Tartalom:

Σ= 24 oldal

A hurokerősítés

A szabályozási kör fontos jellemzője a **(K)** *hurokerősítés (körerősítés).* Ez a körben szereplő átviteli tagok átviteli tényezőinek szorzata. A hurokerősítés csupa **P**-típusú tagból álló hurok esetében dimenziónélküli szám, míg **n** darab **I**-típusú tagot is tartalmazó hurok körerősítésének dimenziója:

$$\mathbf{K = 1 / sec^{n}}.$$

A hurokerősítés <u>mérése</u> az állandósult állapotú hurok felnyitásával történik. A felnyitás helyén (általában a visszacsatoló ágban a különbségképző előtt) beadott vizsgálójel (pl. ugrásjel) **(x_b)** hatását a felnyitott lánc záró (a visszacsatoló ágban lévő) elemének kimenetén mérhető jelet **(x_k)** kell megfigyelni. A hurokerősítést a

$$\mathbf{K=\Delta x_k / \Delta x_b}$$

érték adja.

A hurokerősítés értéke a kör stabilitásának biztosítása érdekében meghatározó jelentőségű, és a szabályozó "hangolásánál" nem hagyható figyelmen kívül.

Példa:

A szabályozási kör előrevezető ága egy szabályozóból és a szabályozott szakaszból, a visszacsatoló ág egy P1T tagból épül fel. Ezen elemek átviteli tényezője(erősítése) a következő:

PID szabályozó (csak P átvitel választással): K_P = 4.5; Szakasz: $K_{szakasz}$ = 2.2;Visszacsatolás: $K_{v.csat.}$ = 3.

Körerősítés (hurokerősítés) : $K_{kör}$ = (4.5 * 2.2 * 3)= 29.7

A szabályozó körök típusai

Az egyszerű szabályozó körök tipizálására a hurokátviteli függvény szerkezete szolgáltat lehetőséget. Mivel az előrevezető ágban P- és I-jellegű, a visszacsatolásban pedig csak P-jellegű tagok lehetnek sorbakapcsolva, a hurokátviteli függvény is csak arányos vagy integráló - esetleg többszörösen integráló - jellegű lehet. A hurokátviteli függvény tehát általában:

$$Y=\frac{K}{s^i}.Y_p(s)$$

alakban irható,

ahol K a hurokerősítés;

i a hurokban előforduló soros(!) integráló tagok számossága;

$Y_p(s)$ pedig egy olyan P-jellegű maradékfüggvény, amely (T_i.s + 1) alakú tagokat tartalmaz.

Az <u> i számot</u> a hurok *típusszámának* nevezzük. **$i = 0$ esetben a hurok arányos vagy 0 típusú** **$i = 1$ esetben integráló vagy 1 típusú**($i = 2$ szabályozás csak rakéták stb. irányításánál fordul elő)

Már most előrebocsátjuk, hogy a szabályozás elvárható maradó hibája a típusszámtól függ, és **hibamentes (szabályozási eltérés mentes) szabályozást <u>csak</u> $i = 1$ esetében (azaz 1 típusú szabályozással) lehet elérni.** Az idevonatkozó elméleti meggondolásoktól itt eltekintünk és csak a végeredmény közlésére szorítkozunk.

Ezekből következően - a zavarás fellépését is figyelembe véve - a **Δx_s szabályozási eltérés** a következő összefüggés szerint alakul:

$$\Delta x_s = \lim_{s\to 0}\left[\frac{s^i}{s^i+K}.x_a - s^{i-j}\frac{A_z}{s^i+K}.x_z\right]$$

az összefüggésben:

s	a Laplace transzformálás változója
i	a szabályozás típusszáma
j	a zavarátvitel típusszáma
K	a körerősítés, hurokerősítés
A_z	a zavarás átviteli tényezője
x_A	alapjel értéke
x_z	a zavarójel értéke

A következő táblázat az összefüggésből származtatható (kivonatos) eredményeket foglalja össze.

A kör típusszáma	A zavarás típusszáma	A szabályozott jellemző állandósult értéke	Állandósult szabályozási eltérés
i	j	$x_s(\infty) = x_{sa}(\infty) + x_{sz}(\infty)$	$\Delta x_s(\infty) = x_A - x_s(\infty)$
0	0	$\frac{K}{1+K}x_A \pm \frac{A_z}{1+K}x_z$	$\frac{K}{1+K}x_A \mp \frac{A_z}{1+K}x_z$
0	1	$\frac{K}{1+K}x_A \pm\infty$	$\frac{K}{1+K}x_A \mp\infty$
1	0	$x_A \pm 0$	0 ∓ 0
1	1	$x_A \pm \frac{A_z}{K}x_z$	$0 \mp \frac{A_z}{K}x_z$
1	2	$x_a \pm \infty$	$0 \mp \infty$

A táblázat vizsgálatával - többek között - a következő észrevételeket lehet tenni: • amennyiben nincs zavarás (és így $j = 0$) csak P jellegű ($i = 0$) szabályozással csak szabályozási eltéréses szabályozás lehetséges;

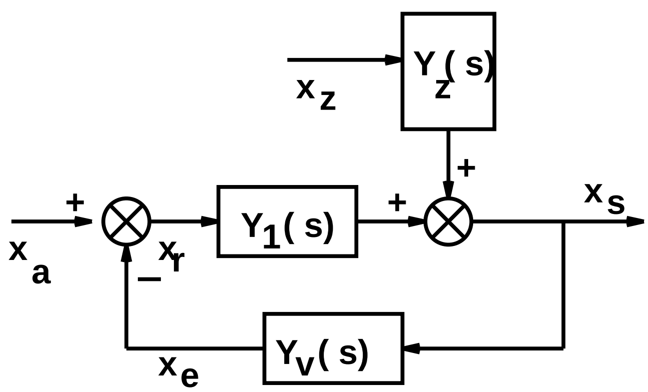
- ebben az esetben K növelésével az eltérés csökken, de K növelése nem történhet minden határ nélkül, mert egy kritikus K értéknél a rendszer elveszti a stabilitását (erről a későbbiekben többet tanulunk);
- eltérés mentes szabályozás csak akkor lehetséges, ha i = 1, azaz a körben I-tulajdonságú előrevezető ág van.;
- i = 0 és j = 0 esetben a kimenetet a kör és a zavarás átvitelének különbsége fogja meghatározni, ami azt jelenti, hogy a zavarás a szabályozott jellemzőt módosítja;
- csak P-jellegű kör kimenetét j = 1 típusú tagon át ható zavarás végtelenbe vezeti;
- i = 1 és j = 1 esetben a kimenőjel a zavarás átvitelének megfelelően állandósul.

A zárt kör átviteli függvényei

Az egyszerű szabályozó köröket, - a további vizsgálatok szempontjából - az ábra szerinti átviteli *rész-szakaszokra* célszerű bontani.

- $Y_1(s)$ az un. előrevezető ág (kompenzáló-, + végrehajtó-szerv, + szakasz) átviteli függvénye;
- $Y_v(s)$ a visszacsatoló ág (mérő - átalakító + távadó) átviteli . függvénye;
- $Y_z(s)$ a zavarásokat behozó szakasz átviteli függvénye.

Ezek a szakaszok bármelyik egyszerű körnél jól elkülöníthetők.



Az előtanulmányokból ismert a zárt kör átviteli függvényének értelmezése.

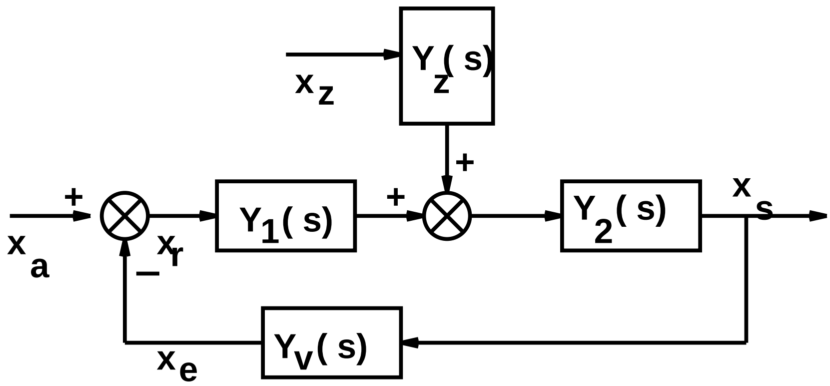
Emlékeztetőként (és az itt alkalmazott jelölésekre módosítva)

$\mathbf{Y(s)} = X_s(s)/X_a(s) = Y_1(s) \, / \, (1 + Y_1(s) \, . \, Y_v(s))$;

Y(s) az eredő átviteli fgv.

A nevezőben meglévő $\mathbf{Y_1(s) \, . \, Y_v(s)}$ szorzat a felnyitott ("kiterítve képzelt") kör eredő átviteli függvénye, amit *hurokátviteli függvénynek* (**Y**) nevezünk. (Ennek erősítése az előzőekben megismert hurokerősítés vagy körerősítés.)

Példa: egy szabályozási .kör eredő átviteli függvényének számítására. (zavarást nem tételezünk fel !)



A tagok átviteli függvénye és a felnyitott kör átviteli függvénye: **Y(s)** a következő:

$$Y_1(s) = K_p \frac{T_1.s+1}{T_2.s+1};$$

$$Y_2(s) = \frac{K_i}{s} \frac{1}{(T_3.s+1).(T_4.s+1)};$$

$$Y_v(s). = K_{pv}$$

$\mathbf{Y\,(s)} = Y_1(s) \, . \, Y_2(s) \, . \, Y_v(s) =$ (behelyettesítés és összevonás) $= \mathbf{(K / s^1) \, . \, Y_p(s)}$

A **K** a három átviteli tényező szorzata,

$\mathbf{s^1}$ (s első hatványon) mert P és I tagok vannak az előrevezető ágban, míg az $\mathbf{Y_p(s)}$-ben az időkéséses tagok ($T_n s+1$) vannak összevonva.

(végezze el a műveleteket; keresse vissza az előző anyagokban az átviteli függvényeket összefoglaló részt és állapítsa meg azt, hogy melyik tag az integráló; gondolkozzon el azon, hogy ez a kör képes-e szabályozási eltérés nélkül működni?).

Az értéktartó és a követő szabályozás összehasonlítása

Az értéktartó szabályozás jellemzője az, hogy a szabályozott jellemző alapjele hosszú időtartam alatt állandó. Feladata a szabályozott jellemzőnek az alapértéken tartása és a határozatlan módon és időben jelentkező zavarások hatásának elhárítása. Az értéktartó szabályozások vizsgálatában elégséges, ha az állandó nagyságú alapjel mellett a zavarást **egységugrás-függvény szerint** változónak tételezzük fel. A cél a **0** és **1** típusú szabályozások alapértéktartó tulajdonságának és zavarelhárító képességének megismerése. Utóbbi képesség - amint azt már megismertük - a kör *típusszámától* függ.

A vizsgálandó esetek (ahogyan ezeket a már a ismertetett táblázat mutatta)

0 típusú szabályozás avagy 1 típusú ?

a zavarás arányos (P) tagon avagy integráló (I) tagon keresztül történik ?

azaz j = 0 avagy j = 1 **?**

0 típusú szabályozás még zavarmentes esetben sem képes a szabályozott jellemzőt az alapértéken tartani, hanem csak $\mathbf{1 / 1+K}$ nagyságú eltéréssel. A zavarás hatását is $\mathbf{1 / 1+K}$ értékkel csökkenti akkor, ha a zavarás arányos (P) tagon keresztül történik.

Integráló (I) típusú zavarás az eltérést minden határon túl növeli. **1** típusú szabályozás, zavarmentes esetben a szabályozott jellemzőt alapértéken tartja. Ha van zavarás, úgy arányos zavarás esetében ugyancsak nincs szabályozási eltérés, míg integráló zavarás $\mathbf{A_z / K}$ értékre csökkenti azt.

A következő **példában** egy szabályozási kör erősítésnek lehetséges értékét határoljuk be.

Legyen a kört érő zavarások hatása az alapérték 30 %-a, és vegyük figyelembe a táblázat 4-ik sorát (0 - $(A_z / K)\ x_z$), azaz - átrendezve - $A_z \cdot x_z = 0{,}30 \cdot x_a$.

A mérő átalakító és a távadó eredő pontossága ± 2 %. Ekkor a szabályozási eltérést sem érdemes $0{,}02 \cdot x_a$ értéknél kisebbre tervezni, tehát 0 típusú kör esetében:

$$\Delta x_s = 0{,}02 \cdot x_a = (0{,}30 \cdot x_a) / (1 + K)$$

amiből $K = 14$.

A kívánt pontossághoz tehát a számolt nagyságú erősítés szükséges. (A stabilitás problémája ezután még tisztázandó, de erről később!)

A követő szabályozás jellemzője, hogy a szabályozott jellemző alapértéke időben *üzemszerűen* változik. Feladata, hogy a különböző módon változó alapjelet a szabályozott jellemző alakhűen kövesse és az esetleges zavarásokat elhárítsa. A követő szabályozások ritkán 0 típusúak, általában 1 típusúak, igényesebb esetekben (rakéták) 2 típusúak. Visszavezetésük (a visszacsatoló ág) merev, azaz az átviteli tényezője =1 és nincs időkésés. A követő szabályozás vizsgálata egységugrás és sebességugrás (időben egyenletesen növekvő/csökkenő) jellel történik. Az elsőrendű kérdés a követőképesség pontosságának a vizsgálata; a zavarás elhárítás itt másodrendű feladat. Így itt a szabályozási eltérés helyett a **követés pontossága** a minőségi kritérium. Az értékelés eredményeként a szabályozási eltérés táblázatához hasonló táblázat alakul ki. (Itt nem közöljük.). A kapott eredményekből kitűnik, hogy a 0 típusú követő szab. még az egységugrás szerint változó alapjelet sem képes hiba nélkül követni, ezért követő szabályozásnál nem használatos. Hibamentes követés csak 1 típusú szabályozással érhető el, ami még a zavarások hatását is kiküszöböli.

A stabilitás fogalma és értelmezése a szabályozási folyamatokban

Valamely fizikai folyamat vagy állapot stabilitásán azt a tulajdonságot értjük, hogy a folyamat vagy az állapot egyensúlyát megbontva, az önmagától ismét egyensúlyi helyzetbe jut, vagyis meghatározó jellemzői újból határozott és véges nagyságú értéket vesznek fel. A folyamat vagy állapot akkor instabil, ha az egyensúlyi helyzet megbontása után jellemzőinek az egyensúlyi értéktől való eltérése egyre nő, amíg csak a szerkezet adta (műszaki, biztonsági, stb.)határokat el nem éri.

Egyes tagok vagy *nyitott* körök stabilitásának vizsgálata nem nagy jelentőségű. A *egyedülálló tag* vagy *nyílt lánc* tulajdonképpen *önmagában* instabil nem lehet, mert a kimeneten jelentkező megnövekedett jel - minthogy nincs visszacsatoló ág - nem hat vissza a bemenetre és így a kitérések a tagon illetve a rendszeren belül nem növekedhetnek (szuperponálódhatnak).

Zárt szabályozási kör ezzel szemben önmagában is instabil lehet. Ha ugyanis valamilyen hatás a kör végigfutása után - a visszacsatoló ágon át - megnövekedve érkezik vissza, a növekedés tovább folytatódik, az összes jellemzők tartósan növekednek és egyensúlyi helyzet nem jön létre. A stabilitás nem a külső hatásokkal függ össze, hanem a körnek belső felépítéséből eredő lényeges tulajdonsága, és elsősorban a **felnyitott kör erősítési tényezőjétől** és a kört alkotó elemek **időállandóitól** függ.

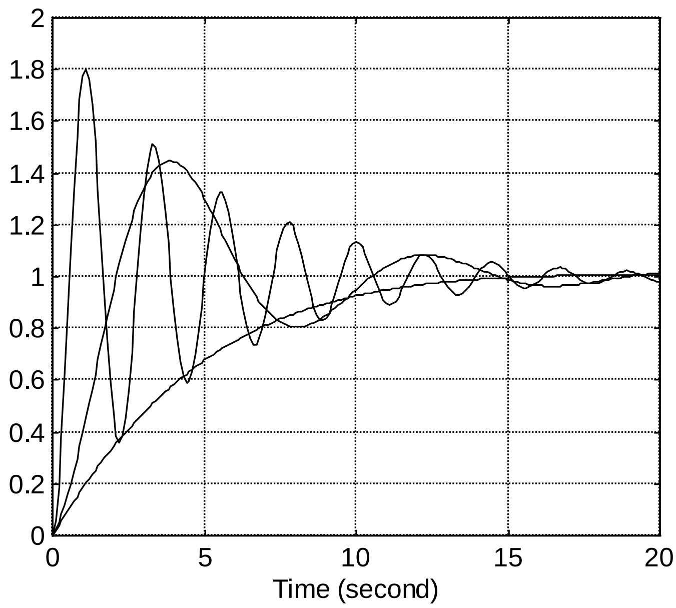
Természetes, hogy bármely módon instabil szabályozás használhatatlan. Ezért a szabályozással kapcsolatos mindennemű előzetes tanulmány legfőbb célja, hogy a stabilitás meglétét megállapítsa, illetve meglétének feltételeit megteremtse. Ezeket a feltételeket **stabilitási feltételeknek** vagy **stabilitási kritériumoknak** nevezzük.

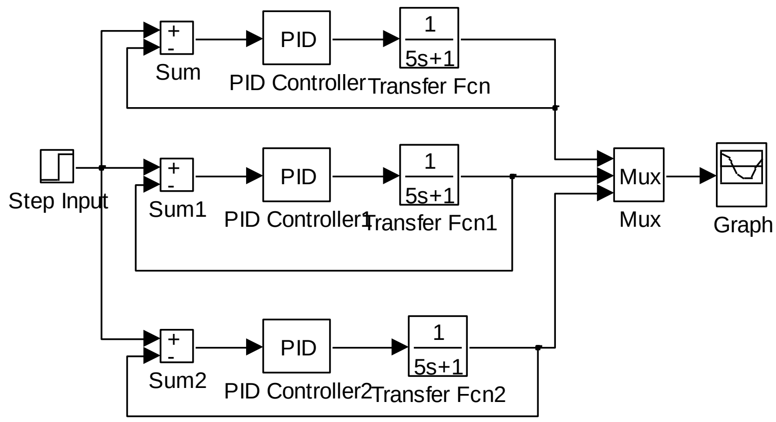
A stabilitási feltételek lényegében olyan, a gyakorlat számára kielégítő eredményt nyújtó *matematikai módszerek* amelyek alkalmasak annak megítélésére, hogy

- egy adott szabályozás stabilis-e vagy sem;
- ha **igen**, a szabályozási kör egyes paramétereinek (átviteli tényezők, időállandók) valamely irányban történő változtatása növeli vagy csökkenti-e a stabilitást;
- ha **nem**, milyen irányba kell befolyásolnunk a szabályozási kör paramétereit;
- avagy milyen dinamikus tulajdonságokkal bíró járulékos tagot kell a szabályozási körbe iktatni, vagy milyen belső visszacsatolásokat kell alkalmazni a célból, hogy a szabályozási kör stabilissá váljon.

A stabilitás vizsgálata

A **zárt szab. kör** ***átviteli függvényéből*** az könnyen megállapítható, hogy elvileg lehetséges-e az állandósult állapot elérése. Az ilyen vizsgálatok során azonban elsősorban az állandósult viszonyokat tartjuk szem előtt és eltekintünk a megelőző tranziens (átmeneti) állapotoktól. A stabilitás eldöntéséhez tehát az átmeneti állapot vizsgálata is szükséges. Már működő szabályozási körök stabilitás vizsgálata ugrásjelre adott válaszuk megfigyelésével is lehetséges. Előre kell bocsátani azt, hogy meglévő rendszerek nem mindig "szeretik" az ilyen vizsgálatokat, mert meghibásodásokat és /vagy termeléskiesést okozhatnak. Az ábrán három átmeneti görbét lehet megfigyelni, valamint azt a SIMULINK programot, amelynek segítségével készült. A körök egymástól csak az integrálási időben különböznek. A kevésbé csillapodók rövidebb integrálási idővel készültek.





A SIMULINK program elemeinek paraméterei:

Step Input: kezd. időpont:0; kezdő érték:0; végső érték:1,

Transfer Fcn: számláló: [1]; nevező: [5 1],

PID: felső P=1, I=1/0.25, középső 1 ill 1/3, alsó 1 ill.1/40.

Szimulációs idő:20 sec.

A stabilitás matematikai módszerekkel történő vizsgálatától - az elméleti előismeretek hiánya miatt - itt el kell tekinteni, de megemlítjük, hogy a zárt kör átviteli függvényének inverz Laplace transzformálásával el lehet jutni a szabályozási kör *karakterisztikus egyenletéhez,* és ha ennek a gyökeinek valós része negatív, úgy rendszerünk stabilis.

Az elméleti következtetések kiváltására gyakorlatiasabb módszerek is vannak. Ezek közül a ROUTH-HURWITZ stabilitási kritériumot és a BODE diagram segítségével történő vizsgálatot fogjuk megismerni.

A ROUTH-HURWITZ stabilitási kritérium

A kritérium szerint ahhoz, hogy meglegyenek az előzőekben említett negatív valós részű gyökök két szükséges és elégséges feltétele van:

- a karakterisztikus egyenlet minden együtthatója pozitív legyen,
- az egyenlet együtthatóiból az alábbi módon alkotott fődetermináns:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} A_{n-1} & A_{n-3} & A_{n-5} & .... & 0 \\ A_n & A_{n-2} & A_{n-4} & .... & 0 \\ 0 & A_{n-1} & A_{n-3} & .... & 0 \\ 0 & A_n & A_{n-2} & .... & 0 \\ 0 & 0 & A_{n-1} & .... & 0 \\ 0 & 0 & A_n & .... & 0 \\ .... & .... & .... & .... & .... \\ 0 & 0 & 0 & .... & A_0 \end{vmatrix}$$

- és ennek a főtederminánsnak minden főátlós altederminánsa:

$\Delta_1 = A_{n-1}$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} A_{n-1} & .A_{n-3} \\ A_n & A_{n-2} \end{vmatrix}$$

stb.

nagyobb legyen mint nulla!

Példda: A vizsgált kör hurokátviteli függvénye a következő:

$$\mathbf{Y(s) = K\ / s\ (9s^2 + 6s + 1)}$$

Az elméleti levezetésekből származóan tudjuk a karakterisztikus egyenlet általános alakját:

$$\mathbf{1 + Y(s) = 0}$$

Az első lépés az összegzés két tagjának közös nevezőre hozása (azaz **1** számlálójába és nevezőjébe a hurokátviteli függvény nevezőjét írva) és ezt **Y**-al összevonva, majd csak a számlálót véve figyelembe:

$$9 . s^3 + 6 . s^2 + s + K = 0$$

alakhoz jutunk.

(Értelmezés: a legmagasabb polinom az A_n (a bal első taghoz (itt:9) tartozik), és jobbra csökken, utolsó tag az A_0 (itt:K)).

A determináns:

$$\begin{vmatrix} 6 & K & 0 \\ 9 & 1 & 0 \\ 0 & 6 & K \end{vmatrix}$$

A három aldetermináns közül csak egyiknek nincs 0 szorzója; (győződjön meg erről önmaga is). Ilyen módon a "használható" aldetermináns:

$$K (6.1 - 9.K) > 0$$

Amennyiben az egyenlőtlenséget egyenlőséggé alakítjuk, azaz a jobb oldal =0 lesz, ezen feltétel teljesüléséhez a szorzat két tagja közül egyiknek 0-val kell egyenlővé lenni. A K nem lehet 0, így: 1.6-9.K = 0.

Ennek átrendezésével

$$\mathbf{K = {}^{6}/_{9} = 0{,}66}$$

(A gyakorlaton ezt a példát szimuláljuk).

Másik példa.

Legyen a hurokátviteli függvény:

$$\mathbf{Y = {}^{K}/_{(s+1).(2s+1).(5s+1)}}$$

Mennyi ennek a huroknak a kritikus körerősítése?

(Megjegyzés: a műveletek elvégzése során kialakult (K+1) együttható nem bontható és összetartozóan kezelendő)

Stabilitásvizsgálat BODE-diagramokkal

A felnyitott szabályozási kör Y(jω) amplitúdó-fázis függvényét alapul véve, megrajzoljuk az annak megfelelő logaritmikus amplitúdó-körfrekvencia és fázis-körfrekvencia jelleggörbéjét. (Bode diagram szerkesztését már ismerjük, tehát most már ezt nem részletezzük.) Megkeressük a fázisgörbén a $\varphi = -180^{o}$-hoz tartozó pontot, majd e pontból függőlegest húzunk.

*(**ismétlés és magyarázat**: a zárt szabályozási kör stabilitásával kapcsolatosan már említettük, hogy legfeljebb 180 fok fáziseltolásig stabil. Ha ennél nagyobb fáziseltolás alakul ki a tagokon körben futó jelen, úgy ez szuperponálódik, mindjobban erősíti önmagát és így egyensúlyi állapot nem alakulhat ki. A biztonságos működés érdekében a rendszerbe fázistartalékot igyekszünk kialakítani. Ennek módjait később ismerjük meg.)*

A függőleges egyenes az ω- tengelyt az ω_t **körfrekvenciánál** metszi. Ezt követően megállapítjuk, hogy ehhez a ω_t értékhez milyen nagyságú amplitúdó érték tartozik.

Három eset lehetséges:

- az amplitúdó-körfrekvencia görbe éppen ω_t -nél metszi a 0 dB tengelyt. Ebben az esetben a szabályozás a *labilitás határán* van.

- a görbe ω_t -nél kisebb körfrekvenciánál metszi a tengelyt. Ekkor a szabályozás *stabilis*.
- a metszés a nagyobb frekvenciánál van. Ekkor *labilis* a szabályozás.

A stabilitás kritériumainak most megismert megfogalmazása lehetővé teszi, hogy a kritikus körerősítést meghatározhassuk, illetve támpontot kapjunk arra, hogy a szabályozásunk - bizonyos tartalékkal is rendelkezve - biztosan stabilis legyen.
A labilitásból stabilis rendszert létrehozni több mód van. Ilyenek:

- a felnyitott kör erősítésének csökkentése,
- az időállandók célszerű és helyes megválasztása,
- soros vagy párhuzamos stabilizáló (kompenzáló) tagoknak vagy belső visszacsatolásnak az alkalmazása.

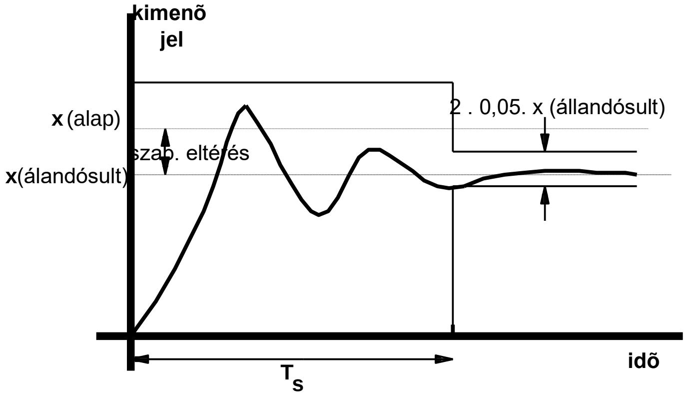
Az első lehetőség a szab. eltérés növekedéséhez és a folyamatok lelassulásához vezet. A második lehetőséggel alig lehet élni, mert a rendszerek adottak, és alig van mód a beavatkozásokra. Mindezek miatt a harmadik módszer a szokásos. A későbbiekben az ilyen lehetőségek kihasználásának módszereit ismerjük meg.

Szabályozások minőségének vizsgálata és javítása

Minden szabályozással szemben három alapvető követelményt támasztunk.

- stabilan működjön és lehetőleg stabilitási tartalékkal rendelkezzen,
- állandósult állapotban a szabályozási eltérés a követelményekben megadottnál kisebb legyen,
- az átmeneti állapotban a szab. minőségi jellemzői a megköveteltnél ne legyenek rosszabbak.

A felsorolt három követelménynek egyidejűleg kell teljesülnie ahhoz, hogy a szabályozás a tőle elvárható módon dolgozzék.
Az első és második követelménnyel már az előzőekben megismerkedtünk, az átmeneti állapotban való viselkedéssel bővebben most foglalkozunk.
Az ábra támpontot ad a szabályozás minőségi megítélésének magyarázatához.



Tételezzük fel, hogy a t=0 időpontban adott egységugrás alakú jel az ábra szerinti változó kimenőjelet gerjeszti. Az ábra alapján a szabályozás minőségének megítélésére szolgáló három jellemzőt a következőképpen értelmezhetjük:

- *túllendülés* van, mert a **kimenőjel** az **x(állandósult)** értéket az átmeneti (tranziens) folyamat alatt túllépi. (az ilyen túllépést a technológia nem mindig "szeret"(enged meg).). Negatív ugrásjel bemenet esetében a túllendülés "alálendülést" mutathat.
- a *szabályozási idő* (T_a) az átmeneti folyamat időtartama. Ez a gerjesztő jel bekapcsolásától tart addig , amíg a kimenőjel az un. *dinamikus pontosságon* belüli értékre csökken. Utóbbi általában a kimenőjel ± 5 %-a.
- a kimenőjel *lengéseinek száma*.

A három jellemzőt figyelembe véve akkor jó a szabályozás ha:

- nincs (vagy csak csekély) a túllendülés,
- a szabályozási idő rövid,
- ha van is túllendülés, a (fél)lengések száma csekély.

A hurokerősítés és a fázistartalék a szabályozási időt és a túllendülést erőteljesen befolyásolja.

Ideális és reális kompenzáló szervek

A szabályozás minőségi jellemzőit elsősorban a *különbségképző és a végrehajtó szerv* közé beiktatott *kompenzáló* szervvel lehet javítani. (a kompenzáló szerv elnevezés az eddig *szabályozóként* említett szerv, eszköz, műszer stb. további szokásos neve; a műveletet gyakran kompenzációnak is nevezik). A rendelkező jel "útjába" elhelyezkedő kompenzáló (szabályozó) szerv helyett vannak más kompenzálási megoldások is: pld. belső visszacsatolás vagy visszavezetés stb. ezek tárgyalásától itt eltekintünk, és a következőkben csak a ***soros*** kompenzálás lényegét ismerjük meg.

A szabályozásban alkalmazott szabályozók többsége külön szerkezeti egységet képez. Tartalmazza a különbségképzőt, a kompenzáló és (jel)erősítő szervet, sőt gyakran az alapjel képző szervet is.

A szabályozó bemenő jeleinek az *alapjelet* és az *ellenőrző* jelet, illetve ezek különbségeként adódó *rendelkező* jelet tekintjük. Kimenő jele a *végrehajtó* jel. A legtöbb villamos szabályozónál ezek a jelek azonos dimenziójúak és értéktartományúak (ma Európában szokásos: 4...20 mA).
Magukban a szabályozókban ritkán fordul elő tároló vagy holtidő, az esetleges kisebb időkésések pedig elhanyagolhatók. A szabályozókat a kompenzálási lehetőségeik alapján a következőképpen csoportosíthatjuk:

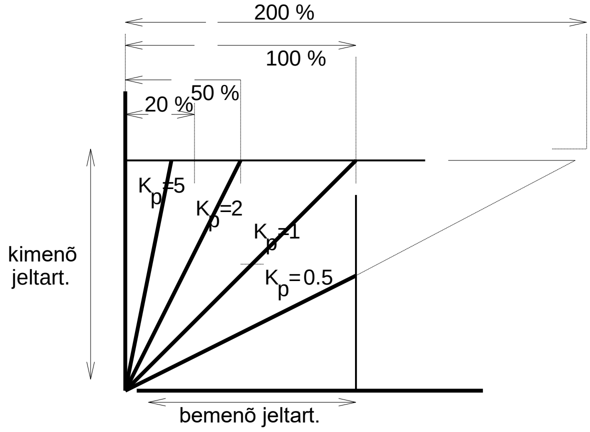
P	csak arányos kompenzáció történik,
I	csak integráló kompenzáció történik,
PI	arányos + integráló kompenzáció történik,
PD	arányos + differenciáló kompenzáció történik,
PID	arányos + integráló + differenciáló kompenzáció történik.

A P szabályozó

Csak a legegyszerűbb szabályozás elvégzésére alkalmas. Az $\mathbf{K_p}$ erősítési tényező megválasztásával a kívánt körerősítés állítható be. Az **arányossági tartomány ($\mathbf{X_p}$)** azt mutatja meg, hogy a kimenőjel tartománynak hány százaléka a bemenő jeltartomány. A két jellemző közötti kapcsolat:

$$X_p = 100 \ / \ Kp$$

(A következő ábra az előzőek magyarázatául szolgál)



Ha az erősítési tényező $K_p=1$, akkor az arányossági tartomány éppen a kimenő jeltartománnyal megegyező jel , tehát 100 %. $K_p=2$ esetében fele, vagyis 50 % és így

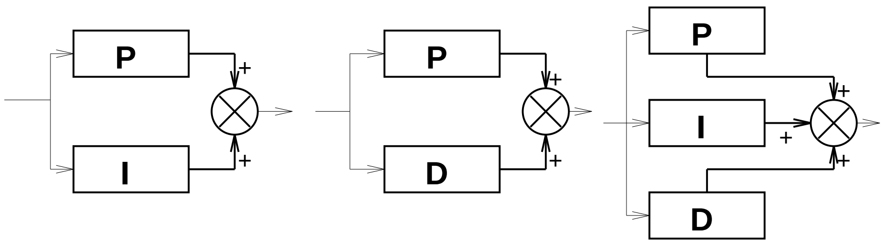
tovább. Az arányossági tartomány tehát az erősítési tényező reciprok értékének *százszorosával megegyező % érték.*
A P szabályozót egyszerűbb esetekben önmagában is alkalmazzák, azonban a műszerkereskedelemben kapható szabályozok rendszerint lehetővé teszik a PID szabályozás megvalósítását is. Ha az I és D hatást nem aktivizáljuk, úgy ezek az eszközök is (csak) P szabályozóként viselkednek.

Az I szabályozó

Az I szabályozó egy változtatható integrálási idővel rendelkező, elhanyagolható tehetetlenségű integráló szerv. Önmagában csak elvétve használatos.
Az integrálási időt $\mathbf{T_i}$ jelzéssel említjük és értelmezése: $\mathbf{T_i = 1/K_i}$; (*emlékeztetőként*: K_i az integráló tag átviteli tényezője, amelynek dimenziójában a nevezőben mindig van idő!)

◆ ◆ ◆ ◆ ◆

Az ábra a PI, PD, PID jellegű összetett szabályozók felépítését mutatja. Működésüket az arányossági tartományon kívül az un. integrálási idővel ($\mathbf{T_i}$) és a differenciálási idővel ($\mathbf{T_d}$) szokás jellemezni.



Az átviteli tényezők: $P = K_p$ $I = K_i / s$ $D = K_d \cdot s$

A PI szabályozó

Az ideális PI szabályozó átvitel függvénye:

$$Y_{PI}(s) = K_p + K_i / s = (100 / X_p) + (K_i / s)$$

Az összefüggés jobb oldalát K_i-vel osztva:

$$K_p / K_i = 100 / (X_p \cdot K_i) = T_i$$

alakhoz jutunk, amelyből végül:

$$\mathbf{Y_{PI}(s) = 100 / X_p \, (1 + 1 / T_i \, s)}$$

átviteli függvényt kapunk.
Ezen kifejezésben a T_i integrálási idő a PI szabályozó fontos jellemzője; jelenti azt az időt, amely alatt a szabályozó kimenő jele éppen az arányos erősítésnek (K_p) megfelelő értékkel változik meg. Szokás *utánállási időnek* is nevezni.
A korszerű szabályozókon (műszereken) a P+I tulajdonság kiválasztható, és a számszerű értékek beállíthatók. A PI szabályozás - ahogyan ezt már az előző fejezetekben megismertük - egyesíti magában a P és az I szabályozás nyújtotta előnyöket. A kezdeti ugrás segítségével (ezt adja P rész) gyorsan felveszi a fellépő bemenet változás (rendelkező jel változás) kompenzálását, majd az integráló hatás (ezt adja az I rész) a zavarásokból eredő eltérést teljesen meg is szünteti.
A kereskedelemben forgalomban kapható szabályozókon az arányossági tartomány

$$1...3 \leq X_p \leq 200\ \%$$

ennek megfelelően az erősítés (átviteli tényező)

$$0{,}5 \leq K_p \leq 33...100$$

az integrálási idő pedig

$$0.1\ \text{perc} \leq T_i \leq \infty$$

tartományban állítható be. A $T_i = \infty$ beállítás az integráló hatás kiiktatását jelenti.

A PD szabályozó

Az ideális PD szabályozó átviteli függvénye:

$$Y_{PD}(s) = K_p + K_d,$$

majd a PI-nél alkalmazott átalakítás után:

$$\mathbf{Y_{PD}(s) = 100 / X_p \,.\, (1 + T_D\, s).}$$

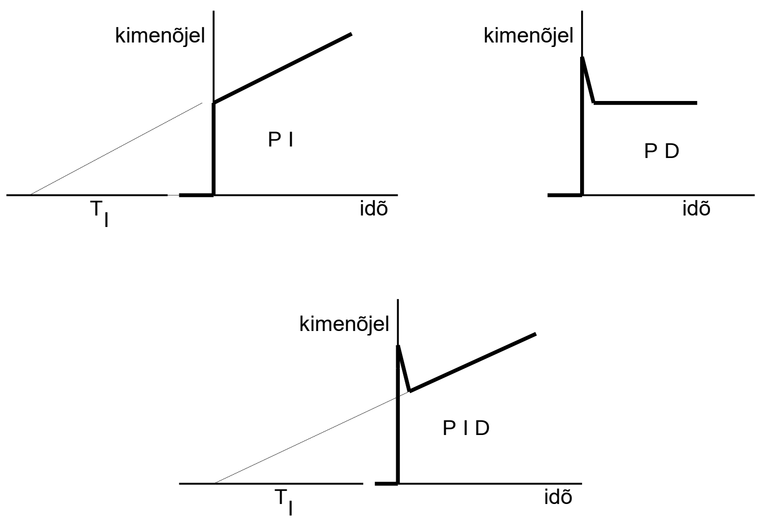
A PD kompenzáció célja olyan kezdeti, forszírozó (siettető) hatás létesítése, amely gyorsítja az eltérés megszűnését. Ezen hatás annál jelentősebb, minél nagyobb az un. *differenciálási (elébevágási) idő* (T_D).
A PD szabályozás önmagában (I hatás nélkül) villamos rendszereknél használatos. A szabályozó készülékeken a differenciálási idő 0...10 perc tartományban állítható. A D hatás $T_D = 0$ érték beállítással kiiktatható.

A PID szabályozó

Az ideális PID szabályozó átviteli függvénye (az előzőekben alkalmazott átalakításokat figyelembe véve):

$$Y_{PID}(s) = (100 / X_p) \, . \, (1 + 1 / T_I s + T_D . s)$$

A PID szabályozó feladata valamennyi eddig említett kompenzáló hatás megvalósítása. Egyesíti magában az összes szabályozó típusok előnyét. A bejövő jelváltozás hatására kezdetben a differenciáló hatás érvényesül, amelyet később (ideális esetben azonnal) a P hatásból eredő értékről induló integráló hatás vált fel. Az utóbbi hatás eredményeként a zavarásokból eredő szabályozási eltérések teljesen kiküszöbölődnek.
Az ideális viselkedés a valóságos eszközökön bizonyos mértékben torzul. A műszakilag előállítható és a kereskedelmi forgalomban kapható szabályozók két lényeges oknál fogva többé-kevésbé eltérnek az ideálistól. Az egyik ok a zérustól különböző (bár néha elhanyagolható) idő**tehetetlenség**, a másik ok a véges és szigorúan megszabott jeltartomány. Ezekhez járulnak még az olcsóbb kivitelezésből eredő rontó hatások.
A diagramok a PI, a PD és a PID szabályozók *ugrásjel* hatására adott *ideális* átmeneti függvényeit mutatják be. A táblázatban a PI, a PD és a PID szabályozók viselkedését és a Bode diagramokat mutatjuk be. A felső részben az elvi felépítéseket, az alsó részben a reális kialakításokat.



A szabályozási kör kompenzációjának kialakítása

Az előzőekben bemutatásra kerültek a különböző kompenzálási módszerek és megoldások. A következőkben ezeknek a szabályozási körhöz történő illesztését ismerjük meg.

A kompenzáló szerv erősítésének meghatározása Bode diagram segítségével.

A módszer elve:

A MATLAB vagy más számítógépes program segítségével előállítjuk a felnyitott kör Bode diagramját, majd a szükséges fázistartaléknak megfelelően a diagramból illetve annak adatsorából meghatározzuk a vágási körfrekvenciához tartozó erősítés többletet. Ezt ismerve meghatározhatjuk, hogy milyen mértékben kell csökkenteni a körerősítést.

Példa:

A szabályozási kör átviteli függvénye:

$Y(s) = 50 / (27s^3 + 27s^2 + 9s + 1)$

nu1 = [50];	az átviteli függvény számlálója
de = [27 27 9 1];	az átviteli függvény nevezője
bode(nu1,de)	Bode diagram kialakítási utasítás
hold on	ezzel az utasítással a B. diagram megőrzésre kerül
[a1, f, w] = bode(nu1,de);	a B. diagram adatai egy mátrixba kerülnek
al1 = 20*log10 (a1);	a1-ből **dB**-t számol
m1 = [al1, f, w]	az m1 mátrix kiírásra kerül

a mátrixban megkeressük a - 130 fokhoz tartozó **dB** értéket

ez a példában 25.62 -nek adódik

(20 . lg 50) - (20 . lg K) = 25.62 kiszámítja a - 130 fokhoz tartozó K-t (körerősítést)

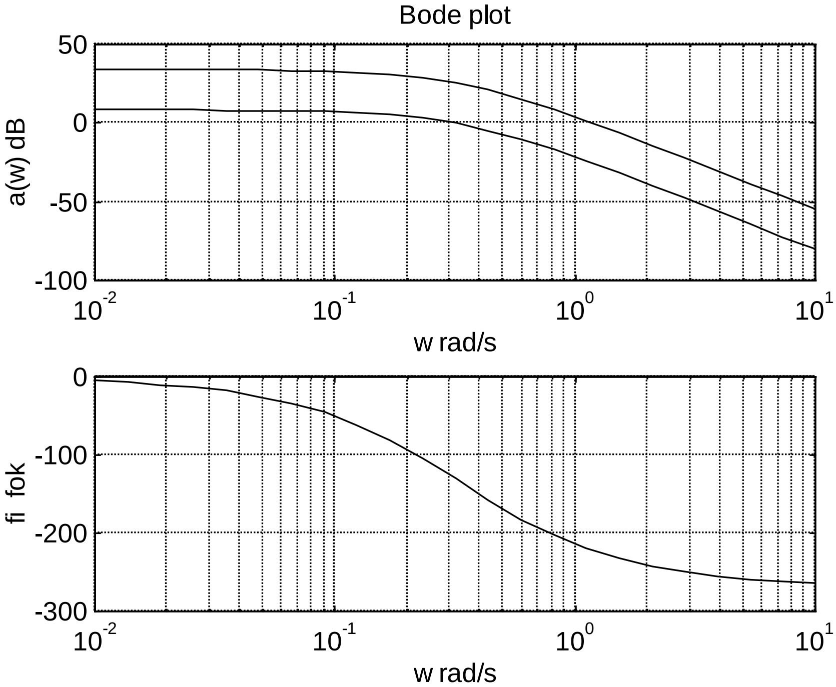
lg 50 - lg K = 25.62 / 20 = 1.28 = lg (50 / K)

(50 / K) = inv.log 1.28 = 19.07

K = 50 / 19.07 = 2.62	ennyire kell a K-t beállítani
nu2 = [2.62];	az új számláló (az új körerősítés)
bode(nu2,de)	az új B. diagram. rárajzolódik a régire

győződjön meg arról, hogy a vágási körfrekvencia (azaz az amplitúdó görbe) a 0 tengelyt a **- 130 fok** fölött metszi.

A diagram amplitúdó részében mindkét görbe együtt látható.



Új példa:

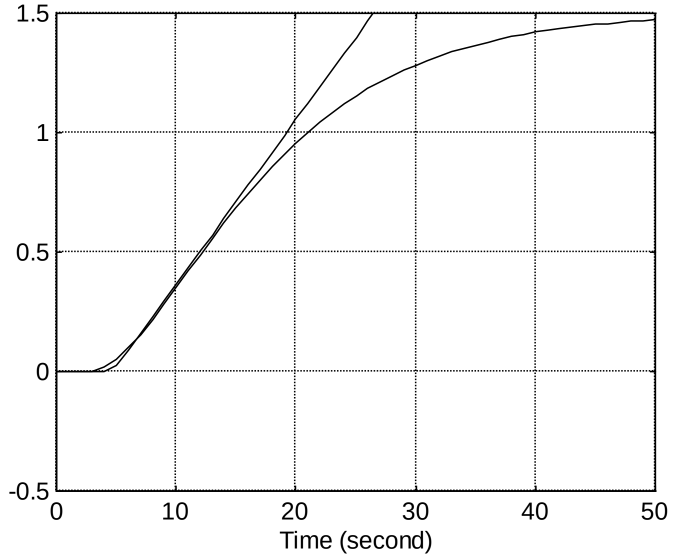
Y(s) = 65 / (192 160 24 1)

A stabil erősítés a fenti számítás elvégzése után: 4.1

A kompenzáció beállítása

A *kompenzáció jellegének* kiválasztásán túl a megfelelő szabályozási minőség a $\mathbf{K_p}$ **(** $\mathbf{X_p}$ **),** $\mathbf{T_i}$**,** $\mathbf{T_d}$ paraméterek *beállításával* érhető el. Ha ehhez nem áll rendelkezésre a felnyitott kör Bode diagramja az **átmeneti függvény** alapján végzett identifikálás nyújthat megoldást. A mérésekkel felvett átmeneti függvény alapján megállapítható, hogy a kör arányos (proporcionális, P) vagy integráló (I) tulajdonságú, tartalmaz-e holtidőt és energiatárolókat (időállandókat), található-e hozzá *egyszerű közelítő hurokátviteli függvény?*

Az ábrán egy arányos hurok átmeneti függvénye látható.



Az ábra alapján a vizsgált átviteli tag tiszta holtidős két-tárolós (P2T) tagnak vagy látszólagos holtidős egy-tárolós (P1T) arányos tagnak tekinthető. Utóbbi időállandóját az inflexiós pontba húzott érintő határozza meg (T_f - felfutási idő). A látszólagos holtidőt pedig az érintő és az időtengely metszéspontjáig értelmezzük.

Az ábrán az érintő az idő tengelyt 5 sec-nél, az állandósult értéket 26 sec-nál metszi. Ennek megfelelően T_{hl} = 5 sec, T_f = 26 – 5 = 21 sec. A tranziens itt egység bemenőjel változás hatására jött létre.

A táblázat arra az esetre adja meg a beállítási értékeket, ha az ábra szerinti átmeneti görbét T_{hl} látszólagos holtidővel és T_f felfutási idővel közelítjük.

Példa:

Egy átmeneti függvény görbéjén 2 sec T_{hl}-t és 6 sec T_f-t tudunk kiszerkeszteni. A tranziens folyamat kezdet állandósult értéke : 0 ; végső állandósult értéke : 4.5. A tranziens 1.2 (ugrásszerű) bemenőjel változás hatására jött létre.

K = 4.5 / 1.2 = 3.79, kerekítve ~3.8 T_f / T_{hl} = 6 / 2 = 3

Ha PI szabályozást akarunk megvalósítani a táblázat szerint:

Xp ≥ 100 . K. (T_{hl}/T_f) az átrendezés következtében a ≤ reláció megfordul

Xp tehát =100 . 3.8 . (1/3) = 126.6

T_i > 3.3 . T_{hl} > 3.3 . 2 = 6.6 sec.

	$\frac{100}{X_p}K \leq$	T_i	T_d
P	$\frac{T_f}{T_{hl}}$	∞	0
PI	$0.9\ \frac{T_f}{T_{hl}}$	$>3.3\ T_{hl}$	0
PD	$1.2\ \frac{T_f}{T_{hl}}$	∞	$<0.25\ T_{hl}$
PID	$1.3\ \frac{T_f}{T_{hl}}$	$>T_{hl}$	$<0.\ 5\ T_{hl}$

A *zárt szabályozási kör belengetése* is támpontot nyújthat arra vonatkozóan, hogy milyen típusú és paraméterű kompenzálást célszerű beállítani (Ziegler-Nichols-módszer). Ehhez **X_p csökkentésével** illetve **K_p növelésével** mindaddig növeljük a hurokerősítést, amíg azt tapasztaljuk, hogy a szabályozott jellemzőben a bemenőjel hatására kiváltott lengések állandósulnak. Ekkor a kompenzáló szerv erősítése a kritikus körerősítéshez tartozó **$X_{p,krit}$**-nak ill. **$K_{p,krit}$**-nak felel meg. Emellett mérések vagy regisztrátum alapján a lengések periódus idejét **T_p**-t is meg kell határozni. A táblázat a különböző típusú szabályozók beállítandó paraméterei foglalja össze.

	$K_p = \frac{100}{X_p} \leq$	T_i	T_d
P	$0.5\ .\ K_{pkr}$	∞	0
PI	$0.45\ .\ K_{pkr}$	$\geq 0.85\ .\ T_p$	0
PD	$0.6\ .\ K_{pkr}$	∞	$<0.25\ T_p$
PID	$0.6\ .\ K_{pkr}$	$\geq 0.5\ .\ T_p$	$<0.125\ .\ T_p$

Példa:

A lengés Kp = 16 értéknél következett be. A Tp értéke 1.5 sec.

PID szabályozást akarunk beállítani. A táblázat alapján

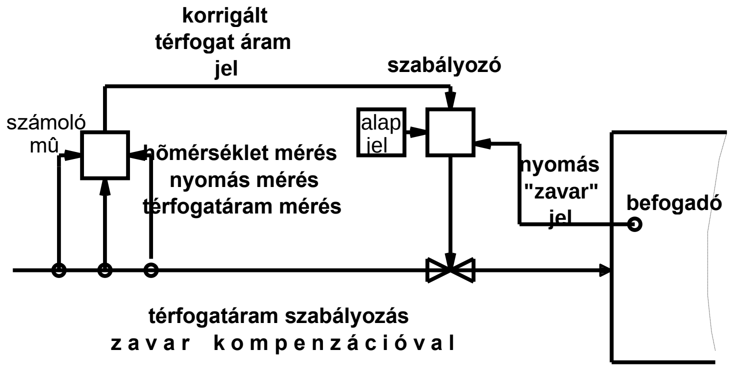
$K_p = 0.6\ .\ 16 = 9.6$ $T_i \geq 0.5\ .\ 1.5 = 0.75$ s $T_d < 0.125\ .\ 1.5 = 0.19$ s

értékekre állítandó

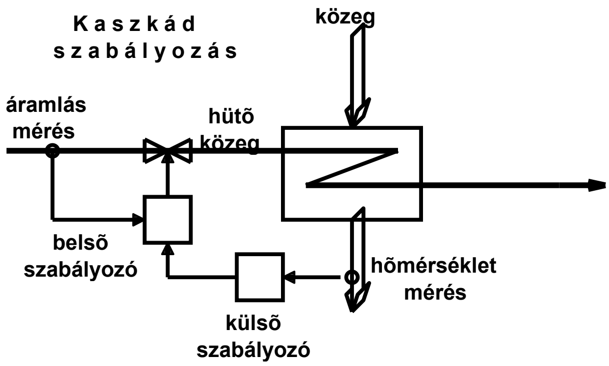
Összetett szabályozások

A szabályozási kör pontossága javítható a típusszám (0 vagy 1 típus) valamint a körerősítés növelésével ami viszont csökkenti a stabilitást és rontja a tranziens folyamat minőségét.

A **zavarkompenzáció** az egyszerű szabályozási kör és a követő vezérlés kombinációját jelenti. Az (ábra szerinti) szabályozási körben a szabályozott jellemző egy gáz (pl. levegő) térfogatárama. A befogadóban lévő nyomásváltozások (pl. a befogadóra kötött felhasználók változó elvételei) következtében a szabályozási körnek figyelnie kell ezeket a nyomásváltoztatásokat, és a térfogatáramot ennek megfelelően kell módosítani. A szabályozó tehát (látszólag) két alapjelet is figyelembe vesz.



A **kaszkád** szabályozás ábrán bemutatott elrendezése két egymásba épült szabályozási kört tartalmaz. Ilyen összetett szabályozás ott kerül alkalmazásra, ahol egy viszonylagosan lassú (nagy időállandójú) folyamatot kell szabályozni, de kialakítható egy gyors reagálású szabályozási kör is, amelyik a főfolyamat valamelyik bemenő (beavatkozó) jelét szabályozza. Az ábra szerinti rendszerben a fő cél az elfolyó közeg hőmérsékletének állandósítása. A hőcserélő nagy energiatároló, így időállandója is nagy. Ha a hűtőközeg árama nem állandó, úgy ez (is) megzavarja a hőcsere folyamatot. Ha (a gyors reagálású) belső szabályozási kör a hűtőközeg áramát állandósítja, úgy a külső kör eredményessége javul.



A kompenzáció kiválasztása Bode-diagramok segítségével

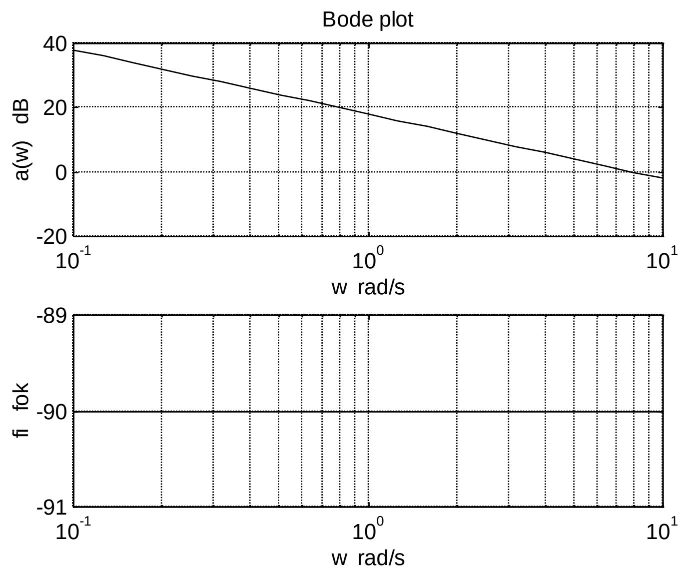
A különböző kompenzációfajták B.-diagramját egy (a xx. oldalon lévő) táblázatban lehet megtalálni. A kiindulás a meglévő kompenzálatlan szab. kör Bode-diagramja. Ennek tanulmányozása után ki kell választani a legmegfelelőbb kompenzátor struktúrát (P, PI, PID, stb.). A két diagram eredőjéből alakul ki a (most már) kompenzált kör B.-diagramja, amiből a választott kompenzáló szerven történő beállítások kikövetkeztethetők.

Első lépésként egy egyszerűbb példán mutatjuk be az eljárás lényegét.

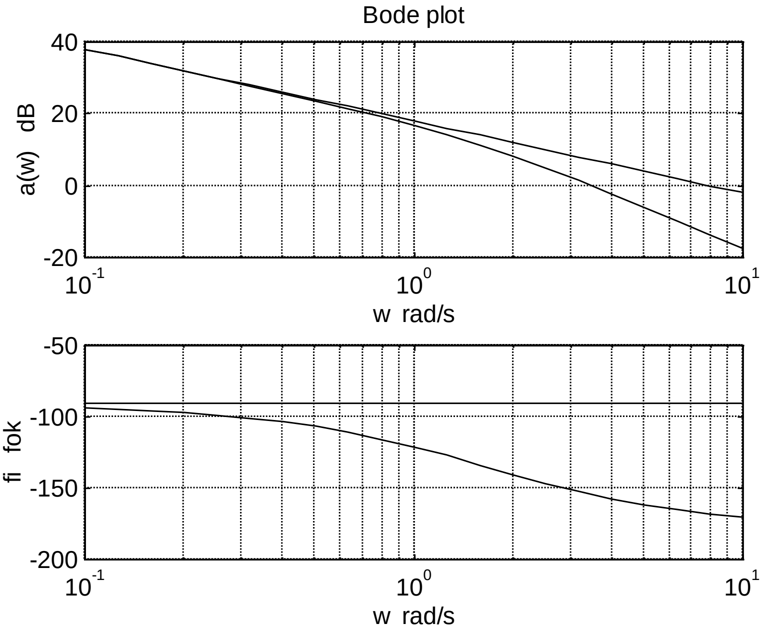
A szabályozandó szakasz átviteli függvénye a következő:

$$Y(s) = \frac{K}{s\,(Ts+1)} = \frac{8}{s\,(0.6s+1)}$$

Az átviteli tag arányos-integráló (PI1T) tulajdonságú (az integráló tulajdonságra a nevezőben lévő **s** szorzó hívja fel a figyelmet). A Bode diagram áltlános ismertetésénél elmondottak szerint az amplitúdó rész szerkesztése az integráló tulajdonság rajzolásával kezdődik. A 0 amplitúdó tengelyt egy –20 dB/dekád érintő a K értéknek megfelelő (8) ponton metszi. A fáziseltolás -90°-on állandó. Az eddigi szerkesztés eredményét az ábra mutatja:



Ezután az egytárolós P rész berajzolása következik. Az időállandó reciprokának megfelelő frekvencia érték (1 / 0.8 = 1.25) feletti metszésponttól egy –40 dB/dekád meredekségű érintőt kell szerkeszteni. A fáziseltolás ezen pont alatt a teljes fáziseltolás (- 90°-tól - 180° ig) félértéke: - 135 ° lesz. A következő ábrán a kész görbék láthatók, amelyekhez a tárgyalt érintők tartoznak.



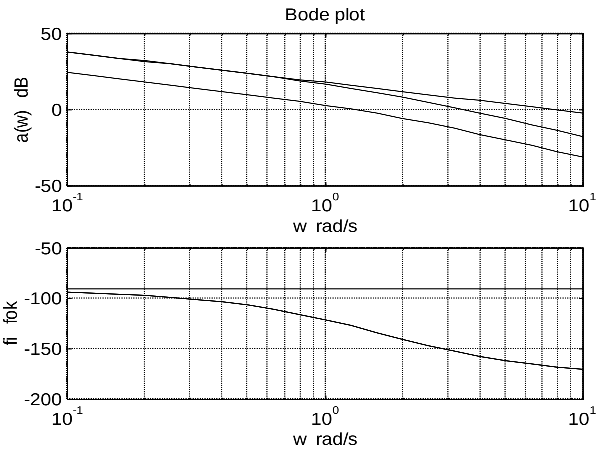
Az érintőkkel készült ábráról leolvasható, hogy a vágási körfrekvencia kb. - 160° fölött van., Ezt kevésnek ítéljük, és 45 ° fázistartalékot kívánunk biztosítani. A görbét tehát a – 135° fölé „kell lehúzni” azaz a vágási körfrekvenciának ezen pontba kell kerülni. – 135°-hoz (a szerkesztés alapján) 1.66 frekvencia érték tartozik. A számítás most már egyszerű. Keresünk egy értéket, amellyel az eredeti K=8 értéket meg kell szorozni, hogy 1.66 legyen, azaz:

$$8 \text{ x } A = 1.66 \qquad\qquad A = 0.20$$

A P kompenzálás tehát azt jelenti, hogy az erősítést K’ = 8 x 0.2 = 1.66 értékre kell módosítani. A rendszer átviteli függvénye tehát:

$$Y'(s) = \frac{K'}{s\,(Ts+1)} = \frac{1.66}{s\,(0.6s+1)}$$

A következő diagram egyesítve mutatja a már ismert és a módosított görbéket. A vágási körfrekvencia valóban – 135° fölött van. A fáziseltolás nem változott, hiszen a T időállandót nem változtattuk.



További gyakorló példák integráló tagokat is tartalmazó esetekre:

1. $Y_1(s) = \dfrac{10}{s(0.5s+1)}$ A kompenzált erősítés : $10 . 0.2 = 2$

2 $Y_2(s) = \dfrac{8}{s(0.4s+1)}$ A kompenzált erősítés : $8 \; . \; 0.312 = 2.5$

3 $Y_3(s) = \dfrac{6}{s(0.6s+1)}$ A kompenzált erősítés : $6 . 0.28 = 1.66$

A következő példa és ábra egy bonyolultabb eljárást mutat be.

Példa

Válasszunk kompenzáló szervet az

$$Y(s)=\frac{40}{(0.05s+1)(0.1s+1)(0.2s^2+s+1)}$$

hurokátviteli függvényű **0** típusú szabályozási körhöz,

$\Delta x_s(\infty) < 2.5$ % szabályozott jellemző (szabályozási) eltérés

$\sigma = 30$ % maximális túllendülés

$T_{sz} = 1.2$ s szabályozási idő

előírások betartásával.

A B.-diagramot az ábra szemlélteti.

A még szabályozó nélküli szabályozási kör Bode diagramjának szerkesztését kezdjük a nevező harmadik lengő P2T taggal, amelynek a közepes időállandójával ($T_{közepes} = \sqrt{0.2} = 0.44$, ennek reciprokja = 2.24) meghatározott sarok-körfrekvenciáig vízszintes aszimptotával (20 . log 40 = 32) , nagyobb körfrekvenciákon pedig egy - 40 dB/dekád meredekségű aszimptotával került megrajzolásra.

A nevező középső tagjához tartozó következő töréspont az 1/0.1 =10 frekvenciaérték fölött van, ahonnan -60 dB/dekád meredekségű érintő halad tovább.

Az átviteli függvény nevezőjének első tagját már nem ábrázoljuk, mert ez már kiesik a későbbi vizsgálatokból.

Meg kell szerkeszteni a fáziseltolás görbét is. Ez 0°-nál indul és elvileg - 360°-ig tart.

A diagram elkészülte után látható, hogy a vágási körfrekvencia $\omega = 10$ és 20 közé esik és itt a fáziseltolás >180 ° -nál. Már ebből is eldönthető, hogy a kompenzálatlan kör instabil.

Gyakorlásként számítsuk ki a $K_{kritikus}$ értéket a már ismertetett Routh-Hurwitz kritérium segítségével.

Az átviteli függvény nevezőjében végezzük el a szorzásokat. Eredmény

$$0.001\, s^4 + 0.035\, s^3 + 0.355\, s^2 + 1.15\, s + 1$$

(Emlékeztetünk, hogy a karakterisztikus egyenlet: $1 + Y(s) = 0$)

Y(s)-t **1** számlálóba- és nevezőbe behelyettesítve és az összeadást elvégezve:

$$0.001\, s^4 + 0.035\, s^3 + 0.355\, s^2 + 1.15\, s + (K +1) = 0$$

összefüggéshez jutunk. Az együtthatók behelyettesítésével kapott determináns:

$$\begin{vmatrix} 0.035 & 1.15 & 0 & 0 \\ 0.001 & 0.355 & K+1 & 0 \\ 0 & 0.035 & 1.15 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0.355 & K+1 \end{vmatrix}$$

A műveletek a következők

$$\begin{vmatrix} 0.035 & 1.15 & 0 & \\ 0.001 & 0.355 & K+1 & .\, (K+1) = 0 \\ 0 & 0.035 & 1.15 & \end{vmatrix}$$

(K + 1) nem lehet = 0, mert (erősítés + 1) mindig van, tehát csak a determináns lehet = 0

A kifejtési szabály szerint kifejtve és továbblépve:

$$- (K + 1)\, . \begin{vmatrix} 0.035 & 1.15 \\ 0 & 0.035 \end{vmatrix} \quad + \quad 1.15\, . \begin{vmatrix} 0.035 & 1.15 \\ 0.001 & 0.355 \end{vmatrix} = 0$$

$$-(K+1).(0.001215) + 1.15 \,.\, 0.011275 = 0$$

$$K + 1 = 10.6$$

$$K_{krit} = 9.6$$

A kiszámított $K_{kritikus}$ körerősítés jelentősen nagyobb a vizsgált átviteli függvényben szereplő K = 40 körerősítésnél ezért a rendszer önmagában instabil.

Az előirt sztatikus pontosság az adott hurokerősítéssel elérhető. (lásd A szabályozási körök tipusai c. részben közölteket). Minthogy K=40, a szabályozási eltérés várható értéke: $\Delta x_s (\infty)= 1/ (1 + 40) \,.\, x_{alapjel} = 0.0244 \,.\, x_{alapjel}$, azaz az alapjel 2.44 %-a., tehát a szabályozási eltérésben megkívánt 2.5%-nál kisebb.A σ értékhez (ebben az anyagban nem szereplő) diagram alapján k = 2.65 tartozik, amelyből az itt kívánt (betartandó) T_{sz} szabályozási időhöz **ω_c = 7** 1/s **vágási körfrekvencia** adódik. Ugyanakkor a kompenzáció akkor megfelelő, ha a vágási körfrekvencia környezetében az amplitúdó görbéhez húzott érintő meredeksége 20dB/dekád.

Mefigyelhető, hogy a szerkesztés alatt álló (új) eredő amplitúdó görbén a most megállapított vágási körfrekvencia környezetében ez a szakasz már így van felvéve.

ez az ábra hiányzik; megtalálható az Automatika mérnököknek c. könyvben 399. oldal

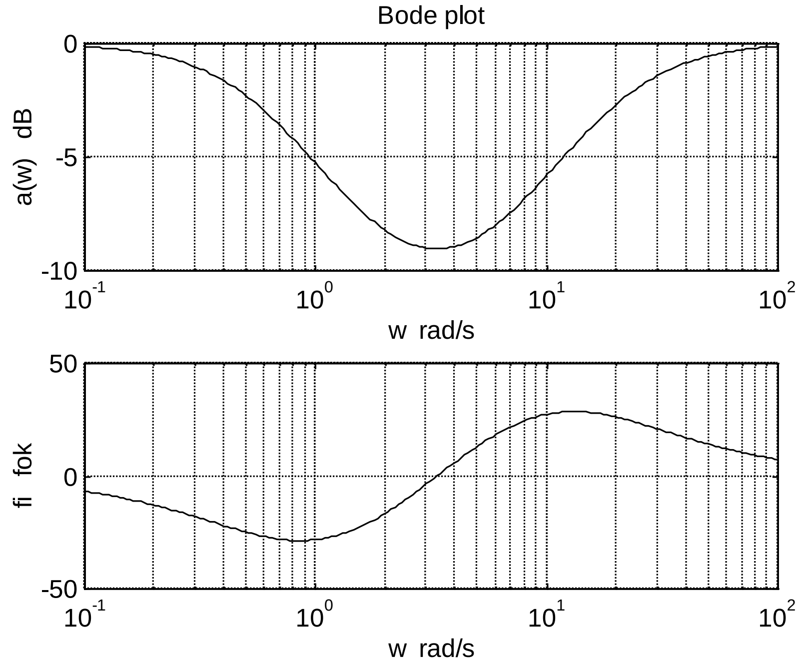
A következő lépés a kompenzáló szerv tulajdonságának eldöntése. Itt PID szabályozót választunk. Ennek Bode diagramja (a xx. oldalon lévő táblázatból kiindulva) a most tárgyalt Bode diagramra ($\mathbf{a_c^*(\omega)}$ jelöléssel) szaggatottan van berajzolva. Kezdetként az eredeti amplitúdó görbét úgy kell kompenzálni, hogy az (előbb már kiszámolt) vágási körfrekvencia környezetében már az eredő görbeszakasz alakuljon ki. Itt egy jobb felé emelkedő szakaszt, azaz egy differenciáló tulajdonságú szakaszt kell választani. (emlékeztetőként: a differenciáló szakasz érintőjének meredeksége +20dB/dekád) Az $\omega = 7$ érték fölé eső amplitúdó szakasz nagyságát (méretét) a 0 tengely alá másoljuk, és ezen a ponton át egy +20 dB/dekád egyenest húzunk. Ez a 0 tengelyt $\omega = 20$-nál metszi és így ez lesz az $\mathbf{1/T_2 = 0.05}$ értékű egyik időállandó.Egy másik nevezetes pont az eredő amplitúdó görbe $\omega = 2.24$ (T= 0.45) fölé eső része. (A diagramon itt van az eredeti átviteli függvény nevezőjében szereplő harmadik – P2T – tagból származó érintők metszéspontja.) Idáig fog tartani az integráló szakasz, amely - 20 dB/dekád meredekségű és a tengelyt az

$$\mathbf{1/T_1 = 0.56}\ \omega\text{-nál} \qquad (T_1 = 1.79)$$

metszi.Az utolsó szakasz az $1/T_i = 2.24$-től húzott vízszintes rész, ami az $\mathbf{1/T_d = 5}$ (azaz $T_d = 0.2$) értéket eredményezi. A kompenzált görbe az $\mathbf{a_k^*(\omega)}$ jelöléssel van ellátva. A diagramból eredő töréspontok ($1/T_i$, $1/T_1$, $1/T_2$, $1/T_d$) frekvenciái alapján a kompenzáló tag átviteli függvénye:

$$Y_c(s) = .\frac{(1+0.45s)(1+0.2s)}{(1+1.79s)(1+0.05s)}$$

A kompenzáló tag Bode diagramja:



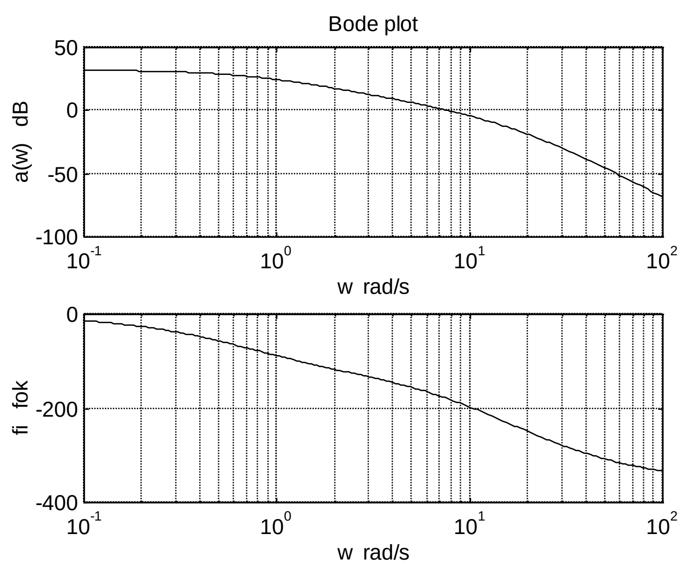
Ne tévessze meg az a látszólagos ellenmondás ami a szerkesztés menetét mutató ábrán bejelölt PID kompenzátor „sarkos” és szaggatott vonallal jelölt menete és a Y(s) átviteli függvény most bemutatott alakja között van. A szerkesztési ábrán a görbéhez tartozó érintőket ábrázoljuk, míg itt a görbe tényleges lefutása látható.

A kompenzált kör Bode diagramja is megszerkeszthető. A két átviteli függvény, a z eredeti kör és a kompenzáló PID tag átviteli függvénye két függvény szorzata:

$Y_c(s)*\ Y(s) =$

$= 3.6s^2 + 26s + 40\ /(\ 0.0009s^6 + 0.005s^5\ 3\ 0.096s^4 + 0.78^3 + 2.55s^2 + 2.99s\ !\ 1$

Ennek a függvénynek a Bode diagramja:



A szerkesztést bemutató ábrán a PID kompenzáló fáziseltolást a **φ_k (ω)** görbe mutatja. A két fázisgörbéből a **φ_c (ω)** eredő fáziseltolás megszerkeszthető. Az ábrából az is kiolvasható, hogy az amplitudó-tartalék **a_{tk*}**= 8 dB, és a fázis-tarrtalék **$\varphi_{tk(\omega)}$** = 40°, ami elegendő stabilitási tartalékot jelent.

A mintavételes rendszerek

A mintavételes rendszerek jelentősége a digitális eszközök irányitástechnikai elterjedése indokolja. A hatáslánc folyamatos és folytonos jelein kivül ezekben a rendszerekben számolnunk kell olyan jelekkel is, amelyek értéke csak meghatározott mintavételi időpontokban áll rendelkezésre.

A mintavételes rendszerekben a szabályozó (kompenzáló) egység szerepét gyakran egy nagyobb teljesitményű számitógép veszi át. Ennek bemenő jelei a z érzékelőktől származnak, kimenő jelei pedig a beavatkozó szervekhez irányulnak. Könnyen belátható, hogy az ilyen sokbemenetű/sokkimenetű rendszer egyidőben nem "foglalkozhat" minden be/ki jellel. Fontos szerepet kap az un. **mintavételi idő**, amely azt jelenti, hogy a számitógép ciklikusan foglalkozik egy-egy szabályozási körrel, és mindig csak azzal, amelyikkel éppen kapcsolatban van. A mintavételi idő az a rövid (a mésodperc tört részét jelentő) időszak, amely alatt a szám.gép egy-egy körrel van kapcsolatban. Ezalatt történik a bejövő jel feldolgozása és az utasitás kiadása. A kiadott jelet az ugynevezett **tartószerv** rögziti és állandósitja a következő mintavételig. A folyamat és a tarószerv viselkedésének lényegét az ábra mutatja be.

A mintavételes müködésű szabályozást és az átviteli tagok viselkedését a Laplace transzformációhoz hasonló elv az ugynevezett **z-transzformáció** segitségével lehet matematikai úton megközelitani.