

Received: November 16, 2017
Accepted: January 17, 2018

Adaptive PID Controller Design with 6 Sigma Process Capability Index

Mehmet Serhat CAN^{1*}, Ömerül Faruk ÖZGÜVEN², Hüseyin ARPACI³

¹Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Zile Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, 60400, Zile/Tokat, Türkiye

²İnönü Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 44210, Malatya, Türkiye

³İnönü Üniversitesi, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü, 44210, Malatya, Türkiye

Abstract

Nowaday, The Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is frequently used in industrial process controls due to its easy design. The performance of the PID controller depends on the optimization of Proportional (K_p), Integral (K_i) and Derivative (K_d) coefficients. If the system parameters changes due to environmental influences, it is important to update the K_p , K_i and K_d coefficients according to the new conditions in order to maintain the performance of the PID controller. In this study, in order to ensure that the controller of the permanent magnet direct current motors (PMDC) under variable load conditions, the coefficients were automatically adjusted with the 6 sigma process capability index. Using the 6 sigma process capability index, the error rate of the controlled system, in other words process capability was calculated, and the coefficients of the PID controller are automatically adjusted according to the obtained value to eliminate the negative effect of the load changes. So, adaptive PID controller structure was obtained. In the MATLAB / Simulink program, a performance comparison of the proposed PID controller with the proposed method was performed at different moments of inertia of the PMDC motor.

Keywords: 6 sigma, process capability, adaptive PID controller, robustness.

6 Sigma Süreç Yeterlilik İndeksi ile Adaptif PID Denetleyici Tasarımı

Mehmet Serhat CAN^{1*}, Ömerül Faruk ÖZGÜVEN², Hüseyin ARPACI³

Özet

Oransal-İntegral-Türevsel (PID) denetleyici, kolay tasarımı sebebiyle günümüzde özellikle endüstriyel proses kontrollerinde sıkça kullanılmaktadır. PID denetleyicinin performansı, Oransal (K_p), İntegral (K_i) ve Türevsel (K_d) katsayılarının optimize edilmesine bağlıdır. Sistem parametrelerinin çevresel etkilerden ötürü değişmesi durumunda, K_p , K_i ve K_d katsayılarının yeni şartlara göre güncellenmesi PID denetleyicinin performansını sürdürülebilirliği bakımından önemlidir. Bu çalışmada, sabit mıknatıslı doğru akım motorunun (PMDC) değişken yük durumlarında kontrolünün sağlanması için, katsayılarının 6 sigma (6σ) süreç yeterlilik indeksi ile otomatik olarak ayarlanması gerçekleştirilmiştir. 6σ süreç yeterlilik indeksi kullanılarak, kontrol sisteminin hata oranı, bir başka değişle süreç yeterliliği hesaplanmış ve elde edilen bu değere göre PID denetleyicinin katsayıları otomatik olarak ayarlanarak yük değişimlerinin olumsuz etkisi giderilmiştir. Bu sayede adaptif PID denetleyici yapısı elde edilmiştir. Önerilen yöntem ile geleneksel PID denetleyicinin performans karşılaştırılması işlemi, MATLAB/Simulink programında PMDC motorun farklı atalet momenti değerlerinde, bozucu ve gürültü işaret durumlarında gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : 6 sigma, süreç yeterliliği, adaptif PID denetleyici, dayanıklılık.

*Corresponding Author, e- mail: mehmetserhat.can@gop.edu.tr

1. Giriş

Kontrol uygulamalarında sistem çıkışının yeterince hızlı, kabul edilebilir oranda az kalıcı durum hatasına sahip olması istenir. Ayrıca, sistem parametre değişimlerine ve dış bozuculara karşı dayanıklı olması beklenir. Tasarlanacak denetleyicinin, bu beklentileri yerine getirmesi temel hedeflerdir. Denetleyici tasarımında, bu temel kuralların yanında, denetleyicinin kolayca gerçekleştirilebilir olması da önemlidir. Teorik olarak iyi sonuç veren birçok algoritma, denetleyicinin gerçekleştirilmesi aşamasında çoğu zaman güçlükler çıkarmaktadır.

PID denetleyici tasarımının kolay olması ve yeterli derecede kontrol performansını vermesi sebebiyle, kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. PID denetleyici Oransal (K_p), İntegral (K_i) ve Türevsel (K_d) olarak adlandırılan üç temel parametreye sahiptir. Bu üç parametrenin, sisteme uygun en iyi kontrol sonucunu temin etmek üzere ayarlanması, PID katsayı ayarlama (PID tuning) olarak bilinir. Daha önceki çalışmalarda bu işlem için Ziegler-Nichols (ZN), Cohen-Coon kuralları, Åström-Hägglund yöntemi ve ileri Ziegler-Nichols yöntemi gibi yöntemler literatüre sunulmuştur [1-3].

Uygulamalarda, kontrol edilmek istenen sistemlerde parametre belirsizlikleri ve parametre değerlerindeki değişimler, sisteme dışarıdan etkiyen bozucular kontrol performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu gibi olumsuz durumların etkilerini azaltmak ve dayanıklı (robust) kontrol performansını sürdürebilmesini sağlamak, PID denetleyicinin K_p , K_i , K_d katsayılarının, sistemin anlık durumuna göre otomatik olarak güncellenmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu tür PID denetleyici tasarımları, adaptif PID tasarımı olarak adlandırılmaktadır. Adaptif PID denetleyici tasarımı için mevcut birçok yöntem önerilmiştir. Yapay sinir ağı tabanlı algoritmalar [4,5], bulanık mantık yaklaşımları [6], genetik algoritmalar [7], çeşitli optimizasyon yöntemleri [8, 9] adaptif PID denetleyici tasarımlarında kullanılan yöntemlerdendir.

Endüstri mühendisliği ve işletme alanlarında kalite kontrolü büyük öneme sahiptir. Endüstri mühendisliğinde bir üretim sürecinde amaç müşterilerin kabul edebileceği tolerans değerleri çerçevesinde mümkün olan en az hataya sahip kaliteli ürünler üretmektir. Bu amaç kontrol mühendisliğinde de geçerlidir. Kontrol mühendisliği uygulamalarında kontrol edilen sistemdeki referans değerinin en az hata ile kısa sürede yakalanması hedeflenir. Endüstri mühendisliğinde bu bir kalite kontrol problemi iken, kontrol mühendisi için bu bir kontrol problemidir.

Kalite kontrolü için geçtiğimiz 25 yıl içerisinde altı sigma (6σ) kavramını geliştirmişlerdir. 6σ yöntemi, istatistiksel temelli, süreç içerisindeki değişkenleri temel alan, sürecin performansı hakkında bilgi sağlayan bir kalite kontrol yöntemidir [10]. Bu yöntemde süreçteki değişkenlikler yanlışların temel kaynağı olarak kabul edilir. Süreç ile ilgili temel gösterge sürecin değişkenlik yani sigma seviyesidir. 6σ yaklaşımında süreç performans bilgisi, sigma seviyesinden yola çıkılarak bulunan kalitesizlik maliyetlerine göre değerlendirilir. Süreci iyiye götürmek için kalitesizlik maliyetlerinin azaltılması amaçlanır [10].

Kontrol uygulamalarında sistem parametrelerindeki değişimler ve sisteme etki eden dış bozucular, sistem üzerinde değişkenliklere ve salınımlara sebep olmaktadır. Bu çalışmada, sistem parametre değişimleri ve dış bozucuların etkisi altında, 6σ süreç yeterlilik indeksi (SYİ) temelli adaptif PID denetleyici tasarımı önerilmiştir. Bu yöntemde, sistemden alınan hata işareti, 6σ yöntemi ile değerlendirilerek sürecin performans seviyesi elde edilmiş, bu seviye bilgisine göre PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayıları çevrim içi (online) olarak güncellenmiştir. Önerilen yöntem, SIMULINK ortamında bir sabit mıknatıslı doğru akım (PMDC) motoru modeli üzerinde pozisyon kontrolü amacıyla farklı motor atalet değerlerinde, motor çıkışına bozucu ve gürültü işaretlerinin etkimesi durumlarında denenmiştir. Ayrıca, önerilen yöntem, klasik PID denetleyici ve adaptif PID denetleyici yapıları ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2. Materyal

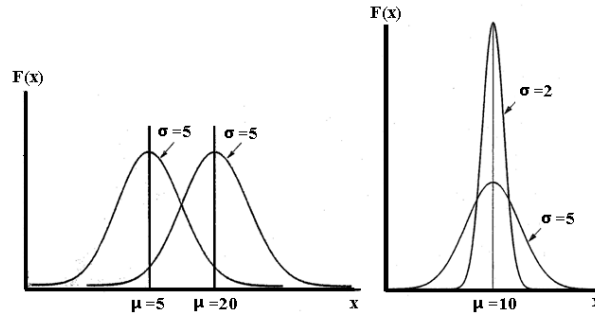
2.1. Altı sigma ve istatistiki süreç yeterlilik indeksleri

İstatistiki süreç kontrol, endüstri mühendisliği ve işletme alanlarında sıkça kullanılan, herhangi bir süreci sürekli olarak kontrol etme ve süreçteki değişkenliği kontrol altına almak için kullanılan bir kalite kontrol yöntemidir. Müşteri şartlarının sağlanıp sağlanmadığına ve sürecin istenilen değişkenlik sınırları içinde olup olmadığına karar vermede kullanılan bir araçtır. İstatistiki süreç kontrolü sürecin kontrol altında olup olmadığı fikrini verebilmesine karşın, sürecin kontrol dışına çıkmasındaki sebeplerle ilgili bir bilgi vermez. Bu açıdan bir uyarı sistemi olarak çalışmaktadır [11].

6σ temelinde “mükemmel” den ne kadar uzaklaşıldığı bilgisi bulunur. Eğer “mükemmel” den ne kadar uzakta olduğu bilirse, sıfır hataya ulaşmak ve mevcut hataları gidermekte o kadar mümkün hale gelecektir. Rakamsal olarak 6σ 'nın hedefi, bir milyon işlemde 3.4'ten daha az hata yapılmasıdır. Başka bir deyişle, yapılan işte yüzde 99.9996 oranında hatasız çıktı elde etmektir [12].

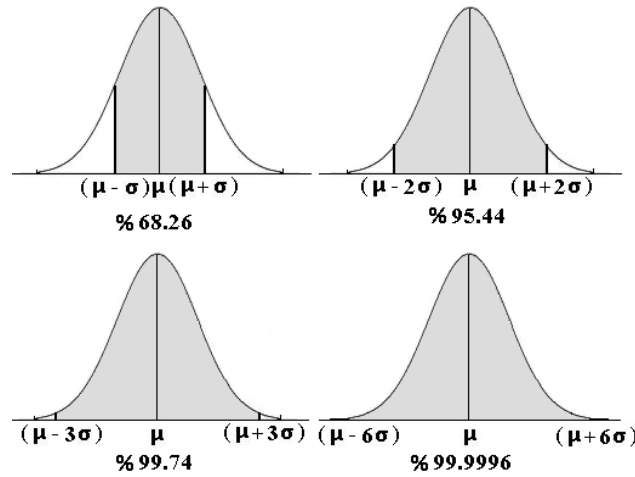
İstatistiki analizlerde, bir veri kümesinin dağılımının belirli bir (matematiksel) modelle ifade edilebilmesi yapılacak analizi kolaylaştırır. İstatistikte en yaygın ve önemli model normal dağılım modelidir. Bir değişken üzerinde rastgele tekrarlanan belli sayıdaki ölçüm veya gözlemlerin ortalaması alınır ve bu işlem zaman içinde tekrarlanırsa bir dizi ortalama elde edilir. Bu ortalamaların dağılımına bakıldığında da normal dağılım olarak adlandırılan olasılık modeline uygun bir dağılım sergiledikleri görülür. Merkezi limit teoremi olarak bilinen bu özellik, istatistik biliminin en önemli yapıtaşlarıdır ve veri analizi ve yorumu bakımından önemlidir [13].

Şekil 1'de iki farklı normal olasılık dağılımını göstermektedir. Normal dağılımın iki parametresi vardır. Bunlar, μ dağılım eğrisinin simetri merkezidir, σ ise dağılım eğrisinin yaygınlığını gösterir.



Şekil 1. μ ve σ gösterimi.

Şekil 1'den de görüleceği üzere farklı veri kümeleri aynı σ değerine ancak farklı μ değerine sahip olabilmektedir. Bu durumun tersi de geçerli olabilmektedir. Bu durum, istatistiksel veri yorumlamada μ ve σ parametrelerinin tek başlarına değerlendirilmeyip birlikte dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 2. μ merkezinden σ kadar sağa sola gidildiğinde kümedeki veriyi yakalayabilme olasılığının % gösterimleri.

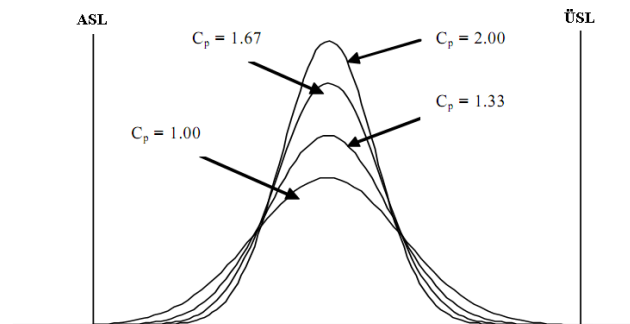
Normal olasılık dağılımı, μ ve σ kavramları, 6σ kontrolü için önemlidir. Şekil 2’den de görülebileceği üzere, dağılım merkezinden 6σ kadar sağa sola gidildiğinde, herhangi bir ölçümün yakalanabilme ihtimali %99.9996’dır. Başka bir deyişle, rastgele yapılan bir ölçümün yakalanamama ihtimali 1 milyonda 3.4’tür. Bu da 6σ ’nın 1 milyonda 3.4 hata ihtimali var olması anlamına gelir.

Süreç yeterliliği istatistiksel bir ölçüt olup, bir sürecin o anki değerinin kabul edilebilir limit değerlerine göre ne kadar değişkenlik gösterdiğini özetler [14]. Sürecin olası ve gerçek performansını ortaya koyarak kalite geliştirme çalışmalarına temel teşkil ederler. Bu alanda görülen ilk indeks, Kane (1986) tarafından tanımlanmıştır [15].

C_p (süreç potansiyel indeksi), kontrol değeri limitleri ile süreç değeri arasındaki ilişkiyi gösterir. “ÜSL” üst spesifikasyon limitini, “ASL” alt spesifikasyon limitini ve σ standart sapmayı ifade edecek şekilde C_p indeksi aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanır.

$$C_p = \text{İzin Verilen Süreç Genişliği} / \text{Gerçek Süreç Genişliği} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{\text{ÜSL} - \text{ASL}}{6\sigma} \quad (2)$$



Şekil 3. C_p ’nin σ ’ya göre değişimi.

Şekil 3'den de açıkça görülebileceği üzere, süreç merkeze (kontrol değerine) yaklaştıkça, σ iyice küçülmekte ve C_p değeri büyümektedir. C_p değerine göre süreç kalitesi için genel durum Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: C_p değerine göre süreç kalitesi [15].

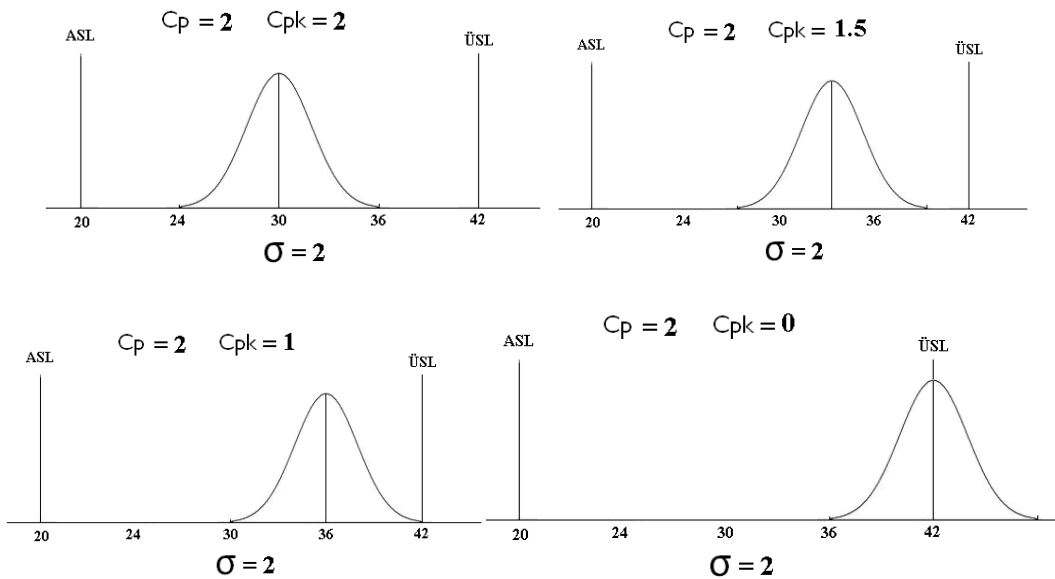
Kalite Seviyesi	C_p Değeri
Süper Mükemmel	$2,00 \leq C_p$
Mükemmel	$1,67 \leq C_p < 2,00$
Tatmin Edici	$1,33 \leq C_p < 1,67$
Yeterli	$1,00 \leq C_p < 1,33$
Yetersiz	$0,67 \leq C_p < 1,00$
Zayıf	$C_p < 0,67$

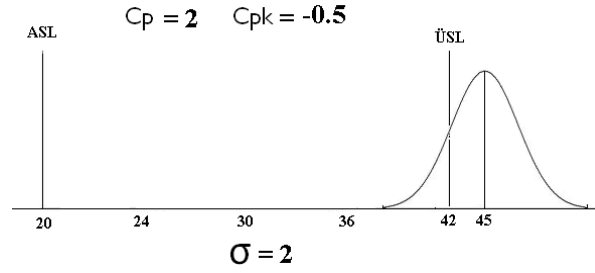
C_p indeksi, bir sürece ait spesifikasyon limit aralığı ile süreç 6σ oranının bir göstergesidir ve C_p değeri, spesifikasyon limitlerinin dışında da 2'ye eşit ve 2'den büyük değer alabilir. Bu sebepten ötürü bir sürecin yeterliliği fikri tek başına C_p 'den elde edilemez. Bu olumsuzluğu gidermek için C_p ve C_{pk} (fiili yeterlilik) indekslerini birlikte değerlendirmek gerekir. C_{pk} , süreç ortalamasına uzaklık bilgisini içerir.

$$C_{pu} = \frac{\bar{USL} - \mu}{3\sigma} \quad (3)$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - \bar{ASL}}{3\sigma} \quad (4)$$

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) \quad (5)$$

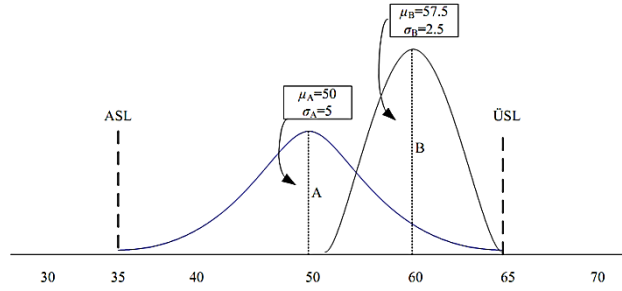




Şekil 4. C_p 'nin aynı değerleri için farklı C_{pk} değerleri.

Şekil 4'ten şu sonuçlar çıkarılabilir:

- $C_p = C_{pk}$ ise süreç merkezlenmiştir ve spesifikasyon limitlerinin ortasındadır. Eğer $C_{pk} < C_p$ ise süreç merkezin dışındadır.
 - $C_{pk} < 1$ ise süreç spesifikasyon limitleri dışındadır.
- Ancak, C_{pk} değeri de bazı durumlarda, süreç karakteristiğine bağlı olarak, tek başına yeterli olamamaktadır. Sabit bir μ ortalamalı süreçte σ 'nın sifıra yaklaşması ile ters orantılı olarak C_{pk} çok büyük değerler alır ki bu da süreç yeterliliğini karakterize etmede yeterli değildir.



Şekil 5. A ve B süreçleri için $C_{pk}=1$ 'dir [15].

Bu olumsuzluğu gidermek için, Taguchi C_{pm} indeksini geliştirilmiştir [16].

$$C_{pm} = \frac{\bar{USL} - ASL}{6\tau} \quad (6)$$

$$\tau = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2} \quad (7)$$

$$T = \frac{\bar{USL} + ASL}{2} \quad (8)$$

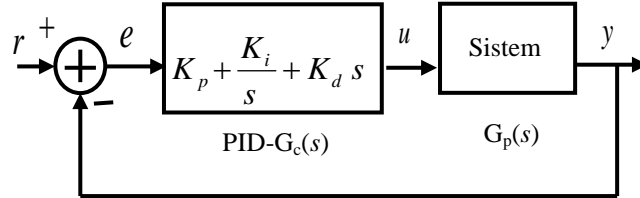
2.2. PID Denetleyici ve adaptif PID denetleyici

PID kontrol tekniğinde, denetlenen sistemin anlık çıkış değeri alınır ve bu anlık değer referans değer ile kıyaslanır. Bu sayede kontrol hata işareti elde edilir. Burada elde edilen anlık hata değeri K_p oransal katsayı ile çarpılır, toplam hata hesaplanır ve toplam hata değeri K_i integral katsayısı ile çarpılır. Hatanın birim zamandaki değişimi (türevi) K_d türevsel çarpan ile çarpılır ve işlemler ile elde edilen sonuçların toplanması ile kontrol işareti elde edilir. Uygulamalara göre P, PI, PID

denetleyici yapıları elde edilebilir. PID denetleyicinin zaman domenindeki gösterimi Denklem 9, 10'da ve kapalı çevrimli PID denetleyici blok diyagramı ise Şekil 6'da verilmiştir.

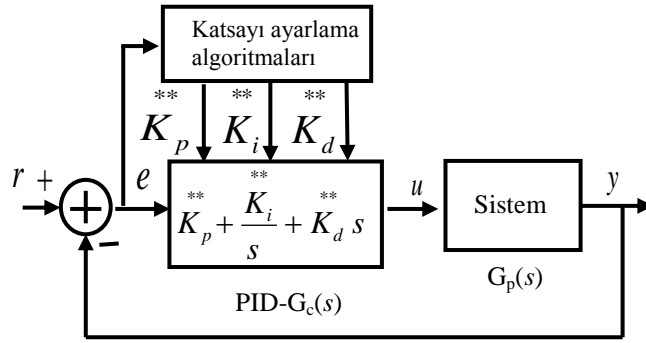
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (9)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (10)$$



Şekil 6. Kapalı çevrimli sabit katsayılı bir PID denetleyici kontrol blok diyagramı.

Burada $r(t)$ referans değerini, $e(t)$ hata değerini, $u(t)$ kontrol işaretini ve $y(t)$ çıkış işaretini gösterir. PID denetleyiciler, doğrusal sistemlerin kontrollerinde iyi performans göstermelerine karşın, doğrusal olmayan sistemlerde iyi sonuçlar üretememektedir. PID denetleyicinin K_p , K_i , ve K_d katsayılarının sistem dinamiklerine göre güncellenmesi kontrol performansının korunmasında veya başka bir deyişle denetleyicinin sağlamlığını artırmada önemlidir. Bu tür PID denetleyiciler adaptif PID denetleyici olarak isimlendirilir. Adaptif PID denetleyici tasarım yöntemlerinde, sistemin istenilen performans değerlerinde kalmasını sağlamak amacıyla, K_p , K_i ve K_d katsayıları sistem değişkenlerine göre güncellenir. Şekil 7'de genel bir adaptif PID denetleyici kontrol bloğu gösterilmektedir.



Şekil 7. Adaptif bir PID denetleyici kontrol diyagramı.

Şekil 7'de verilen adaptif PID denetleyici yapısında K_p^{**} , K_i^{**} ve K_d^{**} güncellenmiş katsayıları göstermektedir. Güncellenmiş katsayıların bulunması işleminde farklı yöntemler ve matematiksel ifadeler kullanılabilir.

3. Metot ve Deneysel Çalışmalar

3.1. Altı Sigma Temelli Adaptif PID Denetleyici Tasarımı

SYİ, elektrik motorlarının tasarım parametrelerinin ve kontrol parametrelerinin optimizasyonu, sistem kararlılığının incelenmesi amaçları için kullanılmaktadır [17-20]. Bu çalışmada, daha önce

yapılan çalışmalardan farklı olarak, 6 sigma SYİ yük değişimlerinde ve gürültülü sistem durumlarında PID denetleyicinin katsayılarının çevrimiçi (online) ayarlanmasında kullanılmıştır. Bu işlemde, sistemden alınan anlık hata değeri temel alınarak, kontrol sisteminin performansı SYİ kullanılarak hesaplanmıştır. Süreç yeterliliği hakkında sağladığı doğru bilgiden dolayı, çalışmada süreç yeterlilik indekslerinden C_{pm} indeksi kullanılmıştır.

Çalışmada, C_{pm} değeri hesaplanırken, Denklem 6 ve 8'deki ÜSL ve ASL değerleri 0.1 olarak seçilmiştir. Böylece, anlık sistem hatası ± 0.1 değerlerine arasına girdiğinde ve 0'a yaklaştığında C_{pm} değeri de 3'e yaklaşmaktadır. C_{pm} indeksinin tersi ($1/C_{pm}$) 3'ten çıkarılarak e_{Cpm} hata değeri elde edilmiştir. e_{Cpm} değerinin 0'a yaklaşması ise hatanın 0'a indirildiği, başka bir deyişle sürecin istenilen spesifikasyon limitleri içinde tutulduğu anlamına gelmektedir.

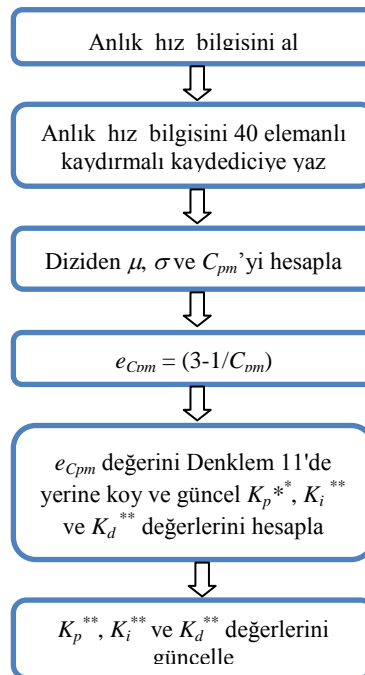
e_{Cpm} değeri, Denklem 11'de kullanılmak suretiyle PID denetleyicinin katsayıları sistemin değişkenlik (yük değişimi ve bozucu gürültü) durumuna göre anlık olarak güncellenmiştir.

$$K_d^{**} = K_d + K_d |ce| (3 - e_{Cpm}) K_d^* \quad (11)$$

$$K_p^{**} = \frac{K_p}{K_d} K_d^{**} \quad (12)$$

$$K_i^{**} = \frac{K_i}{K_p} K_p^{**} \quad (13)$$

Denklem 11, 12 ve 13'te ** o an hesaplanan katsayıyı, * bir önceki adımdaki katsayı değerini, K_p , K_i ve K_d ise PID tuning işlemi ile bulunmuş ve değerleri Tablo 2'de verilen sabit katsayı değerlerini ifade etmektedir. |ce| ise yörünge hatasının türevinin mutlak değerini göstermektedir. Anlık katsayıların belirlenmesi işlemindeki işlem basamakları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Katsayı güncelleme akış diyagramı.

Bu kısımda, klasik PID denetleyici ve çalışmada önerilen adaptif PID denetleyiciler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi, transfer fonksiyonu Denklem 14'de verilen PMDC motorun pozisyon kontrolünde gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalar, motor atalet momentinin (J) farklı değerlerinde bozucu ve gürültü etkilerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışması şeklindedir.

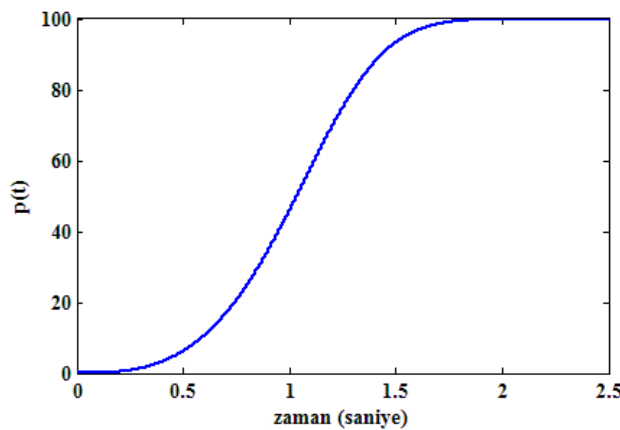
$$TF_{motor} = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s((Js + B)(Ls + R) + K^2)} \quad (14)$$

Denklem 14'de, θ motor milinin açısını ve V motora uygulanan voltajı temsil etmektedir. K , R , L , J ve B terimleri sırasıyla elektromotor kuvvet sabitini (N.m / A) ve motor tork sabitini, elektriksel direnci (Ω), elektrik indüktansı (H), rotorun atalet momentini ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) motor viskoz sürtünme sabitini (N.m.s) göstermektedir. Motor parametreleri $K = 0.105$, $R = 2.7$, $L = 0.004$, $J = 0.0001$ ve $B = 0.0000093$ olarak alınmıştır.

Benzetim deneylerinde motorun pozisyon kontrolünün gerçekleştirilmesinde referans bir yörünge fonksiyonu kullanılmıştır. Bu yörünge fonksiyonu sayesinde, PID denetleyici ve 6 sigma temelli adaptif PID denetleyicilerinin performansları zaman bakımından eşitlenmiştir. Böylece denetleyiciler yük ve bozucu sinyal etkilerinde sağlıklı bir biçimde karşılaştırılabilirlerdir. Her iki denetleyicide referans yörünge fonksiyonu ile motor milinin açısal konumu arasındaki fark hata değeri olarak kullanılmıştır. Referans yörünge fonksiyonu Denklem 15'de verilmiştir.

$$p(t) = p_1 + \Delta p \left(\frac{2}{1 + e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^3}} - 1 \right) \quad (15)$$

Denklem 15'de $p(t)$ motor milinin anlık açısal pozisyon referansını, e Euler sabitini, p_1 motor milinin harekete başlangıç açısını, Δp hedef dönüş açısı (p_2) ile p_1 harekete başlangıç açısı pozisyonu arasındaki farkı göstermektedir. t anlık zamanı ve τ ise zaman sabitini ifade etmektedir. τ değiştirilerek motor milinin açısal hızı ayarlanabilmektedir. Çalışmada τ değeri sabit ve 1 alınmıştır. Şekil 9'da 100 derecelik bir açı değişimi (Δp) ve $\tau = 1$ alınarak çizilmiş örnek bir yörünge takip fonksiyonunun zamanla değişim grafiği görülmektedir.



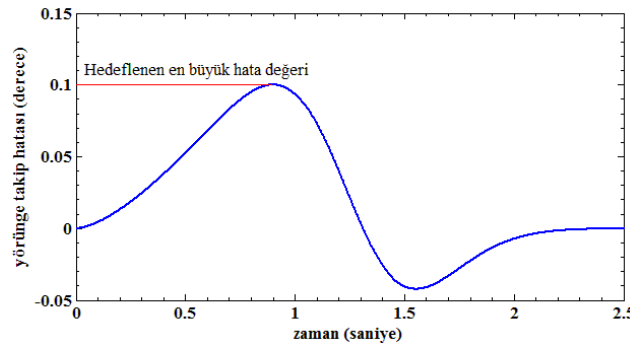
Şekil 9. $p(t)$ sigmoidal referans yörünge fonksiyonun $\tau = 1$, $p_I=0$, $\Delta p = 100$ değeri için zamana göre değişimi.

Deneysel çalışmalardan önce, en uygun PID denetleyici katsayılarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. PID katsayılarının belirlenmesi yapılırken, öncelikle K_i ve K_d değerleri sıfır yapılmıştır. K_p değeri sıfırdan başlanarak 0.1'lik adımlarla, yörünge takip hatasında salınımlar elde edilinceye kadar artırılmıştır. Salınım elde edildiği bu K_p değeri, kritik K_p (K_{pkr}) değeri olarak değerlendirilmiştir. Sonraki adımda, K_d değeri de bulunmuş kritik K_p değeri sabit tutularak, kritik K_p 'nin bulunması ile aynı süreçlerden geçirilmiş ve kritik K_d (K_{dkr}) değeri elde edilmiştir. Son olarak, K_i de artırılmış (K_p ve K_d sabit tutularak) ve en büyük yörünge takip hatasının 0.1 (ASL ve ÜSL) değerine getirilmesini sağlayan K_i değeri kritik K_i (K_{ikr}) olarak alınmıştır. Bu kritik katsayı değerleri, katsayı değişim aralığının alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Belirlenmiş bu katsayılar Tablo 2'de görülmektedir.

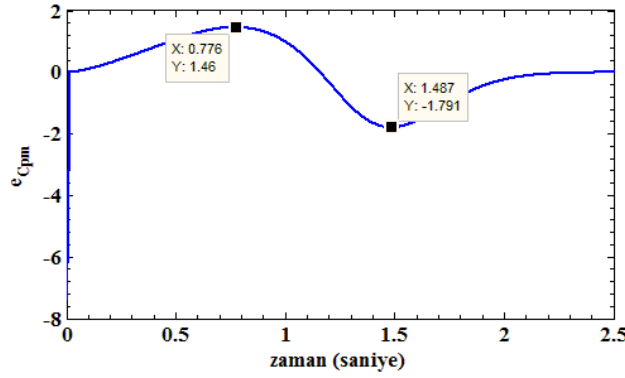
Tablo 2. Belirlenmiş PID katsayıları ve limit değerleri

	Belirlenmiş katsayılar	Üst limit değeri	Alt limit değeri
K_p	$K_{pkr}/2=0.35$	$K_{pkr}=0.7$	0.1
K_i	$K_{ikr}/2=3.55$	$K_{ikr}=7.1$	0.1
K_d	$K_{dkr}=0.3$	$K_{dkr}^*2=0.6$	0.1

Tablo 2'de görüleceği gibi, adaptif çevrimiçi katsayı ayarlama sürecinde katsayılar için alt ve üst limit değerleri verilmiş ve böylece aşırı salınım ve kararsızlık durumları engellenmiştir. Tablo 2'de gösterilen katsayılar kullanılarak elde edilmiş yörünge takip hatası Şekil 10'da, bu yörünge takip hatasına karşılık gelen e_{Cpm} değeri ise Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 10'dan görüldüğü gibi, PID katsayı ayarlama işlemi sonucunda, yörünge takip hatasının en büyük değeri 0.1 seviyesine kadar düşürülmüştür. 0.1'lik hata değeri, süreç kontrol indekslerinin ÜSL ve ASL değeridir.



Şekil 10. PID katsayı ayarlama işlemi sonucunda elde edilmiş yörünge takip hatasının zamana göre değişimi.



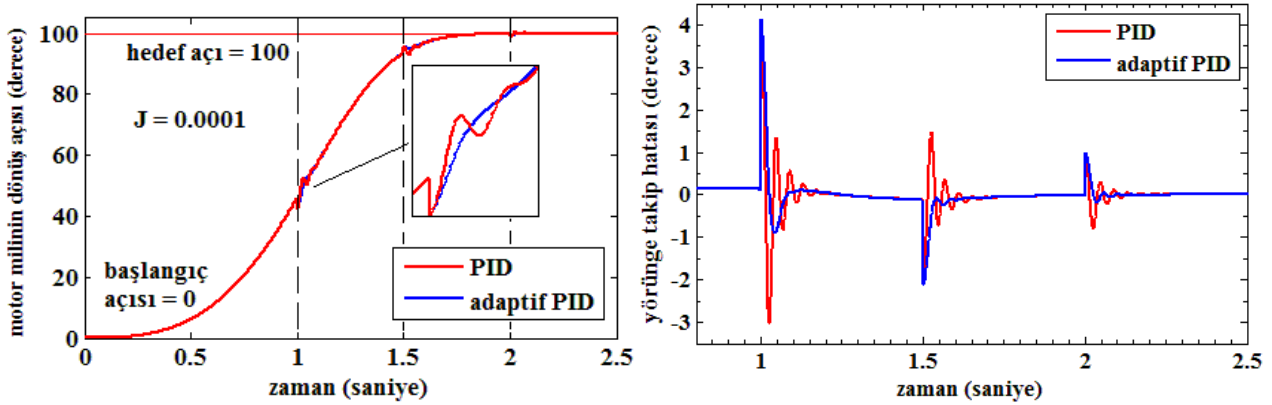
Şekil 11. e_{Cpm} değerinin zamana göre değişimi.

Takip eden örnek uygulamalarda, klasik (adaptif olmayan) PID denetleyici ile çalışmada önerilen adaptif PID denetleyici MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile karşılaştırılmışlardır.

3.2. Deneysel Çalışmalar

Benzetim çalışmaları farklı J motor ataleti değerlerinde, bozucu ve gürültü işaretlerinin eklenmesi durumlarında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında motor milinin 0 dereeden 100 dereceye dönmesi istenmektedir. Deneysel motor çıkış miline 1, 1.5 ve 2. saniyelerde sırasıyla -2, -4 ve -3 derecelik bozucular etkimektedir.

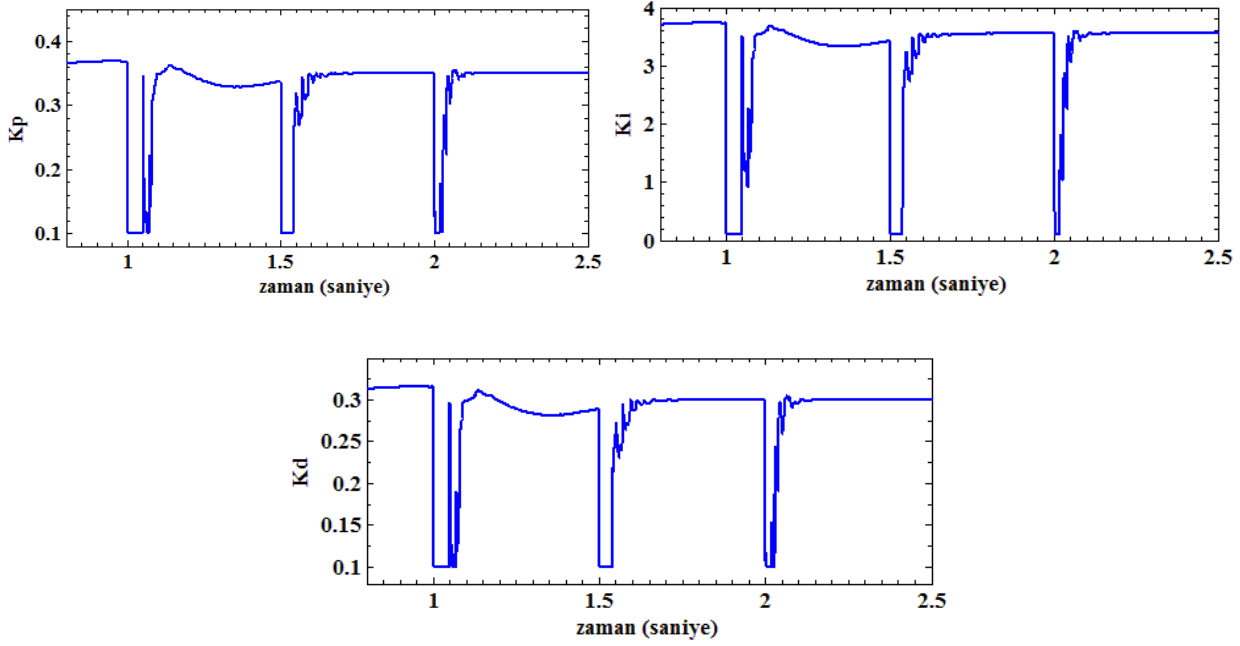
İlk olarak motor atalet momenti $J=0.0001$ alınmıştır. Şekil 12'de gürültüsüz durum için, motor milinin dönüş açısının referans yörüngeye göre değişimi ve bu hareket esnasındaki yörünge takip hatası görülmektedir. Şekil 13'te ise adaptif PID denetleyicideki K_p , K_i ve K_d katsayılarının değişimleri gösterilmektedir.



(a)

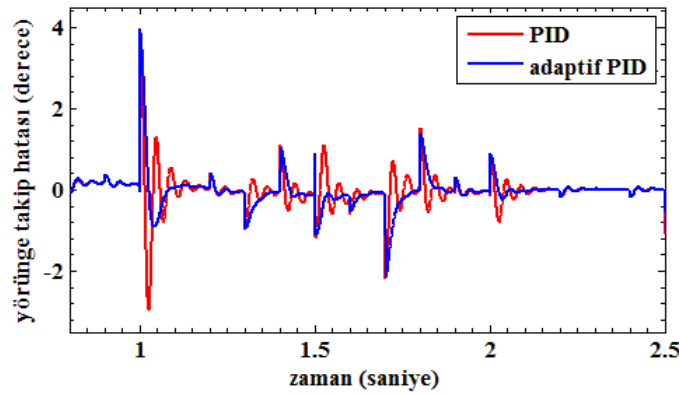
(b)

Şekil 12. $J=0.0001$ ve gürültüsüz durum için; a- PID ve adaptif PID denetleyici ile kontrol edilen motor milinin bozucular etkisindeki dönüş hareketi. b- Yörünge takip hatasının zamana göre değişimi.



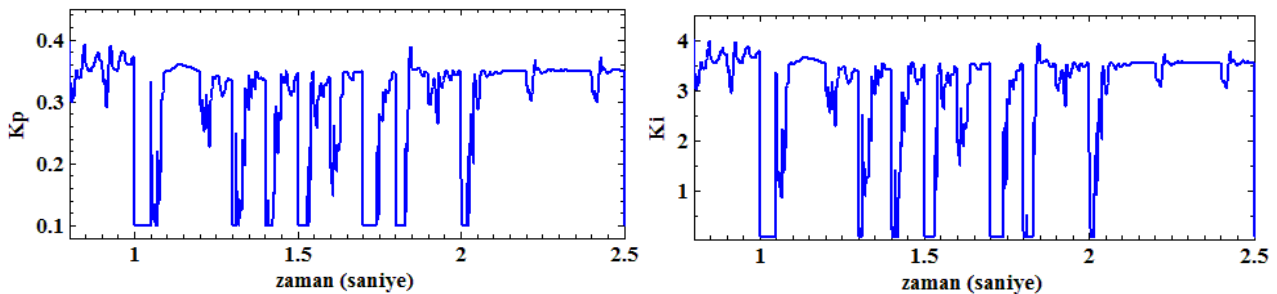
Şekil 13. $J=0.0001$ ve gürültüsüz durum için adaptif PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayılarının değişimleri.

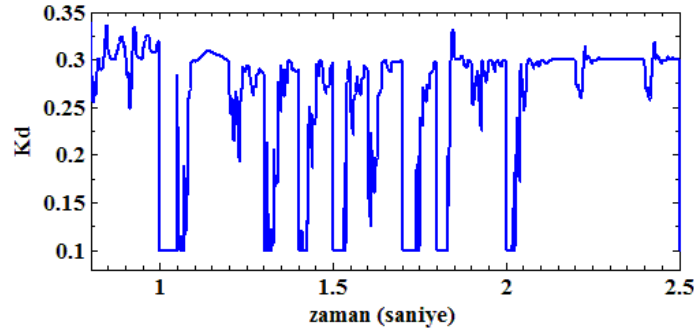
Şekil 14'te motor çıkışına 0.04 gücünde, 0.1 örnekleme zamanına sahip band limitli beyaz gürültü eklenmiş durum için yörünge takip hatasını gösterilmektedir.



Şekil 14. $J=0.0001$ ve gürültülü durum için yörünge takip hatasının zamana göre değişimi.

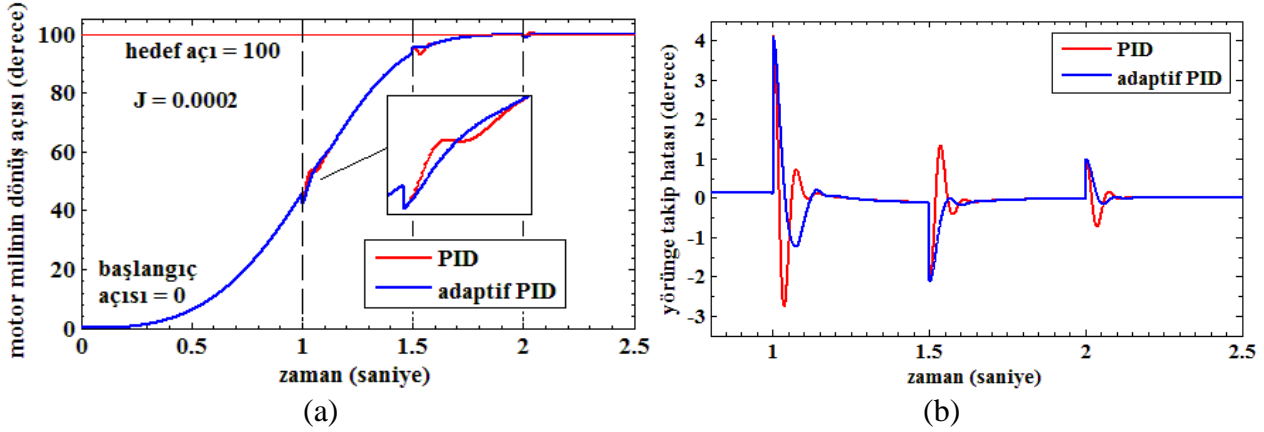
Aşağıda verilen Şekil 15'te motor miline gürültünün eklenmesi durumu için yapılan deneyde adaptif PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayılarının değişimi gösterilmektedir.





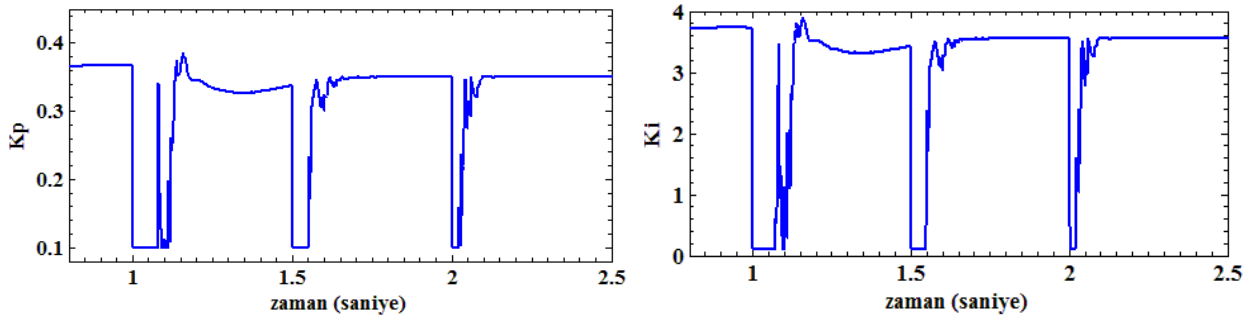
Şekil 15. $J=0.0001$ ve gürültülü durum için adaptif PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayılarının değişimleri.

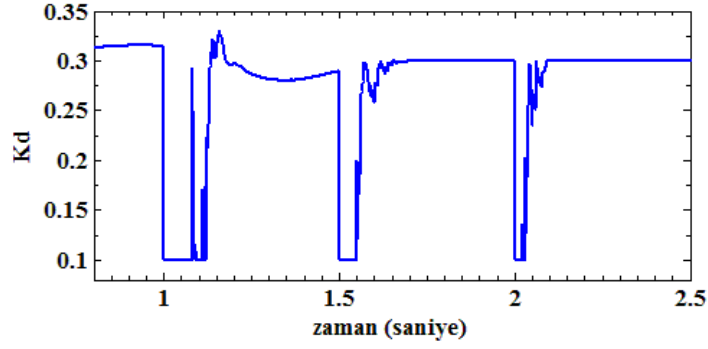
Bu kez benzer bir çalışma, $J=0.0002$ değerinde tekrarlanmıştır. Bir önceki deneysel çalışmada olduğu gibi, ilk olarak gürültü işaretinin olmadığı durum test edilmiştir. Gürültünün olmadığı deneyde elde edilen sonuçlar Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 16. $J=0.0002$ ve gürültüsüz durum için; a- PID ve adaptif PID denetleyici ile kontrol edilen motor milinin bozucular etkisindeki dönüş hareketi. b- yörünge takip hatasının zamana göre değişimi.

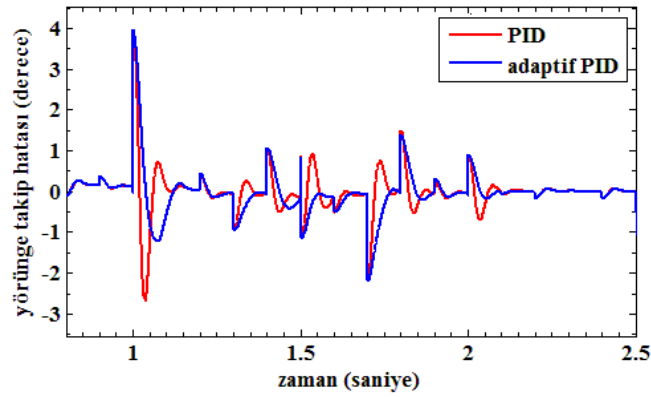
Şekil 17'de bu deneyde adaptif PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayılarının değişimi gösterilmektedir.



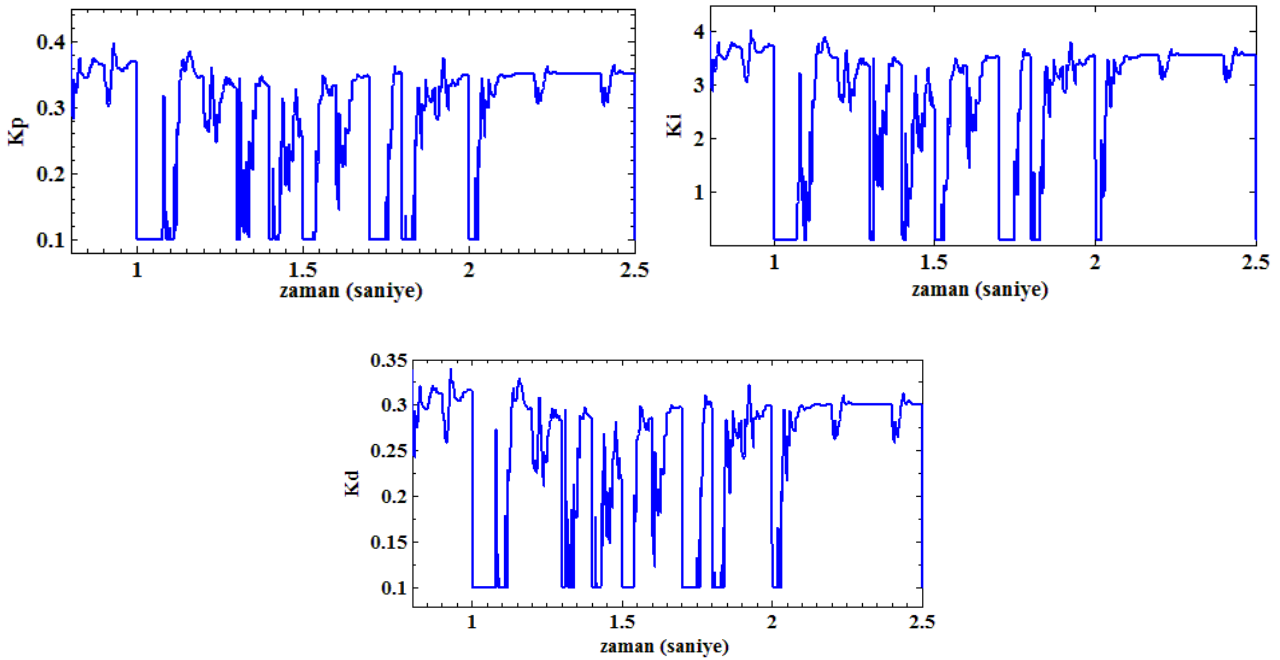


Şekil 17. $J=0.0002$ ve gürültüsüz durum için adaptif PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayılarının değişimleri.

$J=0.0002$ ve gürültünün eklendiği deneyde elde edilen sonuçlar Şekil 18 ve Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 18. $J=0.0002$ ve gürültülü durum için yörünge takip hatasının zamana göre değişimi.



Şekil 19. $J=0.0002$ ve gürültülü durum için adaptif PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayılarının değişimleri.

Benzetim çalışmalarında, geleneksel PID denetleyici ve 6σ SYİ temelli adaptif PID denetleyiciler, farklı motor ataleti değerlerinde, bozucu sinyal ve gürültü durumlarında karşılaştırılmışlardır. Şekil 12-19'da elde deneylerle elde edilen motor pozisyon çıkışları, referans yörünge takip hataları ve adaptif PID denetleyicinin katsayılarının değişimleri gösterilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği gibi, çalışma ile önerilen yöntem motor parametre (J) değişiminde, bozucu ve gürültü sinyalleri durumlarında değişken katsayılı adaptif PID denetleyici, geleneksel PID denetleyiciye göre daha dayanıklı bir kontrol performansı göstermektedir. Bu ise önerilen yöntem ile PID denetleyici katsayılarının değişken sistem durumlarına göre çevrim içi olarak ayarlanabildiğini ve bu sayede kontrol performansının da arttığını göstermektedir.

4. Sonuçlar

Çalışmada 6σ SYİ'ni temel alan adaptif PID denetleyicisinin tasarımı ve benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem bir PMDC motor milinin pozisyon kontrolünde test edilmiştir. Motor pozisyon kontrolünde referans yörünge fonksiyonu kullanılmış ve motor açısının bu yörüngeyi takip etmesi amaçlanmıştır. Önerilen yöntemle PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d katsayıları farklı J değerlerinde, sistemde bozucu ve gürültü işaretinin var olması durumlarında kendinden çevrim içi olarak ayarlanabilmiştir. Önerilen yöntem ile klasik PID denetleyici performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, adaptif PID denetleyici tasarımında 6σ SYİ'nin kullanılması, kontrol performansını artırmıştır. Çalışma ile 6σ SYİ'nin kontrolör tasarımlarında kullanımına yönelik yeni bir öneri getirilmiştir. Sonraki çalışmalarda bu yaklaşım gerçek sistem platformlarında denenecektir.

Bilgilendirme

Bu çalışma, ISMSIT 2017'de sözlü olarak sunulmuştur.

5. Kaynaklar

- [1] J. G. Ziegler, N. B. Nichols, *Optimum Settings for Automatic Controllers*, Trans. ASME 1942; 64; 759 – 765.
- [2] K. J. Åström, T. Hägglund, C. C. Hang and W. K. Ho, *Automatic tuning and adaptation for PID controllers - a survey*, Control Eng. Prac 1993;1; 699-714.
- [3] K. J. Åström, T. Hägglund, *PID controllers: Theory, Design, and Tuning*, Instrument, Society of America 1995.
- [4] I. Mizumoto, H. Tanaka, Z. Iwai, *Adaptive PID Control for Nonlinear Systems With a Parallel Feed forward Compensator*, International Journal of Innovative Computing, Information and Control 2010; 6; 7; 2901-2918.
- [5] W. D. Chang, R. C. Hwang, J. G. Hsieh, *Adaptive control of multivariable dynamic systems using independent self-tuning neurons*, In Proceeding of the Tenth International Conference on Tools with Artificial Intelligence 1998; Taipei, Taiwan; 68-73.
- [6] B. Xu, R. S. Pandian, N. Sakagami, F. Petry, *Neuro-fuzzy control of underwater vehicle-manipulator systems*, Journal of the Franklin Institute 2012; 349; 1125-1138.
- [7] M. S. Saad, M. Jamaluddin, I. Z. M. Darus, *Implementation of PID Controller Tuning Using Differential Evolution and Genetic Algorithm*, International Journal of Innovative Computing, Information and Control 2012; 9; 11; 7761-7779.

- [8] Z. L. Gaing, *A Particle Swarm Optimization Approach For Optimum Design of PID Controller in AVR system*, IEEE Trans. on Energy Conversion 2004; 19; 2; 384-391.
- [9] A. Bagis, *Tabu search algorithm based PID controller tuning for desired system specifications*, Journal of the Franklin Institute 2011; 348; 2795-2812.
- [10] D. Aslan, S. Demir, *Laboratuvar Tıbbında Altı-Sigma Kalite Yönetimi*, Türk Biyokimya Dergisi [Turkish Journal of Biochemistry - Turk J Biochem] 2005; 30 (4); 272-278.
- [11] B. M. Durman, F. Pakdil, *İstatistik Proses Kontrol Uygulamaları İçin Bir Sistem Tasarım*”, VII. Ulusal Ekonometri Ve İstatistik Sempozyumu, İstanbul Üniversitesi, 2005.
- [12] H. E. Ertan,
<http://www.ba.metu.edu.tr/~manclub/yayinlar/glokal/glokglokalar/sayi13/6sigma.pdf>, Erişim tarihi 24.05.2012.
- [13] T. Özdemir, *İstatistik Süreç Kontrol, İS 432 “İstatistik Kalite Denetimi Ders Notu*, 2003, <http://80.251.40.59/science.ankara.edu.tr/ozdemirt/>, Erişim Tarihi 20.05.2012.
- [14] D.C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [15] İ. Kaya, *Altı Sigma Yaklaşımında Bulanık Süreç Yeterliliği Analizleri*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2010.
- [16] S. Yavuz, *Altı Sigma Yaklaşımı Ve Bir Sanayi İşletmesinde Uygulaması*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, 2006.
- [17] W. Zhan, *Robustness Analysis of Pulse Width Modulation Control of Motor Speed*, WCECS 2007, San Francisco USA, 2007.
- [18] J. S. Hwang, K. H. Kim, Y. T. Kim, S. M. Baek, *Parameter Optimization Of Field Oriented Control With 6 Sigma Tool*, Isie 2001, Pusan, Korea, 2001.
- [19] X. Meng, S. Wang, J. Qiu, Q. Zhang, J. G. Zhu, Y. Guo, D. Liu, *Robust Multilevel Optimization of PMSM Using Design for Six Sigma*, Ieee Transactions On Magnetics, Vol. 47, No. 10, October 2011.
- [20] G. Lei, Y. G. Guo, J. G. Zhu, T. S. Wang, X. M. Chen, K. R. Shao, *System Level Six Sigma Robust Optimization of a Drive System With PM Transverse Flux Machine*, Ieee Transactions On Magnetics, Vol. 48, No. 2, February 2012.