

GÜZ DÖNEMİ MAKİNE TEORİSİ, SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL

1. DENEYİ

1. **DENEY ADI:** Rezonans Deneyi

2. **DENEYİN AMACI:** Tek serbestlik dereceli bir sistemin rezonans frekansını deneysel ve analitik olarak bulmak.

3. TEORİK BİLGİLER VE TANIMLAR:

3.1. Tanımlar

Titreşim: Bir cismin denge konumu etrafında yapmış olduğu salınım hareketlerine titreşim denir.

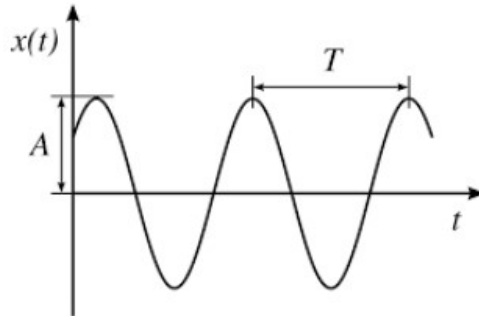
Serbestlik Derecesi: Bir sistemin herhangi bir anda bütün parçalarının konumlarının tamamen belirli olabilmesi için gereken birbirinden bağımsız minimum koordinat sayısıdır.

Genlik: Titresen cismin denge konumuna göre maksimum yer değiştirmesi.

Periyot: Titreşim hareketinin bir kez tekrarlanması için gereken süre.

Frekans: Birim zamandaki titreşim sayısı.

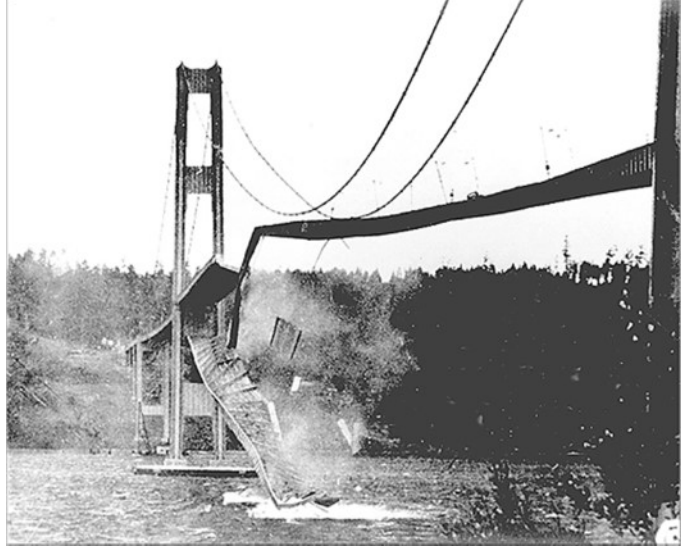
Harmonik Hareket: Bir hareket eşit zaman aralıklarından sonra kendini tekrarlıyorsa buna periyodik hareket denir. En basit periyodik hareket şekli harmonik harekettir (Şekil 1). İvmenin yer değiştirme ile orantılı olduğu titreşimlere ise basit harmonik hareket denir.



Şekil 1. Harmonik Hareket

Rezonans: Dışarıdan tahrik eden zorlayıcı etkinin frekansı, sistemin doğal frekansı ile çakışırsa sistemin salınımlarının giderek büyüdüğü ve sistemi tahrip edecek mertebeye ulaştığı görülür. Bu olaya rezonans denir, sistem için tahribat yaratabilir.

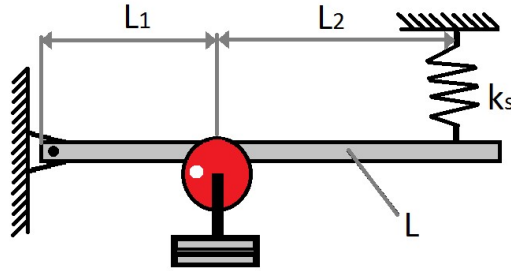
Tasarımcı rezonansı dikkate alamazsa, sonuçlar yıkıcı olacaktır. Rezonans olayının en kötü örneklerinden birisi Tacoma Köprüsü' dür. 1940 yılında, Tacoma Köprüsü' nün çökme sebebi, dış kuvvet frekansı (bu durumda rüzgâr) köprünün doğal frekansı ile çakışmasıdır.



Şekil 2. Tacoma Köprüsü'nün Çökmesi

3.2. Sistemin Matematiksel Modeli

Bu bölümde, deney sisteminin matematiksel modeli türetilmiştir. Matematiksel modelin türetilmesi için Lagranjian yaklaşım uygulanmıştır.



Şekil 3. Titreşim Deney Düzenekinin şeması

Sistem tek serbestlik dereceli olduğu için hesaplamalar sonucunda bir adet denklem elde edilecektir.

İlk olarak, Lagrange Eşitliğinin genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_j} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial x_j} + \frac{\partial E_p}{\partial x_j} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_j} = Q_j \quad (1)$$

Bu eşitlikte

E_k : Sistemin toplam Kinetik Enerjisi

E_p : Sistemin toplam Potansiyel Enerjisi

E_D : Sistemin toplam Sönüm Enerjisi
 Q_j : Genelleştirilmiş kuvvet
 x_j : Genelleştirilmiş koordinat.

Başlangıç olarak potansiyel enerjiyi çıkarılır;

$$E_p = \frac{1}{2} k_s (L_1 + L_2)^2 \theta^2 \quad (2)$$

Sistemin kinetik enerjisi

$$E_k = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (3)$$

Burada atalet momenti (J)

$$J = m_s L_1^2 \quad (4)$$

Lagrangian denklemi için kısmi türevleri alınır;

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} \right) = J \ddot{\theta} \quad \frac{\partial E_k}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial E_p}{\partial \theta} = k_s (L_1 + L_2)^2 \theta \quad (5)$$

$Q = FL_1$ (kirişin O noktası etrafında sonsuz küçük döndüğü varsayılarak)

Lagrange Denkleminde kinetik ve potansiyel enerjinin türevleri yerlerine yazılırsa;

$$J \ddot{\theta} + k_s (L_1 + L_2)^2 \theta = FL_1 \quad (6)$$

bulunur.

4. DENEY SİSTEMİ:

Tek serbestlik dereceli kütle yay sistemi olan deney düzeneği Şekil 4'teki gibidir. Burada sistemi tahrik etmek için verilecek olan bozucu giriş, sistemde bulunan ve çeşitli frekanslarda çalıştırılan motora bağlı disk şeklinde dengesiz bir kütlede oluşan merkezkaç kuvveti ile meydana gelir.



Şekil 4. Deney Sistemi

5. DENEYİN YAPILIŞI:

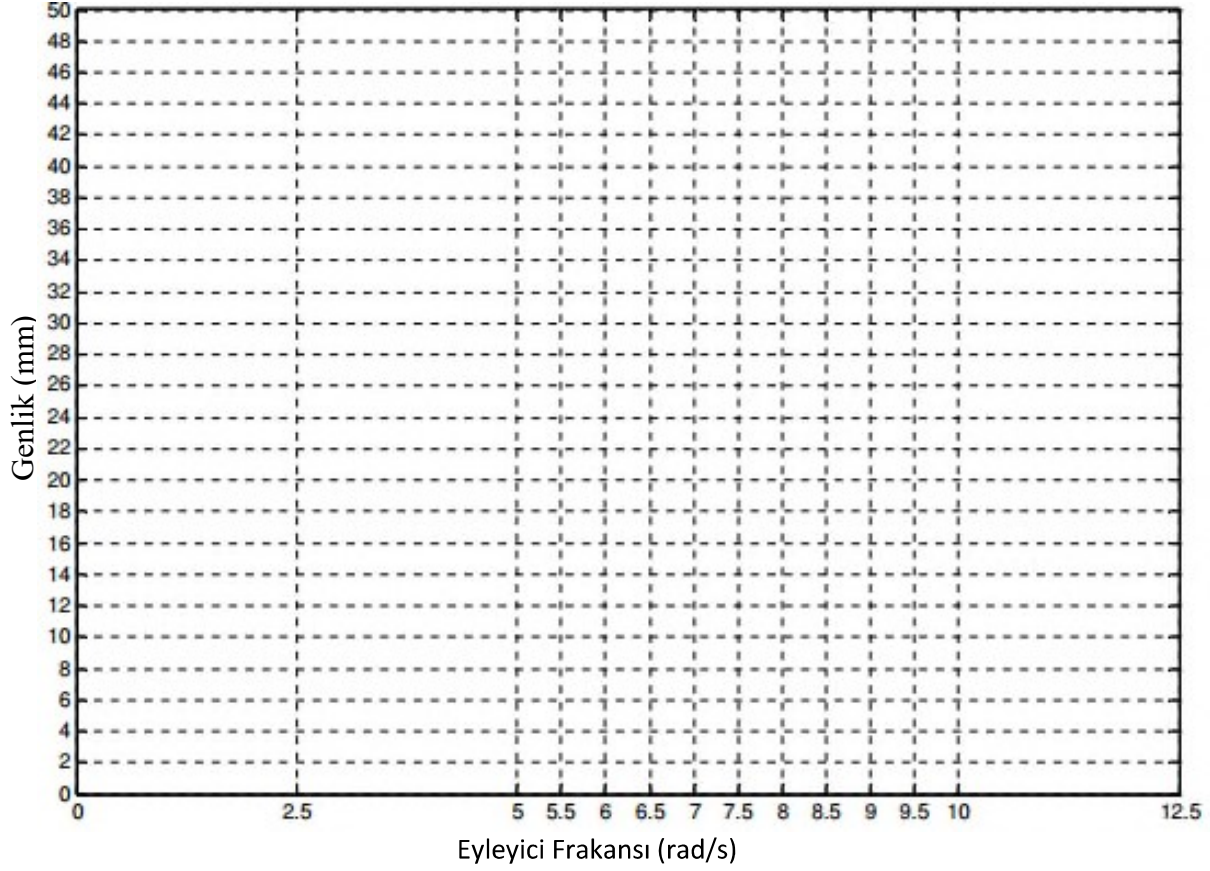
Başlamak için;

1. Tablo 1’de verilen frekanslarda kirişin denge noktasından yaptığı maksimum deplasmanlar ölçülür (m).
2. Aşağıda verilen tablo kirişin yer değiştirmelerine göre doldurulur.

Tablo 1. Cihaz Frekansı Dönüşüm Tablosu

Sistem Frekansı	Frekans: f (x100/2,5) (Hz)	Frekans $\omega = 2\pi f$	Genlik (m)
2,5	100	10,47	
5	200	20,93	
5,5	220	23,03	
6	240	25,12	
6,5	260	27,21	
7	280	29,31	
7,5	300	31,40	
8	320	33,49	
8,5	340	35,59	
9	360	37,68	
9,5	380	39,77	
10	400	41,87	
12,5	500	52,33	

3. Deplasman ölçümlerine göre frekansa karşı genlik çizimi yapılır.



Şekil 5. Grafik çizim tablosu

4. Sistemin doğal frekansı bulunur (grafığın zirve noktası sistemin doğal frekansını gösterir).

Analitik çalışma

1. Adım: Sisteme ait yay sabitinin hesaplanması

- Sabit durumda (yay deney düzeneğine bağlı iken) yayın iki ucu arasındaki mesafe ölçülür:(m)
- Yay söküldükten sonra iki ucu arasındaki mesafe ölçülür :(m)
- Yaya belirli ağırlıklar bağlandıktan sonra oluşan yer değişimi, bağlantı noktaları arasındaki mesafe ölçülür:(m)

Tablo 2. Ölçüm Değerleri

Eklenen kütle (kg)	$\delta_{(c-b)}$ (mm) (c-b)	$\delta_{(a-b)}$ (mm) (a-b)

d. Yay katsayısı hesabı (K)

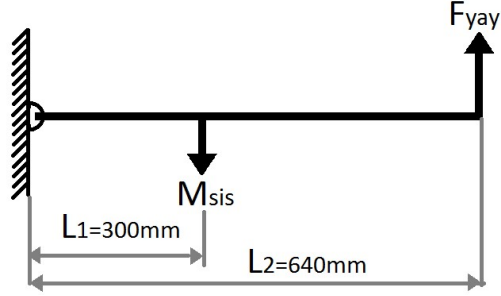
$$F = k\delta(c - b)$$

(7)

Burada, $g=9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ ve $F \text{ (N)}$ yaya uygulanan kuvvettir.

2. Adım: Doğal frekansın hesaplanması

a. Sistemin kütlesi hesaplanır (Sistemin momenti kirişin sabit noktasına göre (O) alınarak).



Şekil 6. Deney düzeneğinin serbest cisim diyagramı

$$F_{yay} = \frac{M_{sistem} \delta_{(a-b)}}{\delta_{(c-b)}} \quad (8)$$

b. Sistemin diferansiyel denklemi aşağıdaki gibidir;

$$J\ddot{\theta} + kL_2^2\ddot{\theta} = F(t)L_1 \quad (9)$$

Burada,

$$J = M_{sistem}L_1^2 = \dots\dots\dots(\text{kg.m}^2) \quad (10)$$

Sonuç olarak sistemin doğal frekansı;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{kL_2^2}{J}} \quad (11)$$

şeklindedir.

Adı-Soyadı :
Numara :
İmza :

Deneyi Yürüten Öğretim Elemanı :
Deneyin Yapıldığı Tarih :
Grup-Alt Grup :

NOT

Tablo 3. Sonuçlar

ω_n (Deneyisel Yolla Elde Edilen)	K(N/m)	J(kg.m ²)	ω_n (Analitik Yolla Elde edilen)

Sonuçlar ve Tartışma

.....

.....

.....

.....

.....

Lütfen işlemlerinizi bu alana yazınız. (Gerek duyulduğu takdirde Ek A4 kağıdı kullanılabilir.)



GÜZ DÖNEMİ MAKİNE TEORİSİ, SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL

2. DENEYİ

1. DENEY ADI: Çift Tank Su Seviyesi Kontrolü

2. DENEYİN AMACI: Su Seviyesi Kontrolü için PI Kontrolör Tasarlanması, Simülasyonu ve Deneysel Olarak Doğrulanması

Deneyin içeriği:

- Çift tank deney setinin matematiksel modelinin çıkarılması,
- Açık çevrim transfer fonksiyonunun Laplace transformasyonu ile s düzlemine aktarılması,
- Sistemin doğrusallaştırılması, doğrusal olmayan sistem denklemlerinden denge noktasının tayini,
- Kutup yerleştirme yaparak PI-İleri beslemeli kontrolörün tasarlanması, tasarım esnasında kıstasların nasıl ele alınacağı,
- Kontrolün sağlanması, deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Deneye hazırlık aşaması:

Deneyin başarılı ile gerçekleştirilebilmesi için öğrencinin aşağıda belirtilen altyapıya sahip olması gerekmektedir.

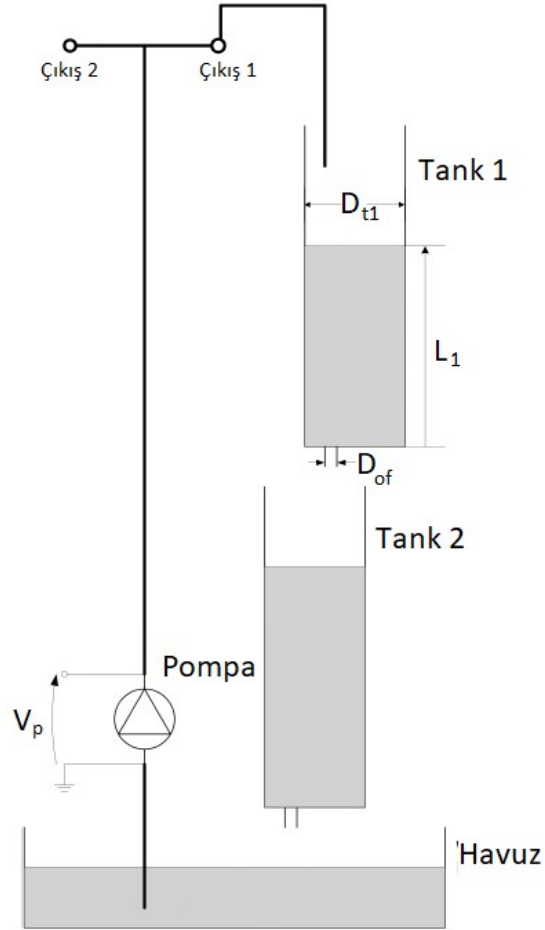
1. Transfer fonksiyonları konusunda bilgi,
2. PID kontrolör tasarımı konusunda bilgi,
3. Matlab-Simulink konusunda temel bilgi,
4. Quark konusunda temel bilgi (Deney gerçekleştirilirken ilgili öğretim elemanı tarafından verilecektir).

3. ÇİFT TANK SU SEVİYESİ KONTROL DENEY SİSTEMİ

Çift tank deney seti, iki tank ihtiva eden, su seviyesi kontrolünün gözlemlendiği, bir su girişli, iki tanklı bir sistemdir. Bu iki tank, bir plakaya sabitlenmiş bir şekilde monte edilmiştir. Üstteki tanka pompa vasıtasıyla su verilir, üstteki tankta biriken su, üstteki tankın altından bir orifiz vasıtasıyla aşağıdaki tanka aktarılır, aşağıdaki tanktan su rezervuarına geri boşalır. Su bir pompa vasıtasıyla iki adet orifize aktarılır, su doldurma işlemini yapmaktadır. Bu çıkışlar “Çıkış 1”, “Çıkış 2” olarak isimlendirilmektedir. Tanklardan su seviyesi kontrolü basınç

sensörleri vasıtasıyla alınmaktadır ve geri-besleme için uygun bir şekilde su seviyesi olarak okunabilir hale hazırlanmaktadır. Çift tank deney setinin endüstriyel uygulamalarına örnek olarak petro-kimyasal endüstri, kağıt yapımı, su arıtma tesisleri verilebilir.

Bu deney, PI ve ileri beslemeli kontrolörlerin tasarımı ile ilgilidir. Bu deney setinde birden fazla konfigürasyon gerçekleştirilebilir. Bu deney, üstten su tedariki, alttan tek kanal ile su tahliyesi üzerinden hareketle kurgulanacaktır. Bu konfigürasyon ile üstteki tankın su seviyesinin korunması sağlanacaktır. Bu konfigürasyon ile ilgili sistem şematiği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çift Tank Deney Seti

4. TEORİK BİLGİLER VE TANIMLAR

4.1. Doğrusal Olmayan Sistem Denklemlerinin Çıkartılması

Sistemin denklemlerini çıkartılmasında pompa beslemesi ihmal edilmiştir. Sisteme giren pompa gerilimi V_p ve birinci tanktaki su seviyesi bir çıkış olarak L_1 olarak tanımlanmaktadır.

Buradaki amaç, sisteme ait açık çevrim transfer fonksiyonunu $G_1(s)$ elde etmektir. Bu transfer fonksiyonu sayesinde gerilim cinsinden su seviyesinin ne derece değiştiği ile ilgili olarak bilgi sahibi olunabilecektir.

Bu fonksiyon,

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = f(L_1, V_p) \quad (1)$$

olarak tanımlansın. F_{i1} ve F_{o1} çıkış ve giriş debisi olsun. O halde, A_{t1} tank alanı olmak üzere,

$$A_{t1} \frac{\partial L_1}{\partial t} = F_{i1} - F_{o1} \quad (2)$$

olarak tanımlanabilir. Burada gerilim cinsinden giriş hacimsel debisi,

$$F_{i1} = K_p V_p \quad (3)$$

olarak gösterilebilir. Bernoulli denkleminin uygulanması neticesinde ise, çıkış hızı

$$v_{o1} = \sqrt{2gL_1} \quad (4)$$

olarak gösterilebilir.

$$F_{o1} = A_{o1} \sqrt{2gL_1} \quad A_{o1} = \frac{1}{4} \pi D_{o1}^2 \quad (5),(6)$$

olduğu göz önüne alınırsa, sisteme ait doğrusal olmayan denklem,

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = \frac{K_p V_p}{A_{t1}} - \frac{A_{o1} \sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{L_1} \quad (7)$$

olarak elde edilir. Arzu edilen $L_{10} = 15$ cm lik denge noktası etrafında denge noktası arandığında,

$$\frac{K_p V_p}{A_{t1}} - \frac{A_{o1} \sqrt{2g}}{A_{t1}} \sqrt{L_{10}} = 0 \quad (8)$$

$$V_{p0} = \frac{A_{o1} \sqrt{2gL_{10}}}{K_p} \quad (9)$$

$$V_{p0} = 9,26 \text{ V} \quad (10)$$

olarak hesaplanır.

4.2. Hareket Denklemlerinin Doğrusallaştırılması ve Transfer Fonksiyonunun Bulunması

Doğrusal kontrolör tasarlanabilmesi ve uygulanabilmesi için her şeyden önce açık çevrim transfer fonksiyonunun elde edilmesi gerekmektedir. Fakat transfer fonksiyonunun elde edilmesi için sistemin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Dolayısıyla, Tank 1'e ait hareket denklemlerinin denge noktası etrafında doğrusallaştırılacaktır. Bu denge noktası (V_{p0}, L_{10}) , tankta sürekli bir L_1 su seviyesini koruyabilmesi için verilmesi gereken V_{p0} pompa gerilimi olarak düşünülebilir. Bu koşul dâhilinde, sistemdeki su seviyesi ve gerilim tanımlaması tekrar yapılsa,

$$L_1 = L_{01} + L_{11} \quad V_p = V_{p0} + V_{p1} \quad (11)$$

olarak ele alınabilir. Doğrusallaştırılmış denklem, denge noktasından sonraki pozisyonda,

$$\frac{\partial L_{11}}{\partial t} = f(L_{11}, V_{p1}) \quad (12)$$

olarak tanımlanabilir. Taylor serisini denge noktası etrafında açarsak,

$$\frac{\partial L_1}{\partial t} = \frac{K_p V_{p0} - A_{01} \sqrt{2g L_{10}}}{A_{t1}} - \frac{1}{2} \frac{A_{01} \sqrt{2g} L_{11}}{\sqrt{g L_{10}} A_{t1}} + \frac{K_p V_{p1}}{A_{t1}} \quad (13)$$

elde edilir. Denge noktası V_{p0} etrafında olduğu göz önüne alınırsa, denge noktasında $L_{11} = L_1 - L_{01}$ olduğu düşünülürse, denge noktası etrafındaki tank su seviyesindeki değişim

$$\frac{\partial L_{11}}{\partial t} = \left(-\frac{1}{2} \frac{A_{01} \sqrt{2g}}{\sqrt{g L_{10}} A_{t1}} \right) L_{11} + \left(\frac{K_p}{A_{t1}} \right) V_{p1} \quad (14)$$

olmaktadır. Burada Laplace dönüşümü gerçekleştirsek,

$$s L_{11}(s) = \left(-\frac{1}{2} \frac{A_{01} \sqrt{2g}}{\sqrt{g L_{10}} A_{t1}} \right) L_{11}(s) + \left(\frac{K_p}{A_{t1}} \right) V_{p1}(s) \quad (15)$$

olmaktadır. Bu eşitliği elektrik motoru açık çevrim transfer fonksiyonu formuna getirirsek,

$$\left(s + \frac{1}{2} \frac{A_{01} \sqrt{2g}}{\sqrt{g L_{10}} A_{t1}} \right) L_{11}(s) = \left(\frac{K_p}{A_{t1}} \right) V_{p1}(s) \quad (16)$$

$$G_{11}(s) = \frac{L_{11}(s)}{V_{p1}(s)} = \frac{K_{dc}}{\tau_1 s + 1} \quad (17)$$

$$\frac{L_{11}(s)}{V_{p1}(s)} = \frac{\left(\frac{K_p}{A_{t1}} \right)}{\left(s + \frac{1}{2} \frac{A_{01} \sqrt{2g}}{\sqrt{g L_{10}} A_{t1}} \right)} \quad (18)$$

$$K_{dc} = K_p \frac{\sqrt{2g L_{10}}}{A_{01} g} \quad \tau_1 = A_{t1} \frac{\sqrt{2g L_{10}}}{A_{01} g} \quad (19), (20)$$

olarak elde edilir.

4.3. Tank 1 Su Seviyesi Kontrolü

4.3.1. İsterler

1. tankın su seviyesinin ayarlanması amacıyla bir kötrolör tasarlaması hedeflenmektedir. Bu amaçla, pompa gerilimine bağlı olarak su seviyesindeki değışimi veren transfer fonksiyonu elde edilmişti. Bu amacın gerçekleştirilmesi için PI-FF kontrol (Proportional Integral-Feed Forward) Kontrol uygulanacaktır. Deneyde ± 1 cm kare dalgalar oluşturulacak olup sistemin bunu takip etmesi istenmektedir.

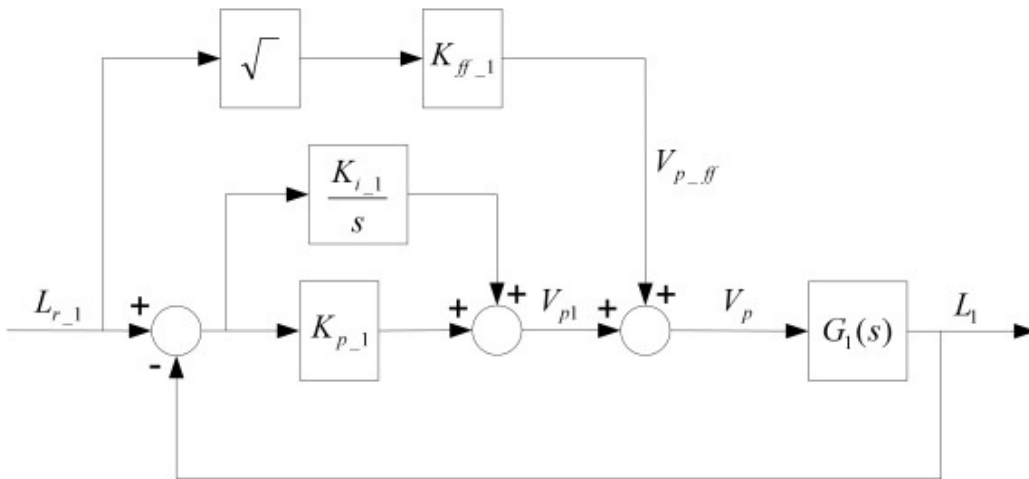
İstenen Performans Kriterleri:

1. Tank 1 için operasyon noktası: $L_{10} = 15$ cm
2. Yüzde aşım %10 dan az: $PO_1 \leq 10\%$
3. %2'ye yerleşme zamanı 5 saniyeden az: $t_{s_1} = 5.0$ s
4. Kararlı hal hatası yok: $e_{ss} = 0$ cm

4.3.2. İleri Beslemeli Kontrolör Tasarımı

Sıfır kararlı hal hatası için Tank 1'in su seviyesi, PI(Orantısal+İntegral) kontrolöre ileri besleme aksiyonu V_{p_ff} eklenerek oluşturulan V_p ile aşağıdaki gibi kapalı çevrim sistem oluşturularak kontrol edilir.

Tasarlanan PI kötrolör, sistemi etkileyen dinamik bozucuların etkilerini bastırır. Diğer taraftan, ileri besleme ise alt tahliye deliğinden sabit hacimde sürekli olarak boşaltılan sıvıyı kompanze ederek tank su seviyesinin dengede kalmasını sağlar (Şekil 2).



Şekil 2. İleri Beslemeli PI kontrol Blok Şeması

Burada ileri besleme gerilimi V_{p-ff} aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_{p-ff} = K_{ff-1} \sqrt{L_{r-1}} \quad (21)$$

Sisteme uygulanan V_p girişi ise, daha önce anlatıldığı gibi sisteme uygulanan küçük gerilim değişiklikleri V_{p1} 'e ek olarak verilen ileri besleme geriliminin toplamı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_p = V_{p1} + V_{p-ff} \quad (22)$$

Buradan hareketle, $L_{r1} = L_{10}$ ve $V_{p-ff} = V_{p0}$ olarak ifade edilebilir. Öyleyse ileri besleme kazancı,

$$K_{ff1} = \frac{A_{01}\sqrt{2g}}{K_p} \quad (23)$$

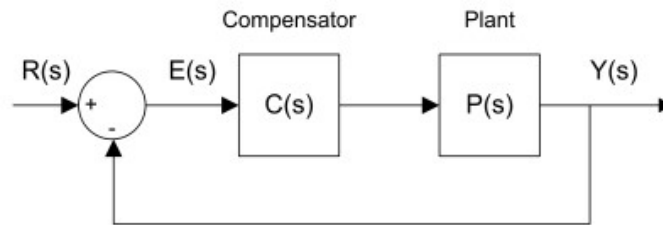
olarak hesaplanır.

4.3.3. PI Kontrolör Tasarımı

Açık çevrim transfer fonksiyonu $G_1(s)$ daha önce ifade edildiği üzere Tank 1'e ait su seviyesi dinamiğini ifade etmektedir. Yalnız görüleceği üzere V_p 'ye bir ileri besleme etki ettiğinden açık çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$G_{11}(s) = \frac{L_{11}(s)}{V_{p1}(s)} \quad (24)$$

Birim geri beslemeli kontrolör uygulanmış sistemin blok diyagramı en genel şekliye aşağıdaki gibi gösterilebilir (Şekil 3).



Şekil 3. Geri Besleme Kontrollü Sistem Blok Şeması

Burada $C(s)$ kontrolöre ait transfer fonksiyonunu, $P(s)$ sisteme ait transfer fonksiyonunu göstermektedir. $Y(s)$ sinyali sistem çıkışını göstermektedir ve bu çıkış $R(s)$ referans sinyalini izlemek zorundadır, referans sinyalini izlerken de istenen performans kriterlerini sağlamalıdır. $E(s)$ sinyali ise her döngüde yeniden hesaplanan sistem çıkışının, takip etmesi istenilen

referanstan ne kadar uzakta olduğunu gösteren hata sinyalıdır. O halde, sistem çıkışı bu sinyaller ve transfer fonksiyonları cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Y(s) = C(s)P(s)(R(s) - Y(s)) \quad (25)$$

Yukarıdaki eşitlik düzenlenerek oluşturulan kapalı çevrim transfer fonksiyonu sistem çıkışını girişine oranından aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)} \quad (26)$$

PI kontrolör için bu giriş-çıkış ifadesi zaman düzleminde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$u = K_p(r - y) + \frac{K_i(r-y)}{s} \quad (27)$$

Burada K_p ifadesi orantısal kazancı, K_i ifadesi ise integral kazancını göstermektedir.

Eğer birinci mertebeden bir sistem PI kontrolör ile seri bağlantı kuracak şekilde bir kapalı döngüye sokulursa, bu bağlantının sonucunda kapalı çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (28)$$

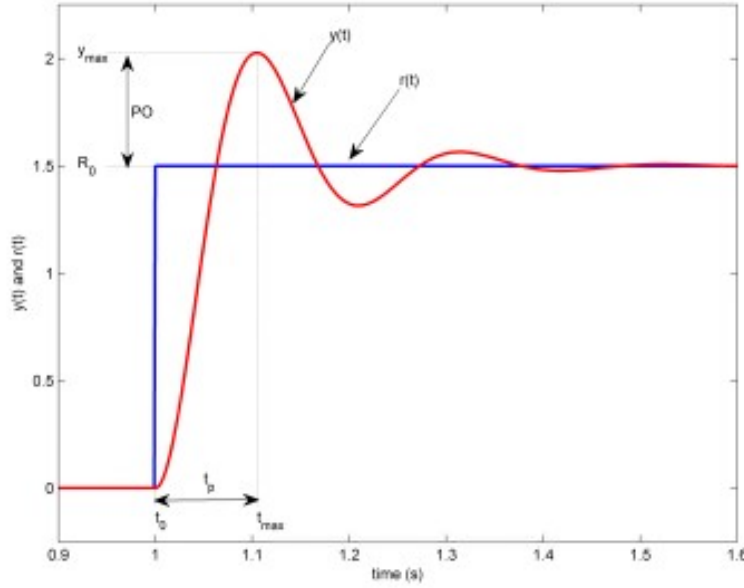
Burada w_n doğal frekans, ζ sönüm oranıdır. Yukarıdaki ifade standart ikinci mertebe transfer fonksiyonu olarak isimlendirilir. Bu fonksiyonun cevap özellikleri w_n doğal frekans ve ζ sönüm oranına bağlıdır.

Tepe Zamanı ve Maksimum Aşım:

İkinci mertebeden bir sisteme aşağıda gösterildiği gibi basamak girişi uygulansın.

$$R(s) = \frac{R_0}{s} \quad (29)$$

Yukarıdaki ifadede R_0 ifadesi basamak genliğidir ve değeri $R_0 = 1.5$ olsun. Bu girişe ikinci mertebeden sistemin verdiği cevap aşağıdaki grafikteki gibidir. Grafikteki eğrilerden biri sistem çıkışı (cevabı) iken diğeri ise sisteme uygulanan 15 birim genlikli basamak giriştir (Şekil 4).



Şekil 4. Birim Basamak Fonksiyonu için Sistem Cevabı

Sistem cevabındaki okunan maksimum değeri y_{max} olarak, y_{max} 'ın oluştuğu anı da t_{max} olarak gösterilsin. Bu durumda sistemin cevabının maksimum yüzde aşımı aşağıdaki ifade ile bulunur.

$$PO = 100 \frac{(y_{max} - R_0)}{R_0} \quad (30)$$

Basamak girişin uygulandığı andan t_0 , sistem cevabının maksimum değere ulaştığı ana kadar geçen zaman, tepe zamanı olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi bulunur.

$$t_p = t_{max} - t_0 \quad (31)$$

İkinci mertebeden sistemde maksimum yüzde aşım sadece sönümleme oranına bağlıdır ve aşağıdaki ifade ile bulunur.

$$PO = 100e^{(-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}})} \quad (32)$$

Tepe zamanı ise hem sönüm oranına hem de doğal frekansa bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (33)$$

Tank 1 için istenen %2'ye yerleşme zamanı ise aşağıdaki ifade ile bulunur.

$$t_s = \frac{4}{\xi \omega_n} \quad (34)$$

4.3.3.1. PI Kontrol Parametrelerinin Hesaplanması

Kontrol Parametrelerinin hesaplanabilmesi için kapalı çevrim transfer fonksiyonunun kutuplarının yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda,

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K_{dc1}(K_{p1}s + K_{i1})}{\tau_1 s^2 + (1 + K_{dc1}K_{p1})s + K_{dc1}K_{i1}} \quad (35)$$

olan kapalı çevrim transfer fonksiyonu isterler cinsinden

$$\xi_1 = \frac{\ln\left(\frac{1}{100}PO_1\right)}{\sqrt{\ln\left(\frac{1}{100}PO_1\right)^2 + \pi^2}} \quad \omega_{n1} = \frac{4}{\xi_1 t_{s1}} \quad (36),(37)$$

şeklinde ifade edilebilir. Neticede, istenen maksimum aşım miktarı limiti ile oturma zamanı içerisinde bir cevap verecek kutbun nerede olduğu bulunmuş olur. Bu bilgiler kullanılarak kontrol parametreleri,

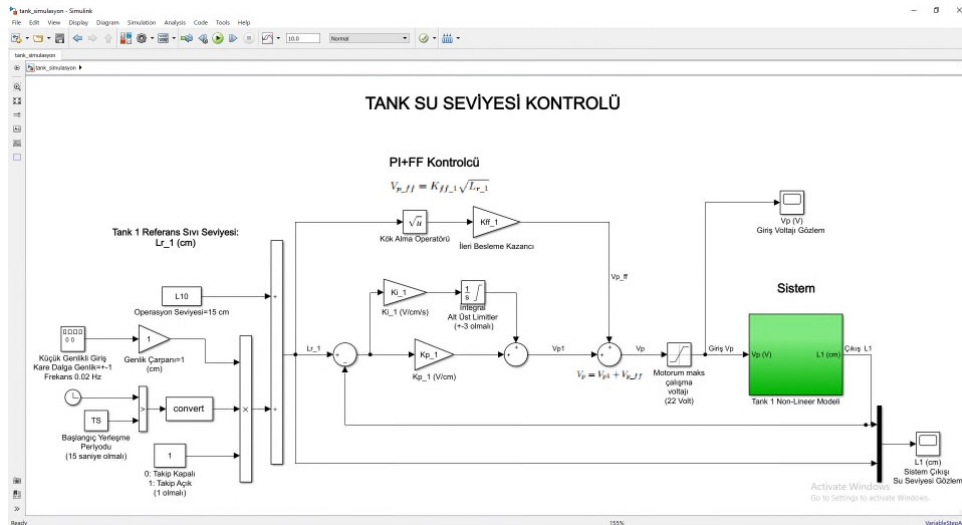
$$K_{p1} = \frac{2\xi_1\omega_{n1}\tau_1 - 1}{K_{dc1}} \quad , \quad K_{i1} = \frac{\omega_{n1}^2\tau_1}{K_{dc1}} \quad (38),(39)$$

şeklinde bulunmaktadır.

4.3.4. Simülasyon

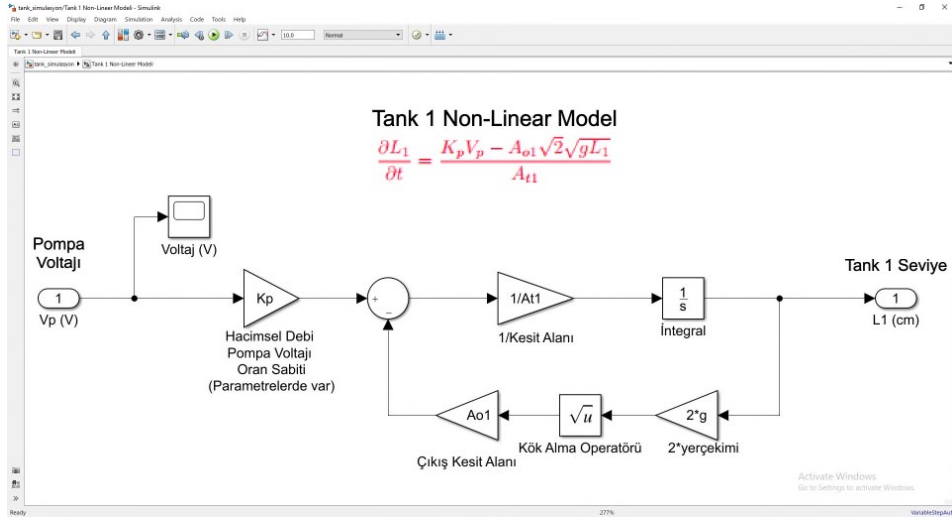
Sönüm oranının sistem cevabının şeklini, doğal frekansın ise hızını belirlediği söylenebilir.

“*tank_simulasyon*” Dosyası Simulink’te açılırsa Şekil 5’te blok diyagramı verilen model açılacaktır (*tank_simulasyon* dosyası laboratuvarı yapan ilgili öğretim elemanı tarafından temin edilmelidir).

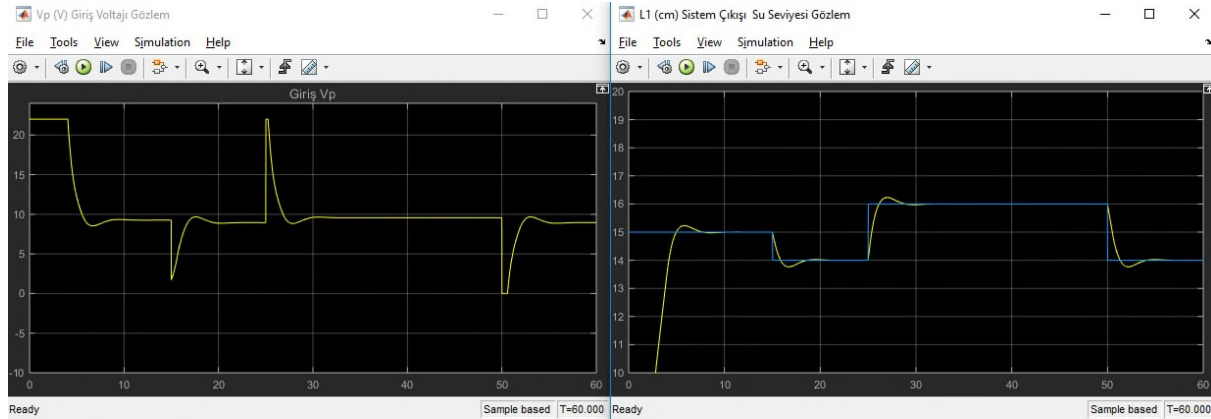


Şekil 5. Tank Su Seviyesi Kontrolü

İçi boyalı sistem bloğuna çift tıklanıp açılırsa daha önce oluşturulan doğrusal olmayan model aşağıdaki gibi görünecektir (Şekil 6). Şekil 7’de ise gerilim ve tank su seviyesi simülasyon cevapları yer almaktadır.



Şekil 6. Tank Sistemine Ait Doğrusal Olmayan Simulink Modeli



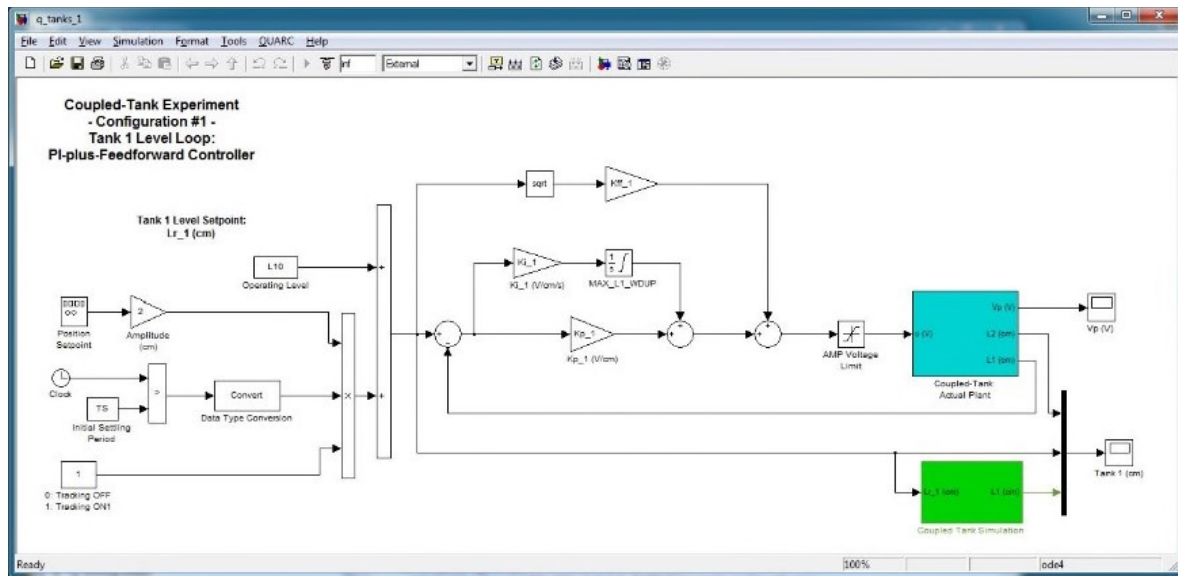
A)

B)

Şekil 7. Simülasyon Cevapları A) Gerilim Cevabı, B) Su Seviyesi

5. DENEYİN YAPILIŞI:

Şekil 8’de *q_tanks_1* Simulink dosyası görülmektedir. Dışsal ölçüm gürültü probleminin önüne geçmek için 2.5 Hz alçak geçiş frekans filtresi kullanılmıştır. Unutulmamalıdır ki, ölçüm gürültüsü sistemin doğru çalışmasına müsaade etmez. Sistem çalışırken, ayar mekanizmasında istenen referans girişin 27 cm’nin üzerine çıkmamasına dikkat edilmelidir. Aksi halde, tanktaki suda taşma meydana gelecektir.



Şekil 8. Çift Tank Deney Seti 1. Konfigürasyon Deney Modeli

Deneyde izlenecek prosedür:

- İlgili setup dosyasını çalıştırarak Matlab® programına hesaplanacak K_{pl} , K_{il} , K_{ffl} parametrelerini tanımlanır. Bu esnada, sisteme ait açık çevrim transfer fonksiyonu da tanımlanmalıdır.
- Kare dalga oluşturmak için “**Signal Generator**” bloğunu açın ve ilgili ayarlamaları yapılır.

Signal type = *square*

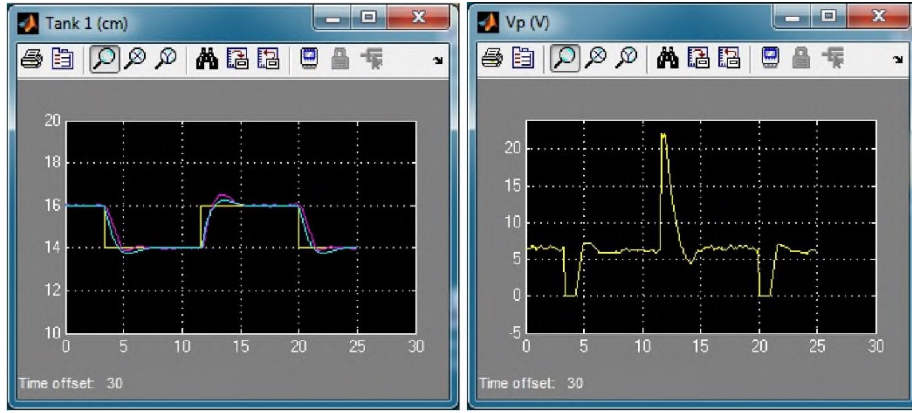
Amplitude = 1

Frequency = 0.06 Hz

Amplitude (cm) 1 olarak ayarlanır. Bu sayede 1 cm'lik deplasman görülecektir (± 1 cm).

3. Programı çalıştırılır ve Pompa Gerilimi penceresi, $V_p(V)$ Tank 1 su seviyesi düzey penceresi gözlemlenir. **Tank 1(cm)** (Scope bloğu kullanılabilir).
4. İntegral etki kalıcı durum hatalarını bastıracağı için İntegral bloğu ile oynama yapılmamalıdır. Yanlış ayarlamalar sistemin doğru çalışmamasına sebep olacaktır.
5. Simulink penceresinde “*build*” yapılarak simulasyon, bilgisayar ve ilgili deney donanımları birlikte çalışabilmek için gerekli arka plan işlerini tamamlar. Ardından “*set to connect*” yapılır. Her şey doğru yapıldıysa, bağlantı sağlanmakta ve sistem çalışmaya hazır olarak beklemektedir.

6. Simulink dosyasını çalıştırılır. Çalıştırıldığında, Hardware-In-The-Loop olarak simülasyon gerçekleşir. Bu şekilde donanım da bağımlıdır ve gönderilecek kontrol sinyallerini donanım işleyebilir. Öncelikle “*signal generator*” bloğundan 0 sinyal alınır. Denge konumu $L_{10} = 15$ cm ve Denge gerilimi $V_{p0} = 9.2$ V olduğundan emin olunmalıdır.
7. “*Signal Generator*” içerisinde, “*amplitude*” değeri ayarlanır. Onayladığında Şekil 9’daki gibi bir cevap elde edilmelidir.



(A)

(B)

Şekil 9. Tank Deney Seti, Deneysel Sonuçlar. A) Su Seviyesi B) Pompa Gerilimi

Sonuç:

Deney sonunda, laboratuvarı yapan öğretim elemanından size sağlayacağı “.mat” uzantılı dosyadan deneyiniz ile ilgili ölçümlere ulaşılabilir. Bu ölçüm verilerini öğrenci değerlendirir.

Tablo 1: Sisteme Ait Parametreler

Symbol	Description	Value	Unit
K_P	Pump Flow Constant	3.3	cm ³ /s/V
V_{Pmax}	Pump Maximum Continuous Voltage	12	V
V_{Ppeak}	Pump Peak Voltage	22	V
D_{Out1}	Out 1 Orifice Diameter	0.635	cm
D_{Out2}	Out 2 Orifice Diameter	0.47625	cm
L_{1max}	Tank 1 Height (i.e. Water Level Range)	30	cm
D_{t1}	Tank 1 Inside Diameter	4.445	cm
K_{L1}	Tank 1 Water Level Sensor Sensitivity (Depending on the Pressure Sensor Calibration).	6.1	cm/V
L_{2max}	Tank 2 Height (i.e. Water Level Range)	30	cm
K_{L2}	Tank 2 Water Level Sensor Sensitivity (Depending on the Pressure Sensor Calibration).	6.1	cm/V
L_{2max}	Tank 2 Height (i.e. Water Level Range)	30	cm
V_{bias}	Tank 1 and Tank 2 Pressure Sensor Power Bias	+/-12	V
P_{range}	Tank 1 and Tank 2 Sensor Pressure Range	0 - 6.89	kPa
D_{So}	Small Outflow Orifice Diameter	0.31750	cm
D_{Mo}	Medium Outflow Orifice Diameter	0.47625	cm
D_{Lo}	Large Outflow Orifice Diameter	0.55563	cm
g	Gravitational Constant on Earth	981	cm/s ²

Adı-Soyadı : Deneyi Yürüten Öğretim Elemanı :
Numara : Deneyin Yapıldığı Tarih :
İmza : Grup-Alt Grup :

NOT

NOT: Kopartılacak bu sayfalar deney raporunu oluşturacaktır. Raporu deneyden sonra en geç 1 hafta içerisinde laboratuvarı yapan öğretim elemanına ulaştırınız.

Tablo 1’de sistem ile ilgili parametreler verilmiştir. Bu parametreleri kullanarak Aşağıdaki parametreleri hesaplayarak Tablo 2’yi doldurunuz.

Tablo 2. Hesaplanan Parametreler

$K_{dc} =$
$\tau_1 =$
$K_{p,1} =$
$K_{i,1} =$
$K_{ff,1} =$

Şekil 10'a deney sonunda elde ettiğiniz grafiği yapıştırınız.



Şekil 10. Deney Sonucu

Tablo 3'e deney ve simülasyon sonucu elde edilen değerleri yazınız.

Tablo 3. Deney ve Simülasyon Sonuçlarına Ait Değerler

Açıklamalar	Sembol	Değer	Birim
Deney Sonucu			
Tank 1 Kontrol Kazançları			
İleri Geri Besleme Kontrol Girişi	$K_{ff,1}$		VA/ cm
Orantı Geri Besleme Parametresi	$K_{p,1}$		V/cm
İntegral Geri Besleme Parametresi	$K_{i,1}$		V/(cm-s)
Tank 1 Kontrol Simülasyonu			
Kalıcı durum hatası	$e_{ss, 1}$		cm
Oturma Zamanı	$t_{s, 1}$		s
Maksimum Aşım Miktarı	PO_i		%
Tank 1 Kontrol Uygulaması			
Kalıcı durum hatası	$e_{ss, 1}$		cm
Oturma Zamanı	$t_{s, 1}$		s
Maksimum Aşım Miktarı	PO_i		%

3. DENEYİ

1. DENEY ADI: PV ve PIV Kontrolcüler ile Motor Konum Kontrolü Deneyi

2. DENEYİN AMACI: Servo motorun dinamik denklemlerini ve transfer fonksiyonunu elde etmek, servo motrunun istenen gereksinimlerdeki konum kontrolünü yapacak PV ve PIV kontrolcüler tasarlamak ve test düzeneğinde alınan ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi.

3. TEORİK BİLGİLER VE TANIMLAR:

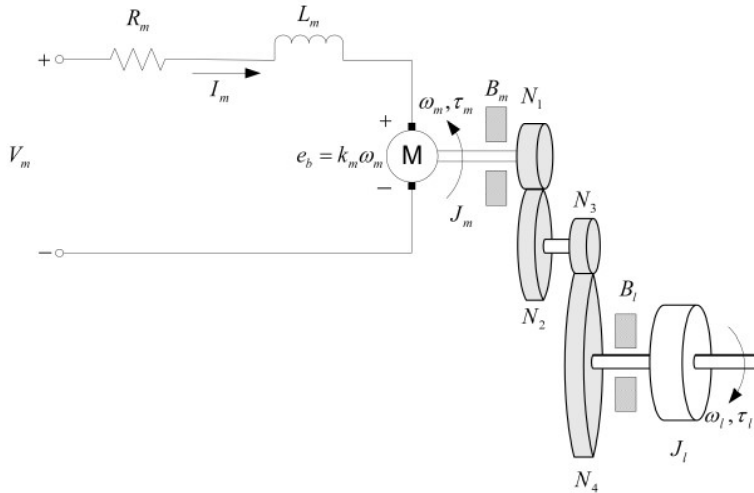
Servo motor yük şaftının giriş motor voltajına göre açısal hızı aşağıdaki birinci derece transfer fonksiyonu ile tanımlanabilir.

$$\frac{\Omega_l(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1)} \quad (1)$$

Burada $\Omega_l(s)$ yük şaftı hızı $\omega_l(t)$ 'nin Laplace dönüşümüdür. $V_m(s)$, motor giriş voltajı $v_m(t)$ 'nin Laplace dönüşümüdür. K kalıcı hal kazancıdır. τ zaman sabiti ve s Laplace operatörüdür.

4. SERVO MOTOR KONUM KONTROL DENEY TESİSATI:

DC motor armatür devresi şeması ve dişli çarkı Şekil 1'de gösterilmiştir. Bilindiği gibi R_m motor direncidir, L_m indüktanstır ve k_m emf sabitidir.



Şekil 1. SRV02 DC motor armatür devresi ve dişli zinciri

emf (elektromotor) voltajı $eb(t)$, motor milinin hızı ω_m ve motorun emf sabiti k_m 'ye bağlıdır. Bu sabit akım akışına karşı çıkar.

emf voltajı şu şekilde verilir:

$$e_b(t) = k_m \omega_m(t) \quad (2)$$

Kirchoff'un Voltaj Yasasını kullanarak, aşağıdaki denklemi yazabiliriz:

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - L_m \frac{dI_m(t)}{dt} - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (3)$$

Motor endüktansı L_m , dirençten çok daha az olduğu için, göz ardı edilebilir.

$$V_m(t) - R_m I_m(t) - k_m \omega_m(t) = 0 \quad (4)$$

Motor akımını $I_m(t)$ için çözüm şu şekilde bulunabilir:

$$I_m(t) = \frac{V_m(t) - k_m \omega_m(t)}{R_m} \quad (5)$$

4.1. Mekanik Denklemler

Bu bölümde, ω_l yük şaftının hızını açıklayan hareket denklemi, uygulanan motor torkuna göre τ_m , geliştirilmiştir. SRV02 bir serbestlik dereceli döner sistem olduğundan, Newton'un İkinci Hareket Yasası şöyle yazılabilir:

$$J \cdot \alpha = \tau \quad (6)$$

Burada J , cismin eylemsizlik momentidir (kütle merkezinde), α sistemin açısal ivmesidir ve τ , cisme uygulanan torkların toplamıdır. Şekil 1'de gösterilen B_m ve B_l motor şaftı ve yük şaftı üzerinde etkili olan viskoz sürtünmedir. Yük hareket denklemi:

$$J_m \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_l \omega_l(t) = \tau_l(t) \quad (7)$$

J_l yükün eylemsizlik momentidir ve τ_l yüke uygulanan toplam torktur. Yük ataleti, dişli zincirinden ve ekli herhangi bir harici yükten (örn. disk veya çubuktan) oluşur. Motor şaftı denklemi şöyle ifade edilir:

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + \tau_{ml}(t) = \tau_m(t) \quad (8)$$

Burada J_m motor mili eylemsizlik momentidir ve τ_{ml} motor torkuna yük torkundan etki eden bileşke torktur. Yük milindeki tork şu şekilde yazılabilir:

$$\tau_l(t) = \eta_g K_g \tau_{ml}(t) \quad (9)$$

burada K_g dişli oranı ve η_g dişli verimidir. Şekil 1'deki N_1, N_2, N_3 ve N_4 dişlileri ile dişli oranı:

$$K_g = \frac{N_4}{N_3} \frac{N_2}{N_1} \quad (10)$$

Böylece, motor şaftında dişliler boyunca görülen tork şu şekilde ifade edilebilir:

$$\tau_{ml}(t) = \frac{\tau_l(t)}{\eta_g K_g} \quad (11)$$

Dolayısıyla aşağıdaki ilişkiler elde edilebilir:

$$\theta_m(t) = K_g \theta_l(t) \quad (12)$$

$$\omega_m(t) = K_g \omega_l(t) \quad (13)$$

yük şaftının uygulanan bir motor torkuna göre hareketini açıklayan diferansiyel denklem, (8)'den aşağıdaki gibi elde edilir:

$$J_m K_g \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_m K_g \omega_l(t) + \frac{J_l \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_l \omega_l(t)}{\eta_g K_g} = \tau_m(t) \quad (14)$$

veya:

$$\left(\eta_g K_g^2 J_m + J_l \right) \frac{d\omega_l(t)}{dt} + \left(\eta_g K_g^2 B_m + B_l \right) \omega_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (15)$$

Bu denklem aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir:

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq} \omega_l(t) = \eta_g K_g \tau_m(t) \quad (16)$$

Burada:

$$J_{eq} = \eta_g K_g^2 J_m + J_l \quad (17)$$

$$B_{eq} = \eta_g K_g^2 B_m + B_l \quad (18)$$

olarak tanımlanır.

4.2. Elektriksel ve Mekanik Denklemlerin Birleştirilmesi

Bu bölümde, uygulanan motor voltajı açısından yük şaftı hızını temsil eden bir ifade elde etmek için elektrik denklemi ve mekanik eşitlik bir araya getirilmiştir. Motor torku uygulanan voltaj ile orantılıdır:

$$\tau_m(t) = \eta_m k_t I_m(t) \quad (19)$$

Burada k_t akım-tork sabiti (N.m / A), η_m motor verimidir ve I_m armatür akımıdır. Denklem 5 ve Denklem 13, Denklem 19'da yazılarak motor torku elde edilir:

$$\tau_m(t) = \frac{\eta_m k_t (V_m(t) - k_m K_g \omega_l(t))}{R_m} \quad (20)$$

Denklem 20, Denklem 16'ya yazılarak hareket denklemi elde edilir:

$$J_{eq} \frac{d\omega_l(t)}{dt} + B_{eq,v} \omega_l(t) = A_m V_m(t) \quad (21)$$

Burada:

$$B_{eq,v} = \frac{\eta_g K_g^2 \eta_m k_t k_m + B_{eq} R_m}{R_m} \quad (22)$$

$$A_m = \frac{\eta_g K_g \eta_m k_t}{R_m} \quad (23)$$

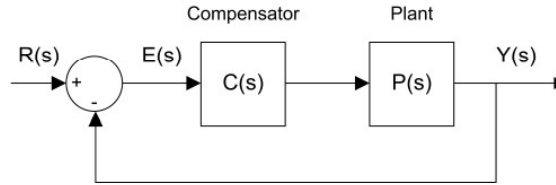
olarak tanımlanır.

4.3. Konum Kontrolü

Kararlı hal hatası, e_{ss} ile gösterilir. Sistem cevabı yerleştikten sonra referans giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki farktır. Bu nedenle, sistem kararlı durumdayken bir t zamanı için, kararlı durum hatası:

$$e_{ss} = r_{ss}(t) - y_{ss}(t) \quad (24)$$

$r_{ss}(t)$, girişin kalıcı hal değeridir ve $y_{ss}(t)$, çıkışın kalıcı hal değeridir.



Şekil 2. Birim geribesleme sistem

Şekil 2'deki hata transfer fonksiyonunu $E(s)$ referans $R(s)$, sistem $P(s)$ ve kompensatör $C(s)$ cinsinden bulabiliriz. Hatanın Laplace dönüşümü:

$$E(s) = R(s) - Y(s) \quad (25)$$

Şekil 2'den:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (26)$$

Son değer teoremi $e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$ kullanarak kalıcı hal hatası bulunur.

$$e_{ss} = R_0 \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(\tau s + 1)s}{\tau s^2 + s + K} \quad (27)$$

SRV02 yük şaftının konumunu kontrol etmek için istenen performans kriterleri:

$$e_{ss} = 0 \quad (28)$$

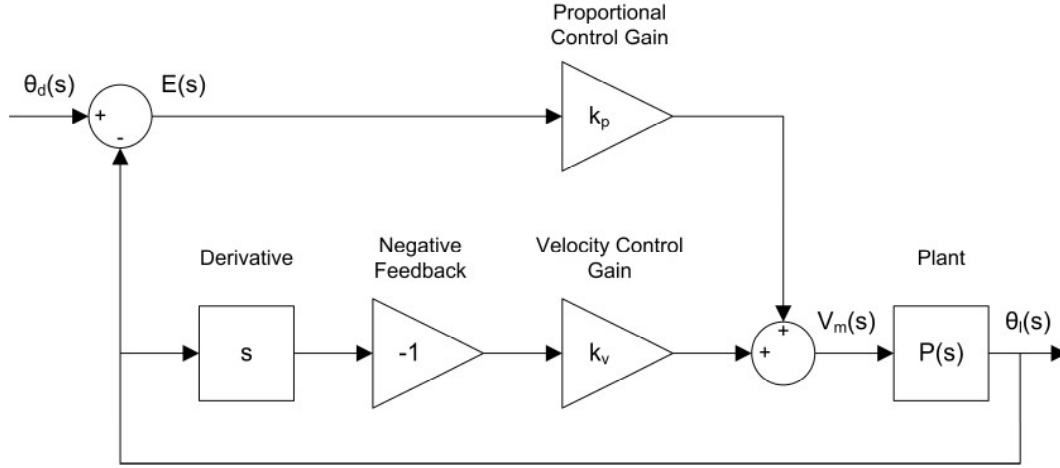
$$t_p = 0.20 \text{ s} \quad (29)$$

$$PO = \% 5.0 \quad (30)$$

4.4. PV Kontrolör Tasarımı

SRV02'nin pozisyonunu kontrol etmek için Şekil 3'te verilen oransal-hız (PV) kontrolcü aşağıdaki yapıya sahiptir:

$$V_m(s) = k_p(\Theta_d(s) - \Theta_l(s)) - k_v s \Theta_l(s) \quad (31)$$

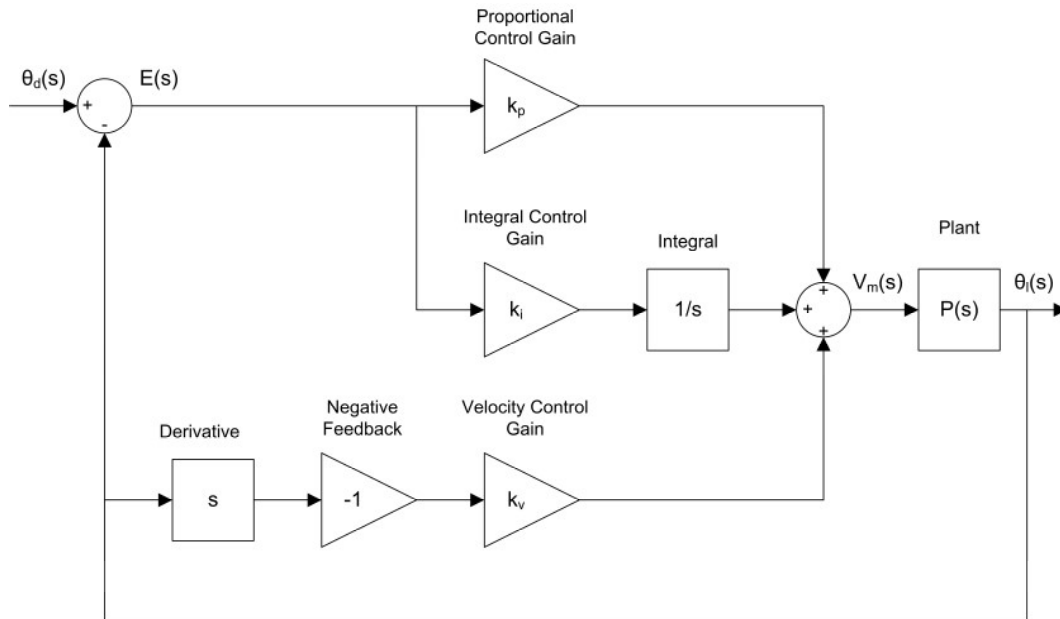


Şekil 3. PV pozisyon kontrolü blok şeması

4.4 PIV Kontrolör Tasarımı

SRV02'nin pozisyonunu kontrol etmek için Şekil 3'te verilen oransal-hız (PV) kontrolör aşağıdaki yapıya sahiptir:

$$V_m(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(\Theta_d(s) - \Theta_l(s)) - k_v s \Theta_l(s) \quad (32)$$



Şekil 3. PIV pozisyon kontrolü blok şeması

5. DENEYİN YAPILIŞI:

5.1. PV Kontrol Kullanılarak Basamak Girişin Uygulanması

Bu deneyde, PV kontrolörü kullanılarak SRV02 yük milinin, yani disk yükünün açısal pozisyonunu kontrol edilecektir. Teknik özelliklerin karşılandığından emin olmak için ölçümler alınacaktır.

1. CONTROL_TYPE = 'AUTO_PV' ile setup_srv02_exp02_pos.m komut dosyasını çalıştırınız.

2. Oransal ve hız kontrol kazançlarını giriniz.

3. Bir adım referansı oluşturmak için, SRV02 Sinyal Oluşturucunun aşağıdakilere ayarlandığından emin olunuz:

- Sinyal tipi = kare

- Genlik = 1

- Frekans = 0.4 Hz

4. Genlik (rad) kazanç bloğunu $\pi/8$ olarak ayarlayın ve 45 derecelik genliğe sahip bir adımı oluşturunuz.

5. SRV02 yük dişlisinin kalıcı hal hatasını, aşma yüzdesini ve tepe zamanını ölçünüz.

Sonuçları Sorular C bölümüne yazınız.

5.2. PV Kontrol Kullanılarak Rampa Girişin Uygulanması

Bu deneyde amaç, sistemin üçgen (rampa) pozisyon girişini ne kadar iyi takip edebildiğini incelemektir.

1. Bir üçgen referansı oluşturmak için, SRV02 Sinyal Oluşturucunun aşağıdakilere ayarlandığından emin olunuz:

- Sinyal tipi = üçgen

- Genlik = 1

- Frekans = 0.8 Hz

2. Genlik (rad) kazanç bloğunu $\pi/3$ olarak ayarlayınız.

3. Kalıcı hal hatasını ölçünüz ve daha önce elde edilen teorik sonuçla karşılaştırınız.

Sonuçları Sorular C bölümüne yazınız.

5.3. PIV Kontrol Kullanılarak Rampa Girişin Uygulanması

Bir rampa girişini takip ederken kararlı durum hatasının giderilip giderilemeyeceğini görmek için PIV Kontrolcü tasarlayınız. Bu deneyde, PIV kontrol cihazı kullanılarak disk yükünün açısal pozisyonunu kontrol edeceğiz. Amaç, sistemin üçgen (rampa) pozisyon girişini ne kadar iyi takip edebildiğini incelemektir.

5.2'deki ayarlamaları yaparak deneyi PIV kontrolcü için tekrarlayınız.

Sonuçları Sorular C bölümüne yazınız.

Adı-Soyadı	:	Deneyi Yürüten Öğretim Elemanı :
Numara	:	Deneyin Yapıldığı Tarih :
İmza	:	Grup-Alt Grup :

NOT

Sorular A

1. Yük şaft hızının dinamik davranışını motor giriş voltajının bir fonksiyonu olarak tanımlayan bir denklem (21) elde ettik. Bu denklemi kullanarak transfer fonksiyonunu bulunuz.

2. Modelin kalıcı hal kazancını (K) ve zaman sabitini (τ), J_{eq} , $B_{eq,v}$ ve A_m parametreleri cinsinden bulunuz.

3. Teknik Özellikler tablosunda verilen sistem özelliklerini kullanarak $B_{eq,v}$ ve A_m model parametrelerini hesaplayınız.

4. Motor milindeki atalet momentini hesaplayınız. ($J_m = J_{tach} + J_{m,rotor}$)

5. Dişlilere ait toplam atalet momentini J_g bulunuz.

6. Disk yükünün yük şaftına bağlı olduğunu varsayarsak, disk yükü $J_{ext,l}$ ve toplam yük atalet momentini J_l bulunuz. ($J_l = J_g + J_{l,ext}$)

7. Eşdeğer atalet momentini bulunuz.

8. Sistem modeli kazancı K ve zaman sabiti τ değerlerini hesaplayınız.

Sorular B

1. k_p ve k_v kontrol katsayılarını ω_n ve ζ cinsinden bulunuz.
2. Denklem 28-30'daki istenen özellikleri sağlayan sönüm oranı ve doğal frekans değerlerini elde ediniz.
3. Denklem 28-30'daki istenen özellikleri sağlayan k_p and k_v kontrol katsayılarını daha önce bulunan K ve τ değerlerini kullanarak bulunuz.
4. PV kontrollü kapalı devre sistemi için, kalıcı hal hatasını bulunuz ve $R_0 = 3.36 \text{ rad/s}$ eğimli bir rampa ile sayısal olarak değerlendiriniz. Daha önce bulunan kontrol kazançlarını kullanınız.
5. SRV02, maksimum $V_{max}=10V$ gerilimi ile beslendiğinde, 1 saniye içinde yukarıda hesaplanan kararlı durum hatasını ortadan kaldırabilmesi için integral kazancı ne olmalıdır?

Sorular C

1. PV kontrol, rampa tepkisindeki kalıcı hal hatasını ortadan kaldırmak için nasıl modifiye edilebilir?

2. Önerilen kontrolcünüzün bağımsız ve bağımlı değişkenlerini listeleyin. İlişkilerini açıklayınız.

3. Bu kontrol tasarımında yaptığınız varsayımları listeleyiniz. Varsayımlarınızın nedenlerini belirtiniz.

Sonuçlar

Tanım	Sembol	Değer	Birim
PV Kontrol Kullanılarak rampa girişe karşı Kalıcı hal hatası	e_{ss}		rad
Basamak cevap simülasyon sonuçları			
Tepe zamanı	t_p	0.20	s
Aşım oranı	PO	5.0	%
Kalıcı hal hatası	e_{ss}	0.00	rad
Basamak cevap deney sonuçları			
Tepe zamanı	t_p		s
Aşım oranı	PO		%
Kalıcı hal hatası	e_{ss}		rad
PV Kontrol Kullanılarak rampa girişe karşı Kalıcı hal hatası simülasyon sonucu	e_{ss}	-0.213	rad
PV Kontrol Kullanılarak rampa girişe karşı Kalıcı hal hatası deney sonucu	e_{ss}		rad
PIV Kontrol Kullanılarak rampa girişe karşı Kalıcı hal hatası simülasyon sonucu	e_{ss}	-0.0125	rad
PIV Kontrol Kullanılarak rampa girişe karşı Kalıcı hal hatası deney sonucu	e_{ss}		rad

SRV02 TEKNİK ÖZELLİKLER

Aşağıdaki tablolar SRV02 ile ilişkili ana parametreleri listeler ve karakterize eder.

Bunlardan bazıları matematiksel modelde kullanılır. Dişliler hakkında daha ayrıntılı bilgi ikinci tabloda verilmektedir.

Sembol	Değer	Değişim
V_{nom}	6.0 V	
R_m	2.6 Ω	$\pm 12\%$
L_m	0.18 mH	
k_t	7.68×10^{-3} N-m/A	$\pm 12\%$
k_m	7.68×10^{-3} V/(rad/s)	$\pm 12\%$
K_g	70	
η_m	0.69	$\pm 5\%$
η_g	0.90	$\pm 10\%$
$J_{m,rotor}$	3.90×10^{-7} kg-m ²	$\pm 10\%$
J_{tach}	7.06×10^{-8} kg-m ²	$\pm 10\%$
J_{eq}	2.087×10^{-3} kg-m ²	
B_{eq}	0.015 N-m/(rad/s)	
m_b	0.038 kg	
L_b	0.1525 m	
m_d	0.04 kg	
r_d	0.05 m	
m_{max}	5 kg	
f	50 Hz	
I_{max}	1 A	
ω_{max}	628.3 rad/s	

Symbol	Description	Value
K_{gi}	Internal gearbox ratio	14
$K_{ge,low}$	Internal gearbox ratio (low-gear)	1
$K_{ge,high}$	Internal gearbox ratio (high-gear)	5
m_{24}	Mass of 24-tooth gear	0.005 kg
m_{72}	Mass of 72-tooth gear	0.030 kg
m_{120}	Mass of 120-tooth gear	0.083 kg
r_{24}	Radius of 24-tooth gear	6.35×10^{-3} m
r_{72}	Radius of 72-tooth gear	0.019 m
r_{120}	Radius of 120-tooth gear	0.032 m