

Soós Tamás
SZAKDOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
MŰSZAKI MECHANIKAI TANSZÉK



SZAKDOLGOZAT



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Műszaki Mechanikai Tanszék
Szakdolgozat

DIGITÁLIS ADMITTANCIA SZABÁLYOZÓ STABILITÁSÁNAK VIZSGÁLAT

Soós Tamás

Konzulens:

Vizi Máté Benjámin

Témavezető:

Tóth András

Budapest, 2023.12.13.

Nyilatkozatok

Beadhatósági nyilatkozat

A jelen szakdolgozat/diplomaterv az üzem/intézmény által elvárt szakmai színvonalnak mind tartalmilag, mind formailag megfelel, beadható.

Kelt, Budapest, 2019.12.13.

Az üzem részéről:

.....

üzemi konzulens

Elfogadási nyilatkozat

Ezen szakdolgozat/diplomaterv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E szakdolgozatot/diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2019.12.13.

.....

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, Majoros Tamás (NEPTUN KOD), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezü aláírással igazolom, hogy ezt a szakdolgozatot/diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2019.12.13.

.....

szigorló hallgató

Köszönetnyilvánítás

Kivonat

Tartalomjegyzék

1. Modell	3
1.1. Egyenáramú motor dinamikája	3
1.2. Állapotmegfigyelő	5
1.3. Impedancia szabályozó	6
2. Összegzés	9
3. Következtetések	11
 FÜGGELÉK	 13
A. Measurement dataset	15
B. Poster	17
Irodalomjegyzék	21

Ábrák jegyzéke

1.1. Egyenáramú motor áramkör és szabadtest ábra	3
1.2. Impedancia szabályozó közvetlen nyomaték méréssel	6
1.3. Impedancia szabályozó szöggyorsulás méréssel	7

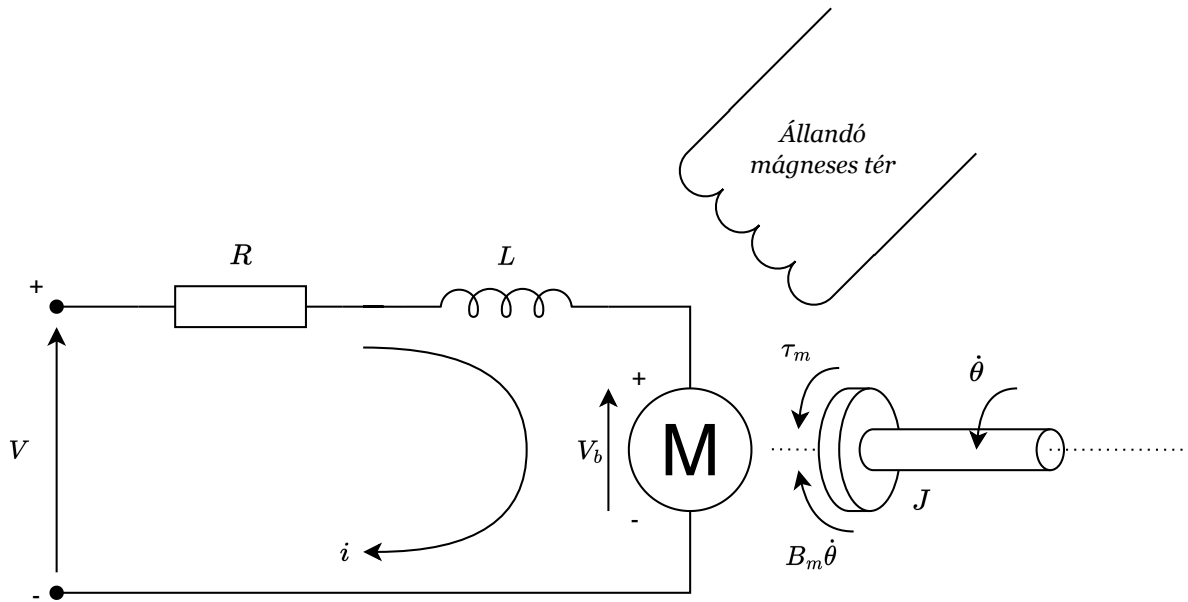
Táblázatok jegyzéke

A.1. Dataset for the equilibrium position measurement.	15
--	----

Bevezetés

1. Modell

1.1. Egyenáramú motor dinamikája



1.1. ábra. Egyenáramú motor áramkör és szabadtest ábra

A felhasznált motor feltételezeten állandó gerjesztésű. A kifejtett nyomaték a Biot-Savart-törvény szerint arányos a forgórészen átfolyó árammal. A forgórészben indukált feszültség pedig arányos a szögsebességével a Lenz-törvény alapján

$$\tau_m = K_\tau i, \quad (1.1)$$

$$V_b = K_e \dot{\theta}, \quad (1.2)$$

ahol K_τ a nyomatékállandó, K_e a sebesség-feszültség állandó, τ_m a kifejtett nyomaték, i a rotor árama, V_b az rotorban indukált feszültség és $\dot{\theta}$ a rotor szögsebessége. Az energia

megmaradás törvénye alapján a két konstans értéke megegyezik

$$K_m = K_\tau = K_e, \quad (1.3)$$

így a következőkben K_m paraméterként jelennek meg. A forgórész áramkörére Kirchhoff I. törvénye alapján felírható

$$V - Ri - L \frac{di}{dt} - K_m \dot{\theta} = 0, \quad (1.4)$$

ahol R a forgórész tekercsének ellenállása, L a tekercs induktivitása, K_m a motorállandó, V a motor feszültsége, i a motoráram és θ a szögelfordulás. A forgórészt mechanikailag egy merev testként tekintve Newton II. törvénye alapján

$$J\ddot{\theta} = -B_m \dot{\theta} + K_m i + \tau, \quad (1.5)$$

ahol J a forgórész tehetetlensége, B_m a viszkózus csillapítási együttható, K_m a motorállandó, θ a szögelfordulás, i a motoráram és τ a forgórészre ható külső nyomaték. Ez a két lineáris differenciálegyenlet egyértelműen leírja a rendszer időtartománybeli viselkedését.

A további vizsgálathoz kedvezőbb a differenciálegyenleteket állapotter modellként felírni. Egy állapot térmodell általánosan

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (1.7)$$

alakban írható fel. A két bemenet a külső nyomaték és a motorra adott feszültség. A kimenet a forgórész szöge. A paramétereket kifejtve (1.4) és (1.5) alapján a modell

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J} & \frac{K_m}{J} \\ 0 & -\frac{K_m}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ V \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ V \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

alakba írható át. A frekvenciatartománybeli vizsgálatokhoz felírható a rendszer szög-

nyomaték és szög-feszültség átviteli függvénye. Az állapottér modellt felhasználva

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (1.10)$$

általános formában, ahol I az identitás mátrix. Behelyettesítve (1.8) és (1.9) paramétereit (1.10) felírható

$$\begin{bmatrix} \frac{\theta(s)}{\tau(s)} \\ \frac{\theta(s)}{V(s)} \end{bmatrix} = \frac{1}{s(JLs^2 + (B_m L + JR)s + K_m^2 + B_m R)} \begin{bmatrix} Ls + R \\ K_m \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

alakban.

1.2. Állapotmegfigyelő

Az állapotvisszacsatoláshoz szükséges belső állapotok közül csak a szögelfordulás áll rendelkezésre közvetlen mérésből. A többi állapotra egy megfigyelő ad becslést. Elkülönítve a mért és becsült állapotokat (1.6) és (1.7) felírható

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\mathbf{x}}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\theta\theta} & \mathbf{A}_{\theta b} \\ \mathbf{A}_{b\theta} & \mathbf{A}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{x}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_\theta \\ \mathbf{B}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau \\ V \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \mathbf{x}_b \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

alakban, ahol \mathbf{x}_b jelöli a becsült állapotokat. Továbbá jelölje $\tilde{*}$ a becsült paramétereket. Ezután legyen

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{A}} &= \mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{\theta b} \\ \hat{\mathbf{B}} &= \hat{\mathbf{A}} \mathbf{K}_e + \mathbf{A}_{b\theta} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{\theta\theta} \\ \hat{\mathbf{F}} &= \mathbf{B}_b - \mathbf{K}_e \mathbf{B}_\theta, \end{aligned} \quad (1.14)$$

ahol $\hat{\mathbf{A}}$ a megfigyelő belső állapotának (továbbiakban $\tilde{\boldsymbol{\eta}}$) dinamikáját adja meg, és $\hat{\mathbf{B}}$ és $\hat{\mathbf{F}}$ a mért illetve a becsült állapotok bemeneti mátrixai. A becsült állapotok és az állapotváltozók közötti összefüggés ekkor

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= \mathbf{x}_b - \mathbf{K}_e \theta \\ \tilde{\boldsymbol{\eta}} &= \tilde{\mathbf{x}}_b - \mathbf{K}_e \theta \end{aligned} \quad (1.15)$$

alakban adható meg. A belső állapot dinamikája

$$\dot{\tilde{\eta}} = \hat{A}\tilde{\eta} + \hat{B}\theta + \hat{F}u. \quad (1.16)$$

Végül (1.13) átalakításával a rendszer becsült állapotvektora

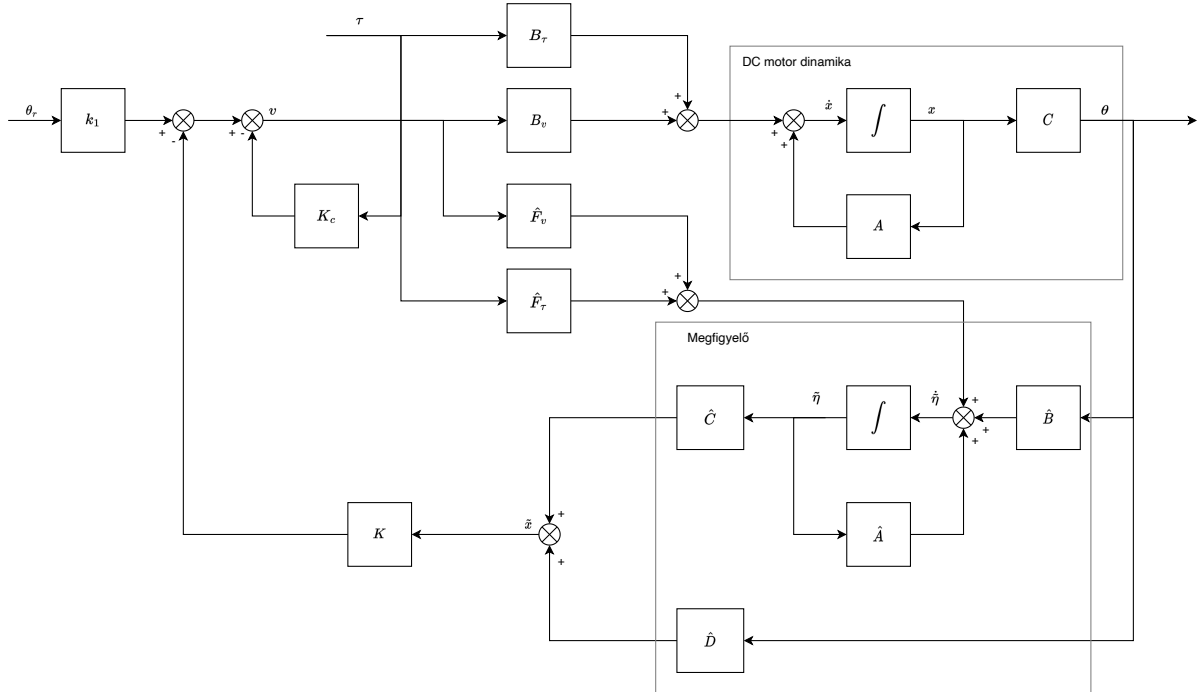
$$\tilde{x} = \hat{C}\tilde{\eta} + \hat{D}\theta, \quad (1.17)$$

ahol

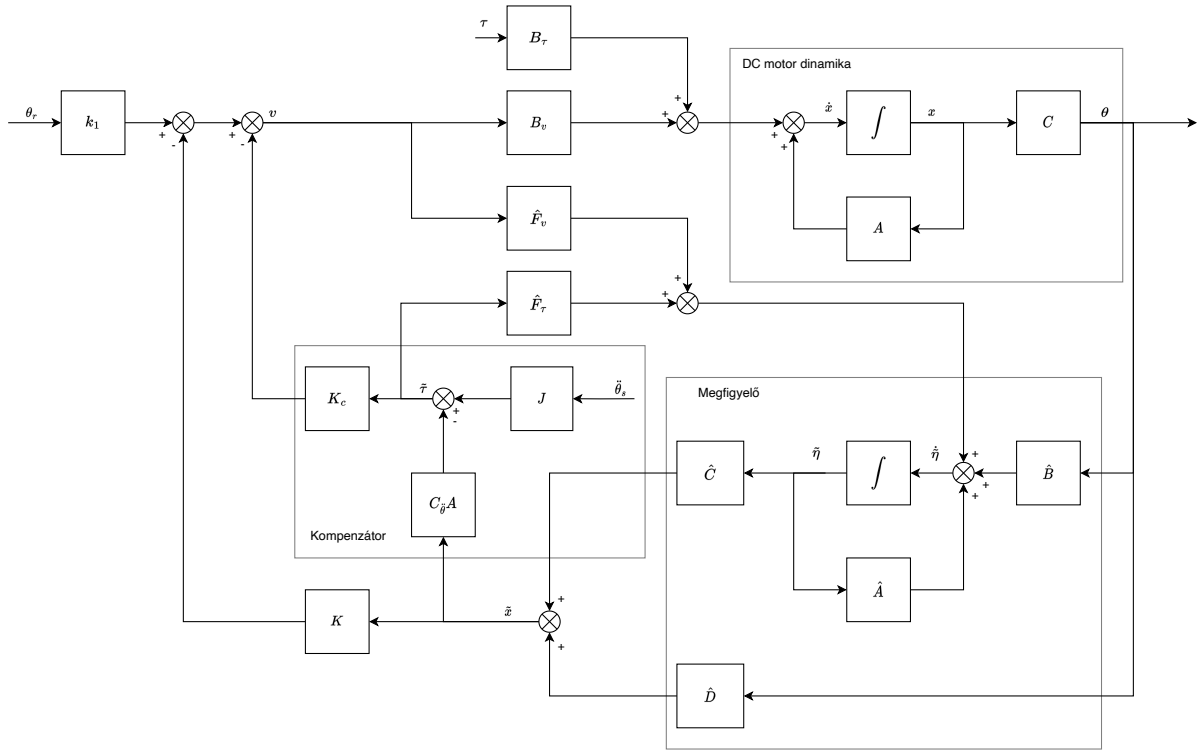
$$\hat{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \hat{D} = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{K}_e \end{bmatrix}, \quad (1.18)$$

mely tartalmazza a mért állapotot is.

1.3. Impedancia szabályozó



1.2. ábra. Impedancia szabályozó közvetlen nyomaték méréssel



1.3. ábra. Impedancia szabályozó szöggyorsulás méréssel

A rúd differenciálegyenlete

$$\ddot{\phi}(t) - \frac{6g}{l}\phi(t) + \frac{6D}{ml}\dot{\phi}(t - \tau) + \frac{6P}{ml}\phi(t - \tau) = 0 \quad (1.19)$$

A differenciálegyenlet Laplace transzformáltja

$$s^2\phi(s) - s\phi_0 - \dot{\phi}_0 - \frac{6g}{l}\phi(s) + \frac{6D}{ml}(se^{-s\tau}\phi(s) - \phi_{-\tau}) + \frac{6P}{ml}e^{-s\tau}\phi(s) = 0 \quad (1.20)$$

Kifejezve $\phi(s)$ -t

$$\phi(s) = \frac{s\phi_0 + \dot{\phi}_0 + \frac{6D}{ml}\phi_{-\tau}}{s^2 + \frac{6D}{ml}se^{-s\tau} + \frac{6P}{ml}e^{-s\tau} - \frac{6g}{l}} \quad (1.21)$$

A végérték frekvenciatartománybeli reprezentációban

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \phi(s) = \frac{\dot{\phi}_0 + \frac{6D}{ml}\phi_{-\tau}}{\frac{6P}{ml} - \frac{6g}{l}} \quad (1.22)$$

Az időkéstés Taylor-sorral közelítve

$$\phi(t - \tau) = \phi(t) - \frac{1}{1!}\dot{\phi}(t)\tau + \frac{1}{2!}\ddot{\phi}(t)\tau^2 - \frac{1}{3!}\dddot{\phi}(t)\tau^3 + \dots \quad (1.23)$$

különböző rendű közelítésekkel

2. Összegzés

3. Következtetések

FÜGGELÉK

A. Measurement dataset

A.1. táblázat. Dataset for the equilibrium position measurement.

U_{in}	$\dot{\varphi}$	θ	U_{in}	$\dot{\varphi}$	θ
1.3	0	3.1415926536	1.3	0	3.1415926536
1.4	4.3	3.1415926536	1.4	-4.3	3.1415926536
1.5	4.7	3.1415926536	1.5	-4.7	3.1415926536
1.6	5.2	3.1415926536	1.6	-5.2	3.1415926536
1.7	5.67	3.1415926536	1.7	-5.67	3.1415926536
1.8	6.34	3.1415926536	1.8	-6.34	3.1415926536
1.9	6.61	3.1415926536	1.9	-6.61	3.1415926536
2	7.22	3.1415926536	2	-7.22	3.1415926536
2.1	7.72	3.1415926536	2.1	-7.72	3.1415926536
2.2	8.02	3.1415926536	2.2	-8.02	3.1415926536
2.3	8.5	3.8746309394	2.3	-8.3366666667	3.1415926536
2.4	9.0033333333	3.9677151662	2.4	-8.78	2.3561944902
2.5	9.5366666667	4.0666171571	2.5	-9.26	2.2514747351
2.6	9.9666666667	4.1306125631	2.6	-9.7	2.1758438008
2.7	10.4366666667	4.2120612615	2.7	-10.2	2.1060306307
2.8	10.7833333333	4.264421139	2.8	-10.63	2.0594885174
2.9	11.3933333333	4.3284165449	2.9	-11.1333333333	1.9605865264
3	11.84	4.3516876016	3	-11.55	1.9198621772
2.9	11.41	4.3225987808	2.9	-11.1033333333	1.9722220548
2.8	11.0133333333	4.2818744316	2.8	-10.6433333333	2.0653062815
2.7	10.5233333333	4.2353323182	2.7	-10.2633333333	2.1060306307
2.6	10.0566666667	4.1655191481	2.6	-9.7733333333	2.1700260366
2.5	9.5933333333	4.1015237422	2.5	-9.31	2.21656815
2.4	9.1266666667	4.0666171571	2.4	-8.8633333333	2.2514747351
2.3	8.55	3.9735329304	2.3	-8.4566666667	2.3329234335
2.2	8.2	3.8571776469	2.2	-7.9366666667	2.4609142453
2.1	7.71	3.7466401276	2.1	-7.5366666667	2.5539984721

B. Poster

Abstract

Irodalomjegyzék
