Szabályozástechnika – 9.

Dr. Szilágyi Béla – Dr. Juhász Ferencné

A szabályozástechnikai összefoglaló soron következő részében részletesen megvizsgáljuk a jelátvivő tagok alapstruktúráit, valamint a SISO tag differenciálegyenletéhez rendelhető, lineáris alaptagokat tartalmazó hatásvázlatokat és a tipikusan előforduló tagokat, különös tekintettel a szabályozástechnikában fontos szerepet játszó első- és másodrendű jelátvivő tagokra és azok rendszerjellemző függvényeire.

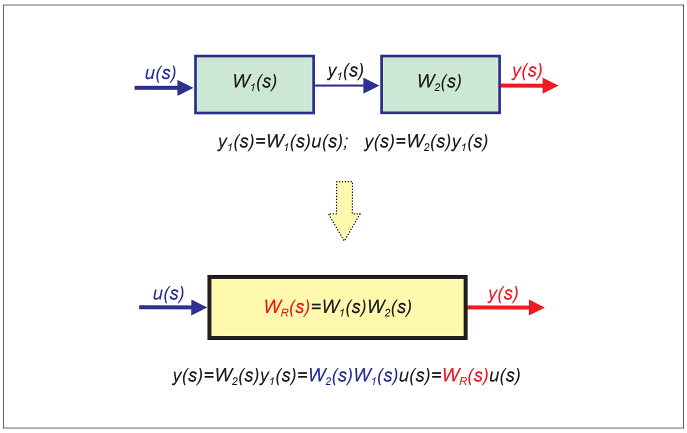
Jelátvivő tagok alapstruktúrái

Két, matematikai modelljével leírt **SISO** tag egymással háromféle *alapstruktúrában* fordulhat elő. Ezek az alapstruktúrák a tagok **soros** és **párhuzamos** kapcsolásai, valamint a tagok egymáson keresztül történő *pozitív* vagy *negatív* **visszacsatolásai**. Az eredő struktúrának a tulajdonságai (hasonlóan, mint a kapcsolásban részt vevő egyedi tagok mindegyikének) a bemenő–kimenő jelek közötti függvénykapcsolatot definiáló, rendszerjellemző függvényekkel írhatók le. Az eredő függvénykapcsolat meghatározására célszerűen az alapkapcsolásban részt vevő mindkét tagot a $W_1(s)$ és $W_2(s)$ átviteli függvényeikkel definiáljuk, és ezek ismeretében számítjuk a rendszer $W_R(s)$ eredő átviteli függvényét. A következőkben a lehetséges **alapstruktúrákat**[1] tárgyaljuk.

Tagok soros kapcsolása

Két jelátvivő tag soros kapcsolásakor az első tag y_1 kimenőjele működteti a második tagot, tehát az első tag y_1 kimenőjele egyben a második tag bemenőjele is[2]. A kapcsolást az 1. ábra szemlélteti.

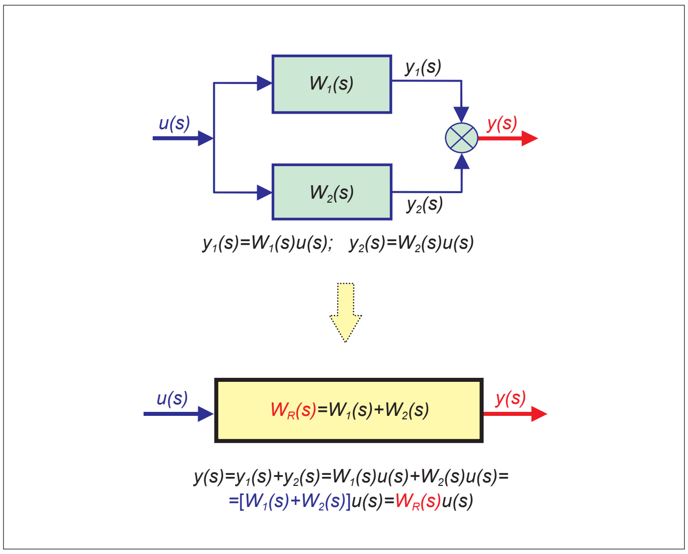
A soros kapcsolás eredő átviteli függvénye a két átviteli függvény ***szorzata***. A kapcsolásban szereplő tagok – az eredő jelátviteli tulajdonság megváltozása nélkül – egymással felcserélhetőek.



1. ábra Tagok soros kapcsolása

Tagok párhuzamos kapcsolása

Két jelátvivő tag párhuzamos kapcsolásakor mindkét tag bemenőjele *azonos*, az eredő kimenőjel az egyes tagok kimenőjeleinek az ***összege***.[3] A párhuzamos kapcsolást a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra Tagok párhuzamos kapcsolása

A párhuzamos kapcsolásban szereplő tagok – az eredő jelátviteli tulajdonság megváltozása nélkül – egymással felcserélhetőek.

Tagok visszacsatolása

Két jelátvivő tag egymással visszacsatolt kapcsolást alkot, ha a $W_1(s)$ átviteli függvényű *visszacsatolt* tag $\varepsilon(s)$ bemenőjele a rendszer $u(s)$ bemenőjelének és a $W_2(s)$ átviteli függvényű *visszacsatoló* tag $v(s)$ kimenőjelének az összege (**pozitív** visszacsatolás), vagy különbsége (**negatív** visszacsatolás). *A visszacsatolás alapstruktúrája különleges jelentőséggel bír.* Ebben a struktúrában a jelek egy zárt hatásláncú ($u \rightarrow \varepsilon \rightarrow y \rightarrow v \rightarrow \varepsilon$) hurokban terjednek, aminek előnyös és hátrányos[4] tulajdonságai vannak. A visszacsatolás hatásláncában jelentős szerepe van az egyébként egymással soros kapcsolást alkotó $W_0(s)=W_1(s)W_2(s)$ ún. **hurokátviteli függvénynek**. A kapcsolást a 3. ábra szemlélteti.

Miután a szabályozási rendszer is a **negatív visszacsatolás elvére** épül, ezért az erre vonatkozó

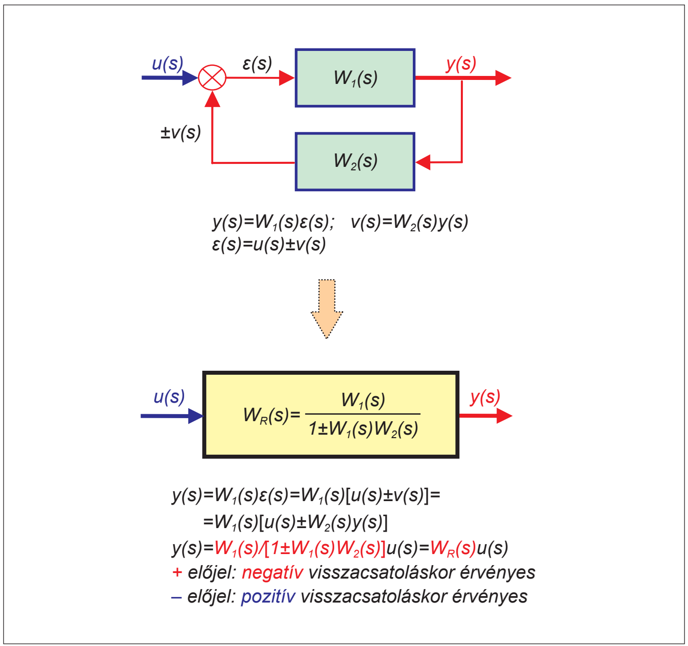
$$W_R(s) = \frac{W_1(s)}{1+W_1(s)W_2(s)} = \frac{W_1(s)}{1+W_0(s)} = \frac{1}{W_2(s)}\frac{W_0(s)}{1+W_0(s)}$$

[1] A jelátvivő tagok alapstruktúráiban értelmezett soros és párhuzamos kapcsolások *nem azonos fogalmak* az áramkörökben alkalmazott áramköri elemek soros és párhuzamos kapcsolásaival!

[2] Szerkezeti megoldásban a soros kapcsolás akkor hozható létre, ha az első tag y_1 kimenőjele és a második tag y_1 bemenőjele azonos fizikai jelhordozókkal rendelkeznek.

[3] Szerkezeti megoldásban a párhuzamos kapcsolás akkor hozható létre, ha mindkét tag u bemenőjelei, és mindkét tag y_1, y_2 kimenőjelei, azonos fizikai jelhordozókkal rendelkeznek. A soros és a párhuzamos kapcsolás tetszőleges k számú tagra is kiterjeszthető.
- Soros kapcsoláskor $W_R(s)= W_1(s)W_2(s) \ldots W_k(s)$.
- Párhuzamos kapcsoláskor $W_R(s)= W_1(s)+ W_2(s)+ \ldots + W_k(s)$.

[4] A visszacsatolás hátrányos tulajdonsága a struktúra **labilitásának** a lehetősége. Stabilis tagokból felépülő visszacsatolás labilissá válhat, különösen *pozitív* visszacsatolás esetében.



3. ábra Tagok visszacsatolása

eredő átviteli függvény képletének a zárt szabályozási rendszer eredő jelátviteli tulajdonságainak meghatározásában is *alapvető jelentősége* van[5]. A visszacsatolás ***zárthurkú*** jelterjedési viszonyai – különösen a pozitív visszacsatolás mellett – ***stabilitási*** problémákhoz vezethet. A kapcsolásban szereplő tagok – az eredő jelátviteli tulajdonság megváltozása nélkül – (a $W_1(s)=W_2(s)$ eset kivételével) egymással ***nem** cserélhetők fel*. Áramköri példa a 4. ábrán látható.

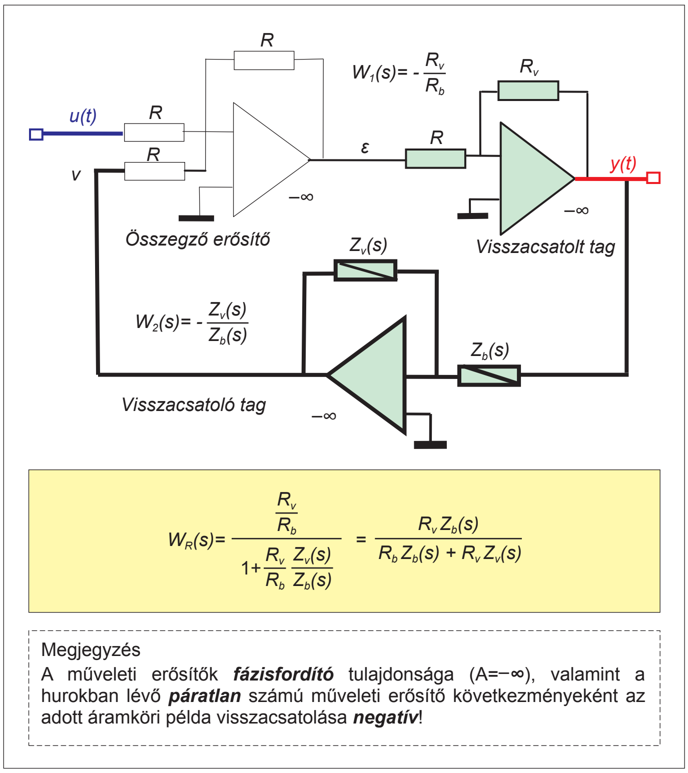
Megjegyzés

Ha $W_1(s)=k_1$, $W_2(s)=k_2$ időkésleltetés nélküli, arányos tagok, a visszacsatolt rendszer hatáslánca algebrai hurkot alkot[6]. Ekkor az eredő átviteli függvény (eredő átviteli tényező) $k_0=k_1k_2$ jelölés mellett:

$$W_R(s)=\frac{W_1(s)}{1\mp W_1(s)W_2(s)}=\frac{k_1}{1\mp k_1k_2}=\frac{1}{k_2}\frac{k_0}{1\mp k_0}.$$

Pozitív visszacsatolás és $k_0=1$ hurokerősítési értéknél $1-k_0=0$, és ezért formálisan $W_R(s)=\infty$. A pozitívan visszacsatolt algebrai hurok $k_0\geq 1$ hurokerősítés mellett nem üzemeltethető, mert a struktúra bármilyen kis értékű δu bemenőjele a visszacsatolás eredő kimenőjelét a telítődésbe viszi. A pozitív visszacsatolás az erősítési tényező növelésére vagy integráló tag megvalósítására használható.

Legyen $W_1(s)=G_1(s)/H_1(s)$ és $W_2(s)=G_2(s)/H_2(s)$. Ekkor a tagok soros kapcsolása esetében az eredő átviteli függvény $W_R(s)=G_1(s)G_2(s)/[\boldsymbol{H}_1(s)\boldsymbol{H}_2(s)]$, a tagok párhuzamos kapcsolása esetében pedig $W_R(s)=[G_1(s)H_2(s)+G_2(s)H_1(s)]/[\boldsymbol{H}_1(s)\boldsymbol{H}_2(s)]$. Tehát mindkét esetben a nevező ugyanaz a $H_R(s)=\boldsymbol{H}_1(s)\boldsymbol{H}_2(s)$ kifejezés. A stabilitás feltétele a $H_R(s)$ – és ezen belül a $H_1(s)$ és a $H_2(s)$ polinomok – *Hurwitz*-polinom volta. Ha tehát a tagok soros és párhuzamos kapcsolásaiban *mindkét* tag aszimptotikusan stabilis[7], az eredő rendszer is rendelkezik ezzel a tulajdonsággal. Ha viszont a tagok *valamelyike* labilis, akkor az eredő rendszer is az.



4. ábra Áramköri példa tagok visszacsatolására

Nincs ez így a visszacsatolás esetében[8]. A visszacsatolás eredő átviteli függvénye ugyanis $W_R(s)=G_1(s)H_2(s)/[H_1(s)H_2(s)\pm G_1(s)G_2(s)]$. Az eredő visszacsatolt rendszer most akkor stabilis, ha a $H_R(s)=\boldsymbol{H}_1(s)\boldsymbol{H}_2(s)\pm\boldsymbol{G}_1(s)\boldsymbol{G}_2(s)$ *Hurwitz*-polinom[9]. Ekkor *stabilis* tagok esetében is lehet az eredő rendszer *labilis*, vagy *labilis* tag megfelelő visszacsatolásával az eredő rendszer *stabilizálható*.

Az előzőekben vázolt alapstruktúrák felhasználásával tetszőleges bonyolultságú lineáris rendszer – köztük a lineáris szabályozás – hatásvázlata építhető fel. Az előző témák tárgyalásainak során ezeket az alapstruktúrákat hallgatólagosan már korábban is felhasználtuk.

SISO tag differenciálegyenletéhez rendelhető – P, I, Σ lineáris alaptagokat tartalmazó – hatásvázlatok

Lineáris **alaptagok**: **P** (proporcionális, *időkésés nélküli, arányos tag*) kimenőjele a bemenőjelének állandószorosa: $y(t)=kx(t)$, átviteli függvénye: $W_P(s)=k$, ahol *k az átviteli tényező*. Az **I** (*integráló tag*) kimenőjele a bemenőjelének idő szerinti integrálja: $y=y(0)+\int u(t)dt$, differenciálegyenlete: $dy(t)/dt=u(t)$, átviteli függvénye: $W_I(s)=1/s$. A **Σ** (*összegző tag*) kimenőjele a bemenőjeleinek az összege: $y(t)=\Sigma u_i(t)$, $y(s)=\Sigma u_i(s)$.[10] A lineáris alaptagok soros, párhuzamos és visszacsatolást tartalmazó alapkap-

[5] A stabilis negatív visszacsatolás eredő átviteli függvényének képletéből láthatóan $W_0(s)>>1$ esetében $\boldsymbol{W_R}(s)\approx\boldsymbol{1/W_2}(s)$, vagyis az eredő átviteli függvény (közelítőleg) a visszacsatoló tag átviteli függvényének reciproka. Ez a tulajdonság a $W_2(s)$ átviteli függvénynek, ill. a szabályozási kör visszacsatolásában szereplő *érzékelő szervnek* különleges jelentőséget ad.

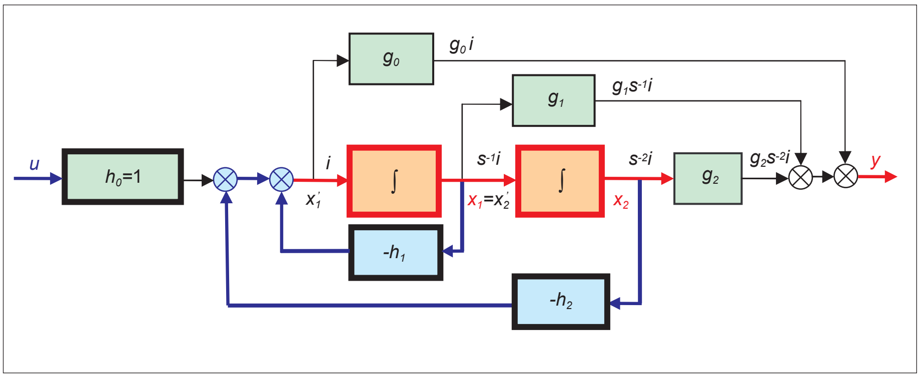
[6] Ez egy idealizált állapot, a valóságos viszonyok mellett a bemenő- és a kimenőjelek közötti jelkésleltetés általában jelen van.

[7] A *Hurwitz*-polinom minden p_i gyöke **negatív** – vagy **negatív valós részű** komplex szám. A $H_R(s)=H_1(s)H_2(s)$ akkor *Hurwitz*-polinom, ha $H_1(s)$ és $H_2(s)$ külön-külön is *Hurwitz*-polinom. Ha a $\boldsymbol{W_R(s)}$ átviteli függvény $\boldsymbol{H_R(s)}$ nevezője *Hurwitz*-polinom, akkor az eredő rendszer sajátmozgásának tranziens komponensei „lecsengenek", vagyis: $t\rightarrow\infty$ mellett $\Sigma e^{p_it}\rightarrow 0$.

[8] Szerkezeti megvalósításban a visszacsatolás akkor hozható létre, ha a visszacsatolt tag *y* kimenőjele és a visszacsatoló tag bemenőjele, valamint a visszacsatolt tag *ε* bemenőjele és a visszacsatoló tag *v* kimenőjele azonos jelhordozóval rendelkeznek. A **MATLAB** **`series, parallel, feedback, cloop`** függvényei támogatják az alapkapcsolások eredő átviteli függvényeinek kiszámítását.

[9] A - előjel a struktúra pozitív visszacsatolása esetén érvényes. Ekkor a rendszer labilitására való hajlama jelentős.

[10] Tágabb értelemben a **H**-jelű holtidős tagot is a lineáris alaptagok közzé soroljuk. A holtidős tag kimenőjele T_h holtidő elteltével követi a bemenőjelet: $y=u(t-T_h)$, $T_h>0$. A holtidős tag átviteli függvénye a $W_H(s)=exp(-sT_h)$ transzcendens kifejezés. A holtidős tag is elméleti határeset, fizikai rendszerekben energiatárolásból származó jelkésleltetésekkel együtt fordul elő.



5. ábra Az átviteli függvény közvetlen felbontása

csolásaival tetszőlegesen bonyolult lineáris rendszer hatásvázlat struktúrája építhető fel. *Az alaptagokból felépített hatásvázlat alapján – az integráló tagok kimenőjeleit állapotváltozóknak elnevezve – az átviteli függvényével leírt tag állapotegyenlete is meghatározható.*

Az átviteli függvény közvetlen felbontása

Holtidő nélküli, másodrendű rendszert vizsgálunk, de az n rendű esetben is az itt bemutatott eljárást lehet alkalmazni.

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2}+h_1\frac{dy(t)}{dt}+h_2y(t)=g_0\frac{d^2u(t)}{dt^2}+g_1\frac{d^2u(t)}{dt^2}+g_2u(t)$$

$$\frac{y(s)}{u(s)}=W(s)=\frac{G(s)}{H(s)}=\frac{g_0s^2+g_1s+g_2}{s^2+h_1s+h_2}=\frac{g_0+g_1s^{-1}+g_2s^{-2}}{1+h_1s^{-1}+h_2s^{-2}}\cdot\frac{i(s)}{i(s)}.$$

Az utóbbi egyenletekből – figyelembe véve, hogy s^{-1} az integrálás operátora – felépíthető a másodrendű rendszer **P, I,** és **Σ** lineáris alaptagokat tartalmazó hatásvázlata[11] (lásd 5. ábra).

A differenciálegyenletben, az átviteli függvényben, ill. a hatásvázlaton szereplő h_2, h_1, és g_2, g_1, g_0 együtthatók mindegyike tetszőleges valós szám[12]. Fontos tulajdonsága a közvetlen felbontás alapján kapott struktúrának, hogy a $H(s)$ karakterisztikus polinom $-h_1$ és $-h_2$ negatív *együtthatói* az integrátorok visszacsatolásaiban játszanak meghatározó szerepet. *A hatásvázlat integráló tagjainak kimenőjelei a másodrendű dinamikus rendszer x_1 és x_2 állapotváltozói*[13]. Ezekkel a jelölésekkel a másodrendű rendszer állapotegyenlete:

$$\begin{bmatrix}\dfrac{dx_1(t)}{dt}\\[2mm] \dfrac{dx_2(t)}{dt}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-h_1 & -h_2\\ 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}u(t)$$

$$y(t)=\left[(g_1-g_0h_1)\quad(g_2-g_0h_2)\right]\begin{bmatrix}x_1(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}+g_0u(t).$$

A két elsőrendű lineáris differenciálegyenletet és az y kimenőjelet meghatározó algebrai egyenletet tartalmazó állapotegyenlet – az adott $u(t)$-re vonatkozó $y(t)$ válasz meghatározásának szempontjából – egyenértékű a **SISO** tagot leíró másodrendű, állandó együtthatójú lineáris differenciálegyenlettel. Az állapotegyenlet megoldása azonban nem csupán az $y(t)$ kimenőjelet szolgáltatja, hanem a rendszer $x_1(t)$, $x_2(t)$ állapotváltozóit is megadja, mivel az $y(t)$ meghatározását meg kell előznie az állapotváltozók kiszámításának[14]. Az $x(t)=[\,x_1(t)\ x_2(t)]^T$ állapotvektor meghatározása a differenciálegyenlet megoldását igényli.

Az átviteli függvény közvetlen felbontása alapján származtatott állapotegyenletnek jellegzetes tulajdonsága, hogy a rendszám $n>1$ tetszőleges értéke esetben az A állapotmátrix alakja:

$$A=\begin{bmatrix}-h_1 & -h_2 & -h_3 & \cdots & -h_{n-1} & -h_n\\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

Láthatóan A első sorában a karakterisztikus polinom negatív együtthatói állnak[15]. Az állapotmátrixból következik, hogy az $x_i(t)$ állapotváltozó $dx_i(t)/dt$ sebessége az $x_{i-1}(t)$-vel azonos ($dx_i(t)/dt=x_{i-1}(t)$, $i=2,3,\ldots,n$), és csupán az x_1 állapotváltozó $dx_1(t)/dt$ állapotsebessége függ minden állapotváltozótól, hacsak a h_i ($i=1,2,\ldots,n$) együtthatók valamelyike nem zérus. Az állapotegyenletnek ez az alakja az **irányíthatósági kanonikus alak**. Az állapotváltozók által kifeszített n dimenziós állapotteret ekkor fázistérnek nevezzük, amely $n=2$ kétdimenziós esetben a fázissík[16].

Az adott $u(t)$ és $x(0)$ hatására keletkezett $x(t)$ megoldást szemléltető állapottrajektóriát (harmadrendű rendszer esetében) a 6. ábra tartalmazza. Az állapottrajektória az adott $u(t)$ gerjesztés és $x(0)$ kezdeti feltétel hatására keletkező $x(t)$ állapotvektor végpontjainak mértani helye, miközben a t időváltozó egy tetszőleges intervallumot befut. A trajektória a t idővel paraméterezett térgörbe, a rátett nyíl iránya az idő növekedésének az irányát mutatja. Lényegét tekintve az $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ állapotváltozó időfüggvényeinek egy térbeli ábrázolási formája.

Tipikusan előforduló tagok

Az együtthatók számértékei alapján már a másodrendű rendszer is számos, különféle tulajdonsággal rendelkező jelátvivő tagokat

---

[11] Az $i(s)$ jelet két, egymással sorosan kapcsolt, integráló tag bemenetén működtetve az első integrátor kimenője $s^{-1}i(s)$, a másodiké pedig $s^{-1}[s^{-1}\ i(s)]=s^{-2}i(s)$. Ha a rendszám n, $s^{-n}i(s)$ segédváltozóval kell számolnunk. $1/s$ az integráló tag átviteli függvénye.

[12] Vegyük figyelembe, hogy a differenciálegyenletnek a karakterisztikus egyenlet vezető együtthatójára normalizált alakját használjuk, ezért $h_0=1$, $h_i=a_i/a_0$, $g_i=b_i/a_0$.

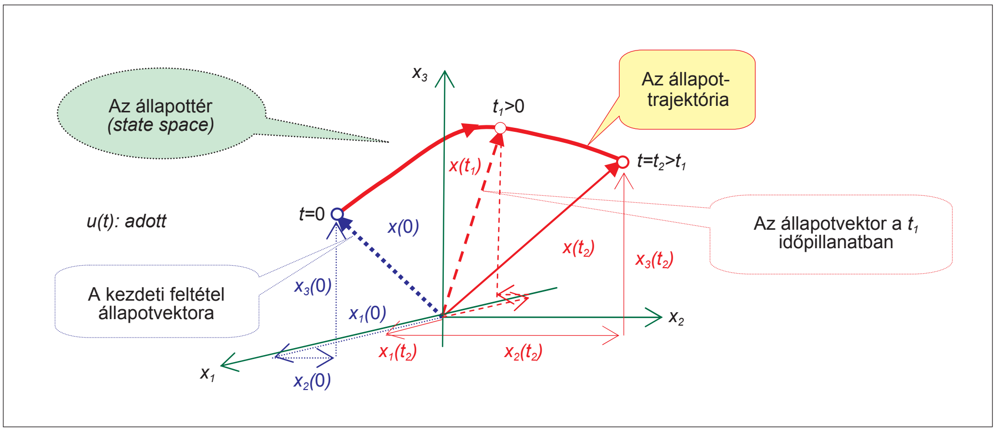
[13] Az átviteli függvény közvetlen felbontásával kapott hatásvázlat-struktúra figyelmet érdemlő ismérve az ***integráló tagok** egymást működtetett, **soros kapcsolást alkotó láncolata*** (lásd a hatásvázlatot). Az irányíthatósági kanonikus alaknak ez jellegzetes tulajdonsága. A rendszám $n\geq1$, és az integráló tagok száma azonos az n rendszámmal. Az irányíthatósági kanonikus alaknak a szabályozáselmélet állapotirányíthatósági kérdéskörének tárgyalásánál van jelentősége.

[14] A **MATLAB** mind az egy egyenletből álló, n rendű lineáris differenciálegyenlet megoldását, mind az n számú, elsőrendű differenciálegyenletből álló differenciálegyenlet-rendszer (az állapotegyenlet) megoldását hatékonyan támogatja: `[y,x]=lsim(G,H,u,t)`, `[y,x]=lsim(A,B,C,D,u,t,x0)`. A $v(t)$ átmeneti függvény vagy a $w(t)$ súlyfüggvény számítása **MATLAB** támogatással: `[v,x,t]=step(G,H)`, `[w,x,t]=impulse(G,H)`. Az átviteli függvényből az állapotegyenlet irányíthatósági kanonikus alakjának paramétermátrixait az `[A,B,C,D]=tf2ss(G,H)` utasítással lehet meghatározni. A rendszer sajátmozgásának meghatározását támogató **MATLAB**-utasítás: `[y,x,t]=initial(A,B,C,D,x0,t)`.

[15] Az állapotmátrix karakterisztikus egyenlete $det(\lambda I-A)=\lambda^n+h_1\lambda^{n-1}+h_2\lambda^{n-2}+\ldots+h_{n-1}\lambda+h_n=0$.

[16] Itt kell megjegyeznünk azt a tulajdonságot, hogy az átviteli függvénynek a közvetlen felbontástól eltérő, de vele egyenértékű, másfajta felbontásai is léteznek, ezek egyikére a következőkben térünk ki.

definiálhat. Ezek közül – a szabályozási rendszerek analízisében gyakran használt – néhány fontosabbat az 1. táblázatban foglalunk össze. A tábl. differenciálegyenleteiben található h_0, h_1, h_2 *és* g_0, g_1, g_2 együtthatókról feltételeztük, hogy valós, *pozitív* értékű számok[17], vagy egyes esetekben valamelyikük értéke zérus. Ebből következőleg az átviteli függvényekben szereplő k, k_i, k_d, T, T_d, T_i, ξ, ω_0 paraméterek szintén pozitív értékek, és a h, g együtthatókból származtathatók. A táblázatban a differenciálegyenleteket (**LDE**), a $W(s)$ átviteli függvényeket és a $v(t)$ átmeneti függvényeket szerepeltettük, a $w(t)$ súlyfüggvények és a $W(j\omega)$ frekvenciafüggvények meghatározását az olvasóra bízzuk.



6. ábra A tranziens folyamat szemléltetése az állapottérben

A táblázatban felsorolt tagok megnevezései:

- **P: arányos** tag (*kimenőjele a bemenőjelével arányos*, $k=g_2/h_2$ az átviteli tényező),
- **I: integráló** tag (*kimenőjele a bemenőjelének idő szerinti integráljával arányos*, kimenőjelének a sebessége arányos a bemenőjellel, $k_i=g_2/h_1$ az integrálási átviteli tényező),
- **D: ideális differenciáló** tag (*kimenőjele a bemenőjel differenciálhányadosával arányos*, $k_d=g_1/h_2$ a differenciálási átviteli tényező, *nem realizálható*[18]),
- **T: egytárolós, arányos** tag ($k=g_2/h_2$ az átviteli tényező, $T=h_1/h_2$ az időállandó),
- **T_ξ: kéttárolós, lengő**[19] tag ($k=g_2/h_2$ az átviteli tényező, $T_0=\sqrt{(h_0/h_2)}$ az időállandó, $2\xi T_0=h_1/h_2$, $0<\xi<1$ a csillapítási tényező (*damping factor*)),
- **PD_i: ideális, arányos+differenciáló** tag ($k=g_2/h_2$, $T_d=g_1/g_2$, *nem realizálható*),
- **PD: realizálható, arányos+differenciáló** tag ($k=g_2/h_2$, $T_d=g_1/g_2$, $T=h_1/h_2$),
- **PI: arányos+integráló** tag ($k=g_1/h_1$, $T_i=g_1/g_2$),
- **0: oszcillátor**, lengő tag ($k=g_2/\sqrt{(h_0 h_2)}$, $\omega_0^2=h_2/h_0$).

Az átmeneti függvényeket a differenciálegyenleteknek az $u(t)=\mathbf{1}(t)$ gerjesztésre és zérus kezdeti feltételekre vett megoldásával vagy a $v(t)=L^{-1}\{W(s)/s\}$ inverz *Laplace*-transzformáció kiszámításával lehet meghatározni.

1. táblázat Első- és másodrendű jelátvivő tagok rendszerjellemző függvényei

Név	h_0	h_1	h_2	g_0	g_1	g_2	*Differenciálegyenlet*	*Átviteli függvény* $W(s)=y(s)/u(s)$	*Átmeneti függvény* $v(t)=L^{-1}\{W(s)/s\}$
P	0	0	h_2	0	0	g_2	$h_2 y(t)=g_2 u(t)$	k	$k1(t)$
I	0	h_1	0	0	0	g_2	$h_1\frac{dy}{dt}=g_2 u$	$\frac{k_i}{s}=\frac{1}{sT_i}$	$k_i t=\frac{t}{T_i}$
D	0	0	h_2	0	g_1	0	$h_2 y=g_1\frac{du}{dt}$	$k_d s=sT_d$	$k_d\delta(t)=T_d\delta(t)$ *nem realizálható*
T	0	h_1	h_2	0	0	g_2	$h_1\frac{dy}{dt}+h_2 y=g_2 u$	$\frac{k}{1+sT}$	$k(1-e^{-\frac{t}{T}})$
T_ξ	h_0	h_1	h_2	0	0	g_2	$h_0\frac{d^2y}{dt^2}+h_1\frac{dy}{dt}+h_2 y=g_2 u$	$\frac{k}{1+2\xi T_0 s+T_0^2 s^2}$	$k[1+\frac{e^{-\frac{\xi}{T_0}t}}{\sqrt{1-\xi^2}}sin(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_0}t-arctg\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{-\xi})]$
PD_i	0	0	h_2	0	g_1	g_2	$h_2 y=g_1\frac{du}{dt}+g_2 u$	$k(1+sT_d)$	$k[1+T_d\delta(t)]$ *nem realizálható*
PD	0	h_1	h_2	0	g_1	g_2	$h_1\frac{dy}{dt}+h_2 y=g_1\frac{du}{dt}+g_2 u$	$k\frac{1+sT_d}{1+sT}$	$k(1+\frac{T_d-T}{T}e^{-\frac{t}{T}})$ $T_d>T$
PI	0	h_1	0	0	g_1	g_2	$h_1\frac{dy}{dt}=g_1\frac{du}{dt}+g_2 u$	$k\frac{1+sT_i}{sT_i}$	$k(1+\frac{t}{T_i})$
O	h_0	0	h_2	0	0	g_2	$h_0\frac{d^2y}{dt^2}+h_2 y=g_2 u$	$k\frac{\omega_0}{s^2+\omega_0^2}$	$k(1-cos\,\omega_0 t)$
stb.									

(Folytatjuk!)

szbela@iit.bme.hu, juhaszne@iit.bme.hu

[17] Természetesen az is lehetséges, hogy az h_k, ill. g_k együtthatók valamelyike negatív szám. Az ilyen tulajdonságokkal rendelkező (labilis és nem minimum fázisú) tagokat a táblázatban nem szerepeltettük, ezeket a későbbiekben tárgyaljuk.

[18] A „nem realizálható" fogalom azt jelenti, hogy nem hozható létre olyan fizikailag megvalósítható szerkezet, áramkör stb, aminek matematikai modellje az adott differenciálegyenlet lenne.

[19] A kéttárolós, lengő tag ($\mathbf{T}_\xi$-tag) a szabályozástechnika fontos fogalma, mert a **zárt** szabályozási rendszer tulajdonságait – legalábbis közelítőleg – ilyen taggal szeretnénk leírni. A tag $W(s)$ átviteli függvényének pólusai a $p=[-\xi\pm\sqrt{(1-\xi^2)}]/T_0$ **negatív valós részű, konjugált komplex póluspár** ($0\leq\xi<1$, $T_0>0$).