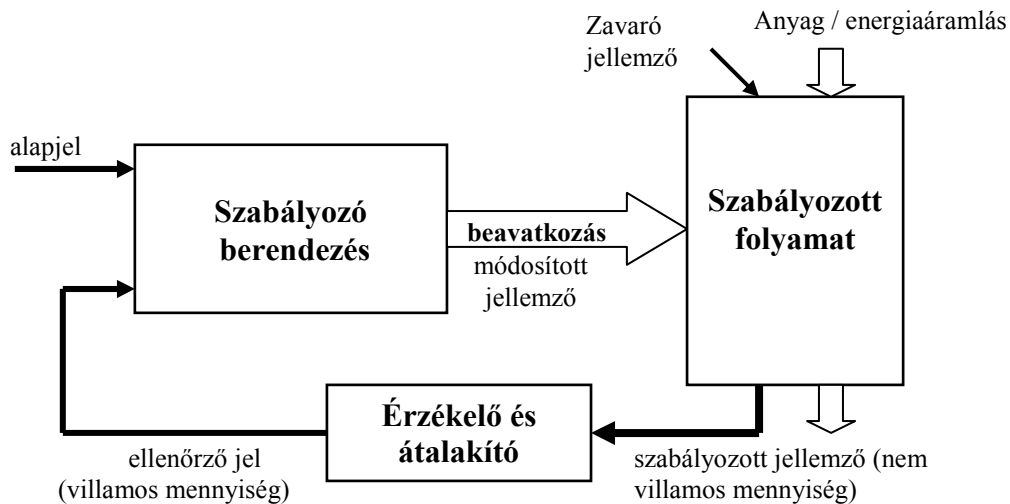


SZABÁLYOZÁSTECHNIKA

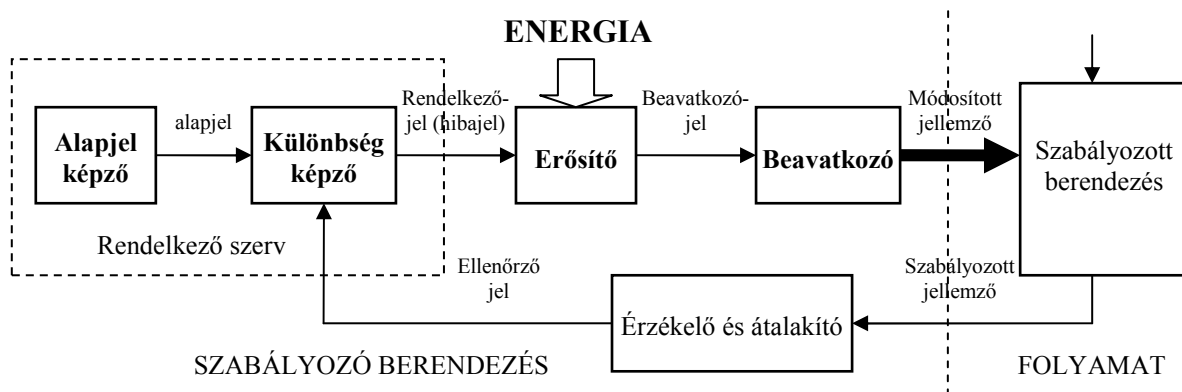
- Szabályozás: - az irányításnak az a formája, amikor folyamatosan vagy időközönként, de legalább egyszer visszajelzést kapunk a folyamat állapotáról.
- A szabályozást zárt hatáslánc jellemzi.
- Zárt hatásláncban: - a hurok bármely jelének megváltozása ugyanarra a jelre visszahat.



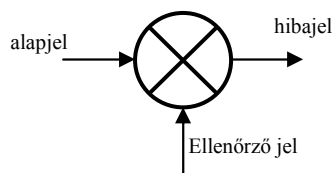
- Működési elve a negatív visszacsatoláson alapszik.
- Jellemzője: - minél erősebb a visszacsatolás, annál stabilabb a működés.
 - a folyamatra történő hatásgyakorlás előjele bármikor megváltozhat annak érdekében, hogy az alapjelnek megfelelő szinten tartsa a folyamatot.

A szabályozási kör részei

- Akárcsak a vezérlésnél, a szabályozásnál is a különböző részfeladatokat ellátó elemeket és elemcsoportokat **szerveknek** nevezzük.
- A vezérléshez képest leginkább a rendelkező szerv módosul.



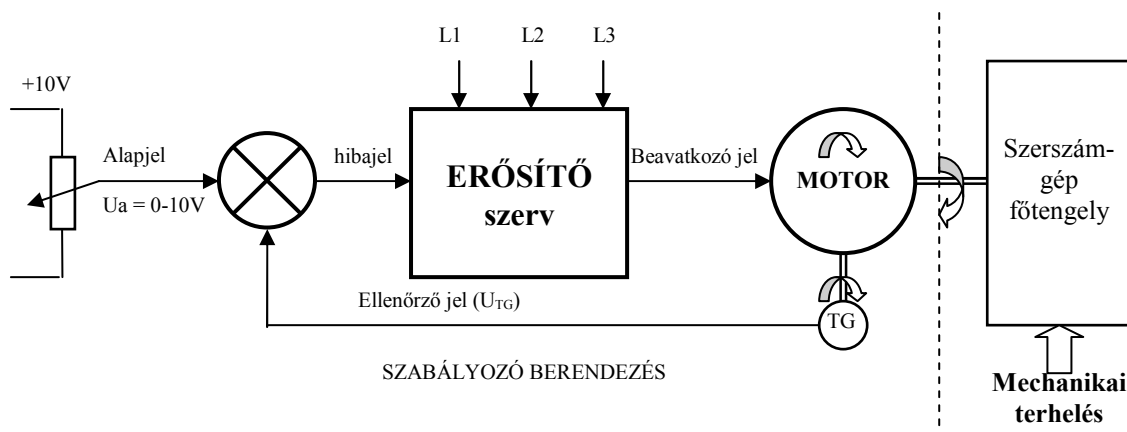
- a különbségképző szerv gyakori jelölési módja:



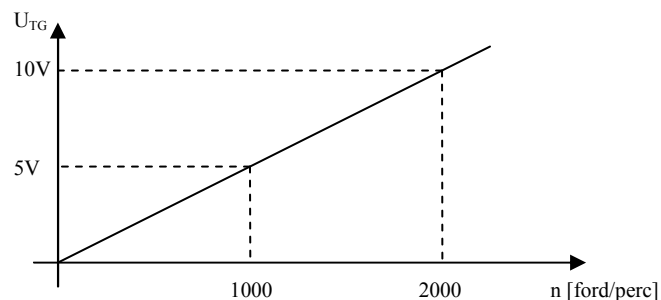
Új fogalmak

- alapjel: - a szabályozott jellemző értékét meghatározó és képviselő jel. Villamos szabályozásnál rendszerint egyenfeszültség vagy áram. ($0 \pm 10 \text{ V}$; $4 - 20 \text{ mA}$) Pneumatikus szabályozásnál $0,2 - 1 \text{ bar}$. Értékét rendszerint előre megadjuk.
- Két formája van:
 - o Beállítójel, amikor az alapérték üzemszerűen állandó, a szabályozás pedig értéktartó.
 - o Vezetőjel, értéke változtatható a kívánt szabályozási hatásnak megfelelően.
- Alapjelképző szerv: feladata az alapjel előállítása.
 - o klasszikus szabályozónál: - fesz. stabilizátor, csavar, rugó, stb. -> beállítójel
 - o termosztát, potenciométer, ikerfém; -> vezetőjel
 - o korszerű szabályozónál: mikroprocesszor, mikrokontroller, folyamatirányító számítógép
- Ellenőrző jel: az érzékelő és átalakító szerv kimenő jele, amely a szabályozott jellemzővel arányos villamos mennyiség.
- Különbségképző szerv: feladata az alapjel és az ellenőrző jel összehasonlítása és a különbséggel arányos és megfelelő előjelű rendelkező jel előállítása. Ezt nevezzük *hibajelnek*. Egyszerű villamos szabályozókban Wheatstone hiddal műveleti erősítővel vagy komparátorral megvalósítható. Nem villamos szabályozóknál: kétkarú emelő, membrán, differenciálmű végzi ezt a feladatot.

PÉLDA: villamos motor fordulatszám szabályozása



- TG – tachogenerátor: - egyenáramú generátor; kimeneti feszültsége arányos a fordulatszámmal.



- a tachogenerátor névleges feszültségértéke a gyártó által megadott érték;
-
- Pl. $n = 1000 \text{ ford/min}$; $U_{TG} = 5 \text{ V}$

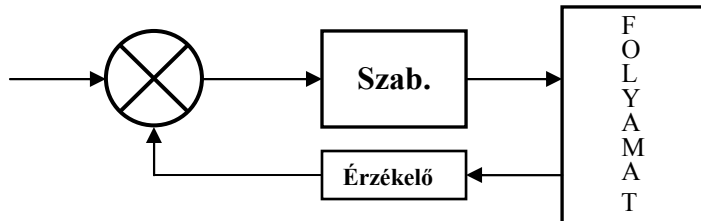
Működés:

1. Feltételezzük, hogy azt akarjuk, hogy a főtengely *500 ford/perc* állandó fordulatszámon működjön. Ennek megfelelően választjuk az alapjelet: $U_a = 2,5 \text{ V}$. A hibajel kezdetben: $\varepsilon = U_a - U_{TG} > 0$, azt eredményezi, hogy az erősítő növeli a beavatkozó jelet. $\rightarrow U_{TG}$ növekszik.
2. Egy adott pillanatban: $U_{TG} > 2,5 \text{ V}$; $\rightarrow \varepsilon = U_a - U_{TG} < 0$; $\rightarrow$ az erősítő csökkenti a beavatkozó jelet, amíg az egyensúlyi helyzet be nem áll: $\varepsilon = 0$.
3. Feltételezzük, hogy növekszik a mechanikai terhelés a motor tengelyén; $\rightarrow U_{TG}$ csökken; $\rightarrow \varepsilon = U_a - U_{TG} > 0$; $\rightarrow$ a beavatkozó növeli a fordulatszámot, míg újra el nem éri a beállított értéket.
4. Ha csökken a terhelés: $\rightarrow U_{TG}$ nő; $\rightarrow \varepsilon = U_a - U_{TG} < 0$; a beavatkozó csökkenti a fordulatszámot.
5. Ha növelni akarjuk a fordulatszámot, növeljük az alapjelet; U_a növekszik; $\rightarrow \varepsilon = U_a - U_{TG} > 0$; az erősítő növeli a beavatkozó jelet, ameddig a kíván fordulatszám be nem áll. ($\varepsilon = 0$).
6. Ha csökkenteni akarjuk a fordulatszámot, csökkentjük az alapjelet; U_a csökken; $\rightarrow \varepsilon = U_a - U_{TG} < 0$; az erősítő csökkenti a beavatkozó jelet, ameddig a kíván fordulatszámot el nem éri. ($\varepsilon = 0$).

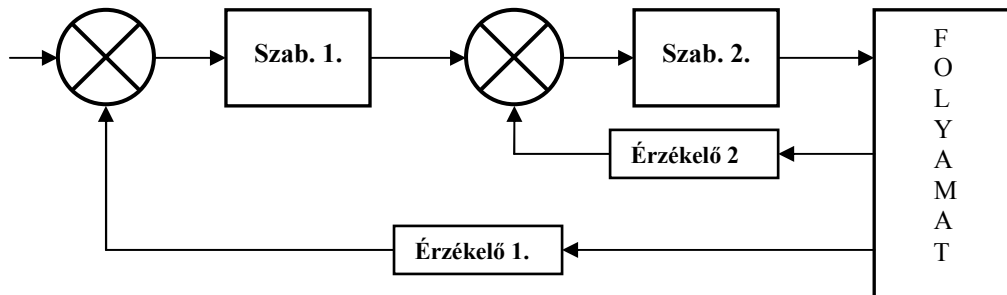
A szabályozások osztályozása

1. a rendelkezés létrejötte alapján:
 - a. kézi
 - b. önműködő
 - c. villamos
 - d. pneumatikus
 - e. segédenergia nélküli
2. az alapjel időbeli lefolyása szerint:
 - a. értéktartó: - alapjele állandó. Feladata, hogy a zavaró hatások ellenére az előírt alapjelnek megfelelő szinten tartsa a szabályozott jellemzőt.
 - b. Követő szabályozás: - az alapjel időben változik. Feladata: az alapjelnek megfelelően változtassa a szabályozott jellemzőt is.
 - c. Arányszabályozások: - két vagy több jellemző arányát tartja állandó értéken, amikor az egyik véletlenszerűen változik. Pl. a gépjármű üzemanyag és levegő keverékének arányát szabályozó berendezés. Szervoszabályozók.
 - d. Menetrendi szabályozás: - az alapjel az idő függvényében előre meghatározott módon változik. Pl. a hőkezelő kemence hőfokszabályozása.
3. a hatáslánc jeleinek folytonossága szerint:
 - a. folytonos: - analóg jelű szabályozók. Pl. fordulatszám szabályozás.
 - b. Nem folytonos: - ha a hatáslánc valamely pontján diszkrét (nem folytonos) jel jelenik meg. Pl. termosztátos hőmérsékletszabályozó. Kétállású szabályozó.
 - c. Digitális szabályozó: - a korszerű szabályozástechnika alapját képezi. A/D, D/A átalakítók segítségével valósítják meg a kapcsolatot az analóg jellemzőkkel. Mikroprocesszoros, mikrokontrolleres szabályozók. Programozott módon működnek.
4. a szabályozás folyamatossága szerint:
 - a. folyamatos működésű: - a hatáslánc tartósan zárt. Pl. fordulatszám szabályozás

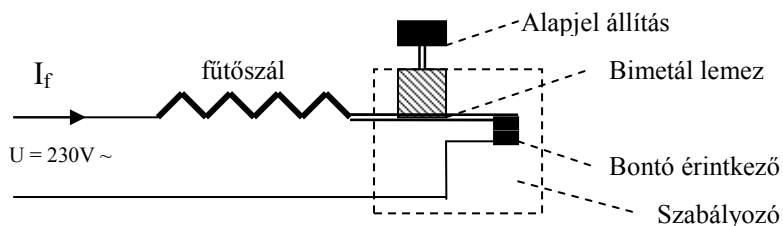
- b. időszakos működésű: a hatáslánc csak időnként, rendszerint periodikusan záródik. Mintavételes szabályozás; a digitális szabályozás alapja. Egy azon intelligens szabályozó, több folyamatot is tud irányítani.
5. a rendszer szerkezete alapján:
- a. egyhurkos: - egyetlen szabályozott jellemző és egyetlen beavatkozó jel van.



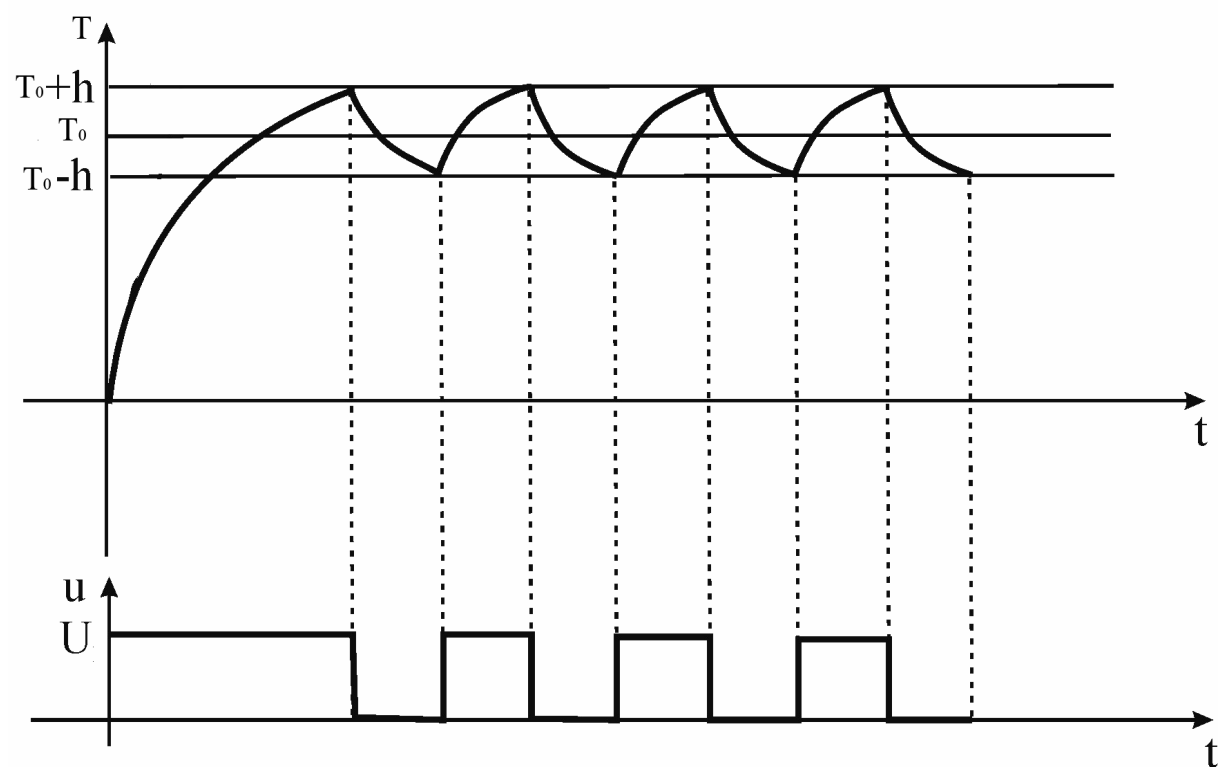
- b. Többhurkos: - kaszkád szabályozás



Kétállású hőmérsékletszabályozó működési elve



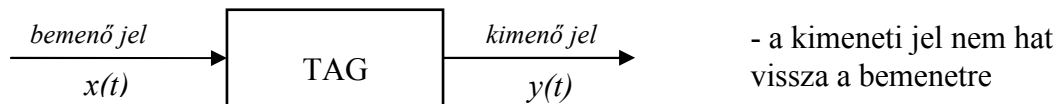
A kívánt hőmérsékleti érték beállítása (alapjel) a legegyszerűbb esetben mechanikusan történik. U feszültség hatására a fűtőszálon keresztül I_f áram halad át. A hőmérséklet addig emelkedik, amíg a beállított értéket el nem éri. Ekkor a bimetal lemez érintkezői bontják a fűtőszál áramkört. A hőmérséklet egy rövid ideig még növekszik, majd csökkenni kezd. Azért, hogy megakadályozzuk a beállított érték körüli gyakori ki-bekapcsolásokat a szabályozó h szélességű hiszterézissel rendelkezik. Így a kikapcsolási hőmérséklet értéknél egy alacsonyabb értéken fog újra bekapcsolni.



Szabályozások vizsgálata

A szabályozási tag fogalma

- Szervek – fizikai alkotóelemek; mindegyike jól meghatározott feladatot lát el. Pl. érzékelés, erősítés, beavatkozás, stb.
- A TAG fogalmának bevezetésével a szabályozó egyes részeinek *jelátviteli tulajdonságait* vizsgáljuk.
- A kimenő és a bemenő jel közötti matematikai kapcsolatot fejezi ki.



- Az átvitel lehet:
 - lineáris
 - nem lineáris
- A tag legfontosabb jellemzői:
 - átviteli tényező - A
 - időállandó - T, τ
- egy rendszer általános viselkedését, így a tagét is n -ed rendű differenciálegyenlet írja le.

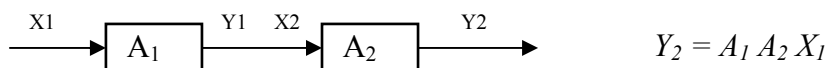
$$T_n^n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = A \left[\tau_1 \frac{dx(t)}{dt} + x(t) \right]$$

- az egyenlet megoldása idő- és frekvenciatartománybeli viselkedésre ad választ, valamint meghatározhatók az A, T, τ mennyiségek is.
- viselkedésüket tekintve a tagokat három csoportra oszthatjuk:
 - arányos tag: - jele P ; jellemzői: A_p, T_p
 - integráló tag: - jele: I ; jellemzői: A_I, T_I
 - differenciáló tag: jele: D ; jellemzői: A_D, T_D .

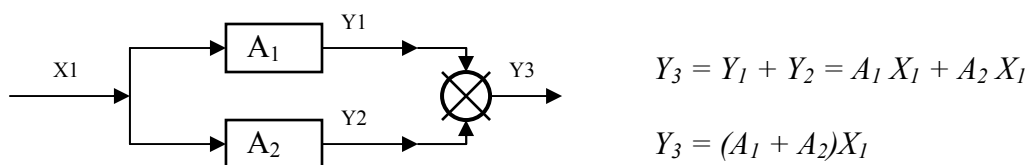
Hatásvázlat

- szabályozási kör olyan jelképes rajza, amelyben a tagok közötti kapcsolatokat és jeleket tüntetik fel. Rendszerint belerajzoljuk a tagok kimenő jeleinek időbeli változását a bemenő jel hatására.

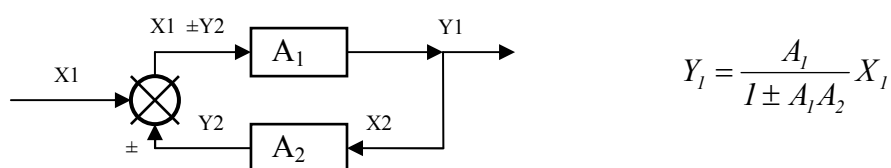
- tagok közötti leggyakoribb kapcsolatok:



Soros kapcsolat



Párhuzamos kapcsolat



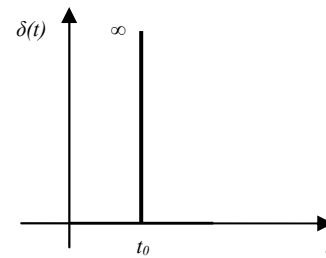
Visszacsatolás (+ negatív, - pozitív visszacsatolás)

Vizsgáló jelek

1) DIRAC impulzus:

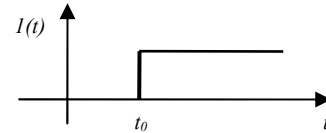
$$f(t) = \delta(t)$$

- elméleti jel: nulla időtartamú, végtelen amplitúdójú, egységnyi területű impulzus.



2) Egységugrás függvény

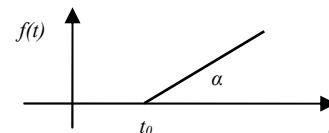
$$f(t) = \begin{cases} 0; & \text{ha } t < t_0 \\ 1; & \text{ha } t > t_0 \end{cases}$$



- ha egy tag bemenetére Dirac impulzust adunk, akkor a kimenő jelet súlyfüggvénynek hívjuk.
- ha a tag bemenetére egységugrás függvényt adunk, akkor átmeneti függvényt kapunk.

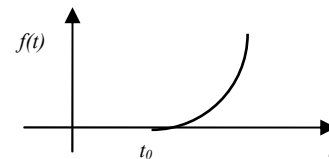
3) Egységsebesség függvény

$$\begin{aligned} f(t) &= t l(t) = \alpha t; & \text{ha } t > t_0 \\ f(t) &= 0 & \text{ha } t < t_0 \end{aligned}$$



4) Egységgyorsulás függvény

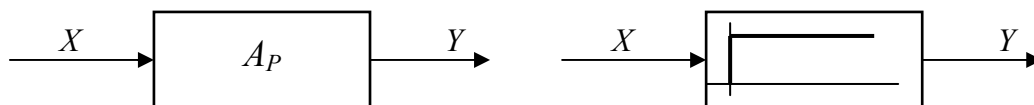
$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2} t^2 l(t); & \text{ha } t > t_0 \\ f(t) &= 0 & \text{ha } t < t_0 \end{aligned}$$



Arányos tag (P)

Energiatároló nélküli arányos tag.

- egyenlete nem tartalmaz differenciál elemeket csak a szabad tagot.

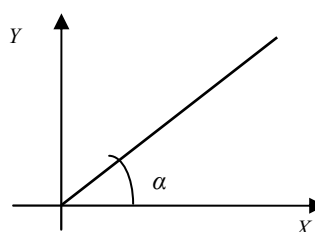
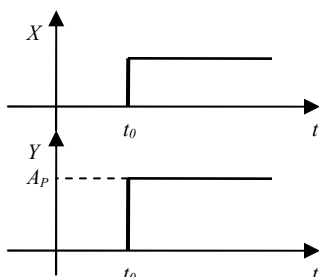


- a beavatkozó jel késedelem nélkül, egyenesen arányosan követi a rendelkező jelet.
- átmeneti függvénye:

$$Y = A_P X$$

- átviteli tényező:

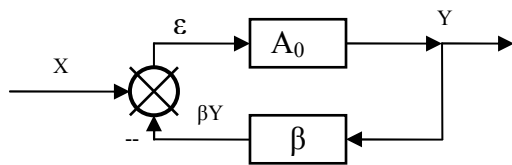
$$A_P = \frac{Y}{X}$$



Példák:

- emelőkar,
- külső gerjesztésű motor vagy generátor

- a szabályozókban negatív visszacsatolású erősítővel valósítható meg.



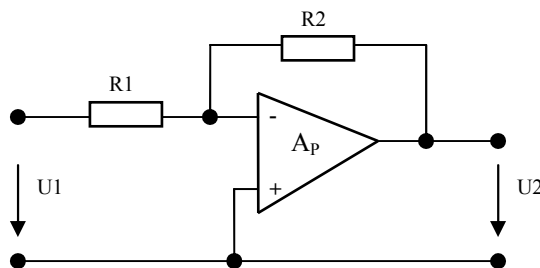
$$\varepsilon = X - \beta Y$$

$$Y = A_0 \varepsilon = A_0 X - A_0 \beta Y$$

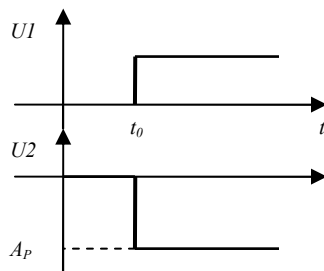
$$Y(1 + \beta A_0) = A_0 X$$

$$A_p = \frac{Y}{X} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} \approx \frac{1}{\beta} = \text{állandó}$$

- műveleti erősítővel megvalósítva:

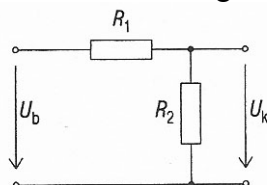


$$A_p = -\frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$



A negatív visszacsatolásnak köszönhetően a zavaró jel hatására a szabályozó nem veszíti el egyensúlyi állapotát, hanem a szabályozott jellemző új, véges értéket vesz fel. Sok esetben ez hátrányt jelent és nem is mindig sikerül megvalósítani.

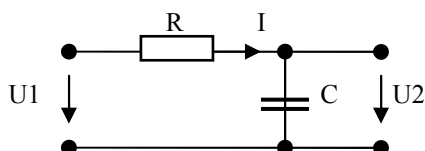
- a feszültségosztó is arányos tagnak tekinthető



$$A_p = \frac{U_k}{U_b} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Egytárolós arányos tag

A szabályozási körben a jelek megváltozása a legtöbb esetben energiaváltozással vagy anyagáramlással jár. Ezek a változások viszont nem mehetnek végbe egyik pillanatról a másikra, így a jeleknek időkéésésük van. Pl. a nyugalomban lévő test tömegének tehetetlenségének köszönhetően az ugrásszerűen ráható erő hatására nem tudja sebességét ugrásszerűen megváltoztatni. Időre van szüksége, míg újra egyensúlyi helyzetbe kerül és egyenes vonalú egyenletes mozgást fog végezni.

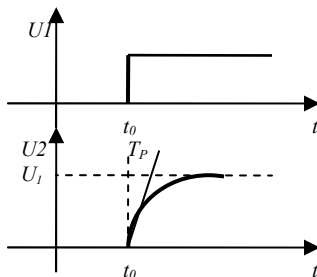


$$A_p = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{I}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{I}{1 + j\omega RC}; T_p = RC$$

- látható, hogy az egyébként időbeli folyamat frekvenciafüggő lesz.
- frekvenciatartománybeli átviteli függvénye:

$$Y(s) = \frac{A_p}{1 + sT_p}; \text{ ahol } A_p = I \text{ és } s = j\omega$$

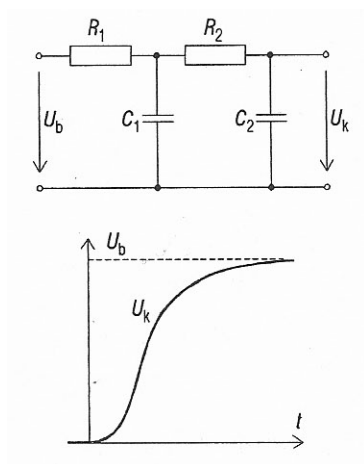
- átmeneti függvénye:



$$U_2 = U_1 \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{T_p}} \right)$$

Kéttárolós tag

- két egytárolós tag soros kapcsolatából származtathatjuk, ahol
- $A_p = A_{p1} \cdot A_{p2}$ (soros tag átviteli tényezője összeszorozódik) és $T_1 = R_1 C_1$; $T_2 = R_2 C_2$



- differenciál egyenlete:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 U_k(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dU_k(t)}{dt} + U_k = A_p U_b(t)$$

$$A_p = A_{p1} \cdot A_{p2} = \frac{I}{1 + j\omega R_1 C_1} \cdot \frac{I}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

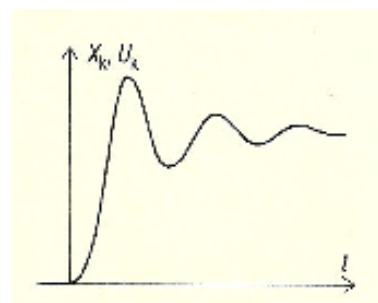
$$A_p = \frac{I}{1 + j\omega(R_1 C_1 + R_2 C_2) - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2}$$

- Laplace transzformáció szerinti átviteli függvénye:

$$Y(s) = \frac{A_p}{T_1 T_2 \cdot s^2 + (T_1 + T_2) \cdot s + I}; \text{ ahol } A_p = I$$

Lengő tag

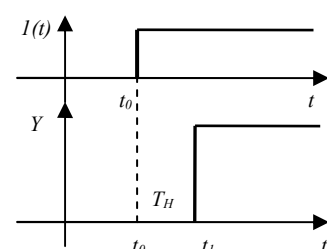
- a bemenő jel ugrásszerű változása sok esetben a kimenő jel belengéséhez vezet.
- a jelenséget a rendszer egymástól független energia-tárolóik jelenléte okozza.
- főleg az átmeneti állapotot jellemzi.
- a szabályozó stabilitásának köszönhetően rövid időn belül megszűnik, és egyensúlyi helyzetbe kerül.



Holtidős tag

- a jel véges terjedési sebessége okozza,
- a kimenő jel szintén ugrásszerűen változik, de a bemenetet csak a holtidő eltelte után követi.

$$T_H = t_1 - t_0$$



Integráló tag (I)

- a kimenő jel a bemenő jel integráljával arányos, azaz a kimeneti jel lineárisan változik ha a bemeneti jel állandó.
- a tagot leíró differenciálegyenlet:

$$T_I \frac{dy(t)}{dt} = A_I x(t)$$

- T_I – integrálási időállandó; A_I – átviteli tényező
- átviteli tényező:

$$A_I = \frac{\Delta Y}{\Delta X}; h a T_I = 1$$

- jelölések:



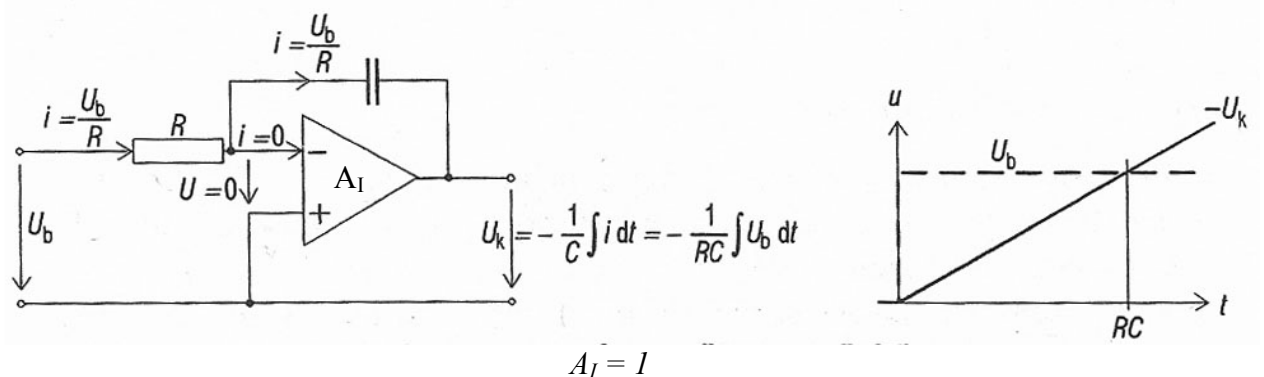
- átmeneti függvénye:

$$y(t) = \frac{A_I}{T_I} \int x(t) dt = \frac{A_I}{T_I} \int_{t_0}^t 1(t) dt = \frac{A_I}{T_I} (t - t_0)$$

- Frekvenciatartománybeli átmeneti függvénye:

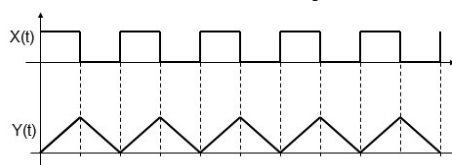
$$Y(s) = \frac{A_I}{T_I} \frac{1}{s} \quad - \quad \text{ahol } s = j\omega t$$

- Gyakorlati megvalósítás műveleti erősítővel:

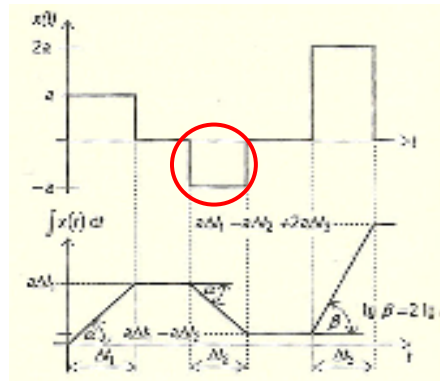


- Jelátviteli tulajdonságai:

- Egységugrás jelből lineáris jel,
- Négyyszögjelből háromszögjel,
- Szinuszos jelből koszinuszosan változó jel 90°-os késéssel.



- Jelátvitel:



- Következtetések:
- Az integráló tag igyekszik a hirtelen megjelenő bemeneti változásokat lassítani;
- A kimenő jel állandó értéke (állandósult állapot) csak akkor tud kialakulni, amikor a bemeneti mennyiség: $x(t) = 0$;
- Negatív hatást kiváltó zavaró tényező hatása nem jelenik meg a kimenten.

Differenciáló tag (D)

- A kimenő jel a bemenő jel differenciáljával arányos;
- Csak az állapotváltozások idejére ad jelet;
- Gyakorlatban csak arányos taggal együtt értelmezhető, mert egységugrás függvényre adott válasza a Dirac impulzus lenne.
- Differenciálegyenlete:

$$y(t) = A_D \cdot T_D \frac{dx(t)}{dt}$$

- Átviteli tényezője:

$$A_D = \frac{\Delta Y}{\frac{\Delta X}{\Delta t}}; \quad \text{ha } T_D = 1$$

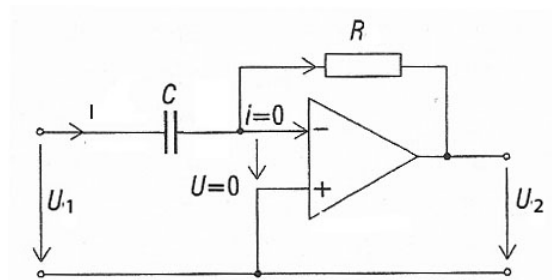
- Átmenti függvénye:

$$y(t) = A_D \cdot T_D \frac{dx(t)}{dt} = A_D \cdot T_D \frac{I(t)}{dt} = 0$$

- Frekvenciatartománybeli átviteli függvénye: $Y(s) = A_D T_D s$
- Jelölése:

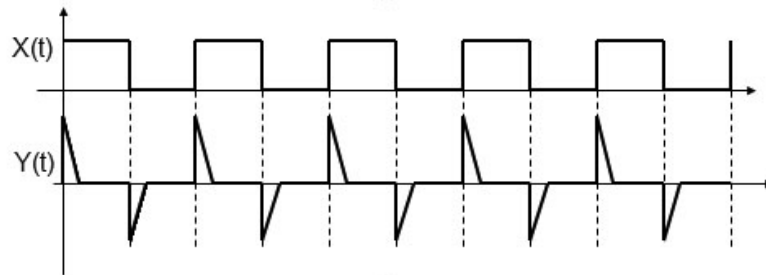


- Megvalósítása műveleti erősítővel:

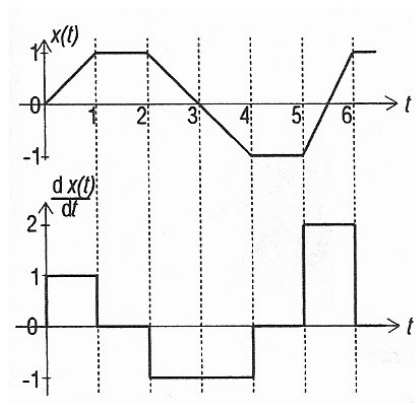


$$U_2 = I \cdot R = -C \cdot \frac{dU_1}{dt} \cdot R = -T_D \cdot \frac{dU_1}{dt}$$

- Jelátviteli tulajdonságai:
 - Egységugrás jelre tüimpulzus,
 - Háromszögjelből négyszögjel,
 - Szinuszos jelből koszinuszosan változó jel (+90°).



- Jelátvitel:



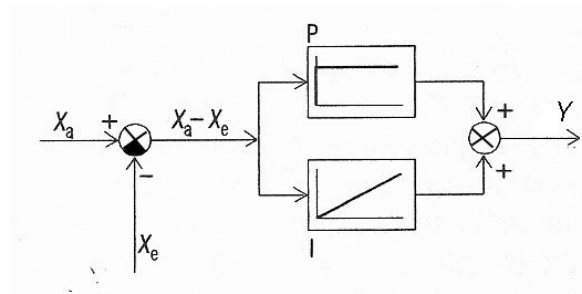
- Következtetések:
 - Igyekszik a lassú változásokat gyorsítani,
 - Csak az átmeneti állapotokban fejt ki hatását,
 - Állandó értékű bemeneti mennyiség mellett kimenete nulla.

Összetett szabályozók

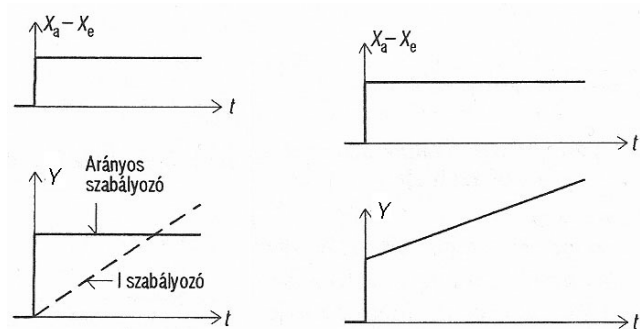
- Cél: az optimális szabályozás elérése.
- Követelmények:
 - stabilitás,
 - bemenő jel változására rövid időn belül újra stabil állapotba kerüljön,
 - nagy hurokerősítés, de ne romoljon a stabilitás.
- Megvalósítás:
 - a tagok optimális paramétereinek megválasztása,
 - átviteli függvények optimalizálása,
- Az eljárást kompenzálásnak nevezzük.
- A kompenzálási hatás szerint pedig:
 - P, I, D, PI, PD és PID szabályozók

PI szabályozó

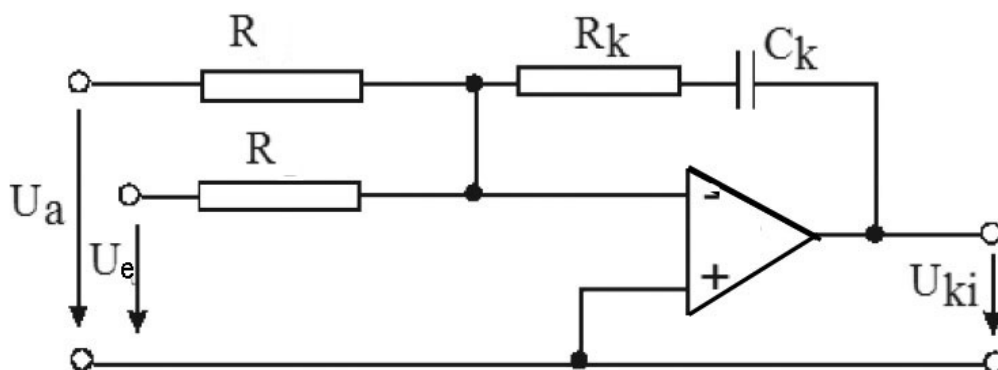
- Egyesíti a proporcionális és integráló tagok hatásait,
- P és I tagok párhuzamos kapcsolásával valósítható meg.



- Átmeneti függvénye egyesíti a tagok hatásait:
- Az arányos tag a gyorsaságot, az integráló tag a pontosságot biztosítja



- Megvalósítás műveleti erősítővel:



$$U_r = U_a - U_e$$

$$U_{ki} = -\frac{R_k}{R} \left(U_r + \frac{1}{R C_k} \int U_r dt \right) = -A_p \left(U_r + \frac{1}{T_I} \int U_r dt \right)$$

$$A_p = \frac{R_k}{R}; T_I = R C_k$$

- A_p – proporcionális tag átviteli tényező
- T_I – integrálási idő

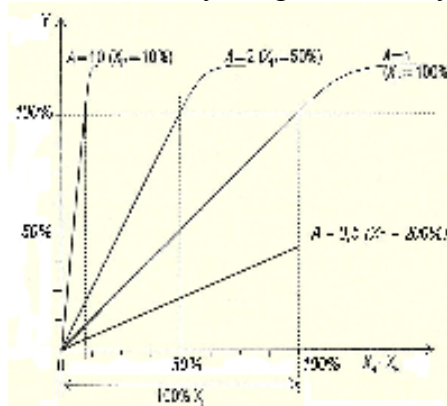
$$Y(s) = A_p \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} \right)$$

- $Y(s)$ – átviteli függvény

A P tag kompenzációja

- a P kompenzáció mértékét az X_P arányossági tartománnyal adják meg:

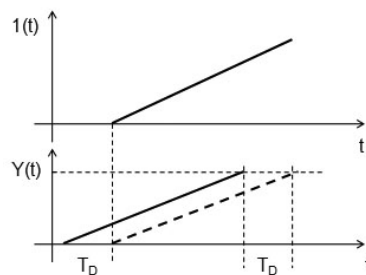
$$X_P = \frac{I}{A_P} 100\%$$



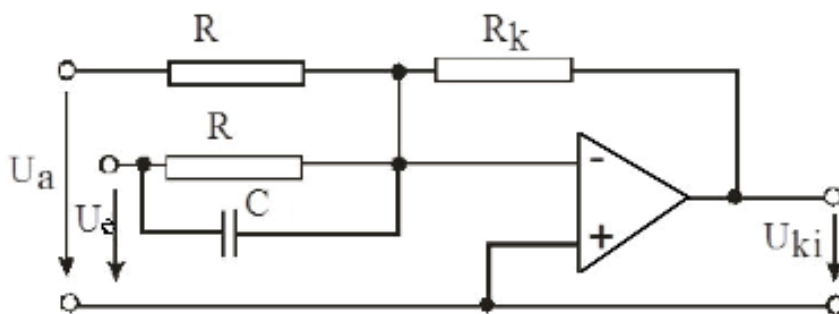
- a bemenőjel $x_r = x_a - x_e$ változási tartománya hány százalékát képezi a kimenő jelnek.

PD szabályozó

- Válasza az egységsebesség függvényre:



- T_D a differenciálási idő,
- Ennyi idővel hamarabb éri el a kiment a kívánt értéket, vagyis mintha ennyi idővel hamarabb kezdődött volna a hatás.
- Megvalósítás műveleti erősítővel:



$$U_r = U_a - U_e$$

$$U_{ki} = -\frac{R_k}{R} \left(U_r + R_k C \frac{dU_r}{dt} \right) = -A_P (U_r + T_D \frac{dU_r}{dt})$$

$$A_P = \frac{R_k}{R}; T_D = R_k C$$

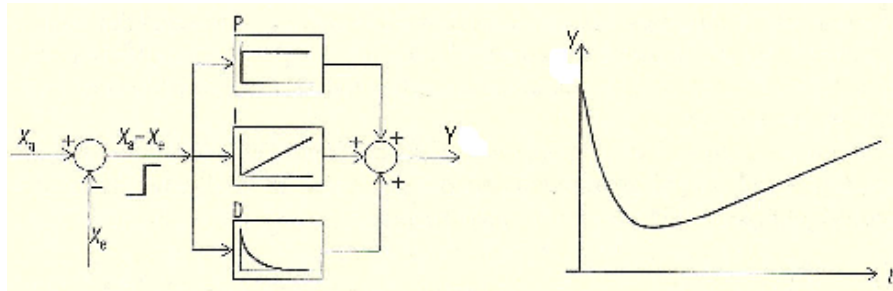
- A_P – proporcionális tag átviteli tényező
- T_D – differenciálási idő

$$Y(s) = A_p(1 + T_D s)$$

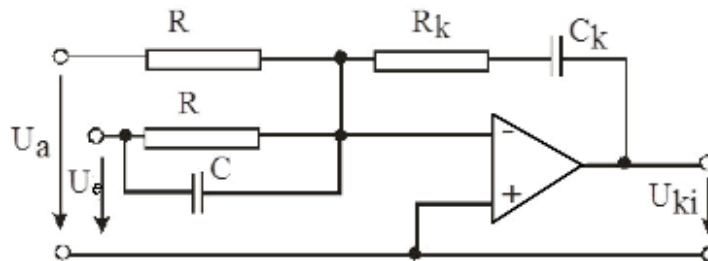
- $Y(s)$ – átviteli függvény

PID szabályozó

- Egyesíti a három alaptípus tulajdonságait egy szabályozón belül.



- Műveleti erősítővel:



$$U_r = U_a - U_e$$

$$U_{ki} = -\frac{R_k}{R} \left(U_r + \frac{1}{R C_k} \int U_r dt + R_k C \frac{dU_r}{dt} \right) = -A_p \left(U_r + \frac{1}{T_I} \int U_r dt + T_D \frac{dU_r}{dt} \right)$$

$$A_p = \frac{R_k}{R}; T_I = R C_k; T_D = R_k C$$

- A_p – proporcionális tag átviteli tényező
- T_D – differenciálási idő
- T_I – integrálási idő

$$Y(s) = A_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

- $Y(s)$ – átviteli függvény

PID szabályozó gyakorlati megvalósítása

