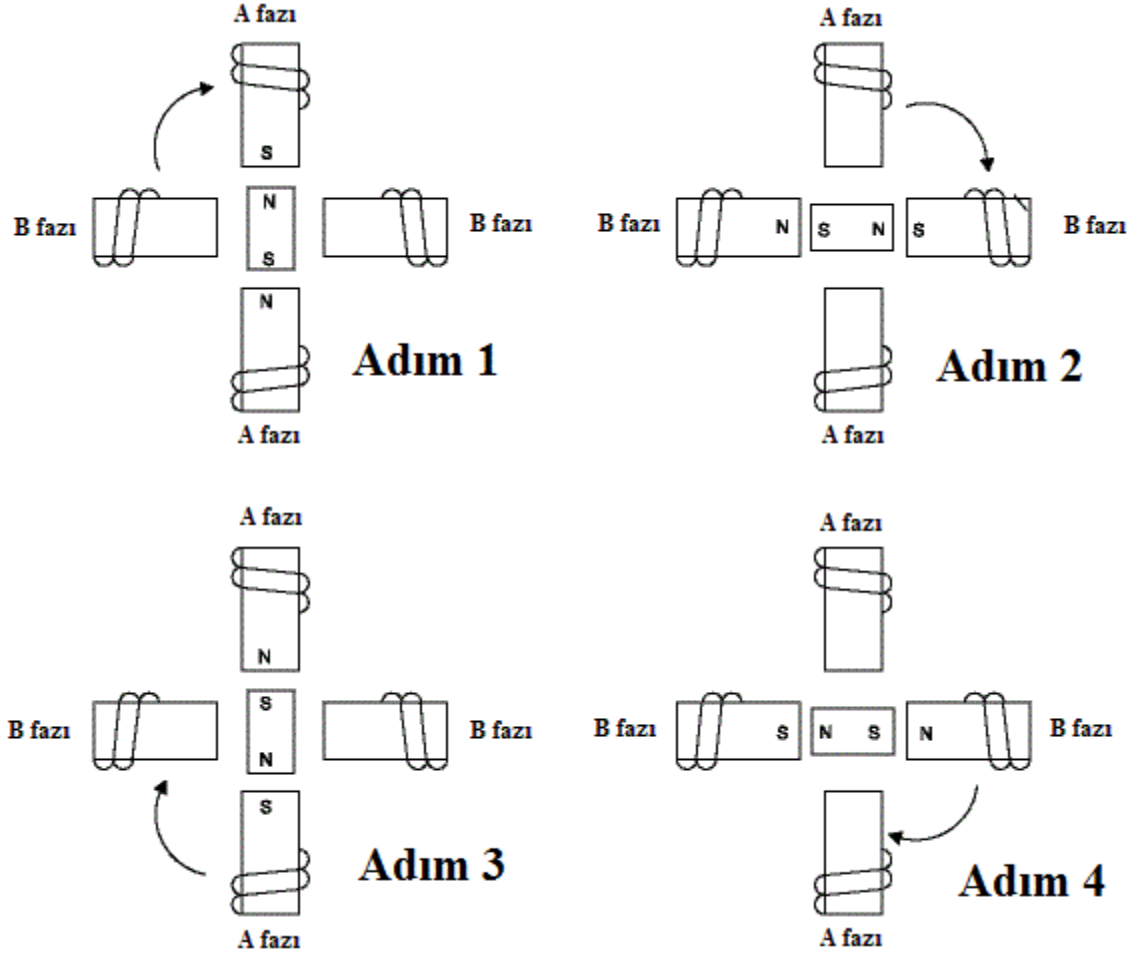
Adım motorlarının birçok üstünlüklerine karşılık bazı dezavantajları da muhakkak ki vardır. Bunlardan birkaçını sıralamak gerekirse:

- Adım aralıkları sabit olduğundan rotordan alınan hareket sabit değil, kesik kesiktir. Bu durum da motorun sarsıntılı çalışmasına sebebiyet verir.

- Klasik sürücülerle sürüldüklerinde verimleri düşüktür.
- Aşırı yüklenme veya yüksek hızlarda çalışma durumlarında açık çevrim kontrol ediliyorsa konum hatası oluşturabilirler.
- Çıkış gücü ve momentı sınırlıdır [17].

2.2. Çalışma İlkesi

Elektrik motorlarının geneli enerji verildiği zaman döner. Enerjisi kesildiği zaman dönme olayı son bulur. Adım motorlarında ise durum bundan farklıdır. Motora sayısal giriş işareti uygulandığı zaman belirli bir miktar döner ve durur. Girişine tek bir darbe uygulandığında rotor tek bir adım atıp dururken, darbeler uygulanmaya devam ederse, motor adım adım döner. Anlatılan bu durum bütün adım motorlarının çalışma prensibini oluşturur. Şekil 2.2'de iki fazlı bir motor için tipik bir adım dizisi gösterilmiştir. Birinci adımda A fazı enerjilendirilir. Bu, zıt kutupların birbirini çekmesinden dolayı rotoru gösterilen konumda manyetik olarak kilitler. A fazının enerjisi kesilip B fazının açılınca, rotor saat yönünde 90° döner. Adım 3'de, B fazının enerjisi kesilip adım 1'dekinin tersine A fazı enerjilendirildiğinde rotor 90° daha döner. Adım 4'de A fazının enerjisi kesilip, B fazı adım 2'dekinin aksine enerjilendirildiği zaman rotor bir 90° daha döner. Bu sekansın tekrarlanması rotoru 90° 'lik açılarla saat yönünde döndürür.



Şekil 2.2. Adım motorunun temel hareket gösterimi [18]

2.3. Adım Motoru Çeşitleri

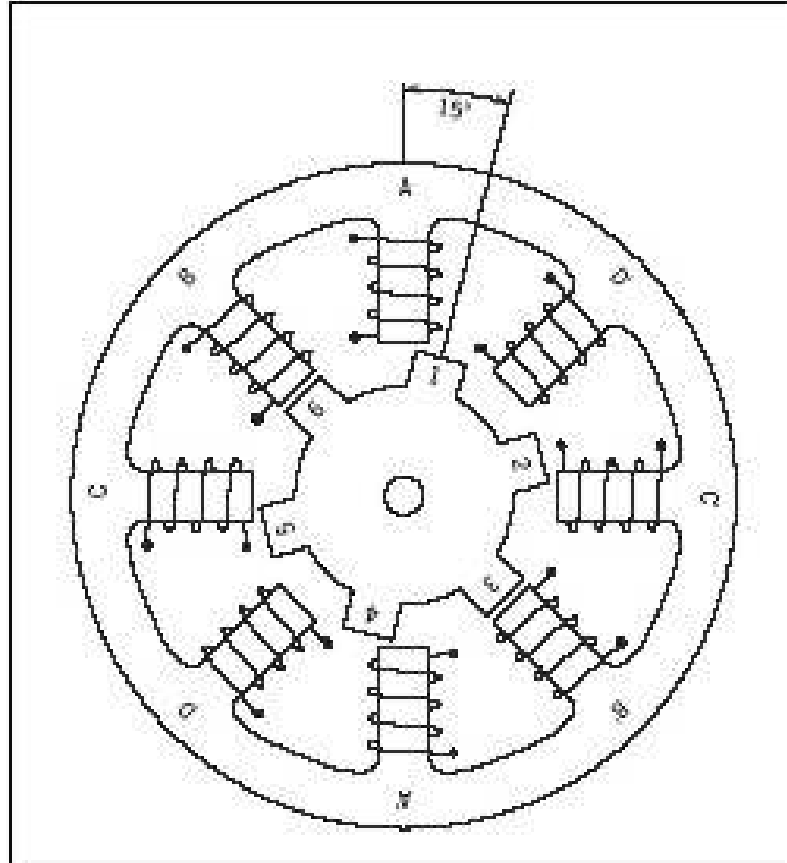
Adım motorları, yapıları bakımından temel olarak üç sınıfa ayrılırlar: Kalıcı mıknatıslı, değişken relüktanslı ve bu türlerin iyi özelliklerinin birleşmesiyle oluşturulan hibrit motor türüdür.

Bağlantı şekillerine göre ise, adım motorları ikiye ayrılırlar: Tek kutuplu (unipolar) ve çift kutuplu (bipolar). Tek kutuplu motorlarda besleme tek yönlüdür ve dolayısıyla tek yönde akım iletir. 5 ve 6 kablolu çeşitleri vardır. Çift kutuplu motorlarda faz başına tek sargı düşer. Sargıdaki akımı ters yönde akıtmak için manyetik kutbu ters yöne döndürmek gereklidir. Her iki yönden de akım akıtılabilir. Genellikle 4 ucu bulunur. Kıyaslamak gerekirse, tek kutuplu motorların kontrolü kolaydır. Buna karşın çift kutuplu motorlarda daha az bobin olduğundan dolayı daha

kalın bobinler kullanılabilir. Bu durum motorun daha fazla akım çekerek, yüksek torklarda çalışabilmesine olanak sağlar [19].

2.3.1 Değişken Relüktanslı Adım Motorları

Adım motorları arasında yapısı en basit olanıdır. Silindirik yumuşak demir rotoru ve rotor yüzeyinde açılmış oluklar vardır. Bu oluklar dişli teker gibi gözüktür. Rotor ve stator diş sayısı birbirinden farklıdır. Bu farklılık sayesinde motorun rotorundan hassas hareket elde edilir. Şekil 2.3'de bir örneği gösterilen değişken relüktanslı adım motorunun statoru ve rotoru arasındaki diş sayısı farkı, eşleşen dişlerden bir sonraki dişler arasında açısal bir fark oluşturur. Şekilde görülen motor için oluşan fark 15 derecedir. Bu açı değerine adım açısı denir.

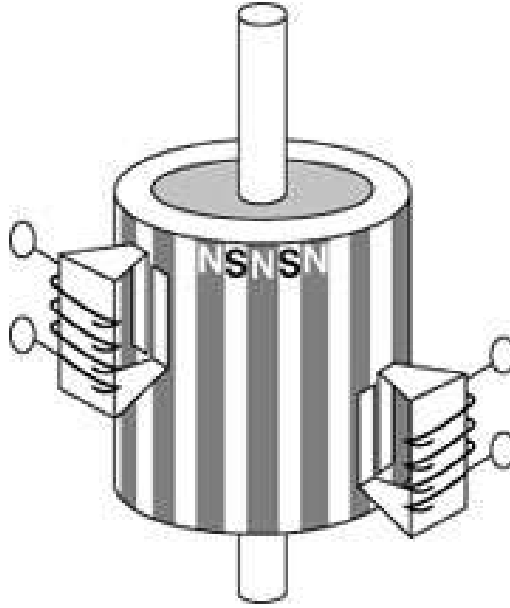


Şekil 2.3. Değişken relüktanslı bir adım motoru [20]

Stator sargılarına uygun sırada enerji verilerek rotor hareketi sağlanır. Bu tip adım motorlarının sargılarından enerji kesildiğinde rotor boşta kalır. Dışarıdan uygulanan mekanik etkiyle döndürülebilir [21].

2.3.2 Kalıcı Mıknatıslı Adım Motorları

Kalıcı mıknatıslı adım motorları, sabit mıknatıslı bir rotordan ve sargılı bir stator oluşurlar. Herhangi bir faz sargısı enerjilendirildiğinde, stator sargısında oluşan manyetik kutuplanmaya uyum sağlayacak şekilde rotor açısally bir dönme hareketi yapar. Statorun diğery faz sargıları da uygun sırada enerjilendirildiğı takdirde bu dönme işleminin sürekliliğı sağlanmış olur. Statorun bir faz sargısına gerilim uygulandığında rotor bir adım hareketi gerçekleştirerek sabit bir konumda kalır. Rotorun bulunduğı konumda üretilen momente "tutma momenti" denir. Bu değery aynı zamanda rotoru bulunduğı konumdan koparmak için gerekli olan momenttir. Sargılarına enerji verilmese bile, sabit mıknatıs ve stator arasında küçük miktarda bir manyetik kuvvet oluşur. Bu kuvvete "tetikleme" ya da "artık moment" denir. Bu moment, adım motorunu elle döndürölürken farkedilebilir ve ekseriyetle tutma momentinin onda biri kadardır.

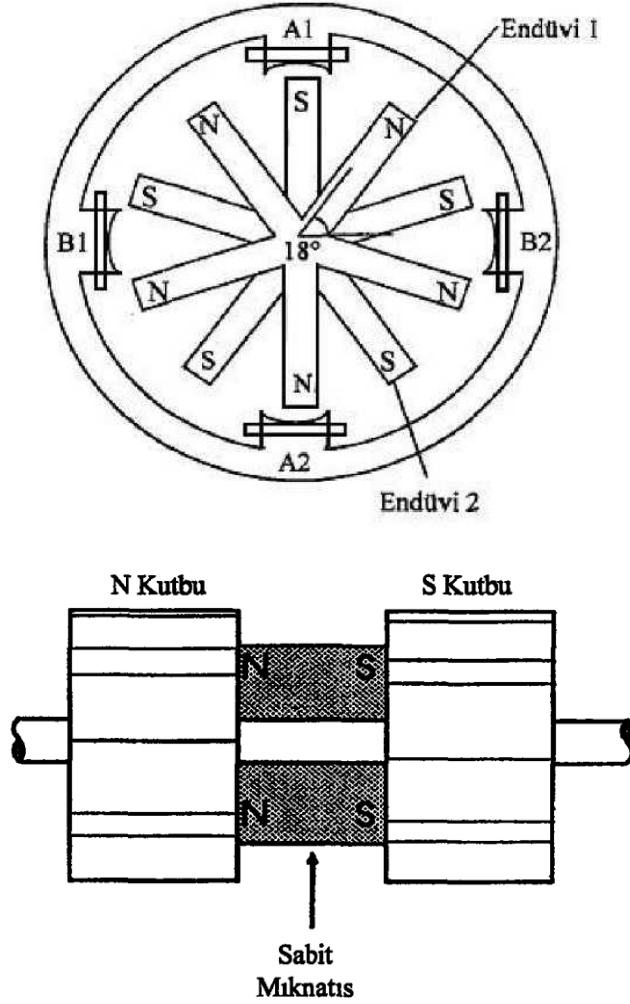


Şekil 2.4. Kalıcı mıknatıslı bir adım motoru [15]

2.3.3 Hibrit Adım Motorları

7.5° adım açısının altında kalıcı mıknatıslı adım motoru üretmek oldukça karmaşıktır. Daha küçük adım açıları, kalıcı mıknatıslı adım motorları ile değışken relüktanslı adım motorlarının birleştirilmesiyle elde edilebilir. Bu birleşimden elde

edilen hibrit adım motoru, kalıcı mıknatıslı adım motorunun moment avantajı ile değişken relüktanslı adım motorunun hassasiyet özelliğini içinde barındırır.



Şekil 2.5. İki fazlı hibrit adım motorun stator ve rotoru[22]

Şekilde 2.5'de görüldüğü gibi hibrit adım motorlarında rotor, değişken relüktanslılarda olduğu gibi çok dişlidir. Ayrıca rotorun mili çevresinde eksensel yol boyunca bir sabit mıknatıs vardır. Sabit mıknatısın kendine dik ekseninde ürettiği manyetik alan sonucu Endüvi-1 üzerindeki bütün kutuplar N olurken, Endüvi-2 üzerindeki bütün kutuplar S olur. Rotor dişleri manyetik akının akacağı yolları belirler. Diğer tip adım motorlarında olduğu gibi, hibrit motorun rotoru da stator sargılarının uygun dizide enerjilendirilmesiyle hareket ettirilir [22].

2.5 Adım Motoru Sürme Yöntemleri

Adım motorlarında rotor hareketini sağlamak için, stator sargılarının ürettiği manyetik alanın yönetilmesi ve rotor akısının sürülmesi gereklidir ki bu işlem sargılardan akan akımın kontrol edilmesiyle mümkündür. Adım motorunun uyarım teknikleri aşağıda verilmiştir.

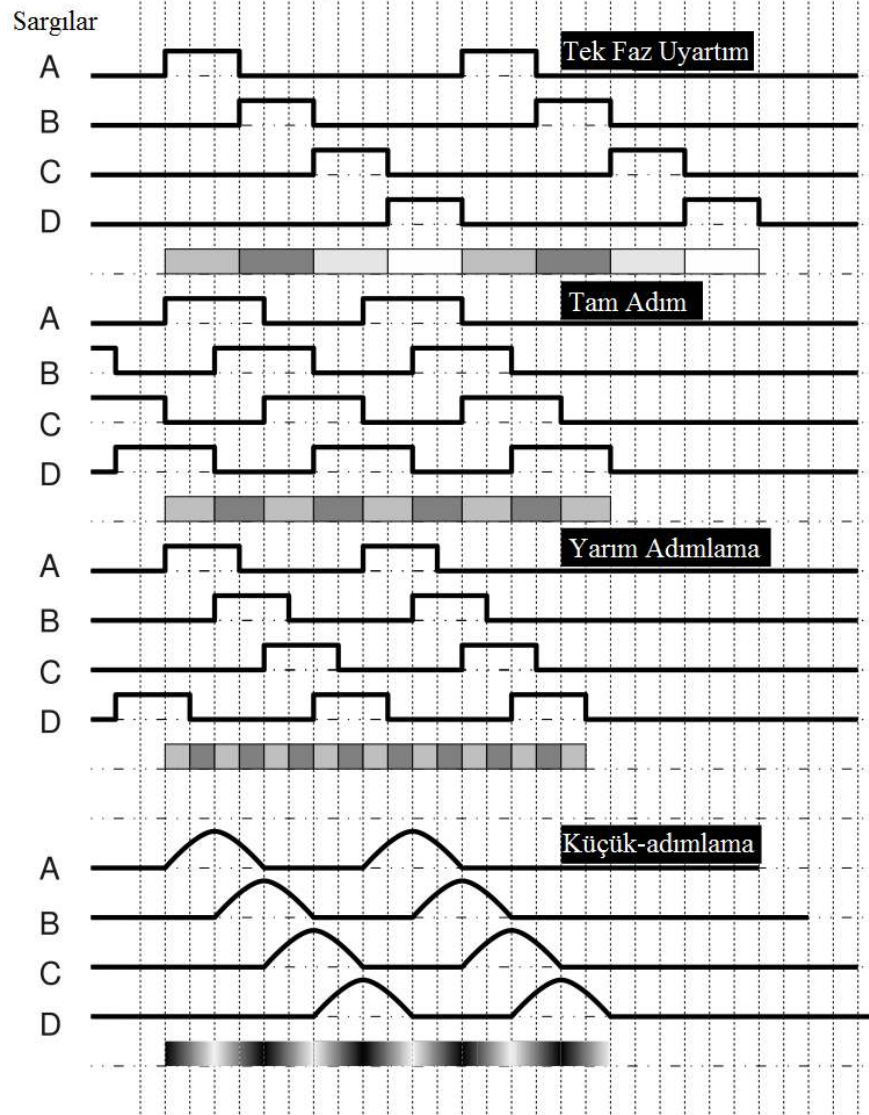
Tek Faz Uyarımı: Bu sürüş yönteminde tek bir zamanda sadece bir sargı enerjilendirilir. Nadiren kullanılan bu yöntemde motor, anma momentinden çok daha düşük bir momente sahip olur. Çift kutuplu bir motor için bir dişlik dönme 4 adımda gerçekleşir. Rotoru 25 dişe sahip bir motorun tam bir tur dönmesi için 100 adıma ihtiyaç duyulur. Böyle bir motor için her bir adım 3.6° 'dir.

Tam Adım: Adım motorları için sıklıkla kullanılan sürüş yöntemidir. İki faz sürekli aktif durumdadır. Bu yüzden motor en yüksek anma momentini sağlar. Bir faz kapatılır kapatılmaz, diğer faz enerjilendirilir. Tek faz uyarımla aynı adım sayısına sahiptir ancak moment konusunda farklılık vardır.

Yarım Adımlama: Bu yöntemde sürme işlemi, tam adım ve tek faz uyarımını sırasıyla takip eder. Bu sayede açışal çözünürlük artar. Ancak motor tam adım konumunda (tek bir fazın uyarıldığı) daha az momente sahip olur. Bu durum akım artırılarak telafi edilebilir. Tam adımla veya tek faz uyarımla sürülen bir motor, herhangi bir elektronik değişiklik yapılmadan yarım adımlama ile de sürülebilir. Yukarıda bahsi geçen motor için böyle bir değişiklik yapılırsa, bir dişlik dönme 8 adımda gerçekleşir. Dolayısıyla bir tam tur 200 adım olur ve her bir adım tek faz uyarımının yarısı yani 1.8° olur.

Mikroadımlama (Microstepping): Stator sargılarından geçen akımlar sinüs eğrisi şeklinde olduğu için "sinüs kosinüs mikroadımlama" olarak da adlandırılır. Diğer yöntemlerde motor, bir adımdan diğerine geçerken sarsıntı meydana gelir. Ancak mikroadımlamada motor hareketi daha pürüzsüzdür. Adımlar daha küçüktür. Her bir adımda motora gönderilen akım manipüle edilerek çözünürlük artırılabilir. Bu çözünürlük sürtünme, yapışma, mekanizmadaki parçalar arasındaki boşluktan kaynaklanan hareket kaybı gibi sebeplerden ötürü sınırlıdır [23].

Farklı sürme yöntemlerinde fazlardan akan akımlar aşağıdaki şekilde görülebilir.



Şekil 2.6. Farklı sürme yöntemlerine ait faz akımları [23]

3. MOTOR MODELİ

Tez çalışmasında iki fazlı kalıcı mıknatıslı adım motoru kullanılmıştır. Motor konumunun akım veya gerilim bilgisinden hesaplanabilmesi için motorun matematiksel modeline ihtiyaç vardır. Bu bölümde adım motorunun matematiksel denklemlerinin oluşturulması ve açısal hız ve konumun teorik olarak hesaplanmasına değinilecektir.

İki fazlı kalıcı mıknatıslı adım motorları için A ve B fazları arasındaki elektriksel açı bilindiği üzere 90° 'dir. Dolayısıyla bir fazda oluşan akı

$$\lambda_a = \lambda_{a,i_a} + \cos(90^\circ) \lambda_{a,i_b} + \lambda_{a,rpm} \quad (3.1)$$

$$\lambda_a = \lambda_{a,i_a} + \lambda_{a,rpm} \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

λ_a : A fazında oluşan toplam akıdır.

λ_{a,i_a} : A fazında i_a 'dan kaynaklanan akıdır.

λ_{a,i_b} : A fazında i_b 'den kaynaklanan akıdır.

$\lambda_{a,rpm}$: A fazında rotorun sürekli mıknatısından dolayı oluşan akıdır.

Eğer sarımlar özdeş olarak kabul edilirse, aynı eşitlikler B fazı içinde geçerli olur ve özetle

$$\lambda_a = \lambda_{a,i_a} + \lambda_{a,rpm} \Rightarrow \lambda_a = L_{sa} i_a + \lambda_m \cos(N_r R \theta_m) \quad (3.3)$$

$$\lambda_b = \lambda_{b,i_b} + \lambda_{b,rpm} \Rightarrow \lambda_b = L_{sb} i_b + \lambda_m \sin(N_r \theta_m) \quad (3.4)$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada;

L_{sa} : A fazının öz indüktansıdır.

λ_m : Rotorun sürekli mıknatısının faz üzerinde oluşturduğu akının genliğidir.

N_r : Adım motorunun rotorundaki bir kutbun üzerindeki toplam diş sayısıdır.

θ_m : Rotorun herhangi bir andaki konumudur.

Motorun statorunun bir fazına bir V gerilimi uygulandığı zaman, R motorun faz sargı direnci, i motorun ilgili faz sargılarından geçen akım ve λ 'da motorun fazında oluşan akı olmak üzere;

$$v = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.5)$$

eşitliği geçerli olur. Bu eşitlik her iki faz yazılacak ve Denklem 3.3 ve 3.4'de verilen toplam akı denklemleri yerlerine yazılacak olursa,

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \Rightarrow \quad (3.6)$$

$$v_a = R_a i_a + \frac{d(L_{sa}i_a + \lambda_m \cos(N_r \theta_m))}{dt} \Rightarrow \quad (3.7)$$

$$v_a = R_a i_a + L_{sa} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_{sa}}{dt} - N_r \lambda_m \frac{d\theta_m}{dt} \sin(N_r \theta_m) \quad (3.8)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \Rightarrow \quad (3.9)$$

$$v_a = R_a i_a + L_{sa} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_{sa}}{dt} - N_r \lambda_m \omega_m \sin(N_r \theta_m) \quad (3.10)$$

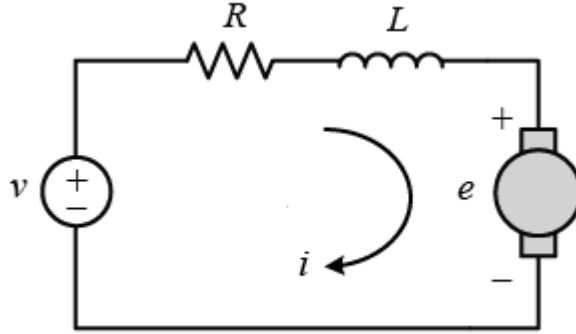
$$v_b = R_b i_b + L_{sb} \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{dL_{sb}}{dt} - N_r \lambda_m \omega_m \sin(N_r \theta_m) \quad (3.11)$$

eşitlikleri elde edilir. Motorun fazlarına ilişkin indüktansların sabit olduğu ve doyuma girmediği, sürekli mıknatısların sıcaklıkla değişmediği ve bu mıknatısların hareketinden dolayı stator sarımlarında endüklenen gerilimin sinüsel değiştiği varsayımları yapılırsa, faz gerilimleri,

$$v_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} - N_r \lambda_m \omega_m \sin(N_r \theta_m) \quad (3.12)$$

$$v_b = R i_b + L \frac{di_b}{dt} + N_r \lambda_m \omega_m \cos(N_r \theta_m) \quad (3.13)$$

şeklinde yazılabilir. $-N_r\lambda_m\omega_m\sin(N_r\theta_m)$ ifadesini motorun a fazına ilişkin ters elektromotor kuvvettir. Benzer şekilde b fazının ters elektromotor kuvveti ise $N_r\lambda_m\omega_m\cos(N_r\theta_m)$ 'dir. Elde edilen eşitliklere göre motorun bir fazına ait elektrisel eşdeğer devre Şekil 3.1'de görülebilir.



Şekil 3.1 İki fazlı kalıcı mıknatıslı adım motorunun elektrisel eşdeğer devresi

Adım motorunun mekanik denklemleri,

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_e - T_L}{J} \quad (3.14)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (3.15)$$

şeklinde [16]. Burada T_L yük momenti, J rotorun ve yükün ataletidir. Denklemlerde T_e yani motorun ürettiği dinamik momenti bulabilmek için tümler enerji eşitliği yazılacak olursa[24],

$$W_C = \frac{1}{2}(L_s i_a^2 + L_s i_b^2) + \lambda_m i_a \cos(N_r \theta_m) + \lambda_m i_b \sin(N_r \theta_m) + W_{PM} \quad (3.16)$$

$$T_e = \frac{\partial W_C}{\partial \theta_m} = N_r \theta_m (-i_a \sin(N_r \theta_m) + i_b \cos(N_r \theta_m)) \quad (3.17)$$

Burada W_{PM} adım motorunun sürekli mıknatıslarının sahip olduğu manyetik enerjidir. (3.16) ve (3.17) denklemlerindeki $N_r\lambda_m$ ifadeleri yerine kısaca K_m yani motor dönme momenti sabiti yazacak olursa özetle iki fazlı bir kalıcı mıknatıslı adım

motorunun durum değişkenleri cinsinden dinamik denklemleri aşığıdaki biçimde elde edilir.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri_a + K_m\omega_m \sin(N_r\theta_m) + v_a) \quad (3.18)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri_b - K_m\omega_m \cos(N_r\theta_m) + v_b) \quad (3.19)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(-i_a K_m \sin(N_r\theta_m) + i_b K_m \cos(N_r\theta_m) - B\omega - T_L) \quad (3.20)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad (3.21)$$

Yukarıdaki denklemler durum-uzay şekline dökülecek ve

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.22)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.23)$$

(3.22) ve (3.23)'deki genel durum-uzay modeline uydurulacak olursa durum vektörü,

$$x = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

giriş vektörü,

$$u = [v_a \quad v_b \quad 0 \quad 0] \quad (3.25)$$

ve çıkış vektörü,

$$y = [\theta] \quad (3.26)$$

olur. Durum matrisi,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & 0 & K_m \sin(N_r \theta) & 0 \\ 0 & \frac{-R}{L} & -K_m \cos(N_r \theta) & 0 \\ \frac{-K_m}{J} \sin(N_r \theta) & \frac{K_m}{J} \cos(N_r \theta) & \frac{-B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

giriş matrisi,

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

çıkış matrisi,

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (3.29)$$

ve doğrudan iletim matrisi,

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

olur [1].

4. KALMAN FİLTRESİ

Kalman Filtresi, durum uzayı modeli ile gösterilen bir dinamik sistemde, modelin önceki bilgileriyle birlikte giriş ve çıkış bilgilerinden sistemin durumlarını tahmin edilebilen bir filtredir [1]. 1960'larda Rudolf Kalman tarafından geliştirilen ve birçok mühendislik konusunda uygulama alanı bulan Kalman Filtresi, sistemin durumu hakkında optimize edilmiş bir tahmin sağlayan bir algoritmadır. Tahmini yaparken sistemdeki gürültüleri ve ölçüm hatalarını da göz önünde bulundurur. Algoritma, giriş verileri üzerinde özyinelemeli ve gerçek zamanlı çalışarak hataları en az-kareler eğriye sığdırma yöntemi ile filtreler ve sistemin fiziksel karakteristiklerinin modellenmesi ile üretilen gelecek durumun matematiksel tahminine göre optimize eder. Gelecek durumu hesaplamak için önceki tüm verileri kullanmak yerine, bir önceki adımın verileri kullanılır. Bu sayede veri saklanması gerek olmadığından, çok büyük hafızalara ihtiyaç yoktur [25].

4.1 Ayrık Zamanlı Kalman Filtresi

Ayrık zamanlı kontrol edilen doğrusal bir sistemin $x(k) \in R^n$ durumlarını tahmin etmek için Kalman filtresi kullanılırken aşağıda tanımlanmış olan stokastik fark denklemlerinden yararlanır.

Durum denklemi;

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) + v(k) \quad (4.1)$$

Çıkış denklemi;

$$z(k) = H(k)x(k) + w(k) \quad (4.2)$$

Burada $v(k)$: k zamanındaki işlem gürültüsü, $w(k)$: ölçüm gürültüsü, A: sistem matrisi, B: giriş matrisi, H: çıkış matrisi, $u(k)$: giriş vektörü, $x(k)$: durum vektörü ve $z(k)$: çıkış vektörü'dür. İşlem ve ölçüm gürültülerinin sıfır ortalamalı, rastgele değerlerden oluşan birer beyaz gürültü olduğu varsayılır.

Kalman filtresi eşitlikleri iki gruba ayrılabilir: Güncelleme ve Tahmin. Tahmin aşamasında, bir önceki iterasyonda yapılan durum tahmini ve ölçülen giriş büyüklükleri kullanılarak o anki adıma ait durum tahmini yapılır. Güncelleme aşamasında ise, son ölçümler ve Kalman kazancı ile tahmin edilen durumlar güncellenir. Güncelleme denklemleri bir nevi düzelticidir. Yani Kalman filtresi, ayrık zamanlı doğrusal sistemlere özyinelemeli çözüm sağlayan bir öngörme-düzeltilme (predictor-corrector) algoritmasıdır.

Güncelleme ve tahmin adımlarının denklemleri aşağıda verilmiştir.

Tahmin adımı:

Durumların tahmini:

$$\hat{x}(k+1|k) = A(k)\hat{x}(k) + B(k)u(k) \quad (4.3)$$

Durum hataları kovaryans matrisinin tahmini:

$$P(k+1|k) = A(k)P(k)A^T(k) + Q(k) \quad (4.4)$$

Güncelleme adımı:

Kalman kazancının güncellenmesi:

$$K(k) = P(k|k-1)H^T(k)(H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R(k))^{-1} \quad (4.5)$$

Durumların güncellenmesi:

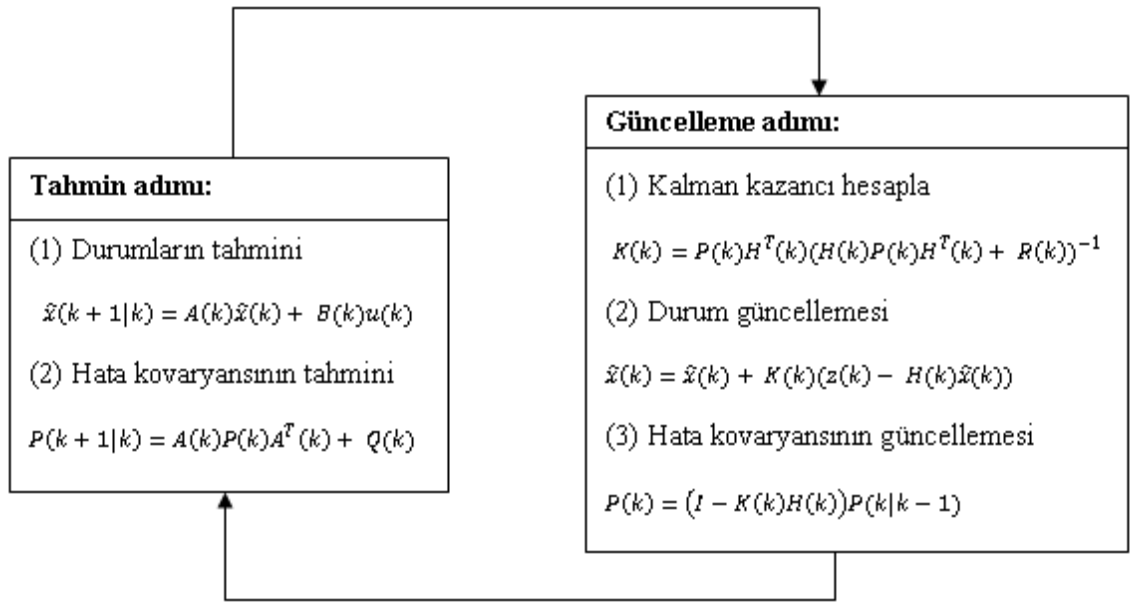
$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)(z(k) - H(k)\hat{x}(k|k-1)) \quad (4.6)$$

Durum hataları kovaryans matrisinin güncellenmesi:

$$P(k) = (I - K(k)H(k))P(k|k-1) \quad (4.7)$$

Tahmin adımı denklemlerinde k zamanında, bir sonraki adımda kullanılmak üzere durum ve kovaryans matrisleri hesaplanır. Güncelleme adımında ilk iş Kalman

kazancı $K(k)$ 'yı hesaplamaktır. Daha sonra gerçek ölçüm $z(k)$ elde edilir. Gerçek ölçüm ve (4.5) denkleminde elde edilen kalman kazancıyla durum güncellemesi yapılır. Son olarak da durum hataları kovaryans matrisi güncellenir. Şekil 4.1'de Kalman Filtresinin algoritması görülebilir. Bu işlemler bir döngü halinde tekrar eder. güncelleme ve tahmin adımları bittikten sonra özyinelemeli algoritma önceki durumda elde edilen tahminlere göre tekrar başa döner. Bu durum Kalman filtresinin sağladığı büyük avantajlardan bir tanesidir. Weiner filtresi gibi önceki tüm verileri kullanmak yerine sadece önceki adımdaki durumları kullanarak tahmin yapar.



Şekil 4.1 Kalman filtresi algoritması

4.2 Filtre Ayarı

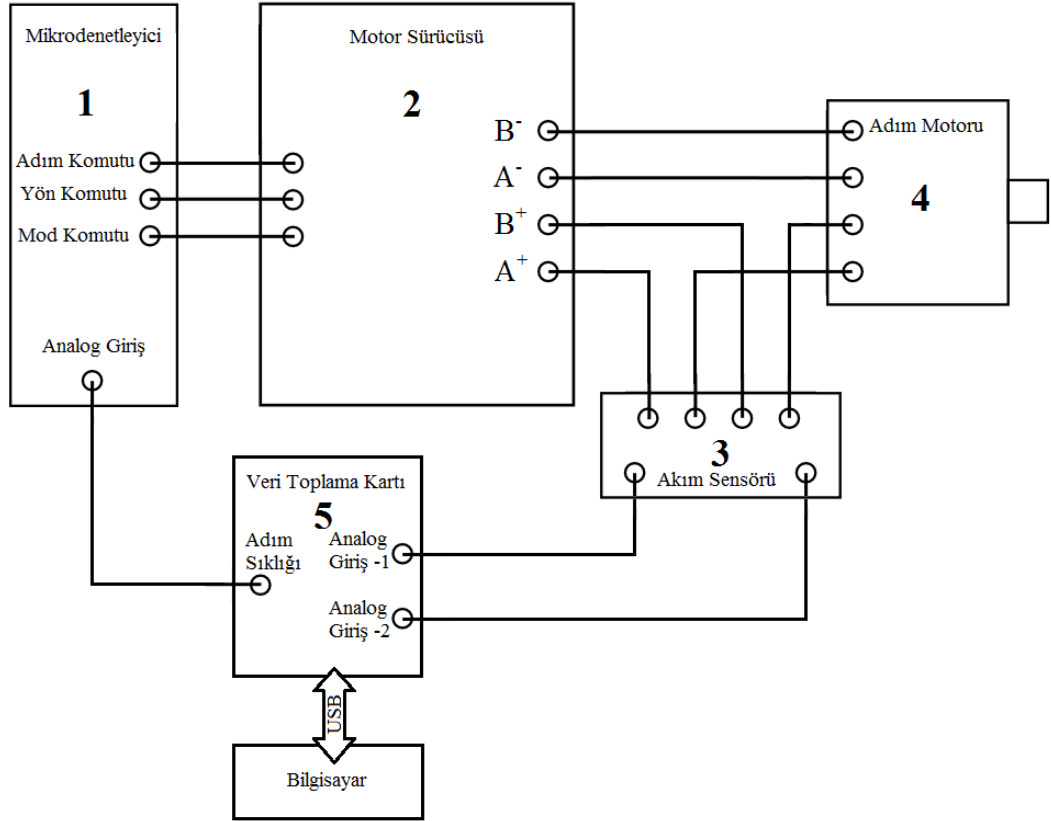
Kalman filtresinden iyi performans alabilmek için gürültü matrisi $Q(k)$ ve ölçüm hata kovaryans matrisi $R(k)$ 'nin ayarlanması gereklidir. Bu değerler genellikle filtre işlemleri başlatılmadan önce ayarlanır. Bu durum hata kovaryans matrisi $R(k)$ için mantıklıdır çünkü ölçüm hatalarına karar vermek için algılayıcıları sisteme bağlamadan önce birkaç örnek alabiliriz. Ayrıca bu başlangıç değerlerini hesaplamak için de gereklidir.

$Q(k)$ 'nın belirlenmesi çoğu zaman $R(k)$ 'dan daha zordur. Örneğin gürültü kaynağı genellikle sistem dinamiklerinin belirsizliklerini temsil eder. Uygun bir $Q(k)$

seçilerek, kötü bir model daha güvenilir hale getirilebilir. Eğer modeldeki belirsizliklerin fazla olduğu düşünülüyorsa, daha yüksek $Q(k)$ değerleri seçilmelidir. Filtrenin iyi performans göstermesi uygun $R(k)$ ve $Q(k)$ seçimine bağlıdır. Bu değerlerin seçimi için sıklıkla istatistiksel yöntemler kullanılır [15].

5. DENEY DÜZENEGİ VE KONTROL YÖNTEMİ

Bu bölümde mekanik bir algılayıcı kullanılmadan iki fazlı bir adım motorunun konum tahmini ve konum kontrolü için hazırlanan deneysel düzenek ve yazılımı anlatılacaktır. Adım motorunun sürülmesi ve çektiği akımların ölçülmesi için kurulan deney düzeneğinin blok şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Deney düzeneğinin blok diyagramı

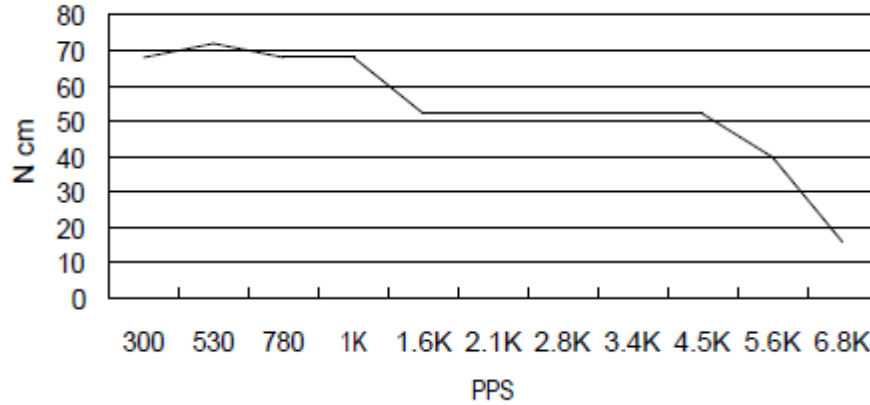
Burada motor sürücüsüne adım, yön ve sürüş yöntemi komutlarının gönderilmesinin yanı sıra veri toplama kartının analog çıkışını okumak için Arduino Mega 2560 mikrodnetleyicisinden faydalanılmıştır. Gelen komutlara göre motorun fazlarına uygun gerilimler vermek için Allegro A3967 sürücü yongalı EasyDriver adım motoru sürücüsü kullanılmıştır. Motorun çektiği akımları ölçmek için de Hall-etkisi tabanlı ACS712 akım algılayıcı entegresi kullanılmıştır. Akım algılayıcıları Hall-etkisi tabanlı olduğundan dolayı devre üzerinde yükleme etkileri yoktur. Motor

5.1 Adım Motoru

Adım motorunun hız algılayıcısız konum kontrolünün gerçekleştirilmesi için kurulan deney düzeneği Şekil 5.3'deki gibidir. Bu çalışmada Matsushita firmasının 42SHA37B2NRA ürün kodlu 1.6Ω iç dirence ve 1.8° adım açısına sahip adım motoru kullanılmıştır. Motorun veri sayfasından alınan parametreleri, varsayılan sabitler ve PPS sayısına göre yük momenti eğrisi aşağıda verilmiştir.

Tablo 5.1. Adım motoru parametreleri

Motor Parametreleri	Sembol ve Birim	Değer
Rotor Yük Atelet Momenti	J [Nms/rad]	$5.2 \cdot 10^{-6}$
Faz Sargı Direnci	R [Ω]	1.6
Faz Sargı Endüktansı	L [mH]	3.8
Rotor Diş Sayısı	N_r	100
Motor Sabiti	K [kg.m ²]	$9.6 \cdot 10^{-4}$
Viskoz Sürtünme Katsayısı	B [Nms/rad]	0.001



Şekil 5.2. Yük momenti eğrisi[26]

5.2 Mikrodenetleyici

Veri toplama kartından gelen bilgilere göre adım motor sürücüsüne uygun darbeleri uygulayabilmek için Arduino MEGA 2560 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Mikrodenetleyici bir mikroişlemcinin, merkezi işlem birimi (CPU), hafıza, giriş - çıkışlar, kristal osilatör, zamanlayıcılar, seri ve analog giriş çıkışlar,

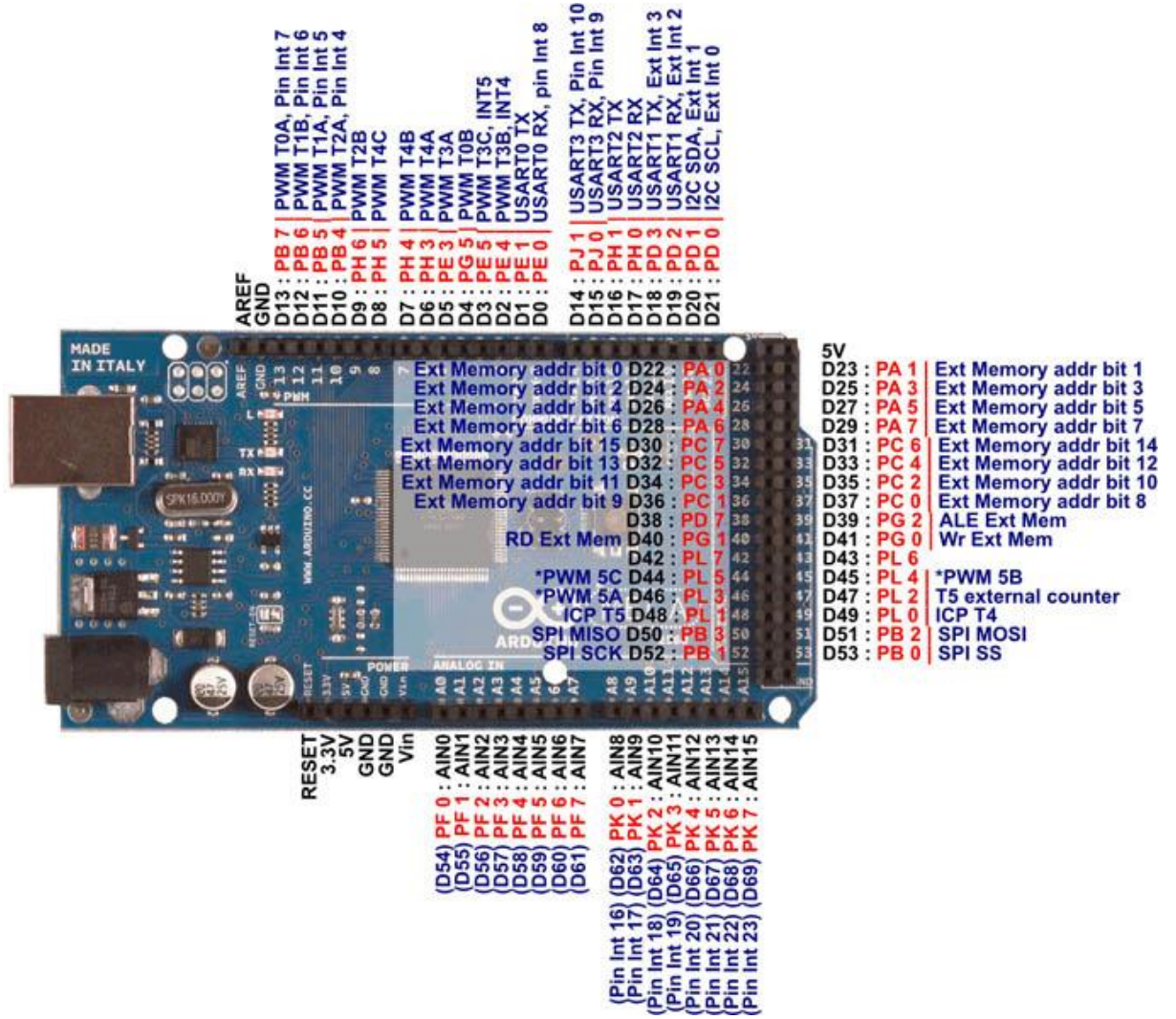
programlanabilir hafıza gibi bileşenlerle tek bir tümleşik devre üzerinde üretilmiş halidir. Üzerlerinde hafıza birimlerini, giriş-çıkış uçlarını ve analog-dijital çevirici gibi tümleşik devreleri barındırmaları sayesinde algılayıcılardan alınan değişik türde verilerin toplanması ve işlenmesinde kullanılabilirler. Aşağıda sıralanan temel avantajları sayesinde günümüz elektronik sanayisinde oldukça fazla uygulama alanı bulmuştur:

- Oldukça küçük boyutludurlar.
- Güç tüketimleri düşüktür.
- Düşük maliyetlidirler.
- Yüksek performansa sahiptirler.

Mikrodenetleyicilerin bulduğu kullanım alanlarına örnek vermek gerekirse, en basit elektronik saatlerden otomatik çamaşır makinelerine, robotlardan fotoğraf makinelerine, LCD monitörlerden biyomedikal cihazlara ve endüstriyel otomasyondan elektronik bilet uygulamalarına kadar pek çok elektronik uygulama alanı sıralanabilir [27].

5.2.1 Arduino

Arduino, bir giriş-çıkış kartı ve dijital sanat ve görsel tasarım toplulukları tarafından programlamanın temellerini görsel bir yaklaşımla öğretmek için kullanılan açık kaynak kodlu bir programlama dili olan Processing/Wiring uygulamasını içeren geliştirme ortamına sahip bir fiziksel programlama platformudur. Processing/wiring dilinin yapısı oldukça basittir ve C programlama diline benzemektedir. Arduino açık kaynak kodlu olarak geliştirilmiştir ve baskı devrelerine erişim serbesttir. Ayrıca baskı devresi hazırlanmış ve bileşenleri yerleştirilmiş halde de satılmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan Arduino Mega 2560 mikrodenetleyicisi ve pim tanımlamaları Şekil 5.4'de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Arduino MEGA 2560 ve pim tanımlamaları [28]

Arduina Mega 2560'ta 54 adet dijital giriş-çıkış pimi vardır. Bu pimlerden 15 tanesi PWM çıkışı olarak da kullanılabilir. Ayrıca 16 tane analog girişi, 4 UART, bir adet 16 MHz kristal osilatörü, USB bağlantısı, güç jakı, ICSP başlığı ve reset butonu bulunmaktadır. Arduino Mega 2560 bir mikrodnetleyiciyi desteklemek için gerekli bileşenlerin hepsini içerir. Bilgisayar bağlanarak, adaptör ile ya da pil ile çalıştırılabilirler. Mikrodnetleyicinin teknik özelliklerini vermek gerekirse:

- Mikrodnetleyici : ATmega2560
- Çalışma gerilimi : +5 V DC
- Tavsiye edilen besleme gerilimi : 7 - 12 V DC
- Besleme gerilimi limitleri : 6 - 20 V
- Dijital giriş / çıkış pimleri : 54 tane (15 tanesi PWM çıkışını destekler)

- Analog giriş pimleri : 16 tane
- Giriş / çıkış pimi başına düşen DC akım : 40 mA
- 3,3 V pimi için akım : 50 mA
- Flash hafıza : 256 KB (8 KB bootloader için kullanılır)
- SRAM : 8 KB
- EEPROM : 4 KB
- Saat frekansı : 16 MHz

Arduino Mega 2560'da bulunan dijital giriş - çıkış pimlerinin tamamı, `pinMode()`, `digitalWrite()` ve `digitalRead()` fonksiyonları ile giriş ya da çıkış olarak kullanılabilir. Ayrıca bazı pimlerin özel fonksiyonları vardır:

- Serial 0: 0 ve 1; Serial 1: 19 ve 18; Serial 2: 17 ve 16; Serial 3: 15 ve 14 : Bu pimler TTL seri data almak (receive - RX) ve yaymak (transmit - TX) içindir. 0 ve 1 pimleri ayrıca ATmega16U2 USB-to-TTL Si çipinin ilgili pimlerine bağlıdır.
- Harici kesmeler; 2, 3, 18, 19, 20 ve 21: Bu pimler bir kesmeyi tetiklemek için kullanılabilir.
- PWM: 2 - 13, 44 - 46: Bu pimler `analogWrite()` fonksiyonu ile 8-bit PWM sinyali üretilmesi sağlar.
- SPI: 50, 51, 52, 53: Bu pimler SPI kütüphanesi ile SPI haberleşmeyi sağlar.
- LED: 13: Digital pim 13'e bağlı bir led'dir. Pimin değeri lojik 1 olduğunda yanar, lojik 0 olduğunda söner.
- TWI: 20 (SDA), 21 (SCL): Wire kütüphanesini kullanarak TWI haberleşmesini destekler.

Arduino Mega 2560'ın 16 tane analog girişinden her biri 10 bit çözünürlüğü destekler. Varsayılan olarak 0 - 5V arası ölçerler.

Arduino Mega 2560 bir bilgisayar ile, başka bir Arduino ile ya da diğer mikrodenetleyiciler ile haberleşme için çeşitli imkanlara sahiptir. ATmega2560 mikroişlemcisi TTL seri haberleşme için 4 donanımsal UART'a sahiptir. Kart üzerindeki ATmega16u2 seri haberleşmeyi USB üzerinden kanalize eder ve

bilgisayardaki yazılıma sanal bir COM portu olarak görünür. 16U2 standart USB haberleşme sürücülerini kullanır ve harici sürücü gerektirmez [28].

5.3 Motor Sürücüsü

Tez çalışması kapsamında, mikrodenetleyici tarafından gönderilen adım, yön ve sürüş yöntemi komutlarını motorun fazlarına uygun gerilimler olarak vermek için Allegro A3967 sürücü yongalı EasyDriver adım motor sürücüsü kullanılmıştır. Sürücünün dıştan görünümü Şekil 5.5'de görülebilir.



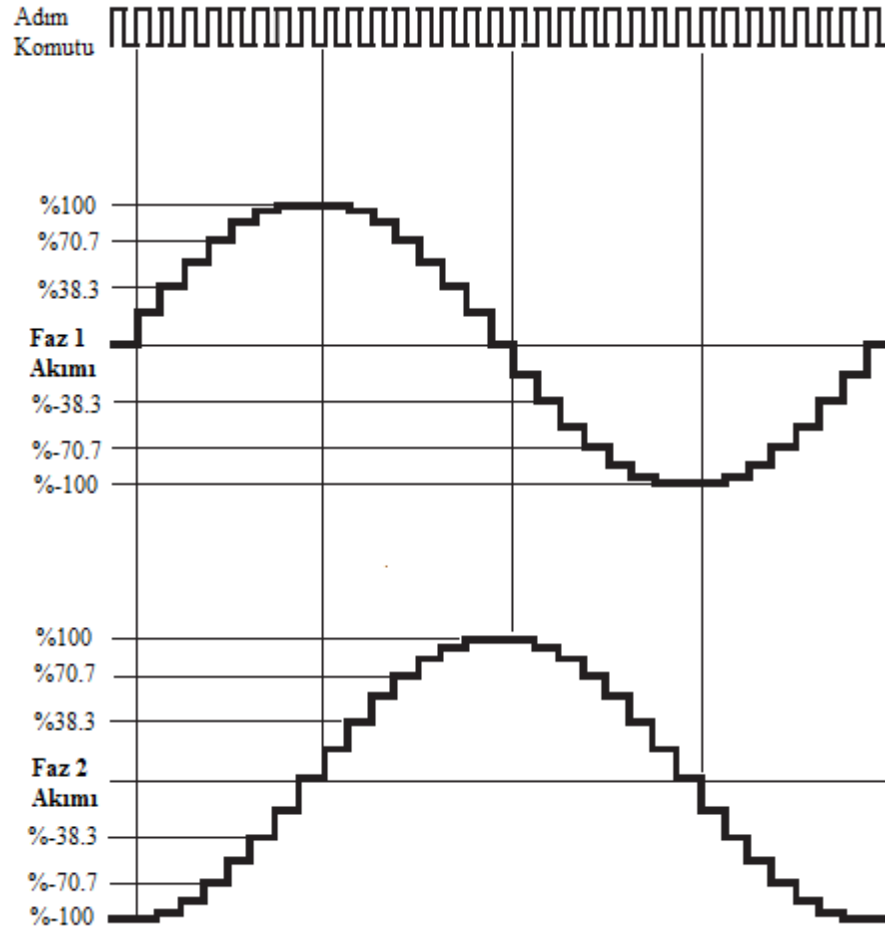
Şekil 5.5. EasyDriver adım motor sürücüsü [29]

EasyDriver, adım motoru sürmek için oldukça kullanışlı ve basit bir sürücüdür. 0 - 5V arası tetikleme veren her cihazla kontrol edilebilir. 6 - 30V arası giriş gerilimiyle enerjilenir ve sürücü üzerindeki gerilim düzenleyiciler sayesinde başka dijital aygıtlar için 5V ya da 3.3V gerilim değerleri elde edilebilir. EasyDriver çift kutuplu adım motorlarını sürmek için kullanılır ve bizlere büyük esneklikler sağlar. Sürücünün özelliklerini sıralamak gerekirse:

- A3967 küçük-adımlama sürücüsüne sahiptir.
- MS1 ve MS2 pimleri kullanılarak çözünürlük tam, yarım, çeyrek ve 1/8 adımlama arasında değiştirilebilir.
- 4,6 ve 8 kablolu, gerilimleri farketmeksizin herhangi bir çift kutuplu adım motoruyla uyumludur.
- Faz başına 150mA'den 700mA'e akım kontrolü yapılabilir.

- 6 - 30V aralığında giriş gerilimiyle çalışır. Yüksek hızlarda giriş gerilimi yüksek tutularak daha fazla moment elde edilebilir.

Uygulamada EasyDriver entegresini 1/8 adımlama modunda çalıştırılmıştır. Bu modda gelen adım komutlarına göre oluşacak faz akımları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. A3987 motor sürücüsüne uygulanan adım komutlarına göre oluşan faz akımları [30]

5.4 Veri Toplama Kartı

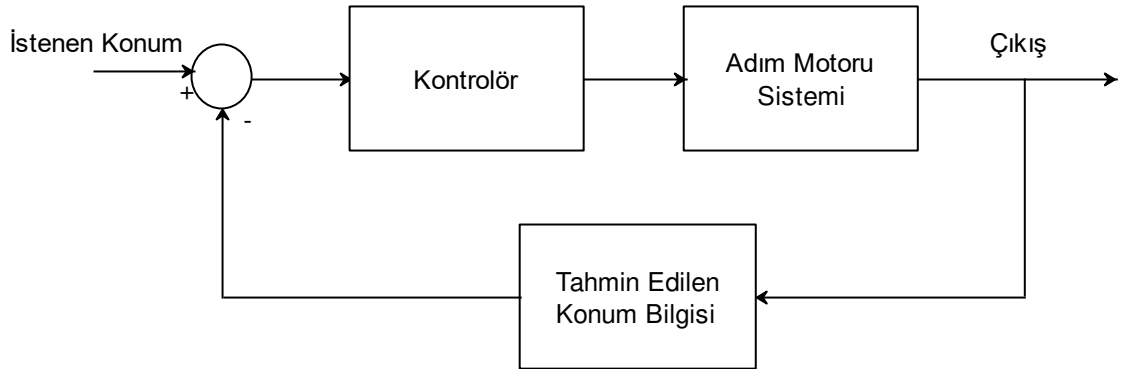
Tez çalışmasında akım sensörlerinden gelen bilgileri okumak ve Simulink ortamına veri aktarımı yapabilmek için National Instruments firmasının USB-6009 ucuz ve çok fonksiyonlu veri toplama kartı kullanılmıştır. Kart, veri kaydı, seyyar

ölçümler ve akademik laboratuvar deneyleri gibi uygulamalar için basit veri toplama işlevselliği sağlamaktadır.

Yalnızca gerilim değerlerini ölçen kart, USB bağlantısıyla bilgisayarla haberleşip, MATLAB ya da LabVIEW gibi programlarla beraber çalıştırılabilir. 8 adet analog girişi vardır ve bu girişler 14 bit çözünürlüğe sahiptir. Saniyede 48 bin örnekleme yapabilme kapasitesine de sahiptir. Ayrıca üzerinde 2 adet statik analog çıkış ve 12 adet de sayısal giriş-çıkış vardır.

5.5 PID Kontrol

Tez çalışmasında adım motorunun istenen konuma konforlu ve hatasız olarak ulaşabilmesi için geri beslemeli kontrol edicilerde en çok kullanılan algoritmalarından olan PID kontrol edici kullanılmıştır. Şekil 5.7'de kontrol sistemine ait blok şema verilmiştir. PID kontrolör geri besleme olarak ölçülen akımlardan elde edilen konum bilgisini, hedef olarak dışarıdan girilen istenen konum bilgisini kullanmıştır.



Şekil 5.7. Geri beslemeli kontrol sistemi blok şeması

PID Kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.1)$$

Burada K_p oransal, K_i integral ve K_d türev kazançlarıdır. $U(s)$ kontrolörün çıkışı, $E(s)$ de hata sinyali ve kontrolörün girişidir. İstenen konum ve tahmin edilen konum bilgileri arasındaki fark hatadır ve bu hata sinyali PID denetleyiciye

gönderilir. Denetleyici bu hata sinyalinin hem türevini hem de integralini hesaplar. Denetleyicinin ürettiği sinyal, K_p ile hata değerinin, K_i ile hatanın integralinin ve K_d ile hatanın türevinin çarpımlarının toplamına eşittir. Bu üretilen sinyal adım motoru sürme sistemine gönderilir ve bir çıkış elde edilir. Bu çıkışa bağlı olarak tekrardan bir konum bilgisi hesaplanır ve istenen konuma göre yeni hata bulunur ve işlemler böyle devam eder.

PID kontrolün kapalı döngü sistemin performans koşullarını sağlayabilmesi için K_p , K_d ve K_i katsayılarının bulunması veya ayarlanması gereklidir. PID katsayılarının belirlenmesinde Ziegler-Nichols, Cohen Coon, Ho-Hang-Cao gibi metodlar mevcuttur [31]. Temel olarak kontrol edici tasarlanırken sistemin açık döngü çalışmasına bakılır ve nelerin geliştirilmesi gerektiğine karar verilir. Sistemin yükselme zamanını iyileştirmek için oransal denetleyici, ani tepkinin iyileştirilmesi için türevsel denetleyici, kalıcı durum hatasını gidermek için integral denetleyicisi eklenir. Sistem istenilen tepkiyi verene kadar katsayılar ayarlanır. K_p , K_i ve K_d 'nin değişimine göre her bir denetleyicinin sisteme etkisi aşağıdaki tabloda özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.2. K_p , K_i ve K_d katsayı değişimlerinin sisteme etkisi [31]

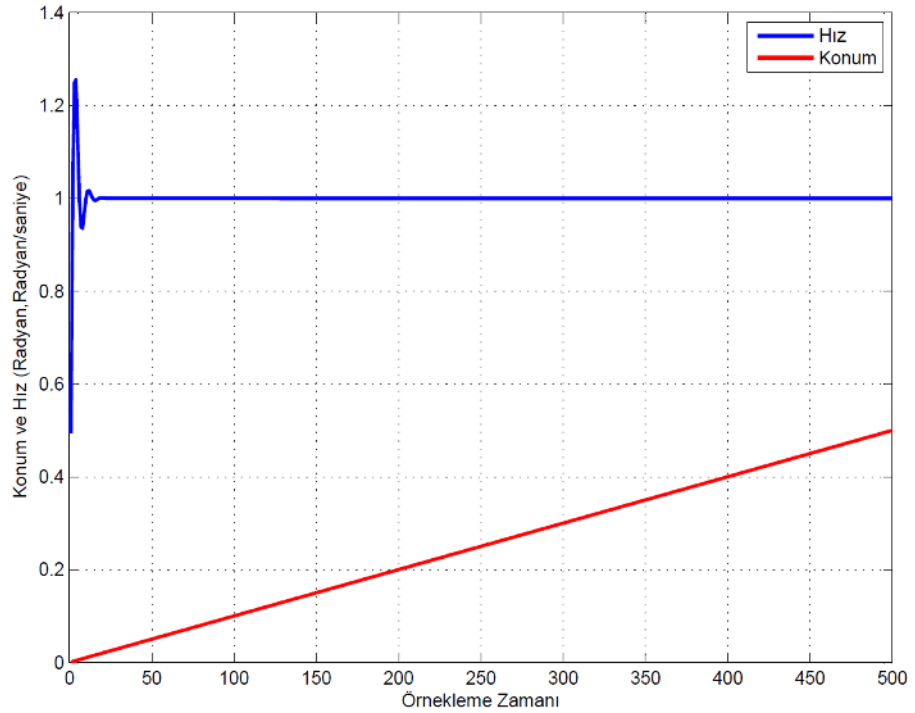
Denetleyici	Yükselme zamanı	Aşma	Oturma zamanı	Kalıcı durum hatası
K_p	Kısalır	Artar	Az değişir	Azalır
K_i	Kısalır	Artar	Artar	Ortadan kalkar
K_d	Az değişir	Azalır	Azalır	Az değişir

K_p , K_i ve K_d katsayıları birbirlerine bağımlı olduklarından bu bağıntılar kesin doğruluk taşımazlar. Tablo, katsayıların belirlenmesinde referans olarak kullanılabilir. Ayrıca her bir denetleyici tüm kapalı döngü sistemlerde kullanılmak zorunda değildir. Yalnızca P veya PI kontrolörler yeterince iyi sonuçlar verebilirler. Bu gibi durumlarda işlem yükünü artırmamak adına türevsel denetleyici kullanmaya gerek yoktur.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, mekanik bir hız algılayıcısı kullanılmadan deneysel olarak iki fazlı bir adım motorunun sürücü sistemi kurulmuş ve konum tahmini için kalman filtresi uygulanmıştır. Mikrodenetleyici yardımıyla kalıcı mıknatıslı iki kutuplu bir adım motoru küçük-adım yöntemi ile sürülmüş ve fazlarının çektiği akımlar NI USB 6009 veri toplama kartıyla ölçülmüştür. Motorun matematiksel modeli kullanılarak konumu hesaplanmıştır. Motorun konum kontrolü için PID kontrol yöntemi tercih edilmiş ve geri beslemesi matematiksel modelden elde edilen konum bilgisi ile yapılmıştır.

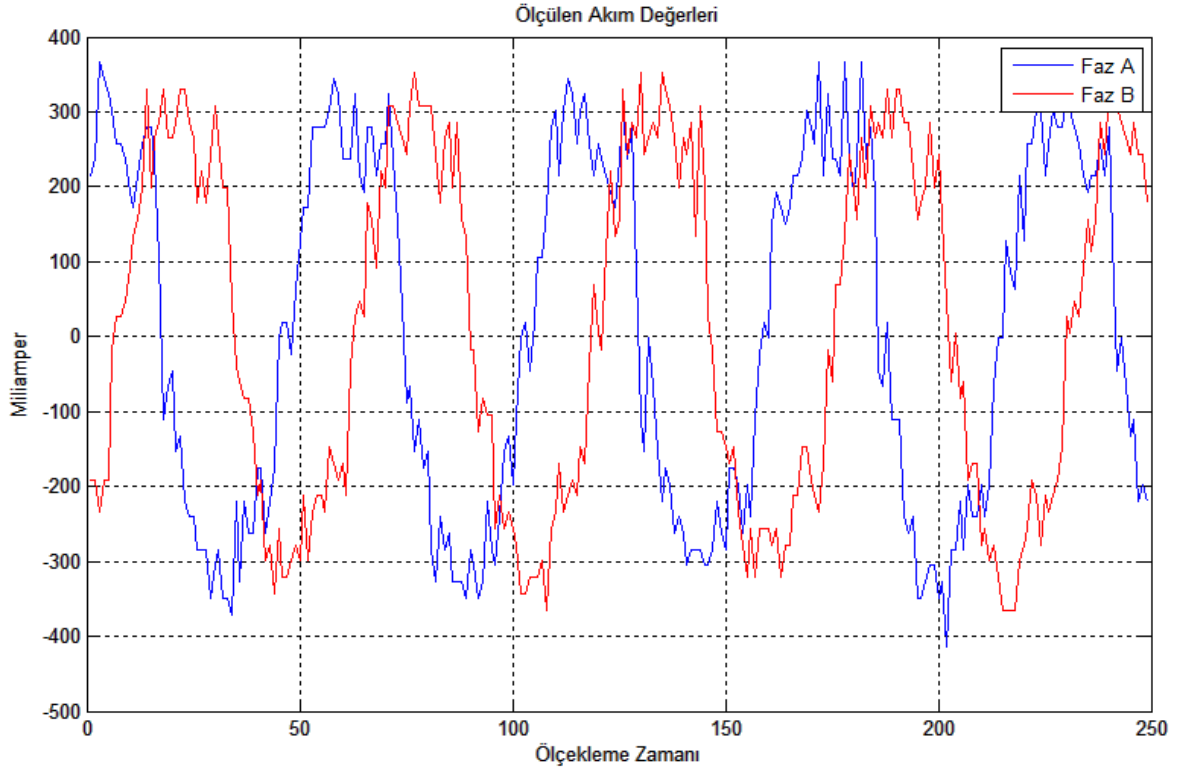
Deney düzeneği kurulmadan önce motorun matematiksel modeli yardımıyla gerçek sinüs ve kosinüs bilgileri akım girdisi olarak verilerek motorun konumu ve hızı hesaplatılmıştır. Hesaplanan değerler aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.1. Açık çevrim hız ve pozisyon değerleri

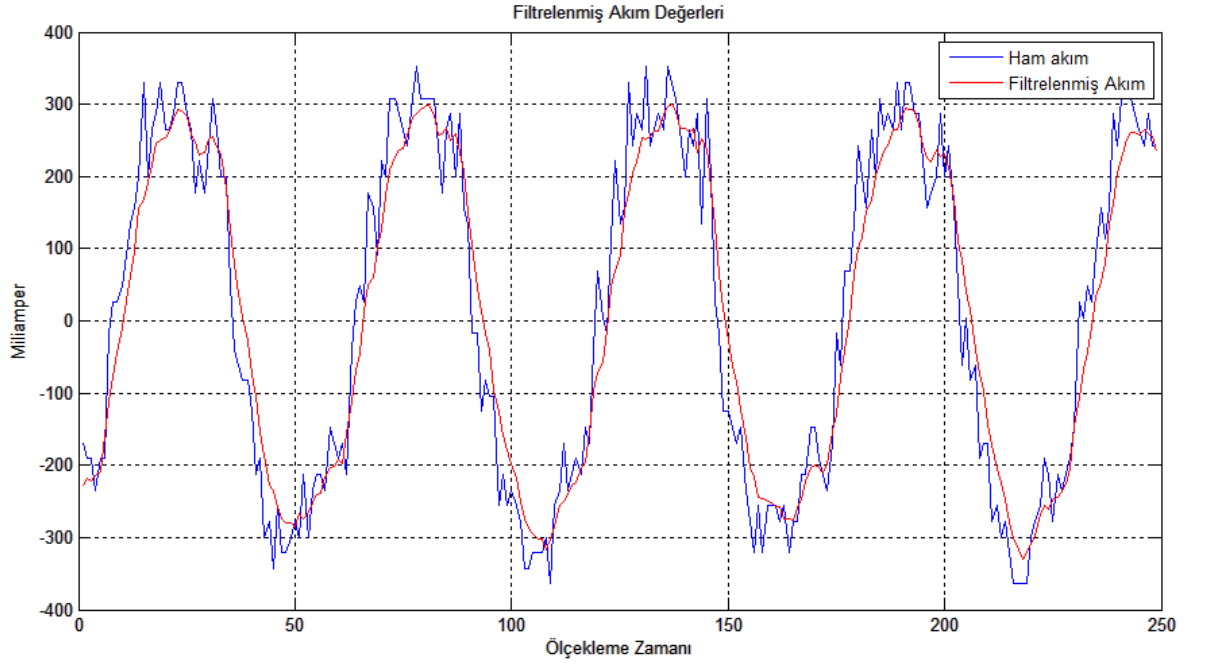
Deney düzeneği kurulduktan sonra motor farklı hızlarda çalıştırılıp fazlarından çektiği akımlar Hall-etkisi tabanlı ACS712 akım algılayıcı entegrasyonu

yardımla ölçülmüştür. Akım algılayıcısı mikrodnetleyicinin analog giriş kısmına bağlanmış, elde edilen akım değeri seri port yardımla bilgisayara aktarılmış ve MATLAB programında çizdirilmiştir. Ölçülen akımlardan bir kısmı Şekil 6.2'de görülebilir.



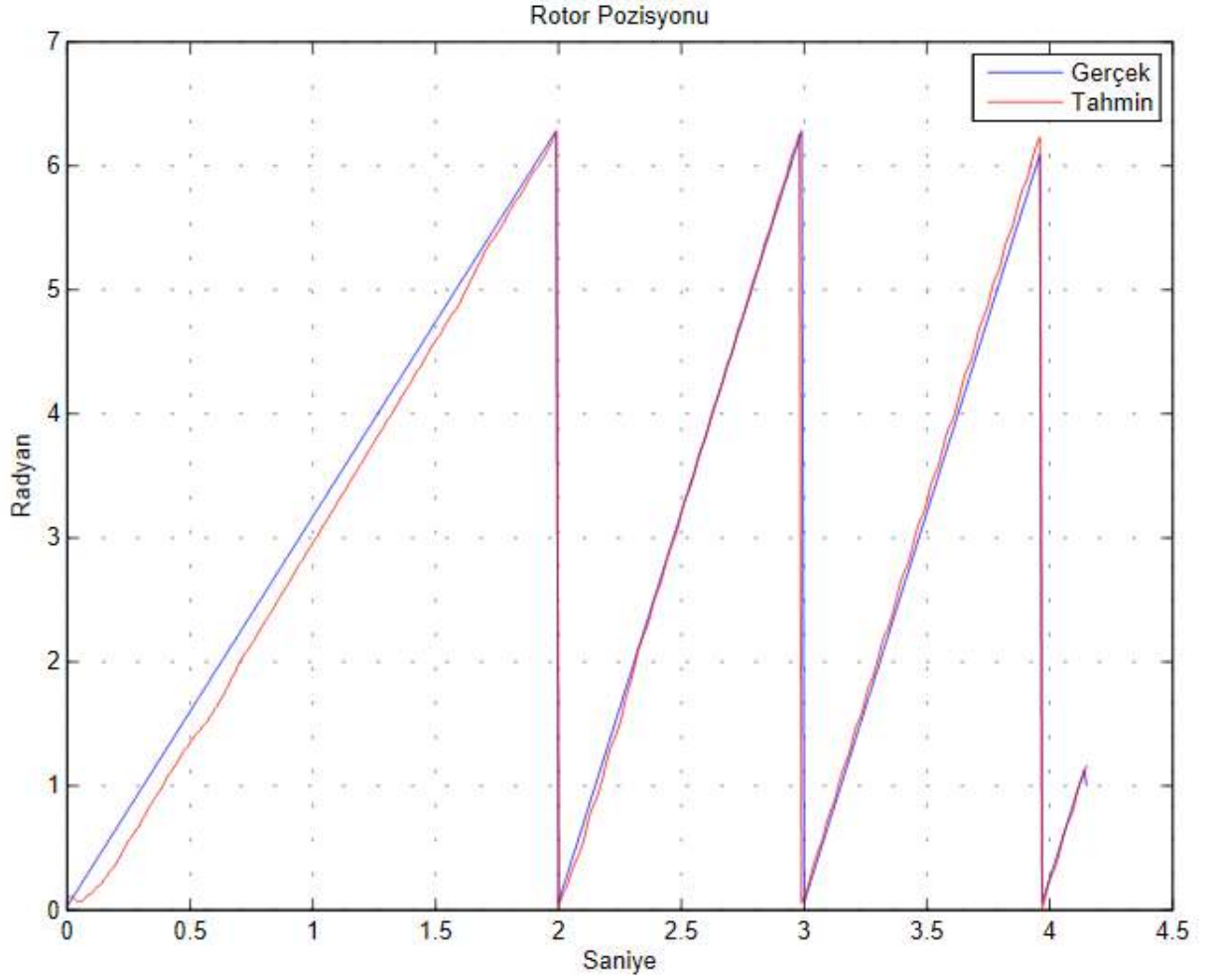
Şekil 6.2. Ölçülen akım değeri

Küçük güçteki adım motorlarının çektiği akımlar oldukça düşüktür. Bu seviyelerde hassas ve gürültüsüz ölçüm yapmak oldukça zordur. Ölçülen akım değeri gürültülü olduğundan alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Bir faza ait filtre uygulanmış ve uygulanmamış akımlar Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3. A fazına ait ham ve filtrelenmiş akım değerleri.

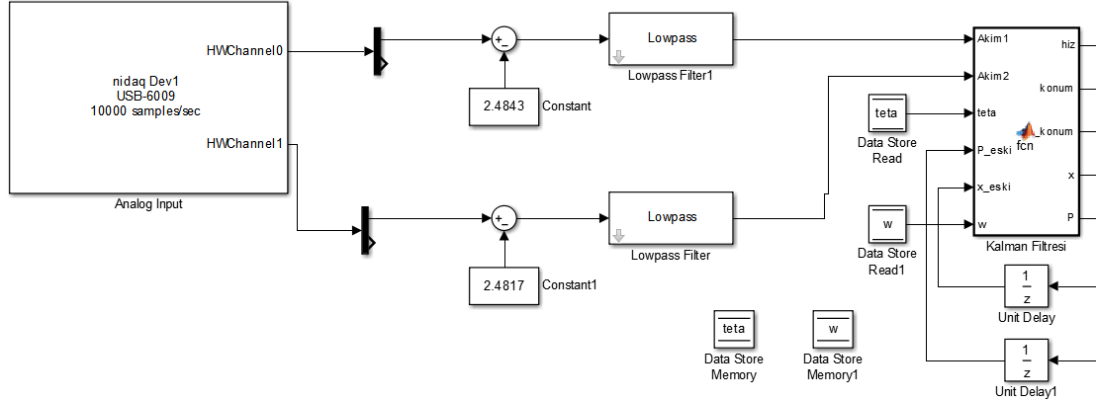
Adım motorunun geri beslemeli konum kontrolünün yapılabilmesi için fazlara ait akımlar ölçülüp filtre uygulandıktan sonra, adım motorunun denklemlerinden faydalanılarak konum bilgisi elde edilmiştir. Gerçek ve elde edilen konum bilgisi değerlerine Şekil 6.4'ten ulaşılabilir. Şekilden görüldüğü üzere herhangi bir mekanik algılayıcı kullanılmadan konum bilgisi düşük bir hatayla bulunmuştur. Aşağıdaki veriler için ortalama bağıl hata 0,0294 'dür.



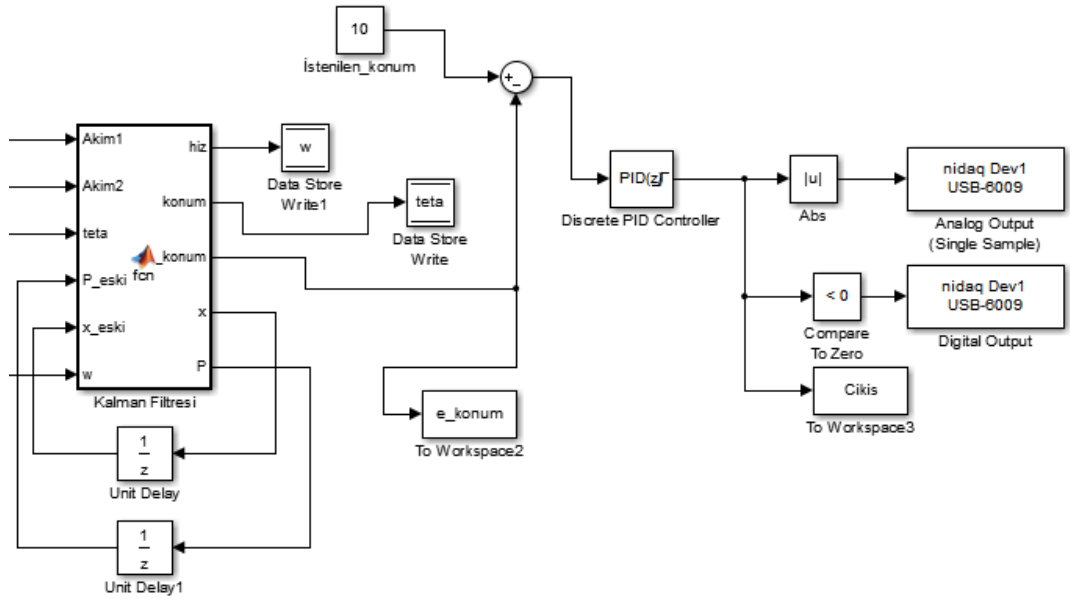
Şekil 6.4. Gerçek ve tahmin edilen konum değerleri

Mikrodenetleyiciden alınan verilerle MATLAB ortamında konum bilgisi başarıyla tahmin edilmiştir. Ancak Kalman filtresini, PID algoritmasını, diğer hesaplamaları ve seri porttan bilgi aktarımını mikrodenetleyici ile yaparken Arduino'nun limitlerinden dolayı veri kaybı yaşanmış ve istenilen konuma gidemediği görülmüştür. Sorunun çözümü için anlık izleme özelliğinden feragat edilip seri porttan veri aktarma işi motor durduktan sonraya bırakılmıştır. Veriler bir dizi değişkenlere kaydedilip, istenilen konuma ulaşıldıktan sonra USB vasıtasıyla bilgisayara aktarılmıştır. Bu işlemler, Kalman filtresinin ve diğer hesaplamaların kayan noktalı sayılarla işlem yapıldığından dolayı motorun yüksek hızlardaki çalışmalarında yine yeterli gelmemiştir. Sorunun çözümü için National Instruments firmasının saniyede 10000 örnekleme yapabilen USB-6009 çok fonksiyonlu veri

toplama kartı kullanılmıştır. MATLAB/Simulink 'te veri toplama kartından bilgiler almak ve konum kontrolü yapabilmek için aşağıdaki düzenek kurulmuştur.

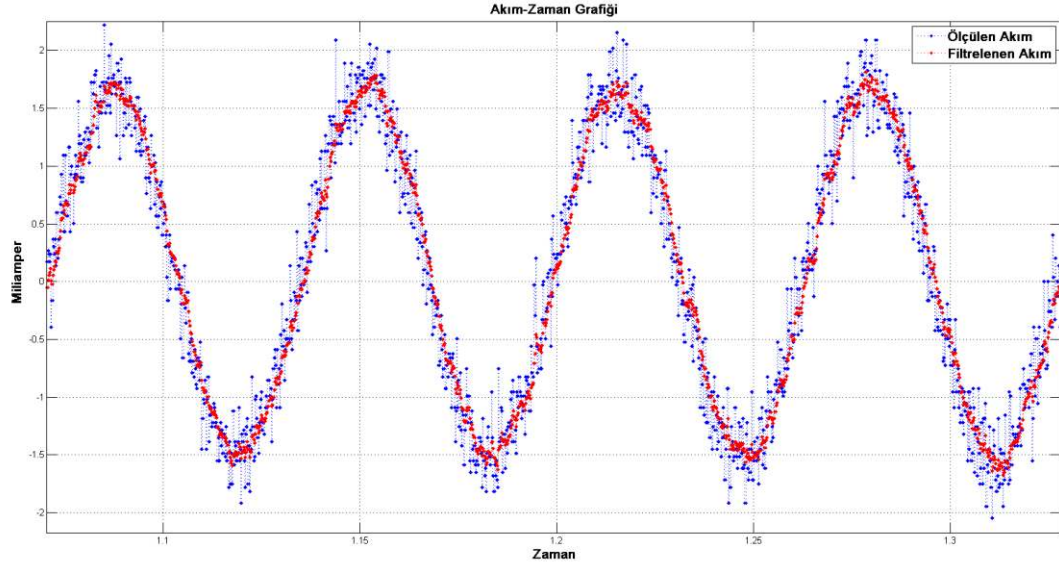


Şekil 6.5. MATLAB/Simulink ortamında kurulan düzenek (1. Kısım).



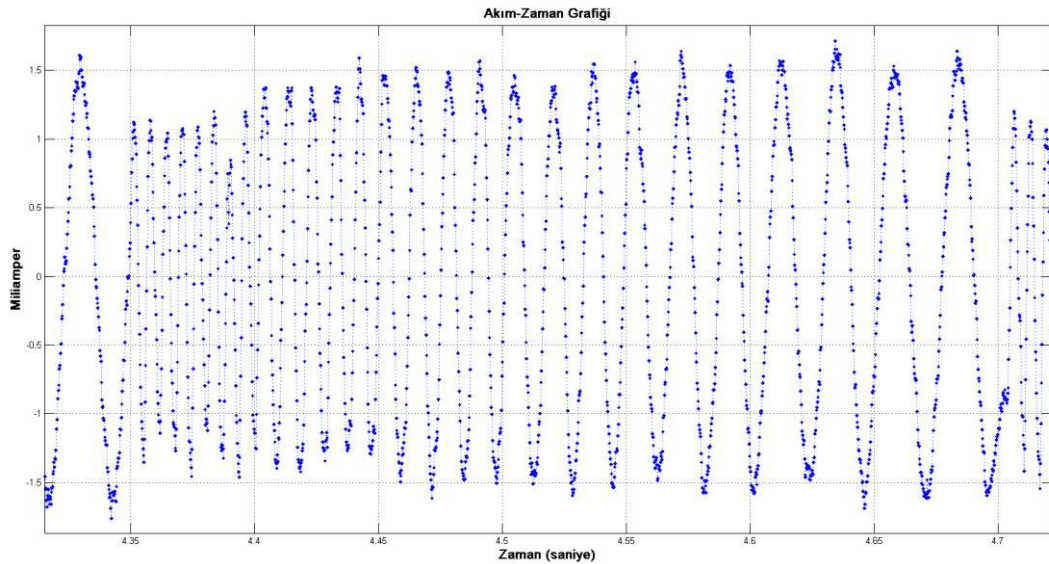
Şekil 6.6. MATLAB/Simulink ortamında kurulan düzenek (2. Kısım).

Akım sensörleri için 0 Amper değeri 2.5 Volt'a karşılık gelmektedir. Bu sebeple, veri toplama kartından bir süre ölçülen akım bilgilerinin ortalaması alınıp, bu değer ölçülen değerden çıkartılmıştır. Ölçümler gürültü olduğu için alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Ölçülen ve filtre uygulanan akım bilgilerinin bir kısmı aşağıda gösterilmiştir.



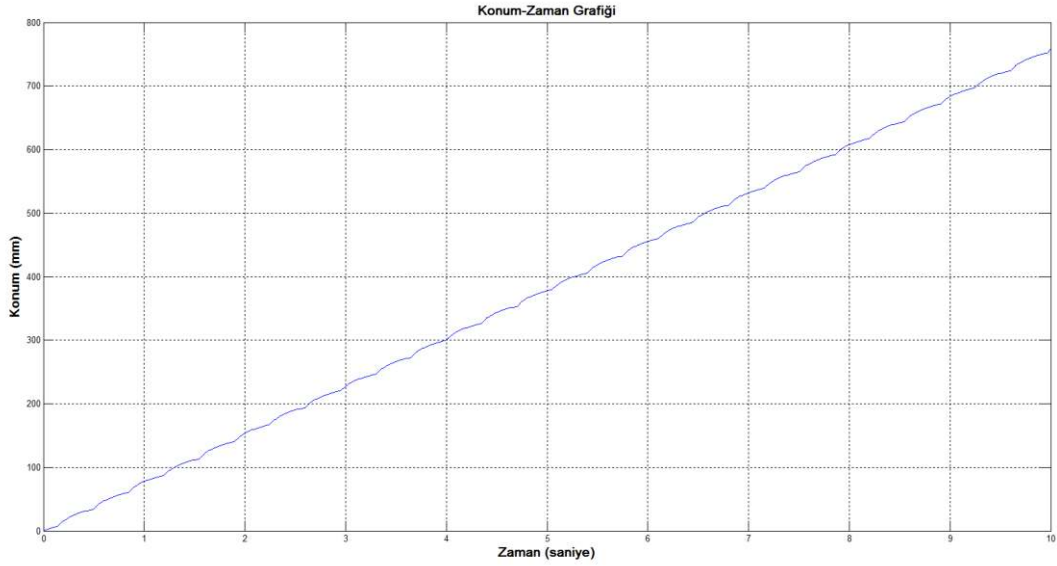
Şekil 6.7. Bir faza ait ölçülen ve filtrelenen akım bilgileri

Ölçülen akım değerleri, filtre uygulandıktan sonra Kalman filtresine giriş olarak verilmiştir. Matematiksel modeli ve kalman filtresini test etmek adına motor farklı hızlarda çalıştırılıp, akım ve konum bilgileri incelenmiştir. Farklı hızlardaki motorun çektiği akım bilgilerinden bir kısmı Şekil 6.8'de görülebilir.



Şekil 6.8. NI USB 6009 kartından alınan akım bilgileri

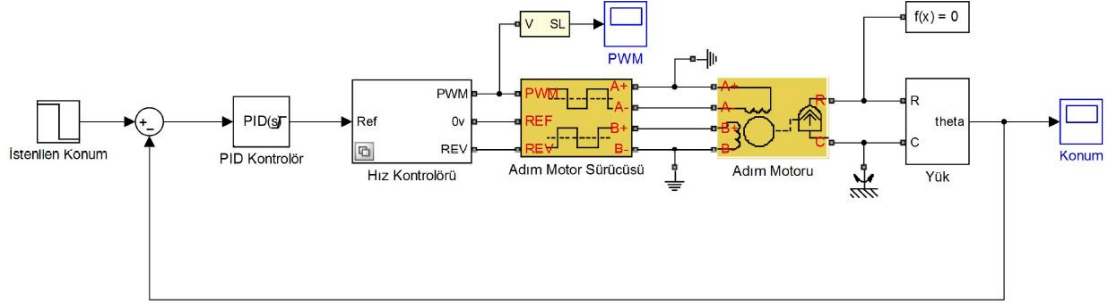
Farklı hızlarda çalıştırılıp alınan akım bilgilerine göre hesaplanan konum değerleri aşağıdaki grafikte görülebilir.



Şekil 6.9. Farklı hızlarda çalıştırılan motorun konum bilgisi

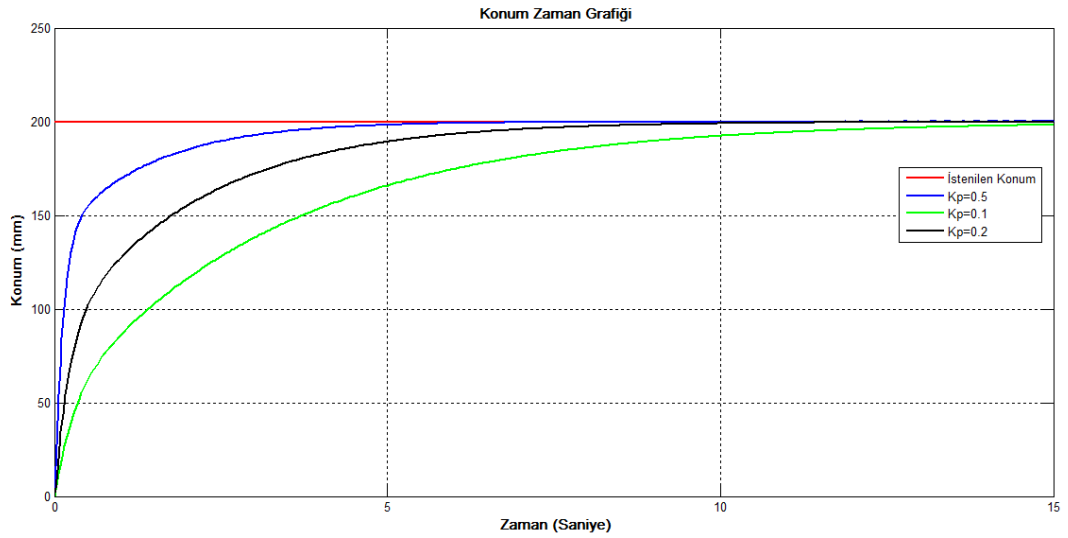
Konum bilgisi doğru bir şekilde hesaplandıktan sonra konum kontrolüne yönelik MATLAB programında çeşitli algoritmalar kullanılıp, pozisyon kontrolü kolaylıkla yapılabilir. Tez çalışması kapsamında örnek bir konum kontrolü uygulaması yapmak için endüstride sıklıkla kullanılan PID kontrolör tercih edilmiştir. İstenilen konum ve tahmin edilen konum arasındaki farkı hata sinyali olarak alan PID kontrolör, -5 Volt +5 Volt arası sinyal üretecek şekilde yapılandırılmıştır. Sinyalin mutlak değeri veri toplama kartının analog çıkışına bağlanmıştır. Bu değer hız bilgisidir. Sinyalin işaretine bakılmış ve sıfırla kıyaslanıp doğru veya yanlış bilgisi veri toplama kartının bir sayısal çıkışına bağlanmıştır. Bu çıkış yön çıkışıdır.

Adım motorunun konum kontrolünde tayin edilcek parametre değerlerinin hesabı için, MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır. İstenilen konum ve anlık konum arasındaki farkı referans alan PID kontrolörün çıkışıyla adım motorunun hızı kontrol edilmiştir. Kurulan benzetim düzeneği ve elde sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6.10. MATLAB/Simulink ortamında kurulan benzetim düzeneği

Öncelikle PID kontrolörün K_i ve K_d katsayıları sıfır yapılarak sadece P kontrol yapılmıştır. Elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir.



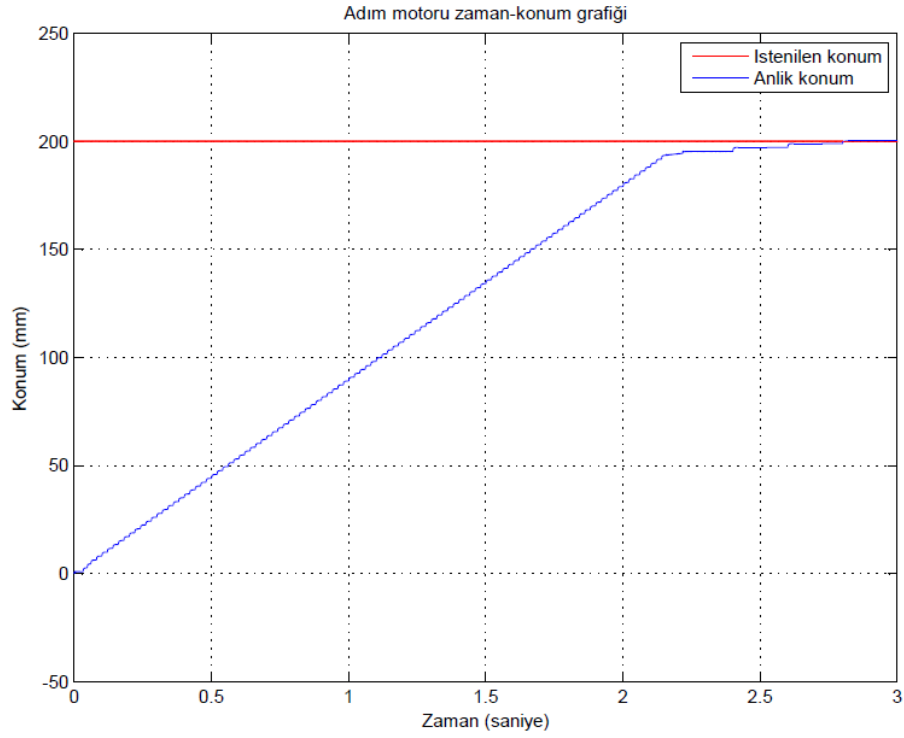
Şekil 6.11. P kontrol benzetim sonucu

Yukarıdaki oluşturulan simülasyon ortamında kontrolörün K_p katsayıları 0.1, 0.2 ve 0.5 seçilmiştir. Bu durumda sırasıyla;

- Yükselme zamanları: 6.7877 sn, 3.7841 sn ve 1.5535 sn.
- Yerleşme zamanları: 11.3927 sn, 7.3283 sn ve 3.8277 sn.
- Aşmalar: 0, 0 ve 0.0057
- Tepe değerleri: 197.7586, 199.8756 ve 200.0114'tür.

Daha sonra konum değerinin istenilen seviyeye daha hızlı ulaşabilmesi için PI kontrol yapılmıştır. Kontrolörün K_p ve K_i katsayıları sırasıyla 0.07 ve 8 seçilmiştir. Bu durumda;

- Yükselme zamanı: 1.7832 sn.
- Yerleşme zamanı: 2.4053 sn.
- Aşma: 0.0096
- Tepe değeri: 200.7225 'tür.

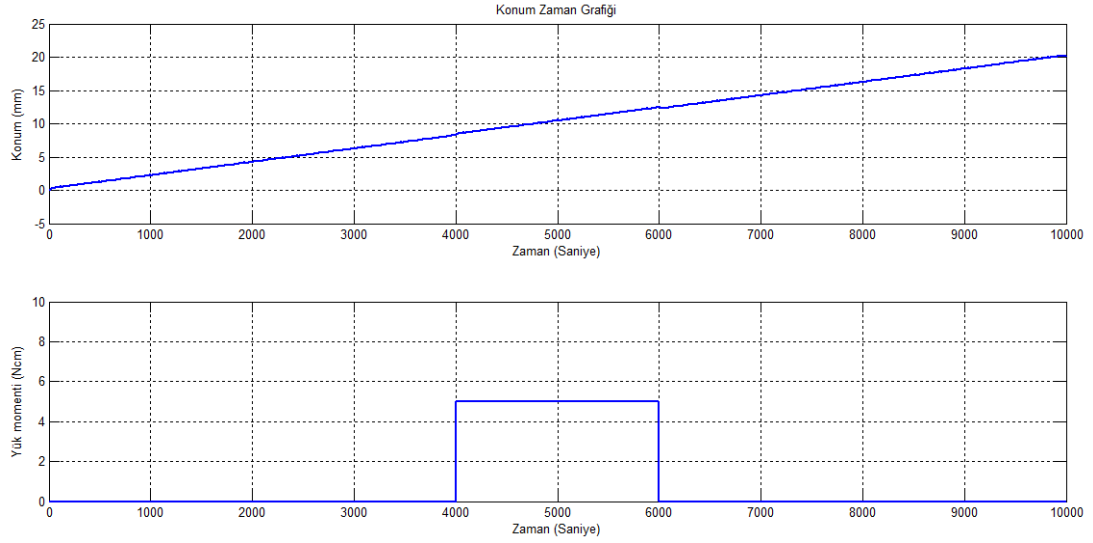


Şekil 6.12. PI Kontrol benzetim sonucu

Aşma değeri çok düşük olduğundan D Kontrol eklenilmesine gerek görülmemiştir. Yükselme zamanı, yerleşme zamanı gibi parametreler adım motorunun kullanılacağı sistemin kriterlerine göre Tablo 5.2'deki bilgiler yardımıyla değiştirilebilir. PI kontrol yapıldığında elde edilen konum zaman grafiği Şekil 6.12'deki gibidir.

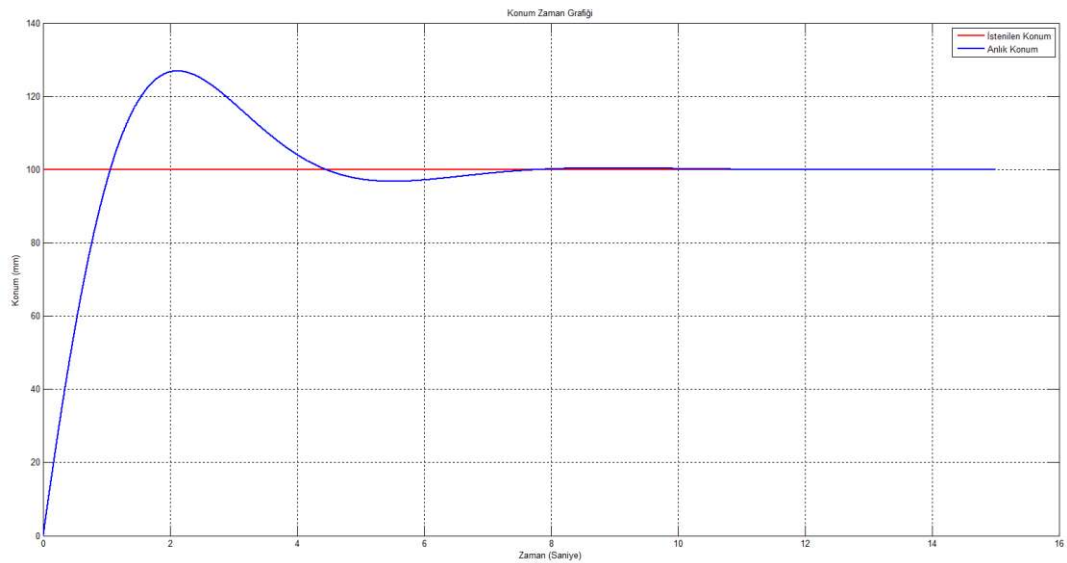
Benzetim yapılırken motora bağlanan yük değerleri değiştirilmiş ve çıkışlar gözlenmiştir. Anma momenti içerisindeki yük değişimlerinde, motorun konumunda

sadece yükün ani değiştiği anlarda çok küçük değişimler olduğu görülmüştür. Yük momentini ve konum zaman grafiği aşağıdaki grafikte görülebilir.



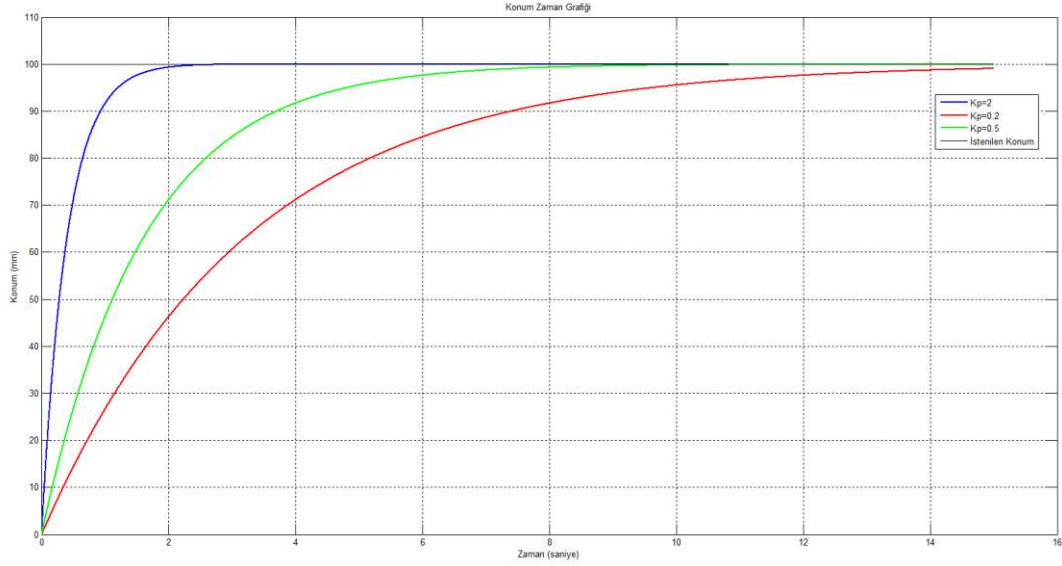
Şekil 6.13. Yük momentini ve konum zaman grafiği

Benzetim çalışmaları yapıldıktan sonra Simulinkte kurulan düzenek veri toplama kartının analog çıkışına bilgi verecek şekilde yapılandırılmıştır. Kartın analog çıkışı, Arduino mikrodenetleyicisinin analog girişine bağlanmış ve okunan değere göre adım motor sürücüsüne uygulanan darbelerin sıklığı ayarlanmıştır. Kurulan düzenekle PI kontrol yapıldığında elde edilen grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.14. PI Kontrol deney sonucu

Belirli hız limitlerinin altında motor çalıştırılmak istenildiğinde süreksizlikler ortaya çıkmaktadır [32]. Bu sorunu çözmek adına elde edilen konum bilgisi, istenilen konum değerine ulaştığı zaman motor durdurulmuştur. PI kontrol yapıldığında motor konumunda aşmalar olduğu ve motorun ileri geri hareketler yaptığı görülmüştür. Farklı K_p değerleri için P kontrol yapıldığında elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.15. Farklı K_p değerleri için P Kontrol deney sonucu

Düşük K_p değerleri için kalıcı durum hatalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. K_p değeri artırıldığında, hem yerleşme zamanı artmış, hem de kalıcı durum hatasının gittikçe azaldığı görülmüştür.

Adım motorları endüstride konum kontrolü gereken uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Doğru konum bilgisine olan ihtiyaçtan dolayı bu sistemler genelde kodlayıcılarla beraber kullanılırlar. Tez çalışması kapsamında kodlayıcıya ihtiyaç duyulmadan konum kontrolünün başarıyla yapılabileceği gösterilmiştir. Sonraki çalışma olarak, en başta işlemci güçlü bir işlemci, DSP ya da bir FPGA ile değiştirilebilir. Veri toplama kartı, analog çıkışlarının saniyede daha fazla örnekleme yapabilen diğer modelleriyle değiştirilebilir. Ayrıca konum kontrolü olarak PID yerine, bulanık mantık kontrol tekniği, yapay sinir ağı veya PID katsayılarının adaptif olarak değiştiği kontrol yöntemleri tercih edilebilir. Sargı akımlarını tahmin etmek için başka filtreleme teknikleri uygulanabilir. Ek olarak Kalman filtresinin

gürültü matrisi $Q(k)$ ve ölçüm hata kovaryans matrisi $R(k)$ birer sabit olarak değil hataya bağlı olarak kendini yenileyen algoritmalarla kullanılabilir. Bu değişimlerle hesaplamaların hızlanmasının yanı sıra, artan veri sayısı ile ya da daha optimize kontrol yöntemleriyle konum kontrollerinde hassasiyet, doğruluk ve çalışma aralığı artırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bakkak, A., Kuyucuoğlu, F. Adım Motorunun Algılayıcısız Konum Tahmini. TOK'2015 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 10-12 Eylül, 2015, Denizli (Bildiriler Kitabı, 246-249 s.)
- [2] Chen, C. Microcomputer speed control of stepper motor. Control Systems Magazine. 1982, 2(1), 17-20.
- [3] Krishnamurthy, P. Khorrami, F. Voltage-fed permanent magnet stepper motor control via position-only feedback. Control Theory and Applications. 2004, 151(4), 499-510.
- [4] Innes, R. Industrial applications of stepper control systems. Stepper Motors and Their Control, 25 Jan, 1994 London (Bildiriler Kitabı, 5/1- 5/3 s.)
- [5] Baluta, G., Coteata, M. Precision microstepping system for bipolar stepper motor control. International Aegean Conference, 10-12 Sept, 2007 Bodrum (Bildiriler Kitabı, 291-296 s.)
- [6] Kabde, A. B., Savio, A. D., Position control of stepping motor. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2014, 3(4), 8974-8981.
- [7] Elsodany, N. M., Rezeka, F. S., Maharem, N. A. Adaptive PID control of a stepper motor driving a flexible rotor. Alexandria Engineering Journal. 2011, 50, 127-136.
- [8] Rajashekara, K., Kawamura, A. Sensorless control of permanent magnet AC motors. 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 5-9 Sep, 1994 Bologna (Bildiriler Kitabı 1589-1594 s. vol.3)

- [9] Lima, A. M. N., de Fornel, B., David, M. On stochastic filtering technique and its applications to AC numerical drive systems. European Power Electronics Conf., 1987, Grenoble (Bildiriler Kitabı 683-688 s.)
- [10] Bolognani, S., Oboe, R., Zigliotto, M. Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1999, 46(1), 184-191.
- [11] İnan, R. Asenkron Motorların Hız-algılayıcısız Kontrolü için Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı FPGA Uygulaması. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde, 2011, 108 s. (Yüksek Lisans Tezi).
- [12] Bendjedia, M., Ait-Amirat, Y., Walther, B., Berthon, A. Position control of a sensorless stepper motor. IEEE Transactions on Power Electronics. 2012, 27(2), 578-587.
- [13] Bindu, V., Unnikrishnan, A., Gopikakumari, R. Adaptive fuzzy logic position control of a Stepper motor with Extended Kalman Filter. International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 3-6 Jan, 2012, Thrissur Kerala (Bildiriler Kitabı, 1-6 s.)
- [14] Ferrah, A., Bani-Younes, J. A. K., Bouzguenda, M., Tami, A. Sensorless speed and position estimation in a stepper motor. International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 10-12 September, 2007, Bodrum (Bildiriler Kitabı, 297-302 s.)
- [15] Shah, C. Sensorless Control of Stepper Motor Using Kalman Filter. Cleveland State University, College of Graduates Studies, Department of Electrical and Computer Engineering, Cleveland, 2004, 137 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [16] Atabay, Y. E. Geri Beslemeyle Doğrusallaştırma Yönteminin Sürekli Mıknatıslı Adım Motoru Denetiminde Kullanılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2007, 115 s. (Yüksek Lisans Tezi)

[17] Milli Eğitim Bakanlığı. Elektrik Elektronik Teknolojisi: Step ve Servo Motorlar Modülü. 522EE0096, Ankara, 2011, 46 s.

[18] Adım motorunun temel hareket gösterimi, <https://www.pc-control.co.uk/images/step-motor1.gif>, 15 Aralık 2015.

[19] Step motor nedir? Nasıl çalışır?, <http://www.mcu-turkey.com/step-motor-nedir-nasil-calisir>, 13 Kasım 2015.

[20] Değişken relüktanslı bir adım motoru, http://www.r2d2.faith.pl/opis_podzespolow.html, 22 Aralık 2015

[21] Çetişli, B. Adım Motorlarının Bilgisayarla Kontrolü. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 1998, 156 s. (Yüksek Lisans Tezi)

[22] Gökmen, Ü. Bir Eğitim Simülatöründeki Çok Sayıda Adım Motorunun PC ile Hız ve Konum Kontrolünün Gerçekleştirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2008, 65 s. (Yüksek Lisans Tezi)

[23] Adım motorları, https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor, 22 Aralık 2015.

[24] Giurgiutiu, V., Lyshevski, S. E. Micromechatronics Modeling, Analysis and Design with MATLAB. Ed.: Sergey Edward Lyshevski, CRC Press, New York, USA, 2004, 920 s.

[25] Oğur, M. Asenkron Motorlarda Geniş Aralıkta Sensörsüz Hız Kontrolü için Genişletilmiş Kalman Filtresi ile Gözleyici Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2014, 178 s. (Doktora Tezi)

- [26] Matsushita 42SHA37B2NRA Adım motoru, veri sayfası.
- [27] Mikrodenetleyici, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Mikrodenetleyici>, 22 Aralık 2015.
- [28] Arduino Mega özellikleri,
http://www.robotiksistem.com/arduino_mega_2560_ozellikleri.html, 22 Aralık 2015.
- [29] Adım motor sürücüsü, <https://www.sparkfun.com/products/12779>, 22 Aralık 2015.
- [30] Allegro A3967, veri sayfası.
- [31] Yağsan, O. Bir Operatörsüz Vinç için PID ve Genetik Algoritma Temelli Minimum Salınımlı Konum Kontrolü. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2006, 93 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [32] Akdoğan, E. Çelik, H. PIC İşlemci Denetimli Adım Motor Mikroadım Sürücüsü. 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 18-20 Ağustos, 2003, Ankara

EKLER

EK A. (Simulink MATLAB fonksiyonu kodları)

```
function [hiz,konum,e_konum,x,P] = fcn(Akim1,Akim2,teta,P_eski,x_eski,w)

ib=Akim1*2.6;
ia=Akim2*5.2;
% sensörlerden biri +-10A, diğeri +-5A ölçüm yaptığından dolayı katsayılar farklıdır.

degisim_w=(((-24752.47*sin(100*teta))*ia)+((24752.47*cos(100*teta))*ib)+(-
495.0495*w);

w=w+degisim_w/1000;

teta=teta+w/1000;

konum=teta;

hiz=w;

% A B C matrisleri önceden workspace'de aşağıdaki kodlarla elde edilmiştir.
% Ailk = [-B/J 0;
%         1 0];
%
%Bilk = [-Km/J Km/J;
%        0 0];
%
%Cilk = [0 1];
%
%Dilk = [0 0];
%
%sys_ilk = ss(Ailk, Bilk, Cilk, Dilk);
%
%dsys = c2d(sys_ilk, Ts, 'zoh');
%
%A = dsys.a;
%B = dsys.b;
%C = dsys.c;

A=[0.609540731265658 0;0.000788727722843371 1];

B=[-19.5229634367171 19.5229634367171;-0.0105636138578315
0.0105636138578315];

C=[0 1];

Q = 0.057;
```

```

R = 0.64;

I = eye(2);

u=[ia*sin(100*teta) ib*sin(100*teta)]';

K = (P_eski * C') / (C*P_eski*C'+R);

x = x_eski + K * (teta - C*x_eski);

P = (I-K*C)*P_eski;

e_kon = C*x;

e_konum=e_kon(1,1);

x = (A*x )+ [(B*u) (B*u)];

P = A * P * A' + B*Q*B';

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali BAKBAK
Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1990
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ali.bakbak@cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Gönen Anadolu Öğretmen Lisesi, 2008
Lisans : Niğde Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2012

Mesleki Deneyim

Artem Elektrik Otomasyon Ltd. Şti., Yazılım ve Uygulama Mühendisi 2012-2013
Süleyman Demirel Üniversitesi, Senirkent MYO, Misafir Öğretim Gör. 2012-2014
Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Araştırma Görevlisi 2014-(halen)

Yayınları

1. Bakbak, A., Kuyucuoğlu, F. Adım Motorunun Algılayıcısız Konum Tahmini. TOK'2015 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 10-12 Eylül, 2015, Denizli (Bildiri Kitabı, 246-249 s.)