ROBOTIRÁNYÍTÁS

10. előadás

Összetett gyakorlati példa

Dr. habil. Kovács Levente
egyetemi docens

kovacs.levente@nik.uni-obuda.hu

Dr. Haidegger Tamás
egyetemi adjunktus

haidegger@irob.uni-obuda.hu

EKIK Egyetemi Kutató és Innovációs Központ
K-MOOC
Óbudai Egyetem Bejczy Antal iRobottechnikai Központ
Élettani Szabályozások Csoport Óbudai Egyetem

Az előadás témája és célja

Ebben az előadásban egy összetett gyakorlati példán keresztül mutatjuk be a PI-szabályotótervezést, a rendszer dinamikai modelljének vizsgálatától kezdve a szimulációs eredmények bemutatásáig. Az előadás célja, hogy a hallgatók egészében megismerjék a szabályozótervezés folyamatát. Láthatjuk majd, hogyan fejlődik ki a szabályozótervezés a dinamikai rendszert leíró egyszerű, a középiskolai tanulmányokból is ismert fizikai összefüggésekből. A frekvenciatartományban történő komplex számítások helyett ebben a példában a Bode-diagram átfogóbb értelmezésére lesz szükség, ugyanis a szabályzási paraméterek meghatározása elsősorban grafikus úton, a Bode-diagram manipulációjával történnek. A számításokat a MATLAB programcsomag segítségével ellenőrizzük majd.

Kulcsszavak

PI-szabályozótervezés, Bode-diagram, dinamikai modell, rendszeregyenlet, grafikus megoldás, műveletek logaritmikus tengelyeken

Tartalomjegyzék

1. A modell áttekintése

Az alábbi gyakorlati példában egy DC-motorral hajtott, autókban található kormánymű leegyszerűsített modelljén mutatjuk be a soros PI-kompenzációt, lépésről lépésre.

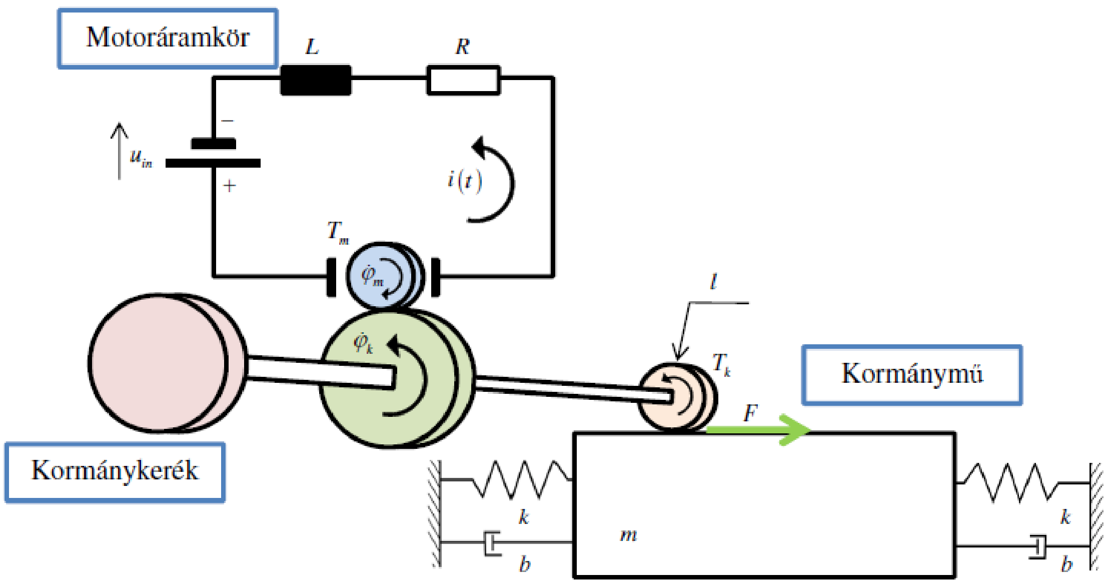
A rendszer bemenete a DC-motorra kapcsolt feszültség, kimenete pedig a kormány szögelfordulása.

A modell két fő komponensből épül fel:

1. a DC-motor áramköre
2. a motor által meghajtott mechanizmus

A komponensek egyéni viselkedését és kapcsolatát a fizikai törvények alapján matematikai összefüggésekkel írjuk le. A végső összefüggés a rendszer átviteli függvénye, melyhez a konvencionális PI-szabályozótervezési módszerek segítségével tervezünk szabályozót.

A kormánymű dinamikai modellje az 1. ábrán látható.



1. ábra: A kormánymű egyszerűsített dinamikai modellje

A rendszer paraméterei:

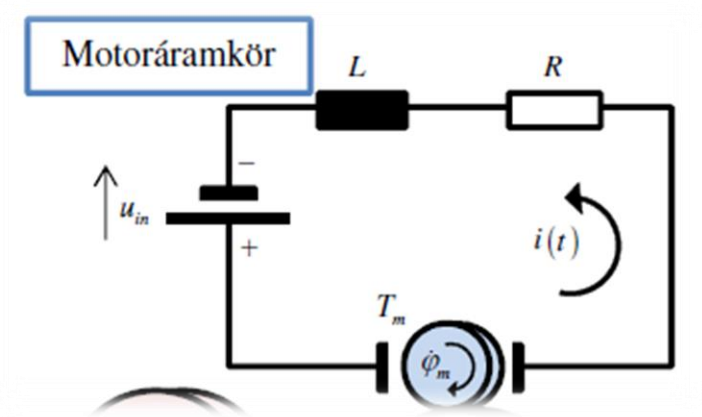
u_{in}- a DC-motoráramkörre kapcsolt feszültség, a rendszer bemenete
φ_k- a kormány szöghelyzete, a rendszer kimenete
i- a DC-motoráramkör hurokárama
R- a motoráramkor lineáris ellenállása
L- a motoráramkör induktív ellenállása
φ_m- a DC-motor tengelyének szöghelyzete

r- a DC-motor és a kormány tengelyei közötti fogaskerék-áttétel
l- a kormánymű fogaslécét meghajtó fogaskerék sugara
m- a kormánymű tömege
k- a kormánymű rugalmassága
b- a kormánymű csillapítása
F- a kormányműre a fogasléc által ható erő
T_k- a kormány tengelyére a kormányműről visszaható nyomaték

2. A rendszer átviteli függvényének levezetése

2.1. A DC-motor áramköre

A felhasználandó egyenletek levezetéséta DC-motor áramkörével kezdjük (2. ábra).



2. ábra: A DC- motor áramköre

Az áramkörben u_{in} feszültség hatására $i(t)$áramerősség jelenik meg. Az áramkör egyes tagjain eső feszültségek előjeles összege zérus, így felírható, hogy

$$u_{in} - u_R - u_L - u_{EMF} = 0 \tag{1}$$

A lineáris ellenálláson eső feszültség Ohm törvénye alapján:

$$u_R(t) = Ri(t) \tag{2}$$

A tekercsen eső feszültség arányos az áramerősség változásával:

$$u_L(t) = L\frac{di(t)}{dt} \tag{3}$$

A Lenz-szabály alapján a motor tekercseiben indukálódó áram a motor fordulatszámával arányos feszültséget (elektromotoros erő) hoz létre:

$$u_{EMF}(t) = \dot{\varphi}_m(t) \cdot K_E \tag{4}$$

K_E a motorállandó, DC-motorra jellemző, katalógusból leolvasható mennyiség, $\dot{\varphi}_m$ pedig a motor fordulatszáma.

Behelyettesítve az (1) egyenletbe:

$$u_{in}(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + K_E\dot{\varphi}_m(t) \tag{5}$$

A motoráramkör kimenete a motor által kifejtett T_m nyomaték, ez teremti majd meg a kapcsolatot a kormánymű mechanikájával. DC-motorok esetén a motor által kifejtett nyomaték egyenesen arányos a motoráramkör hurokáramával:

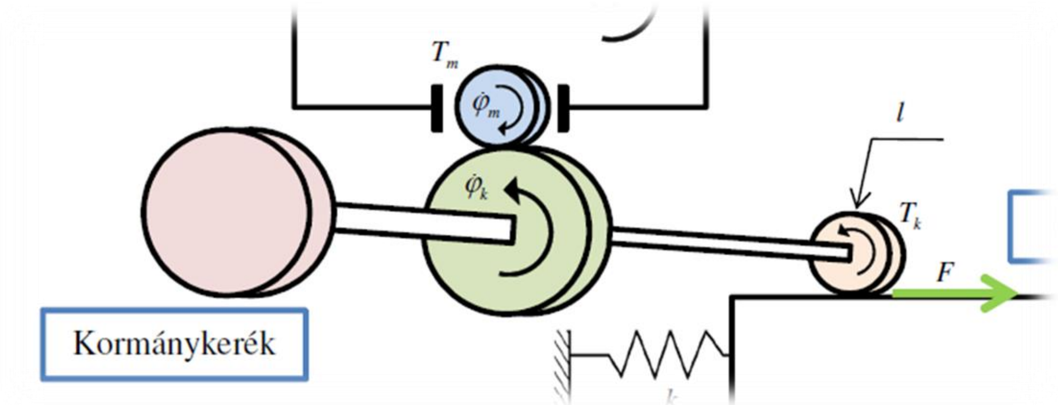
$$T_m(t) = K_M i(t) \tag{6}$$

K_M motorállandó értéke szintén katalógusból kiolvasható. A mérnöki gyakorlatban a két motorállandó értékét azonosnak vesszük, azaz:

$$K_M = K_E = K \tag{7}$$

2.2. A kormánykerék kapcsolata

A motor kimeneti tengelye fogaskerekeken keresztül (kék) csatlakozik a kormánytengelyhez (zöld). A fogaskerekek közötti áttétel felhasználásával (3. ábra).



3. ábra: A kormánykerék kapcsolata

$$\dot{\varphi}_m = r\dot{\varphi}_k \tag{8}$$

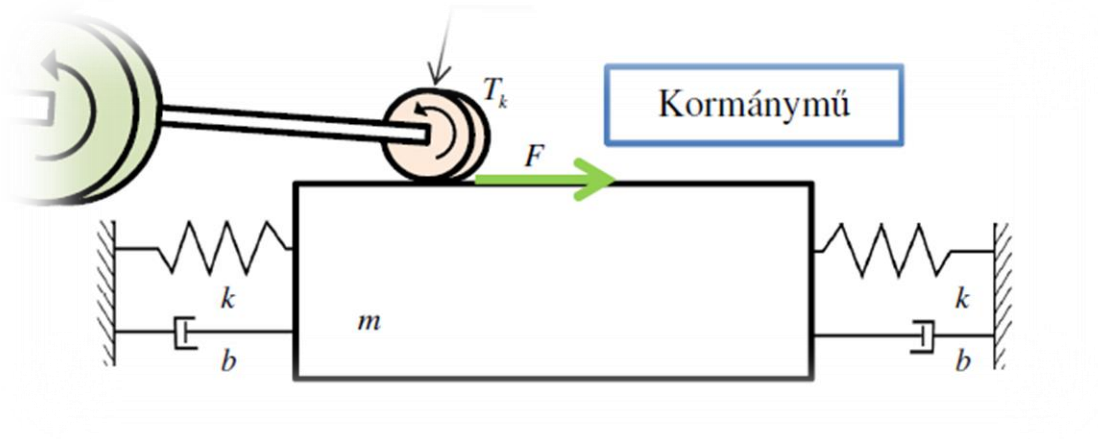
$$T_m = \frac{1}{r}T_k \tag{9}$$

Mivel a kormány tengelye merev, a T_k nyomaték megjelenik a halványpiros fogaskeréken is, mely a testre F erőt gyakorol. Az erőkar ismeretében ez az erő megegyezik a nyomaték és a kerék sugarának hányadosával:

$$F = \frac{T_k}{l} \tag{10}$$

2.3. A kormánymű mechanikája

Az m tömegű test két-két rugó és csillapítás elemen keresztül kapcsolódik a merev falhoz – ami esetünkben a rugalmas kerekek és a merev talaj kapcsolatát jelenti (4. ábra). Az ismert összefüggéseket felhasználva a rendszer mozgásegyenlete:



4. ábra: A kormánymű mechanikája

$$m\ddot{x} + 2b\dot{x} + 2kx = F \tag{11}$$

A test elmozdulása megegyezik a halványpiros fogaskerék elfordulásához tartozó ívhosszal, ami megteremti a kapcsolatot x elmozdulás és φ_k szögelfordulás között:

$$x = \varphi_k \cdot l \tag{12}$$

2.4. A rendszer elemeinek egyesítése

Felírásra kerültek a szükséges fizikai összefüggések. A feladat: a bemeneti és kimeneti változók kifejezése a modellparaméterek függvényében. A rendelkezésre álló egyenletek:

$$u_{in}(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + K\dot{\varphi}_m(t) \tag{5}$$

$$T_m(t) = Ki(t) \tag{6}$$

$$\dot{\varphi}_m = r\dot{\varphi}_k \tag{8}$$

$$T_m = \frac{1}{r}T_k \tag{9}$$

$$F = \frac{T_k}{l} \tag{10}$$

$$m\ddot{x} + 2b\dot{x} + 2kx = F \tag{11}$$

$$x = \varphi_k \cdot l \tag{12}$$

Kifejezhetők a bemenő és kimenő változók:

$$F = l(m\ddot{\varphi}_k + 2b\dot{\varphi}_k + 2k\varphi_k)\ \textit{(11,12 egyenletekből)} \tag{13}$$

$$T_k = l^2(m\ddot{\varphi}_k + 2b\dot{\varphi}_k + 2k\varphi_k)\ \textit{(10,13 egyenletekből)} \tag{14}$$

$$r \cdot T_m = l^2\left(m\frac{1}{r}\ddot{\varphi}_m + 2b\frac{1}{r}\dot{\varphi}_m + 2k\frac{1}{r}\varphi_m\right)\ \textit{(8,9,14 egyenletekből)} \tag{15}$$

$$K \cdot i = \frac{l^2}{r^2}(m\ddot{\varphi}_m + 2b\dot{\varphi}_m + 2k\varphi_m)\ \textit{(6,15 egyenletekből)} \tag{16}$$

A Laplace-transzformációt elvégezzük az (5) és (16) egyenleteken:

$$U(s) = RI(s) + LsI(s) + K\Phi_m(s)s \rightarrow I(s) = \frac{U(s) - K\Phi_m(s)s}{Ls + R} \tag{17}$$

$$KI(s) = \frac{l^2}{r^2}\left(ms^2\Phi_m(s) + 2bs\Phi_m(s) + 2k\Phi_m(s)\right) \tag{18}$$

Az (17) és (18) egyenletekből $I(s)$ kiejthető, így a kifejezés tovább egyszerűsödik:

$$K\frac{U(s) - Ks\Phi_m(s)}{Ls + R} = \frac{l^2}{r^2}\left(ms^2\Phi_m(s) + 2bs\Phi_m(s) + 2k\Phi_m(s)\right) \tag{19}$$

A kimenő és bemenő jelek arányát kifejezve a rendszer átviteli függvénye meghatározható:

$$W(s) = \frac{\Phi_k(s)}{U(s)} = \frac{\frac{Kr}{l^2}}{(Ls+R)(ms^2+2bs+2k)+\frac{K^2r^2}{l^2}s} \tag{20}$$

Legyenek a rendszer fizikai paraméterei a következők:

$K = 0.15\,[Vs]$
$r = 100\,[-]$
$l = 0.1\,[m]$
$L = 10\,[H]$
$R = 350\,[\Omega]$
$m = 80\,[kg]$
$b = 25\,[Ns/m]$
$k = 1\,[N/m]$

Behelyettesítve az átviteli függvénybe, ismerős alakra hozható a kifejezés:

$$W(s) = \frac{\Phi_k(s)}{U(s)} = \frac{1500}{800s^3 + 28500s^2 + 40000s + 700} \tag{21}$$

3. Soros PI-szabályozó tervezése

A rendszer pólusai meghatározhatóak a MATLAB vagy más numerikus számításokat végző programcsomag, segítségével, ennek hiányában pedig más közelítő módszerek, pl. a Newton-Rhapson módszer segítségével.

A rendszer pólusai azok az s értékek, melyekre a nevező értéke zérus. Ezek az értékek a következők:

$$p_1 = -0.0177$$
$$p_2 = -1.4451$$
$$p_3 = -34.1621$$

Az átviteli függvény tehát felírható a következő alakban:

$$W(s) = \frac{1500}{800}\frac{1}{(s+34.1621)(s+1.4451)(s+0.0177)} \tag{22}$$

A gyakorlatban célszerű a rendszer *időállandós* alakját alkalmazni, melynek lényege, hogy a nevezőben található szorzat tagjainak konstans tagja (ha van) egységnyi legyen:

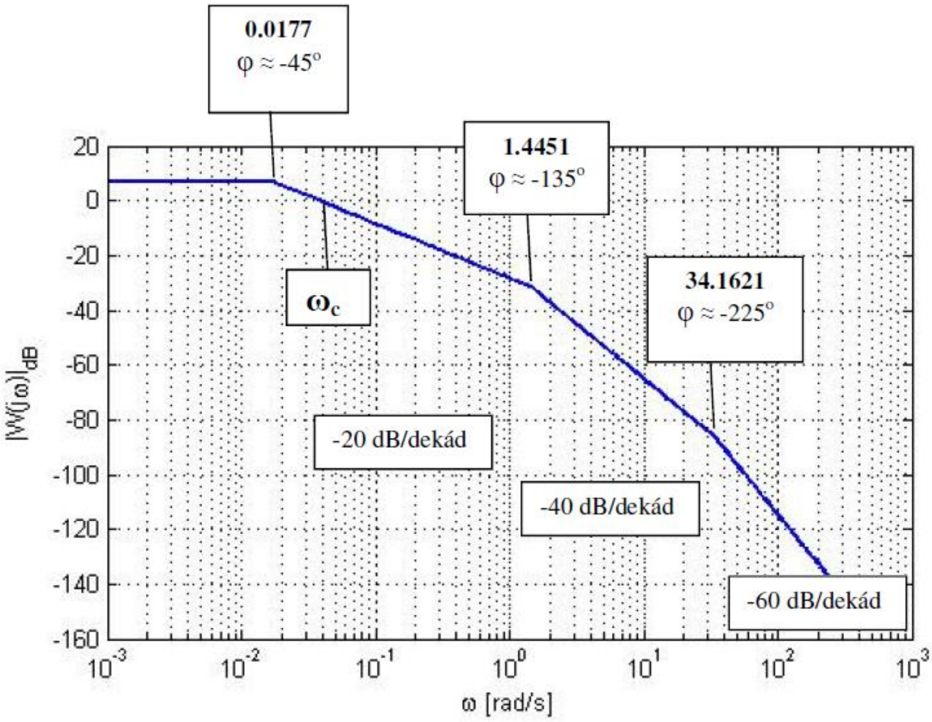
$$W(s) = \frac{1.875}{34.1621 \cdot \left(\frac{1}{34.1621}s + 1\right) \cdot 1.4451 \cdot \left(\frac{1}{1.4451}s + 1\right) \cdot 0.0177 \cdot \left(\frac{1}{0.0177}s + 1\right)} \tag{23}$$

$$W(s) = \frac{2.146}{(0.0273s + 1)(0.692s + 1)(56.4s + 1)} \tag{24}$$

Az időállandók:

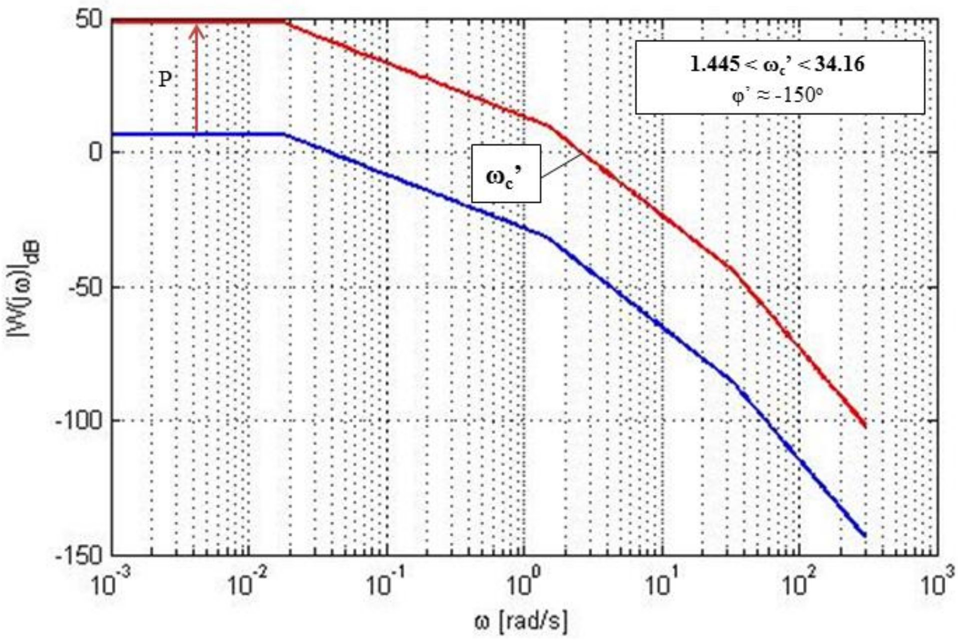
$$T_1 = 56.4\,\text{sec}$$
$$T_2 = 0.692\,\text{sec}$$
$$T_3 = 0.0273\,\text{sec}$$

A rendszer Bode-diagramja megszerkeszthető a szokásos módon, közelítő integráló tagok segítségével. A bekeretezett értékek a törési frekvenciákat mutatják, ω_c a vágási körfrekvencia.



5. ábra: A rendszer közelítő Bode-diagramja

A cél egy olyan PI szabályzó tervezése, mely a Bode-diagramot párhuzamosan eltolja önmagával úgy, hogy a 0 dB értéket $\varphi' = 150°$ értéknél metssze (fázistartalék: $\varphi' = 150°$). Először a *P-szabályzót* tervezzük meg a 6. ábrán látható módon.

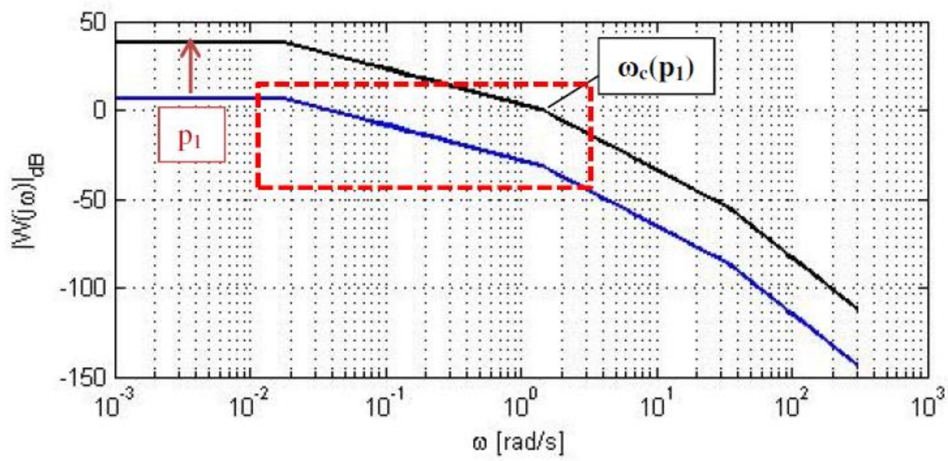


6. ábra: A P-szabályozóval elérni kívánt állapot

A P-szabályozóval piros színnel jelzett görbét kívánjuk előállítani. Az új vágási körfrekvencia, ω_c a második és a harmadik töréspont között helyezkedik el, hiszen a második töréspontban a fázis elméleti értéke csak $\varphi = 135°$, a második töréspontban pedig már $\varphi = 255°$.

Az elérni kívánt fázis azonban $\varphi' = 150°$. A feladat megoldásához nincs közvetlenül szükség a Bode-fázisdiagram megszerkesztésére, de érdemes ellenőrzésképpen felrajzolni azt.

A P értékkel való eltolás a kétszeres törés miatt két lépésben kerül elvégzésre. Először a Bode-diagramot önmagával párhuzamosan eltoljuk felfelé addig, amíg a második töréspont rá nem fekszik a 0 dB tengelyre, mint ahogyan az a 7. ábrán is látható:

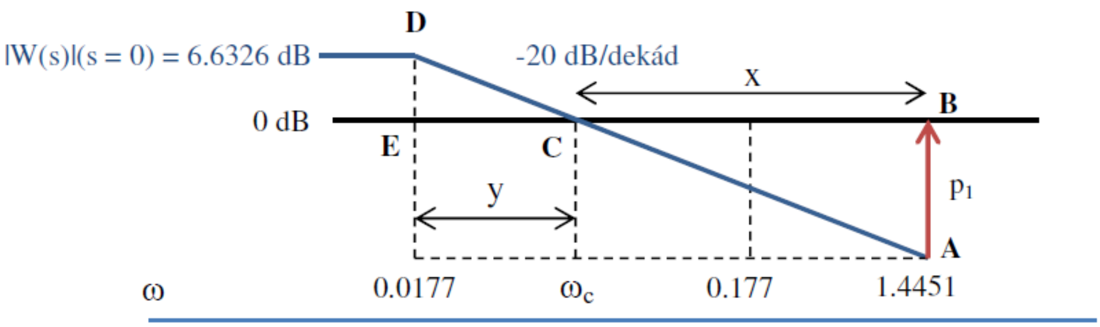


7. ábra: A Bode-diagram eltolásának első fázisa

Az így meghatározott új vágási körfrekvencia:

$$\omega_c^{p_1} = \frac{1}{T_2} = 1.445\ \frac{rad}{s} \tag{25}$$

Az eltolás valójában egy arányos taggal való szorzást jelent. Kérdés: mekkora legyen p_1?
A meghatározáshoz szükség lesz a piros szaggatott vonallal jelzett terület külön vizsgálatára:



8. ábra: A 7. ábrán piros szaggatott vonallal jelzett terület vizsgálata

Első lépésként a **DEC** háromszöget vizsgáljuk. **C** pont a vágási körfrekvencia, melynek pontos értékét nem ismerjük, de kiszámíthatjuk. **D** pontban a nagyítás értéke kiszámítható a megfelelő behelyettesítéssel:

$$\overline{DE} = |W(j\omega)||_{\omega=0.0177\, rad/s} \tag{26}$$

A számítást könnyebbé tehetjük, ha a közelítő értéket határozzuk meg, hiszen a nagyítás állandó az $\omega < 0.0177\ rad/s$ tartományban (a Bode-diagram itt vízszintesen fut). Tehát közelítve:

$$\overline{DE} \approx |W(j\omega)||_{\omega=0} = 2.146 = 6.6326\, dB \tag{27}$$

Fontos megjegyezni, hogy a két érték némileg eltérhet egymástól, hiszen jelen esetben a Bode-diagramot tört vonalakkal helyettesítettük, holott a valóságban az átmenet a töréspontoknál „lekerekített”.

A logaritmikus skálán a vágási körfrekvencia értékét a következőképpen kell kifejeznünk:

$$\omega_c = 0.0177 \cdot 10^y \tag{28}$$

y az **EC** szakasz hossza, a **DEC** háromszög **DC** oldalának meredeksége pedig $20\, dB$. Ebből következik, hogy a **DE** szakasz hossza az **EC** oldal hosszának és a **DC** meredekségének szorzata, azaz:

$$\overline{DE} = 6.6326\, dB = 20\frac{dB}{dekád} \cdot y = 20 \cdot log\left(\frac{\omega_c}{0.0177}\right) \tag{29}$$

A szabályozatlan rendszer közelítő vágási körfrekvenciája tehát:

$$\omega_c = 0.0177 \cdot 10^{\frac{6.6326}{20}} = 0.0379\ \frac{rad}{s} \tag{30}$$

A p_1 arányos nagyítással, ami valójában a W(s) átviteli függvény elé kerülő konstans szorzó, a Bode-diagramot úgy toljuk el, hogy az **A** pont a **B** pontba kerüljön. Ehhez most az **ABC** háromszög vizsgálatára van szükség. **A** vágási körfrekvencia ismeretében már ismert az **AB** távolság, ha a **B** pont frekvenciáját az **A** pontban levő frekvenciával fejezzük ki:

$$\omega(B) = 1.4451\ rad/s = \omega(C) \cdot 10^x = 0.0379 \cdot 10^x \tag{31}$$

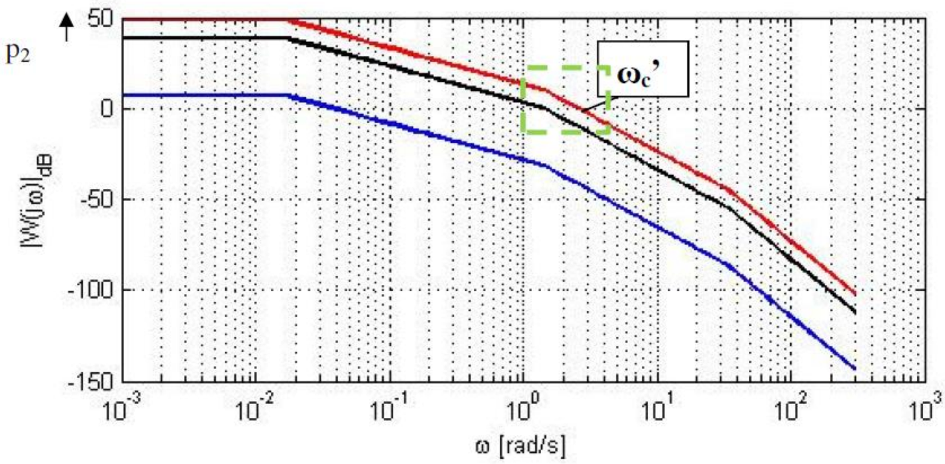
x azt fejezi ki, hogy hány dekád távolságra van **C** pont **B** ponttól. Egy dekád $(x = 1)$ esetén $\omega(C)$ pontosan tízszerese lenne $\omega(B)$ értékének, két dekád $(x = 2)$ esetén százszorosa, stb. Ha megoldjuk a fenti egyenletet, x értékére a következő adódik:

$$1.4451\ = 0.0379 \cdot 10^x\ \rightarrow\ x = log\left(\frac{1.4451}{0.0379}\right) = log(38.1293) = 1.5813 \tag{32}$$

Az AB szakasz hossza a korábbiakkal összhangban, mely egyben a p_1 erősítés értéke is, a következőképpen számolható:

$$\overline{AB} = p_1 = 20\,\frac{dB}{dekád} \cdot 1.5813\,dekád = 31.626\,dB \tag{33}$$

A következő lépésben p_2 értéke kerül meghatározásra. Ebben az esetben a fekete színnel jelzett görbét toljuk el párhuzamosan a piros színnel jelzett görbének fedésébe úgy, hogy a $0\ dB$ tengelyt a kívánt ω'_c körfrekvenciában vágja át:



9. ábra: A Bode-diagram eltolásának második fázisa

Mielőtt meghatároznánk p_2 értékét, szükségünk van ω'_c értékére, melyet mi határozunk meg a kijelölt fázistartalék alapján. Mivel a függőleges eltolás nem módosítja a Bode-fázisdiagram alakját, ezért ω'_c értékét az eredeti rendszer alapján, pontosabban annak egy jó közelítésének alapján számítjuk ki.

A $\varphi_t = 30°$ fázistartalék értéke, azaz a rendszer fázisa ebben a pontban:

$$\varphi = \varphi_t - 180° = 30° - 180° = 150° \quad (34)$$

Az átviteli függvény ismeretében a fázis a körfrekvencia függvényében kiszámítható:

$$\varphi(\omega) = arctan\frac{Im\{W(j\omega)\}}{Re\{W(j\omega)\}} \quad (35)$$

Belátható, hogy ez a kifejezés kézzel kiszámítva hosszadalmas folyamat, hiszen a $W(j\omega)$ rendszer nevezőjében harmadfokú polinom áll. A számítás kivitelezhető, de a kifejezésben megjelenő ω^3 nehézkessé teszi a zárt alakú megoldás megtalálását.

Ha a rendszer két legkisebb időállandóhoz tartozó törése, ebben az esetben T_2 és T_3 kellően messze vannak egymástól (a „kellően” szó némi mérnöki intuíciót is takar, a valóságban egymásnak legalább kétszerese a két érték), akkor a kisebbik időállandójú tagot egyszerűen elhagyhatjuk a számítások egyszerűsítésének érdekében.

A módosított átviteli függvény ezért így alakul:

$$W'(s) = \frac{2.146}{\cancel{(0.0273s+1)}(0.692s+1)(56.4s+1)} = \frac{2.146}{(0.692s+1)(56.4s+1)} \quad (36)$$

Feltételezve, hogy a közelítés nem befolyásolja a számítások eredményét számottevően, a fázisra vonatkozó összefüggés a következő:

$$W'(s) = tan\varphi(\omega'_c) = \frac{Im\{W'(j\omega'_c)\}}{Re\{W'(j\omega'_c)\}} \quad (37)$$

A kifejezésből csak ω'_c értéke ismeretlen. Az átviteli függvény átírható a következő alakra:

$$W(j\omega) = \frac{2.146}{(0.692j\omega+1)(56.4j\omega+1)} = \frac{2.146}{-39.03\omega^2 + 57.092j\omega + 1} = \frac{2.146}{(1-39.03\omega^2) + j\cdot 57.092\omega} \quad (37)$$

A valós és a képzetes részek különválasztandók:

$$W(j\omega)=\frac{2.146}{\left(1-39.03\omega^2\right)+j\cdot 57.092\omega}=\frac{\left(1-39.03\omega^2\right)-j\cdot 57.092\omega}{\left(1-39.03\omega^2\right)-j\cdot 57.092\omega}\cdot\frac{2.146}{\left(1-39.03\omega^2\right)+j\cdot 57.092\omega}=$$
$$=\frac{2.146-83.7584\omega^2-j\cdot 122.3842\omega}{\left(1-39.03\omega^2\right)^2+57.092^2}=\underbrace{\frac{2.146-83.7584\omega^2}{\left(1-39.03\omega^2\right)^2+57.092^2}}_{\mathrm{Re}\{W(j\omega)\}}+j\cdot\underbrace{\frac{-122.3842\omega}{\left(1-39.03\omega^2\right)^2+57.092^2}}_{\mathrm{Im}\{W(j\omega)\}} \quad (38)$$

Ha a fázisértéket behelyettesítjük, a körfrekvenciára a következő egyenlet adódik:

$$\tan\varphi=\tan\left(-150^\circ\right)=0.5774=\frac{\dfrac{-122.3842\omega}{\left(1-39.03\omega^2\right)^2+57.092^2}}{\dfrac{2.146-83.7584\omega^2}{\left(1-39.03\omega^2\right)^2+57.092^2}}=\frac{-122.3842\omega}{2.146-83.7584\omega^2} \quad (39)$$

Átrendezve:

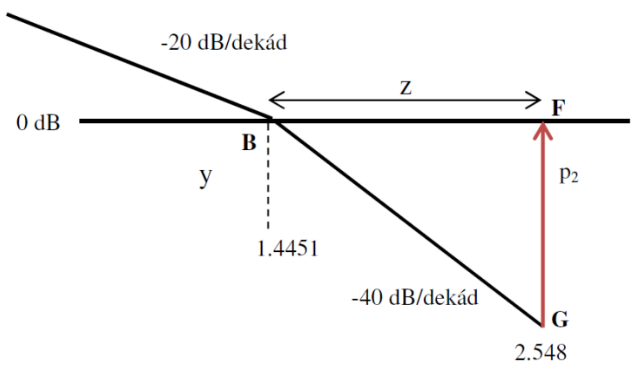
$$\frac{-122.3842\omega}{2.146-83.7584\omega^2}=0.5774\rightarrow -48.3621\omega^2+122.3842\omega+1.2391=0 \quad (40)$$

A másodfokú egyenlet megoldóképletét alkalmazzuk:

$$\omega_{1,2}=\frac{-122.3842\pm\sqrt{122.3842^2+4\cdot 1.2391\cdot 48.3621}}{-2\cdot 48.3621}=\begin{cases}2.548\\-0.0174\end{cases} rad/s \quad (41)$$

$$\omega'_c=2.548\ rad/s \quad (42)$$

Az új vágási körfrekvencia ismeretében már meghatározható a p_2 érték, melyet az alábbi ábrából olvashatunk le:



10. ábra: A 9. ábrán zöld szaggatott vonallal jelzett terület vizsgálata

p_2 valójában az **FG** szakasz hossza, mely a **BGF** háromszög egyik befogója. A befogó hossza a korábbiakhoz hasonlóan a **BF** szakasz z hosszának és a **BG** szakasz meredekségének szorzata, ahol z az **F** pont távolságát adja meg **B**-től dekádban. Így:

$$\overline{FG} = p_2 = z \cdot 40 \frac{dB}{dekád} \tag{43}$$

$$1.4551 \cdot 10^z = 2.548 \rightarrow z = log \frac{2.548}{1.4551} = 0.2433\, dekád \tag{44}$$

$$p_2 = 40 \cdot 0.2433 = 9.732\, dB \tag{45}$$

A rendszer végső nagyítása p_1 és p_2 nagyítások összege (decibelben):

$$P = p_{1\mathrm{dB}} + p_{2\mathrm{dB}} = 31.626\ \mathrm{dB} + 9.732\ \mathrm{dB} = 41.3580\ \mathrm{dB} = 10^{\frac{41.3580}{20}} = 116.923 \tag{46}$$

A P-szabályzót a következő alakú PI-szabályzóra bővítjük:

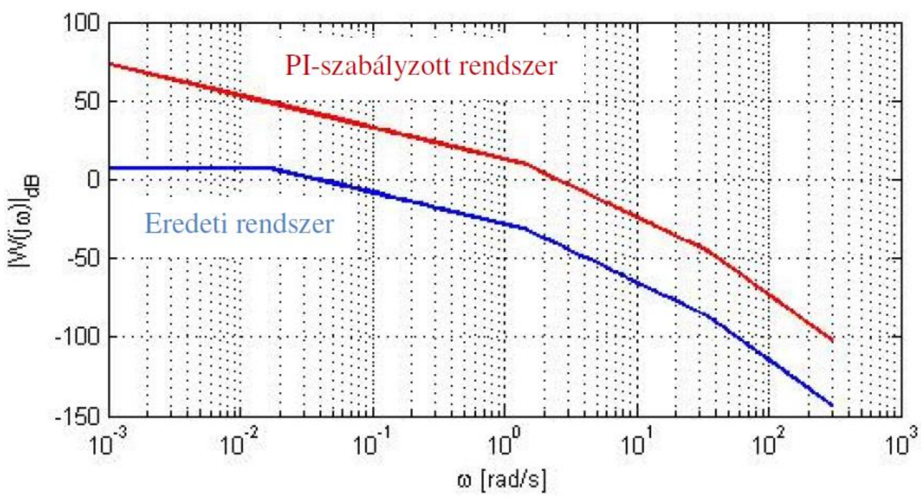
$$W_c(s) = P \frac{T_I s + 1}{T_I s} \tag{47}$$

Ökölszabály szerint T_I értékét úgy választjuk meg, hogy $T_I s + 1$ megegyezzen a szabályozni kívánt rendszer legnagyobb időállandójú tagjával (a legkisebb frekvenciájú töréshez köthető taggal), mely esetünkben $T_1 = 56.4$ sec.

Ennek felhasználásával a szabályzó végleges alakja a következő:

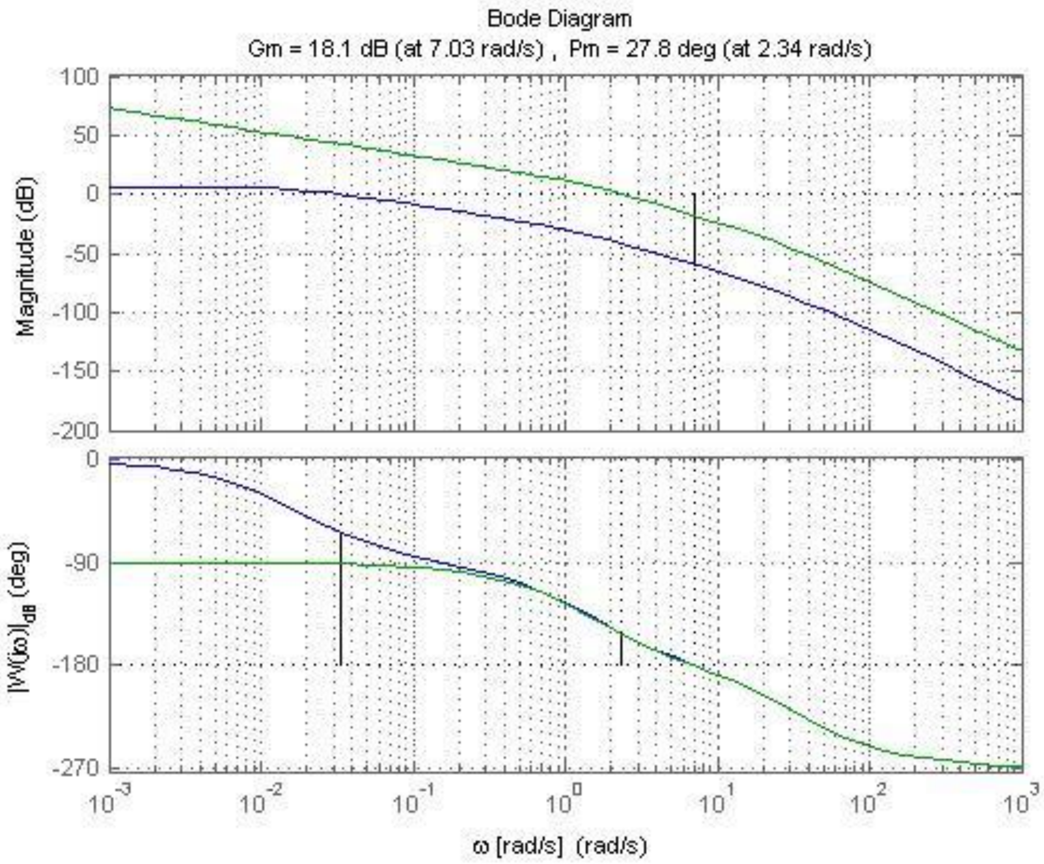
$$W_c(s) = P \frac{T_1 s + 1}{T_1 s} = 116.923 \cdot \frac{56.4s + 1}{56.4s} = \frac{56.4s + 1}{0.4824s} \tag{48}$$

A szabályozott rendszer közelítő Bode-diagramja:



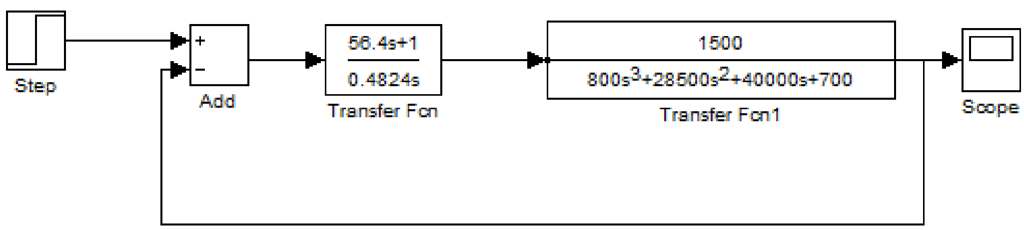
11. ábra: A Szabályozott rendszer közelítő Bode-diagramja

A pontos Bode amplitúdó- és fázisdiagramok a MATLAB programcsomaggal előállíthatóak és ellenőrizhetőek:



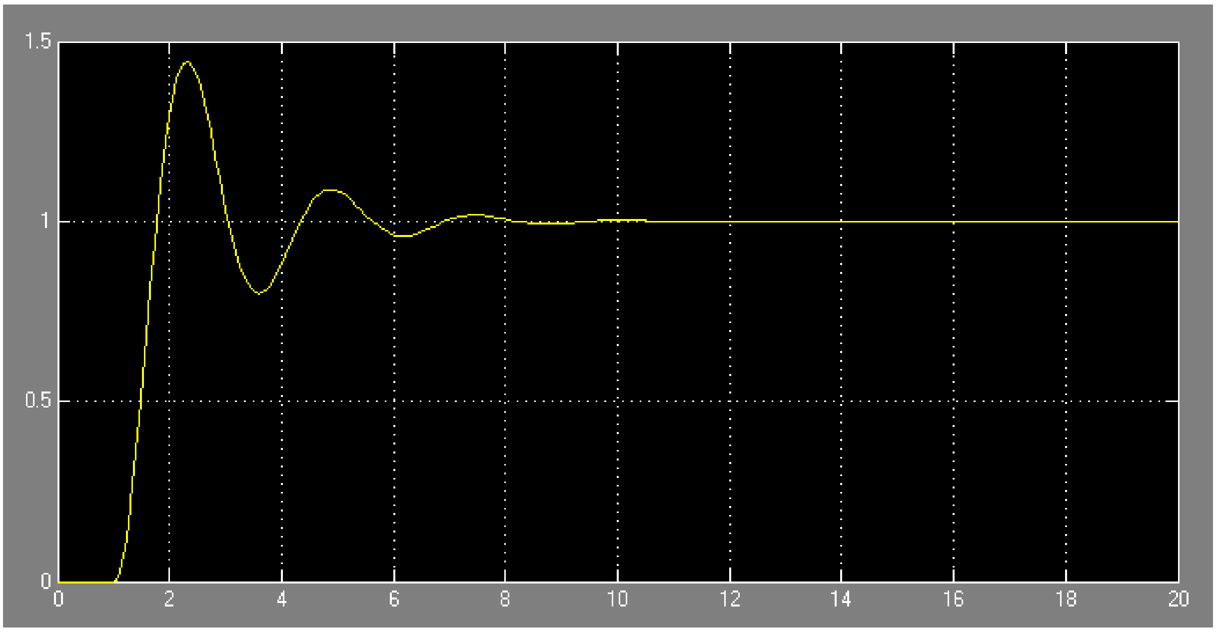
12. ábra: A Bode-diagramok ellenőrzése MATLAB segítségével

Hogy a PI-kompenzációs szabályzás valóban működik, ellenőrzésképpen MATLAB Simulink környezetben megépíthető a szabályozókör modellje:



13. ábra: A rendszer modellje a MATLAB Simulink programban

A rendszer bemenetére egységugrást megadva a 14. ábrán látható, hogy rendszer jól követi a referenciajelet. A szabályzó paraméterei ezek után módosíthatóak a szabályzás minőségi követelményeinek (túllövés, szabályozási idő stb.) figyelembe vételével.



14. ábra: A szabályozott rendszer válasza az egységugrás-referenciajelre

Az előadás összefoglalása

Ebben az előadásban láthattuk, hogyan tervezhetünk meg kézzel egy egyszerű PI-szabályzót a feltüntetett dinamikai rendszerhez. Fontos kiemelni, hogy a rendszer átviteli függvényének maghatározása csak a szabályozótervezés első, szükséges lépése, így az alapvető fizikai ismeretek elengedhetetlenek a sikeres szabályozótervezéshez. Láthattuk, hogyan kapcsolódnak az elektronikai és mechanikai rendszerek egymáshoz, hogyan határozhatjuk meg a rendszer bemenetének hatását a kimenetre, hogyan áll össze egy, a már korábbi előadásokban is tárgyalt alakú átviteli függvény, és hogyan tervezhetünk PI-szabályozót a levezetett rendszerhez „kézi” módszerekkel. A szabályozótervezésnek természetesen más, kidolgozottabb módszerei is léteznek, melyekről a következő előadásokban lesz szó.

Ellenőrző kérdések

1. A vázolt feladatban hol kapcsolódnak a DC-motor áramkörét és a mechanikai rendszer mozgását leíró egyenletek?

2. Milyen közelítésekkel élünk a Bode-diagram kézi megrajzolásakor? Milyen esetekben jelentkeznek nagy hibaértékek a Bode-diagram ilyen módú megrajzolása esetén?

3. PI-szabályozótervezés esetén az I tagot miért a legnagyobb időállandójú taghoz igazítjuk? Milyen veszélyeket rejthet az I tag hozzáadása a rendszer stabilitásának szempontjából?

4. Hogyan ellenőrizhetjük legegyszerűbben (számítógép nélkül), hogy a vágási körfrekvenciát jól számoltuk-e?

5. Hogyan módosulna a fenti szabályozótervezési módszer, ha PI szabályozó helyett PD vagy PID szabályozót terveznénk a rendszerhez? Mi lenne a Bode-diagram „mozgatásának” sorrendje?