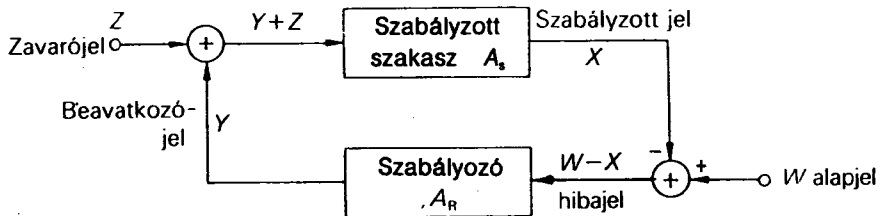


26. Elektronikus szabályozókörök

26.1. Alapok

A szabályozók feladata az, hogy egy meghatározott fizikai mennyiséget (X szabályozott mennyiséget) megadott értékre (W alapjelre) állítson be és ott tartsa. Ehhez a szabályozónak megfelelő módon ki kell küszöbölnie a zavarok hatását [26.1], [26.2].

A 26.1. ábra egyszerű szabályozókör elvi elrendezését szemlélteti. A szabályozó úgy vezérli az Y beavatkozó jellel az X szabályozott jelet, hogy a $W - X$ különbség (hibajel) lehetőleg kicsi legyen. A szabályozott szakaszra jutó zavarokat formálisan a Z zavarójellel helyettesítjük, amelyik a beavatkozójelhez adódik. A továbbiakban abból indulunk ki, hogy a beavatkozójelet elektromos feszültség képviseli, és így az átviteli szakaszt elektromosan vezéreljük. Ekkor elektronikus szabályozót alkalmazhatunk.



26.1. ábra. Szabályozókör blokkélmája

Egy ilyen szabályozó a legegyszerűbb esetben egy erősítő, amelyik a $W - X$ hibajelet erősíti. Ha az X szabályozott jel a W alapjel fölé nő, akkor $W - X$ negatív. Emiatt az Y beavatkozójel csökken. Ez a csökkenés a szabályozott jel növekedése ellen hat, tehát negatív visszacsatolás lép fel. Állandósult állapotban a megmaradó hiba annál kisebb, minél nagyobb a szabályozó A_R erősítése. A 26.1. ábra szerint lineáris rendszereknél:

$$Y = A_R (W - X) \quad \text{és} \quad X = A_S (Y + Z). \quad (26.1)$$

Ebből az X szabályozott jel:

$$X = \frac{A_R A_S}{1 + A_R A_S} W + \frac{A_S}{1 + A_R A_S} Z. \quad (26.2)$$

Látható, hogy a $\partial X/\partial W$ szabályozási jellemző annál jobban megközelíti 1-et, minél nagyobb a

$$H = A_R A_S = \frac{\partial X}{\partial(W-X)} \quad (26.3)$$

hurokerősítés. A $\partial X/\partial Z$ zavarelnyomás annál közelebb lesz 0-hoz, minél nagyobb a hibajelerősítő A_R erősítése.

Fellép azonban az a nehézség, hogy a H hurokerősítés nem lehet tetszés szerinti nagyságú, mert az elkerülhetetlen fázistolások a szabályozó kör begerjedéséhez vezethetnek. Ezt a tényt már megismertük a műveleti erősítők frekvenciakompensálásánál. A szabályozástechnika feladata tehát az, hogy ezen korlátozás figyelembevételével is minél kisebb hibajelet, és jó tranziens viselkedést érjen el. E célból csatlakoztassunk egy integrátort a lineáris erősítőhöz, esetleg még egy differenciáló áramkört is, és így P arányos szabályozó helyett PI , ill. PID szabályozót kapunk. A következők során ilyen szabályozók elektronikus megvalósítását tárgyaljuk.

26.2. Szabályozó típusok

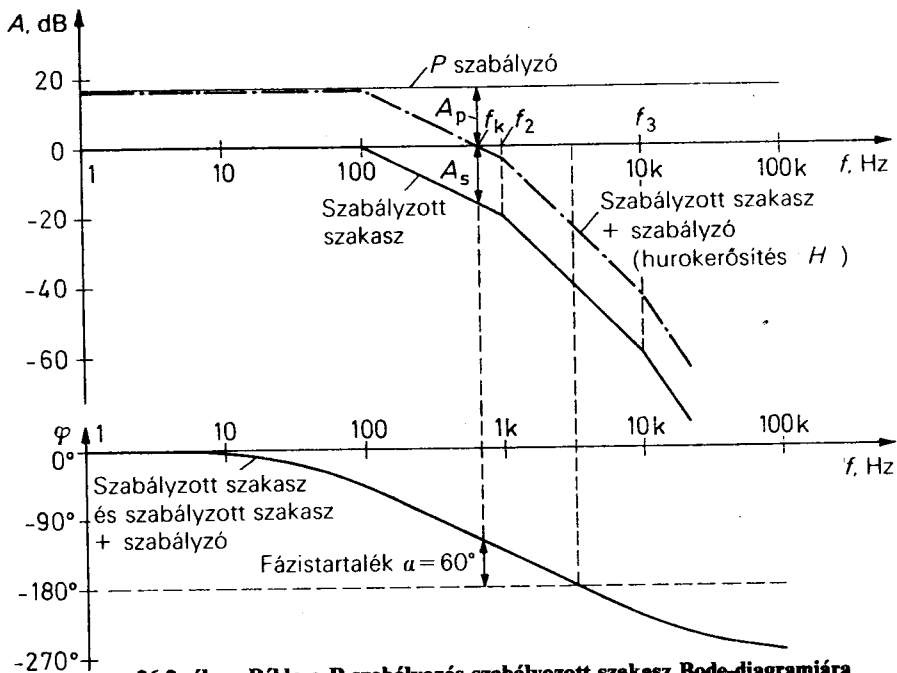
26.2.1. P szabályozó

A P (arányos) szabályozó olyan lineáris erősítő, amelynek fázistolása elhanyagolhatóan kicsi abban a frekvenciatartományban, ahol a szabályozó kör H hurokerősítése 1-nél nagyobb. Egy ilyen P szabályozó lehet az ohmosan visszacsatolt műveleti erősítő.

A lehetséges legnagyobb arányos A_p erősítés meghatározásához tekintsük a szabályozott szakasz jellegzetes Bode-diagramját. Ezt a 26.2. ábrán tüntettük fel. $f=3,3$ kHz frekvencián a fázistolás 180° . Az eredetileg negatív visszacsatolás tehát ezen a frekvencián pozitív visszacsatolássá válik. Vagy másképpen kifejezve: az oszcillátorok berezgésének fázisfeltétele teljesül, l. (18.3) egyenlet. Hogy egyidejűleg teljesül-e a (18.2) egyenlet szerinti amplitúdófeltétel is, az az A_p lineáris erősítés értékétől függ. Példánkban a 26.2. ábrán a szabályozott szakasz $|A_s|$ erősítése 3,3 kHz-en kb. $0,01 \triangleq -40$ dB. Ha $A_p=100$ -at $\triangleq +40$ dB-t választanánk, akkor a $|H| = |A_s| \cdot A_p$ hurokerősítés ezen a frekvencián 1 lenne, azaz az oszcilláció amplitúdófeltétele ugyancsak teljesülne, és $f=3,3$ kHz-es rezgés keletkezne. Ha $A_p > 100$ -at választunk, akkor exponenciálisan növekedő amplitúdójú rezgés keletkezik. $A_p < 100$ -nál csillapított rezgést kapunk.

Az a kérdés, hogy A_p -t mennyire kell csökkenteni, hogy optimális tranziens viselkedést kapjunk. A tranziensek csillapodásának mértékét hozzávetőlegesen megbecsülhetjük közvetlenül a Bode-diagramból is az α fázistartalék alapján. Ez az α fázistartalék, ami az f_k kritikus frekvencián még hiányzik a 180° eléréséhez. A kritikus frekvencia az, amelyen $|H|=1$, vagyis egységnyi a hurokerősítés abszolút értéke. Ennek figyelembevételével a fázistartalék:

$$\alpha = 180^\circ - |\varphi_g(f_k)| = 180^\circ - |\varphi_s(f_k) + \varphi_R(f_k)| \quad (26.4)$$



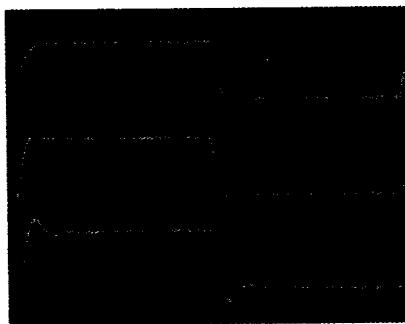
26.2. ábra. Példa a P szabályozós szabályozott szakasz Bode-diagramjára

P szabályozónál $\varphi_R(f_k) = 0$ és

$$\alpha = 180^\circ - |\varphi_s(f_k)| \quad (26.5)$$

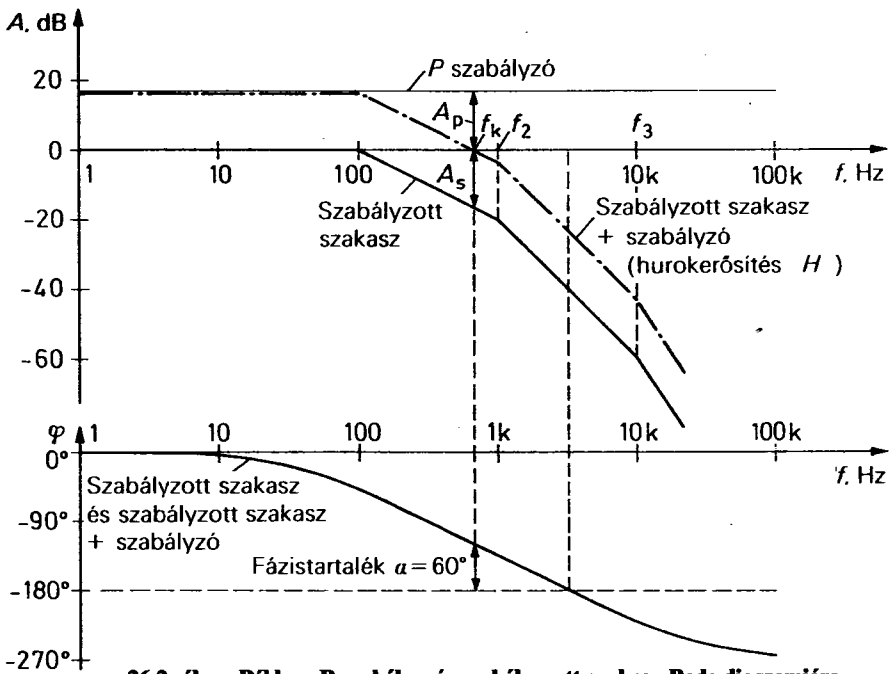
értéket kapjuk. $\alpha = 0$ fázistartaléknál csillapítatlan rezgést kapunk, mert itt a berezésnek mind az amplitúdó-, mind a fázisfeltétele teljesül. $\alpha = 90^\circ$ az aperiodikus határ. $\alpha \approx 60^\circ$ -nál a zárt hurok egységugrásra adott válaszában kb. 4 % túllövés lép fel. Az állandósult állapot minimális idő alatt beáll. Ezért ez a fázistartalék a legtöbb esetben optimális. A 26.3. ábra a különféle tranziens időfüggvényeket hasonlítja össze.

Az optimális erősítés meghatározásához keressük meg a Bode-diagramban azt a frekvenciát, amelyen a szabályozott szakasz fázisforgatása 120° . A 26.2. ábrán



26.3. ábra. Ugrás gerjesztésre adott válaszfüggvény a fázistartalék függvényében állandó f_k kritikus frekvencia mellett

Fentről lefelé: $\alpha = 90^\circ$; $\alpha = 65^\circ$; $\alpha = 45^\circ$



26.2. ábra. Példa a P szabályozás szabályzott szakasz Bode-diagramjára

P szabályozónál $\varphi_R(f_k) = 0$ és

$$\alpha = 180^\circ - |\varphi_s(f_k)| \quad (26.5)$$

értéket kapjuk. $\alpha = 0$ fázistartaléknál csillapítatlan rezgést kapunk, mert itt a berezgésnek mind az amplitúdó-, mind a fázisfeltétele teljesül. $\alpha = 90^\circ$ az aperiodikus határ. $\alpha \approx 60^\circ$ -nál a zárt hurok egységugrásra adott válaszában kb. 4 % túllövés lép fel. Az állandósult állapot minimális idő alatt beáll. Ezért ez a fázistartalék a legtöbb esetben optimális. A 26.3. ábra a különféle tranziens időfüggvényeket hasonlítja össze.

Az optimális erősítés meghatározásához keressük meg a Bode-diagramban azt a frekvenciát, amelyen a szabályzott szakasz fázisforgatása 120° . A 26.2. ábrán



26.3. ábra. Ugrás gerjesztésre adott válaszfüggvény a fázistartalék függvényében
 állandó f_k kritikus frekvencia mellett
 Fentről lefelé: $\alpha = 90^\circ$; $\alpha = 65^\circ$; $\alpha = 45^\circ$

látható példában ez a frekvencia 700 Hz. Ez a frekvencia akkor lesz a kritikus frekvencia, ha gondoskodunk arról, hogy itt $|H|$ egységnyi legyen. A (26.3) egyenletből

$$A_p = \frac{1}{A_s} = \frac{1}{0,14} = 7,$$

ill.

$$A_p^* = -A_s^* = -(-17 \text{ dB}) = 17 \text{ dB}.$$

Ezt az esetet jelöltük a 26.2. ábrán. A hurokerősítés kisfrekvenciás határértéke eszerint

$$H = A_s A_p = 1 \cdot 7 = 7.$$

Ha a szabályozó erősítését megnöveljük, hogy kisebb sztatikus hibát kapjunk, akkor rosszabb lesz a beállási tranziens. Tetszőlegesen nagy, arányos erősítés csak olyan szabályozott szakaszoknál állítható be, amelyek elsőrendű aluláteresztő szűrőként viselkednek, mert ezeknél a fázistartalék minden frekvencián nagyobb, mint 90° .

26.2.2. PI szabályozó

Az előző pontban láttuk, hogy egy arányos szabályozó erősítését stabilitási okokból rendszerint nem lehet tetszőlegesen növelni. A beállási pontosság javítására egy módszer látható a 26.4. ábrán, melynél növeltük a kisfrekvenciás hurokerősítést. Látható, hogy a hurokerősítés frekvenciamenete ebben az esetben az f_k kritikus frekvencia környezetében nem változik meg. A tranziens viselkedés ezért ugyancsak változatlan marad. A statikus hiba azonban most 0, mert

$$\lim_{f \rightarrow 0} |H| = \infty.$$

Az ilyen frekvenciamenet megvalósítására kapcsoljunk párhuzamosan a P szabályozóval egy integrátort (26.5. ábra). Az így kapott PI szabályozó Bode-diagramját a 26.6. ábra szemlélteti. Látható, hogy a PI szabályozó kisfrekvencián integrátorként, nagyfrekvencián arányos erősítőként működik. Az átmenetet a PI szabályozó f_i határfrekvenciájával jellemezhetjük. Ezen a frekvencián a fázistolás -45° és az $|A_R|$ eredő szabályzó erősítése 3 dB-lel nagyobb A_p -nál.

Az f_i határfrekvencia számításához írjuk fel a 26.5. ábra alapján a komplex szabályozóerősítést:

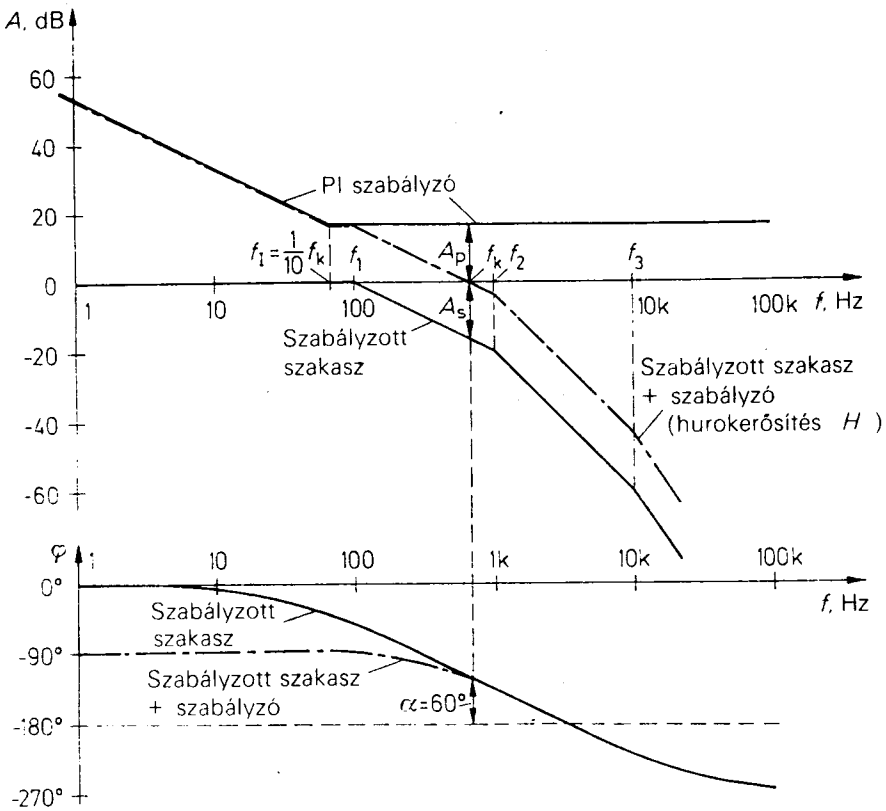
$$A_R = A_p + \frac{1}{j\omega\tau_i} = A_p \left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_i A_p} \right).$$

Ebből

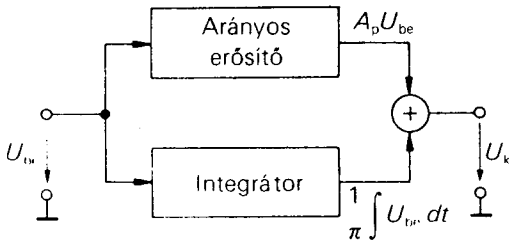
$$A_R = A_p \left(1 + \frac{\omega_1}{j\omega} \right),$$

ahol

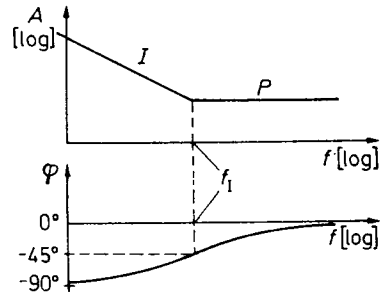
$$\omega_1 = 2\pi f_i = \frac{1}{\tau_i A_p}. \quad (26.6)$$



26.4. ábra. Példa egy szabályzott szakasz Bode-diagramjára PI szabályozóval



26.5. ábra. PI szabályzó blokk-sémája

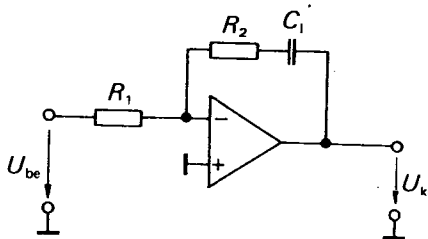


26.6. ábra. PI szabályzó Bode-diagramja

Egy PI szabályzó realizálható egyetlen műveleti erősítővel is. A kapcsolást a 26.7. ábra szemlélteti. Komplex erősítése:

$$A_R = - \frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C_1}}{R_1} = - \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_2} \right). \quad (26.7)$$

Együttható-összehasonlítással a (26.6) egyenlettel a szabályzó jellemzőire az



26.7. ábra. PI szabályozó

$$A_p = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{és} \quad f_1 = \frac{1}{2\pi C_1 R_2} \quad (26.8)$$

értékeket kapjuk.

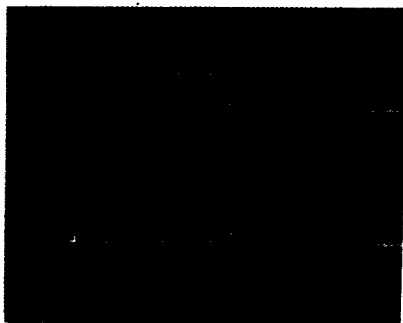
A PI szabályozó méretezése egyszerű, ha figyelembe vesszük, hogy az I rész nem változtatja meg a fázistartalékot. Tehát csak a P részt kell méretezni. Példánkban tehát $f_k = 700$ Hz és $A_p = 7$.

Az f_1 törésponti frekvenciát kicsire kell választani f_k -hoz képest ahhoz, hogy a fázistartalékot f_k -nál ne csökkentse. Másrészt azonban nem érdemes szükségtelesen kicsire sem beállítani, mert akkor sokáig tart, amíg az integrátor a hibajelet 0-ra szabályozza. f_1 felső határa kb. $0,1 f_k$ -nál van. Ekkor az I rész a fázistartalékot 6° -nál kevesebbel csökkenti. Ezt a frekvenciát a 26.4. ábrán feltüntettük. A tranziens alatti hibajelviszonyokat mutatja a 26.8. ábrán látható oszcilloszkópfelvétel. Látható az alsó görbe mentén, hogy a PI szabályozó ennél az optimális méretezésnél ugyanannyi idő alatt állítja be 0-ra a hibajelet, mint amennyi idő alatt a P szabályozó

$$\frac{1}{1+H} = \frac{1}{8} = 12,5 \%$$

eltérésre szabályoz.

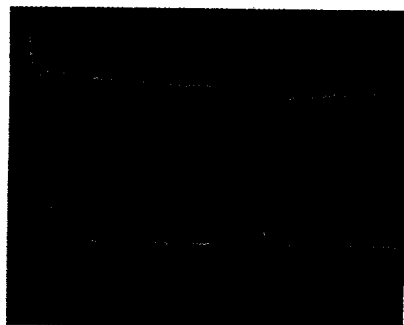
Nem egészen optimális φ_1 frekvenciabeállítást mutat a 26.9. ábrán látható felvétel. A felső görbénél f_1 -et túl kicsire választottuk. A beállási idő meghosszabbodik. Az alsó görbénél f_1 -et túl nagyra választottuk, a fázistartalék csökken.



26.8. ábra. Hibajel

Fent: P szabályozó;

Lent: PI szabályozó f_1 optimális beállításánál



26.9. ábra. PI szabályozó hibajele

Fent: f_1 túl kicsi;

Lent: f_1 túl nagy