

Szilágyi Béla Juhász Ferencné

Szabályozástechnika
Alapfogalmak

A cikksorozat elkészítését és elérhetőségét támogatja az „Ipar a korszerű mérnökképzésért” alapítvány.

A Szabályozástechnika témával foglalkozó cikksorozat a szabályozási rendszerek elméletével, üzemtanával, tervezésével foglalkozik, és azok számára készült, akik a „Szabályozástechnika” témában az ismeretanyaguk „felfrissítését” kívánják elérni.

A cikksorozat tervezett témái:

- 1.) A szabályozás, mint a kulturális evolúció egy jelensége. A negatív visszacsatolás. Érzékelés (**szenzorok**), a szabályozási algoritmus realizálása (**controller**), beavatkozás (**aktuátorok**).
- 2.) A jelterjedés leírása. A hatáslánc. Szerkezeti vázlat, működési vázlat, hatásvázlat. A szabályozás egyensúlyi helyzete. Állásos-, arányos-, és integrál szabályozás. A zavarelhárítás hatásmechanizmusa.
- 3.) A dinamikus rendszer leírásának matematikai modelljei. Az állapotegyenlet. A munkaponti linearizálás, és a lineáris modell. Az statikus, és a dinamikus viszonyok kezelése. A Laplace transzformáció, és alkalmazásának jelentősége. Az átviteli függvény.
- 4.) A stabilitás fogalma. Dinamikus rendszer, és a visszacsatolt szabályozás aszimptotikus stabilitása.
- 5.) A klasszikus soros kompenzáció struktúrája, értéktartás-, és követés. Az integráló tag szerepe a hiba minimalizálásában, az értéktartási-, és követési feladatol ellátásában.
- 6.) A PID szabályozó paramétereinek illesztése a folyamat adataihoz. (A szabályozó rendszertechnikai méretezése).
- 7.) Az irányíthatóság-, és a megfigyelhetőség fogalmai. A folyamat dinamikus tulajdonságainak befolyásolása állapotvisszacsatolással. Az állapotmegfigyelő alkalmazása.
- 8.) A kaszkádszabályozás, a zavarkompenzáció, az IMC rendszer, mint a minőségjavítás eszközei. A folyamat holtidejének kezelése *Smith* szabályozóval.
- 9.) A számítógépes irányítás leírása, a hibrid rendszer matematikai modellje. ADC, DAC jelátalakítás, mintavételezés, és zérusrendű tartás. A diszkrét jelek tulajdonságai. A Z transzformáció. Az impulzusátviteli függvény.
- 10.) Hibrid szabályozás rendszertechnikai méretezése folytonos, és diszkrét modell alapján. Véges beállású rendszer elve.

A szerzők szeretnék remélni, hogy a következőkben tárgyalt ismeretanyag felkelti a téma iránti érdeklődést, és megalapozza a bonyolultabb rendszerek megismeréséhez vezető utat. A sorozat elkészítésének felkérésekor igényként merült fel, hogy lehetőleg egyszerű matematikai módszerek alkalmazására kerüljön sor. Ennek kielégítése nem egyszerű feladat, miután a dinamikus rendszerek matematikai modellalkotásának alapvető eleme a rendszert leíró **differenciálegyenlet**, illetve az ennek megfelelő **átviteli függvény**. Az olvasóról feltételezzük, hogy ezeket a matematikai alapfogalmakat az alkalmazás mélységéig ismeri, és felhasználásukat kezelni képes.

Mottó helyett...

A szabályozási feladatok megoldására a negatív visszacsatolás elvét a biológiai-, élettani evolúció folyamatában az élő természet már igen régen (valószínűsíthetően kialakulásának pillanatától) alkalmazza. Az elv ösztönzerű, ember által alkotott folyamatokban történő felhasználására (a kulturális evolúcióban) már az ókorban (az időszámítás előtti harmadik, második évezredben) sor került. A tudatos technikai alkalmazás *James Watt* (skót feltaláló, eredeti foglalkozását tekintve műszerész és géplakatos) nevéhez fűződik. (Gőzgép fordulatszám szabályozása centrifugális inga – mint fordulatszám szabályozó – segítségével: A gőzgép fordulatszáma a terhelés növekedésének hatására csökken. Ez a fordulatszám csökkenés a bevitt gőzmennyiség megnövelésével szüntethető meg. *Watt* a fordulatszámot egy centrifugális inga segítségével mérte. A fordulatszám esésekor az érzékelő szerv elmozdulása automatikusan megnövelte a gépbe vitt gőzmennyiséget, és így a fordulatszám terheléstől való függése – **emberi közreműködés nélkül** – megszüntethetővé vált). *James Watt* (1736-1819) *Dr. Joseph Black* (a kémia és az orvostudományok professzora, a hőtan tudományának egyik megalkotója) kortársa. *Dr. Black* tudományos eredményeit tanítványai tették közzé, köztük *Robinson Lectures* című könyvében. *Robinson* ezt a könyvet *Watt*nak dedikálja, az alábbiak szerint¹:

Tisztelt Uram!

Azt hiszem, azzal, hogy az Ön levelével kezdem a mi kiváló Mesterünk előadásainak ezen kiadását, a legmélyebb tiszteletemet fejezem ki iránta, és ugyanakkor szolgálatot teszek a köznek is. Az Olvasó figyelmét Dr. Black legkiválóbb tanítványára felhívva, emlékeztetem Önt azon fontos eredményekre, amelyek éppen Mesterünk felfedezéseiből eredtek. Biztos, hogy a modern időkben senki sem járult annyival az ember erejének növeléséhez, mint éppen Ön, tökéletesítve a gőzgépet, amelyről Ön azt vallja, hogy Dr. Blacktól kapott instrukciók alapján tudta azt véghezvinni.

¹ Irodalom: *Simonyi Károly*: A fizika kultúrtörténete. Gondolat, 1978.

Az Ön példáján akarom megmutatni az Olvasónak, hogy nincs a tudományos képesség olyan magas foka, amelynek elérése reménytelen lenne számára, ha szilárdan követi a **kísérleti vizsgálatok józan tervét**, mint ahogy azt oly kitartóan hajtogatta Dr. Black, és ugyanakkor **süket a ragyogó elméletek elbájoló ígéreteivel szemben**. A szikra, amelyet így szétszórok, alkalmas anyagban világítóvá válhat... azokban, akik önmaguk sem ismerik erőiket. Talán még az Öné is szunnyadna, ha nem fedezte volna fel Dr. Black a rejtőző tüzet...

Ezek a gondolatok a mai napig megőrizték aktualitásukat, bár a hosszú időn át „Csipkerózsika álmukat” alvó „ragyogó elméletek elbájoló ígéretei” napjainkban a gyakorlat részeseivé válnak (pl. Ljapunov 1892-ben kidolgozott stabilitásemelése).

J.Watt vezette be a teljesítmény mérésére a lóerő (LE) fogalmát (Egy ló 1 perc alatt 33000 angol fontot képes 1 angol láb magasságba emelni. Ez a jelenleg meghatározott definíció szerint 1LE=75 kilopondméter másodpercenként, ami egyébként kerekén **736 Watt**). Az energetikai folyamatoknak (szén vegyi energiájának hőenergiává-, illetve a hőenergia mechanikai energiává való átalakítása, a gőzdugattyú egyenes vonalú mozgásából forgó mozgás létrehozása), az informatikai folyamatokkal (gőzgép fordulatszám szabályozása) történő közös szemléletében Watt meghatározó szerepet játszott. Az 1 bit információ egység értelmezése, vagy a dinamikus rendszernek a Laplace transzformációra épülő matematikai modellalkotásának alkalmazása természetesen ekkor még váratott magára.

A Heaviside által bevezetett – a lineáris áramkörök vizsgálatát támogató – **átviteli függvény** fogalma (kb. 1910), illetve a visszacsatolt műveleti erősítők kísérleti vizsgálata során (Nyquist, Bode, Mihajlov kb. 1930-1940) megjelenő gerjedési (**labilitási**) jelenségeknek a tanulmányozása teremtette meg azt a lehetőséget, hogy az általános dinamikus rendszereknek - így a visszacsatolt lineáris szabályozásoknak is – a rendszerelmélete kialakuljon. J. Watt – alapvetően a **kísérletekre** és az ezekből levonható tapasztalatokra alapozva – ezen ismeretek hiányában is maradandót alkotott.

Bevezetés

A biológiai-, és a kulturális evolúció teljes folyamata alatt az irányítás „az idő kezdete óta” jelen van. Napjainkban a különböző műszaki berendezések, folyamatok jelentős részének üzemeltetése az automatikus irányítás hiányában nem is lenne lehetséges. (Pl. úrjárművek, robotika, nukleáris technika, vegyipari reaktorteknika, földi-, vízi-, légi járműirányítás, elektronikus berendezések, számítógépek, híradástechnikai eszközök, villamos hajtások, CNC megmunkálás szerszámgépei, energetikai folyamatok, orvos-elektronikai berendezések, háztartási gépek, épületgépészet, élelmiszeripari gépek, haditechnika, stb.). Az élettani-, biológiai-, közgazdasági-, szociológiai-, kutatások eredményeként is nyilvánvalóvá vált, hogy az élő szervezetekben, és a társadalmi folyamatokban irányítási (szabályozási) hatásmechanizmusok működnek. Ezek azonban természetüknél fogva nagyságrendekkel bonyolultabbak a technikai folyamatok irányítási rendszereinél.

A folyamatok egy jelentős része igen egyszerű technológiai rendszer, amelynek irányítása is egyszerű irányító berendezéssel oldható meg (pl. háztartási *villanybojler* hőmérsékletszabályozása állásos szabályozóval). Léteznek azonban jelentősen bonyolult folyamatok, ezek irányítása nagy bonyolultságú, komplex feladatokat ellátó irányító berendezéseket igényelnek (pl. atomerőmű *reaktor-turbina-villamos generátor* blokkegységének számítógépes folyamatirányítása). Az irányítani kívánt folyamatok tehát sokrétűek, az irányító berendezés azonban általában egységes elvek alapján épül fel. *A rendszerelméleti tárgyalás pedig teljesen független a folyamat, illetve az irányító berendezés szerkezeti kialakításától.*

A különféle technológiai folyamatok irányítása az alábbi mechanizmusok szerint történik:

- információ szerzés az irányított folyamatról: →▶ **érzékelés,**
- az információk feldolgozása: →▶ **ítéletalkotás,**
- az ítéletalkotás eredményétől függően rendelkezésadás a beavatkozásra: →▶ **rendelkezésadás,**
- a folyamat módosított jellemzőinek a szándékolt megváltoztatása abból a célból, hogy az irányítással szemben megfogalmazott követelmények megvalósuljanak: →▶ **beavatkozás.**

Az irányítás során megoldandó feladatok illusztrálására szemléletes példa a közúti gépjármű (pl. személygépkocsi) vezetése. A technológiai célkitűzés a gépkocsinak, és utasainak a közúti úthálózat igénybevételével az (a) pontból a (b) pontba való eljuttatása. Ehhez igénybe kell venni a gépkocsi energiaellátó rendszerét, amely az üzemanyag elégetéséből mechanikai energiát termel (ennek az energiának a felhasználásával hajtjuk a kerekeket, gyorsítjuk a tömeget, leküzdve a légellenállást, a súrlódást, az emelkedők miatti terhelést, és ez az energiaforrása a gépjármű üzemeltetéséhez szükséges segédenergiáknak is). A gépjármű vezetője – a motor elindítását követően – információkat szerez be a motor megfelelő üzemállapotáról, a biztonsági berendezések működőképességéről, a motor fordulatszámáról, a hűtővíz hőmérsékletéről, az olajnyomásról, az akkumulátor töltöttségi állapotáról, a forgalmi helyzetéről, az időjárásról, és az útviszonyokról, a gépkocsi sebességéről, stb. Ezen információk egy részét a mérőműszerek, illetve a fedélzeti számítógép szolgáltatja, és a műszerfalon

kijelzi, egy másik részét pedig a vezető a közvetlen érzékelés (látás, hallás, stb.) alapján észleli. Mindezen információkat feldolgozza, majd ennek eredményeként rendelkezéseket ad ki a jármű kezelőszerveinek működtetésére (a beavatkozásra). A rendelkezések végrehajtására szolgáló beavatkozások lehetőségei: kezeli a kormányművet, a gázadagolással és a fékrendszerrel változtatja a sebességet, a tengelykapcsoló működtetésével szétkapcsolhatja az energia átalakító rendszert a hajtóműtől, az időjárási viszonyoktól függően be-, vagy kikapcsolja az ablaktörlő lapátokat hajtó szervomotorokat és a klíma berendezést, a forgalmi szituációtól függően fékez, gázt ad, és manőverez, kezeli a navigációs rendszert, ha a „normális” üzemben zavarok lépnek fel, az ezek megszüntetésére intézkedéseket hoz, információkat szolgáltat a forgalomban lévő többi jármű számára, stb. A technika mai szintjén sok automatikus irányítási rendszer már eleve tehermentesíti a vezetőt az irányítás bizonyos részfeladatainak ellátásától (motor hőmérséklet szabályozás, kipörgés gátló, blokkolás gátló, automatikus sebességváltás, világítás automatikus ki-be kapcsolása, automatikus klímaszabályozás, olajnyomás szabályozás, a segédenergia rendszer feszültség szabályozása, ablaktörlés szabályozás, stb). Ezek a részrendszerek általában emberi közreműködés nélkül működnek, a vezető ezeket csupán felügyeli. A járműipar fejlődésével egyre több részfeladatot lehet emberi közreműködés nélkül megoldani, arra azonban még sokat kell várni, hogy az embert a jármű irányításában való résztvételtől teljesen tehermentesíteni lehessen. Az irányításra jellemző **érzékelés, ítélet alkotás (az információk feldolgozása), rendelkezés adás, és beavatkozás** funkciói nem csak a vezető által végzett globális járműirányításban, hanem az automatikus részirányítások mindegyikében is fellelhetők.

A gépjármű **tempomat** sebességszabályozási rendszere képes a jármű állandó sebességének a biztosítására, ha a rendszert az arra alkalmas forgalmi viszonyok mellett aktivizáljuk. A menetszél változás okozta terhelések, nemkívánatosan változtathatják a jármű sebességét. Az automatikus irányító rendszer sebességérzékelő szerv (*szenzor*) segítségével méri a jármű tényleges v sebességét (érzékelés). Egy központi számítógép memóriájában tárolható a sebesség megkívánt v_a értéke. A számítógép aritmetikai egysége előállítja a kívánt-, és a tényleges sebességek $v_e = v_a - v$ különbségét, és ezt követően gondoskodik arról, hogy annyi üzemanyag áramoljon a motorhoz, ami e különbség megszüntetéséhez szükséges (rendszerelérés és beavatkozás). Ez rendszerint annak az intézkedésnek a végrehajtásával jár, hogy egy beavatkozó szerv (*aktuátor*) megfelelő mértékben mozgatja a gázpedált, és ezzel változtatja a motorba vitt üzemanyag mennyiségét. A vezető beállíthatja a sebesség előírt v_a értékét, amit a jármű tempomat irányító rendszere a tényleges sebesség vonatkozásában általában be is tart. Ha a vezetőnek hirtelen fékeznie-, vagy gyorsítania kell, az irányító rendszer „kikapcsol”, és ismételt aktivizálása csak újabb vezetői utasításra történik.

Hasonló elvnek megfelelően működik a motor hőmérséklet szabályozásának irányítási rendszere is. Egy hőmérsékletérzékelő (pl. götzenziós hőmérő) méri a hűtővíz tényleges v hőmérsékletét, és ha ez egy beállított v_a előírt értéket meghalad, akkor az irányító rendszer nyitja a vízáramba tett szelepet, és bekapcsolja a hűtőventillátort. Ezeket a funkciókat szerkezeti szinten is megvalósító berendezés a **termosztát**.

A gépjármű üzemeltetése azt is igényli, hogy villamos segédenergia álljon rendelkezésre a különféle elektronikus rendszerek működtetésére. A villamos segédenergiát egy, a motor által hajtott villamos generátor, illetve az akkumulátor szolgáltatja. A villamos feszültség általában 12V, és ennek állandósága elvárható követelmény, mivel ez a segédenergia forrás táplálja a fedélzeti számítógépet, a világítási hálózatot, a gyújtási rendszert, a közlekedési követelményeknek megfelelő jelzőrendszert, a szórakoztató elektronikát, és ez szolgáltatja azt a segédenergiát is, ami a gépjármű elindításához, és az egyéb irányítási rendszereinek működtetéséhez is szükséges. Mindezen okok miatt a villamos segédenergia forrással szemben jogos igény, hogy ennek 12V feszültségű szintje a mindenkori terheléstől, illetve a motor fordulatszámától függetlenül állandó legyen. Ezt az elvárást a jármű **feszültség szabályozási rendszere** elégíti ki. Érzékelő szerv méri a feszültség u aktuális értékét, amely összehasonlítható ennek kívánt $u_a = 12V$ előírt értékével. Ha – például a fényszórók bekapcsolása miatt, a feszültség lecsökken – eltérés keletkezik a feszültség kívánt-, és az aktuális értékei között, és ezt a eltérést meg kell szüntetni. A feszültség szabályozási rendszer az eltérés hatására megváltoztatja a generátor gerjesztő áramát, aminek eredményeként a feszültegegyensúly helyreáll. A **feszültség szabályozó** gondoskodik az akkumulátor megfelelő töltöttségének biztonságáról is.

A jármű vezetője – mintegy élő biológiai szervezet – önmagában is sok autonóm szabályozási rendszert tartalmaz (vérnyomás szabályozás, vércukorszint szabályozás, hőmérséklet szabályozás, szívritmus szabályozás stb.). Ezek működési mechanizmusai az emberi agy irányításával, tudatunktól függetlenül mennek végbe. A jármű ember által végzett irányításnak egy része, felügyeli a jármű részrendszereinek működését, más része pedig – érzékelő szerveivel (látás, hallás, szaglás, egyensúlyérzés, stb.) beszerzett információk alapján – vezeti a járművet (végtagjainak segítségével motorikusan kezeli a kormányt, a féket, a gázpedált, a sebességváltót, a kezelő szerveket). Ez szintén az emberi agy tevékenységének az eredménye. Ha a technikailag megoldottak tekinthető, és a termosztát által végrehajtott motor hőmérséklet szabályozást (a hűtővíz hőmérséklet növekedésének hatására a götzenziós hőmérő nyitja a hűtővíz mennyiségét befolyásoló szelepet, és bekapcsolja a hűtőventillátort), hasonlítjuk az emberi test hőmérsékletének szabályozásához, szembetűnően jelentkezik az irányítás minősége, és bonyolultsága közötti különbség. Az évmilliókban mérhető evolúciós átalakulás folyamán, az emberi agy által elektrokémiai folyamatok sorozatával végrehajtott irányításoknak olyan rendszerei alakultak ki, amelyekhez képest a legbonyolultabb, technikailag megvalósítható megoldások is csupán kezdetleges utánpótlások. Napjaink élettani, biológiai kutatásainak jelentős területei az emberi agy működésének „megfejtésére” irányulnak. Az élettani folyamatok sokrétűsége, és bonyolultsága miatt, gyorsan megszerzhető eredményekkel ezek a kutatások nem kecsegtetnek.

Az irányítási feladatok ellátásában az információ szerzés eszközei az **érzékelő szervek (szenzorok)**. Az információ feldolgozás eszköze a **szabályozó (controller)**, amely az egyszerű kétállású kapcsolótól, a villamos-, pneumatikus-, hidraulikus szabályozókon át, a folyamatirányító digitális számítógépig terjed. A szabályozási algoritmust realizálja, a beszerzett információk alapján *kiszámítja*, hogy milyen mértékű beavatkozásra van szükség, és ennek végrehajtására rendelkezést ad. A szabályozási algoritmus egy lehetséges elve a szabályozott jellemző y_A kívánt-, és y tényleges értékének különbségével (a $h = y_A - y$ hibával) arányos beavatkozás, igényesebb követelmények kielégítésére az algoritmusképzésbe bevonható a hiba differenciálhányadosa, integrálja, vagy a folyamat egyéb jellemzői is. A beavatkozás feladatát a **beavatkozó szervek (aktuátorok)** látják el. Ezek működtetése gyakran segédenergiát igényel, ennek forrásául villamos, pneumatikus, és hidraulikus tápegységek szükségesek.

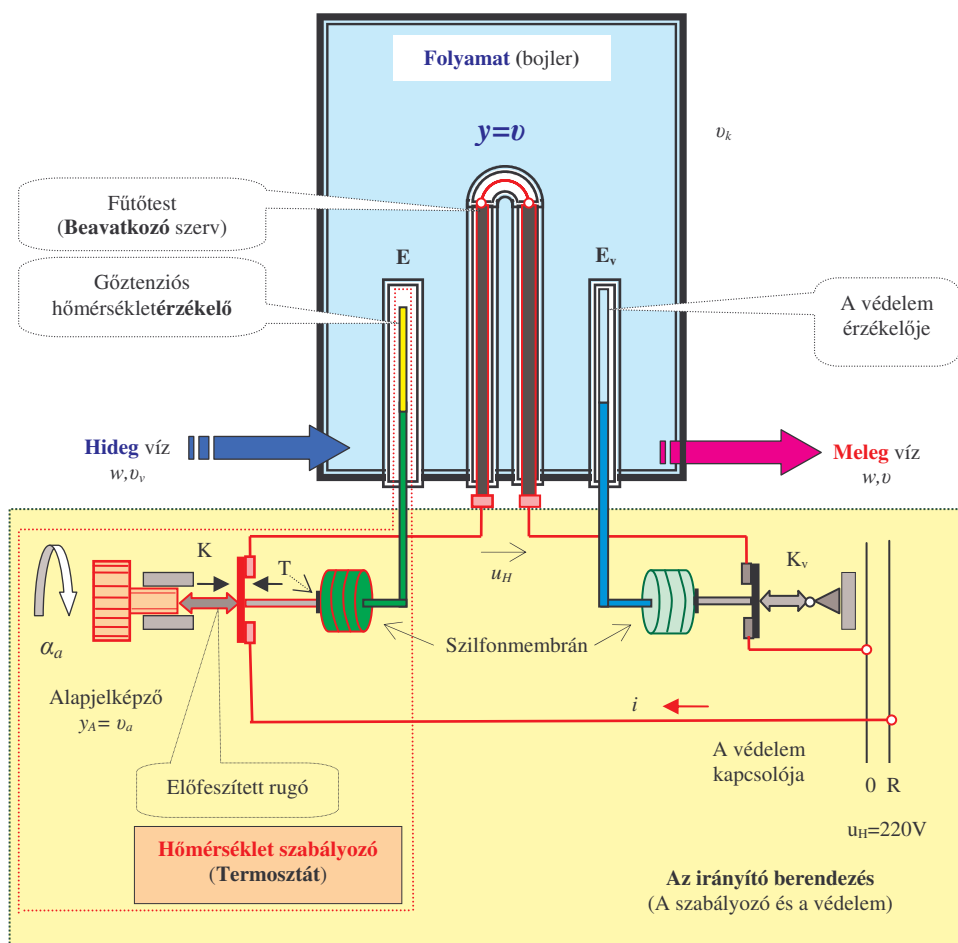
A szabályozási rendszer szerkezeti vázlata

A *szerkezeti vázlat* a különféle ipari szabályozások tényleges elrendezését, szerkezeti megoldásait, áramköri kapcsolási vázlatait, olyan mélységű részletezéssel tartalmazzák, amelynek alapján a szabályozó berendezés egyes szerveinek-, és magának a teljes szabályozási rendszernek is, a fizikai működése megvalósul. Ennek megfelelően, (miután az irányítások igen sokfélék) a szerkezeti vázlatok is igen változatos képet mutatnak. A szerkezeti vázlatot három bevezető példán – jelentős sematizálással – illusztráljuk. Ezek a példák az **állásos**-, az

arányos-, és az **integrál** szabályozás működését vannak hivatva illusztrálni, egyszerűségüknél fogva alkalmasak a statikus-, és dinamikus jelenségek szemléltetésére.

Melegvíztároló hőmérsékletszabályozása (állásos szabályozás)

A szabályozási rendszer működésének bemutatására tekintünk egy igen egyszerű, a háztartások jelentős részében megtalálható melegvíztároló (villanybojler) hőmérsékletszabályozásának szerkezeti vázlatát. Az adott folyamat esetében az irányítási cél a bojlerben tárolt víz $y=v$ [°C] hőmérsékletének egy **beállítható**, $y_A=v_A$ [°C] **állandó értéken** való tartása². Ez egy állásos szabályozó³ alkalmazásával (amely a villamos fűtés ki-be kapcsolgatásával oldja meg az irányítási feladatot), a **háztartási igényeket kielégítő pontossággal** biztosítható. Az ábrán vázolt melegvíztároló egy átfolyásos rendszerű, a vízvezeték hálózat P_T [N/m²] nyomása alatt álló hengeres tartály, amelybe a beáramló hideg víz hozama w [m³/s], és hőmérséklete v , [°C]. A tartályba lévő vizet az R [Ω] fűtőellenálláson fejlesztett hővel melegítjük, ennek eredményeként a melegvíz hőmérséklete $y=v$. Az ellenálláson hővé alakított villamos teljesítmény az ellenállásra kapcsolt u_H [V] hálózati feszültséggel befolyásolható. A tartály külső felületén a $v-v_k$ hőmérsékletkülönbségtől függő hőmennyiség távozik a v_k [°C] hőmérsékletű környezetbe, így a bojlerben lévő víz v hőmérsékletére – bármilyen jó is a bojler hőszigetelése – a v_k is befolyást gyakorol. A szabályozási cél az $y=v$ **szabályozott jellemző** állandó értéken való tartása, függetlenül a **zavaró jeleknek** tekintett $u_{z1}=w$, $u_{z2}=v$, $u_{z3}=v_k$ jelek változásaitól. A szabályozási feladat az adott elrendezés szerint üzemelő rendszerben úgy valósul meg, hogy az **E** gözteniós hőmérővel⁴ érzékeljük a bojlerben lévő víz $y=v$ **tényleges** hőmérsékletét, és ha ez eltér egy előzetesen beállított $y_A=v_A$ **előírt** értéktől (az **alapértéktől**), akkor az u_H hálózati feszültségnek az R ellenállásra történő ki-, vagy be kapcsolásával a hővé alakuló villamos teljesítményt befolyásoljuk. A rendszer szerkezeti vázlata:



1.ábra
Villanybojler hőmérsékletszabályozásának szerkezeti vázlata

Az alkalmazott szabályozó berendezés (a **termosztát**) a hőmérséklet-érzékelőn túlmenően egy ún. szilfonmembránt, a v_a **alapjelet** reprezentáló előfeszített rugót és egy K kapcsolót is tartalmaz. A hőmérséklet növekedésekor a gözteniós hőmérőben a nyomás növekszik,

² Az $y=v$ [°C] **tényleges** víz hőmérsékletet a folyamat **szabályozott jellemzője**, melynek beállítható, (előírt) értéke az $y_A=v_A$ **alapérték**.

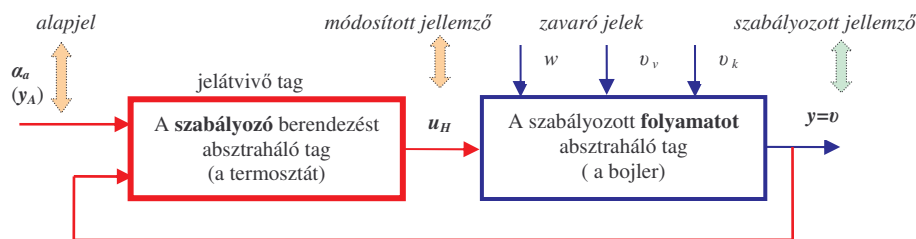
³ A kétállású állásos szabályozó kimenő jelének – miközben a bemenő jele befutja a működésének teljes intervallumát – két diszkrét értéke van. Az adott példában ez a fűtőellenálláson lévő u_H hálózati feszültség, ami vagy 220 [V] (ha a K kontaktus zárva van), vagy 0 [V] (ha a K kontaktus nyitva van). Az állásos szabályozót ennek egyszerűsége, valamint kedvező ára miatt jelentős gyakorisággal alkalmazzák a szabályozási feladat ellátására. Igényesebb követelmények kielégítésére azonban más megoldások szükségesek.

⁴ A gözteniós hőmérő a bojlerben lévő víz $y=v$ [°C] hőmérsékletét a vele arányos gözteniós nyomással alakítja át. Szerkezeti kialakítása egy vékonyfalú, jó hővezető képességű rézcső, amely párolgni képes folyadékkal (pl. klórbenzollal) van félig feltöltve. Ha a víz hőmérséklete növekszik, a csőben lévő folyadék párolgásának intenzitása is növekszik, ami növeli a párolgási nyomást is. Ez a nyomás alakul át a szilfonmembránra a víz hőmérséklettel arányos erővé.

ez a szilfonmembránon erővé alakul, amely erő a membrán T talppontját a rugóerő ellenében elmozdítja, és ez a K kapcsoló nyugalmi érintkezőjét nyitja. Ez a fűtőtest áramát kikapcsolja, ami a v hőmérséklet csökkenéséhez vezet. Ennek hatására az érzékelő szerv gözteniós nyomása is csökken, aminek következtében az előfeszített rugó a K kapcsolót zárja, ez áramot indít a fűtőellenállásokon, stb. Az állásos szabályozót tartalmazó irányítás jellegzetes tulajdonsága, hogy a szabályozott jellemzőnek nincs állandósult értéke, hanem egy ún. $i=\Delta y$ ingadozási sávban kvázistacioner lengéseket végez. Ennek az ingadozási sávnak az értékét a kapcsolási **hiszterézis**⁵, illetve a folyamat időképlettelése befolyásolja.

A tartályba egy másik érzékelő szerv is be van építve (E_v), ennek **védelmi** feladata van. Ha ugyanis a szabályozó kontaktusai túlzott igénybevétel miatt beégnének, vagy az érzékelő meghibásodik, a K kapcsoló nem tudna kinyitni, ezért a víz túlzottan felmelegszik, rosszabb esetben felforr, és a keletkező gőznyomás miatt a bojler esetleg fel is robban. Ennek a „katasztrófa helyzetnek” az elkerülésére szolgál a (védelmi célból beépített) E_v hőmérő, amely úgy van méretezve, hogy $v_{max}=90$ [°C] értéknél hozza működésbe saját K_v kontaktusát, és „megszólalása” esetén visszakapcsolást sem engedélyez. **Ehhez hasonló funkcióval rendelkező védelmek ellátására általában minden igényesebb szabályozásnál sor kerül**⁶.

Az irányításban lejátszódó jelenségek leírására a *hatásvázlattal* történő absztrakciót használjuk. Ebben elvonatkoztatunk a szerkezeti-áramkörtől kialakítás tényleges elrendeződésétől. *Jelátvivő tagokkal* ábrázoljuk a folyamatot (pl. a bojler), és a teljes szabályozó berendezést (pl. a gözteniós hőmérsékletérzékelőt, a szilfonmembránt, az alapjelet előállító előfeszített rugót és az előfeszítést beállító tárcsát, a K kontaktust). Ezek a tagok a kimenő–bemenő jelek közötti függvénykapcsolatokat szimbolizálják. A folyamat bemenő jelei az u_m **módosított jellemző** (a példában az ellenállásra kapcsolható u_H hálózati feszültség), és az u_z zavaró jelek (a hidegvíz w hozama, v_v hőmérséklete, és a v_k környezeti hőmérséklet), kimenő jele az $y=v$ szabályozott jellemző. A szabályozó berendezést absztraháló tag bemenő jelei az $y_A = v_A$ alapértéket (az y kívánt értékét) képviselő u_a **alapjel** (az alapjelképző tárcsájának hőmérsékletben skálázott α_a elfordulása, amelynek segítségével az előfeszített rugóban keltett erő állítható be), és az $y=v$ szabályozott jellemző, kimenő jele az u_H irányító jel, amely egyébként egyben a folyamat bemenő jele is. A szerkezeti vázlatnak megfelelő hatásvázlat:



2. ábra

Villanybojler hőmérsékletszabályozásának hatásvázlata

Egyenáramú villamos motor fordulatszám–szabályozása (arányos szabályozás)

A szabályozási feladat az állandó gerjesztő fluxusú egyenáramú motor $y=\omega$ [rad/sec] szögsebességének (illetve az ennek megfelelő fordulatszámának) állandó értéken való tartása, függetlenül az $u_z=m_t$ [Nm] terhelő nyomaték változásaitól. Mivel az állandó gerjesztésű egyenáramú motor fordulatszámja a terhelő nyomatékon túlmenően a gép u_m [V] kapocsfeszültségétől is függ, a szabályozási feladat úgy oldható meg, hogy a terhelésnövekedés okozta fordulatszám csökkenést a kapocsfeszültség adott mértékű, szándékolt megnövelésével mérsékeljük. Mindezt – egy alkalmasan megválasztott szerkezeti megoldással – emberi (gépkészlelői) közreműködés nélkül is megvalósíthatjuk⁷. A **fordulatszám–szabályozás** szerkezeti-áramkörti elrendezése látható a következő ábrán. Ezen a szerkezeti vázlaton a külsőgerjesztésű egyenáramú motor képviseli a szabályozott folyamatot, szabályozott jellemző a motor fordulatszáma, illetve az ennek megfelelő $y=\omega$ szögsebesség (3. ábra).

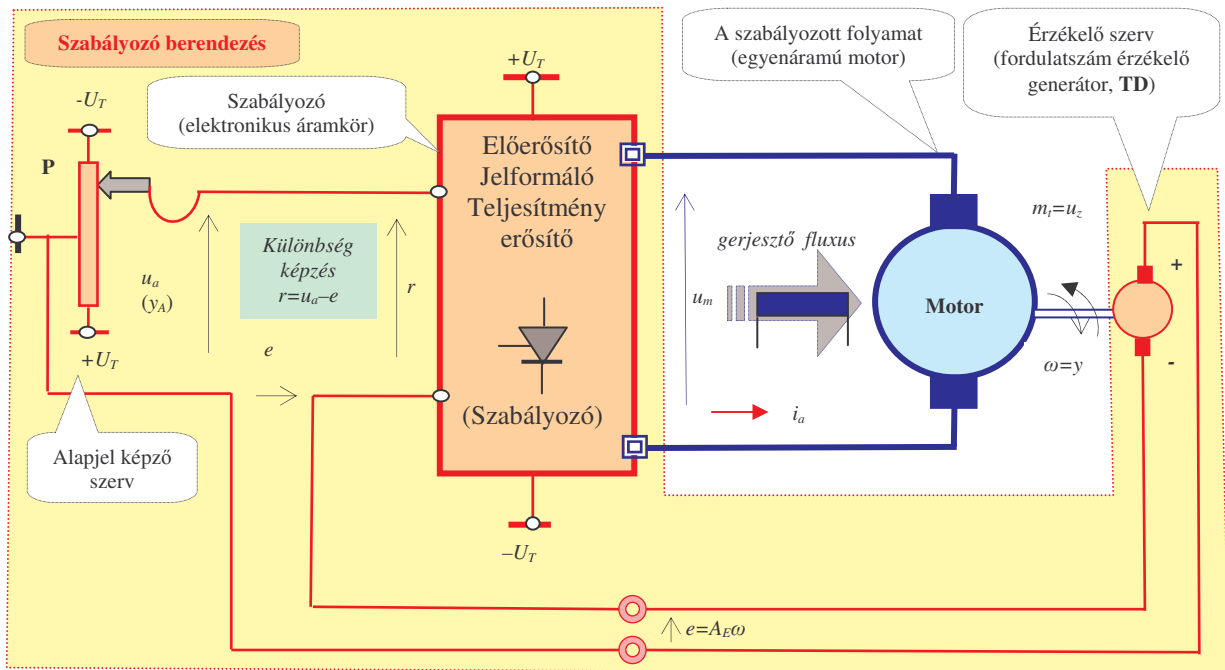
A fordulatszám mérő **TD** generátor (érezkelő szerv: tachométerdinamó) állítja elő az $y=\omega$ fordulatszám mindenkor tényleges értékének megfelelő e [V] ellenőrző jelet, amely arányos a gép fordulatszámával: $e=A_E y=A_E \omega$, ahol A_E az **érezkelő szerv átviteli tényezője**. A fordulatszám kívánt értékét (az y_A alapértéket) az alapjel képző szerv (potencióméter, **P**) u_a [V] alapjele reprezentálja. Az alapjel, és a szabályozott jellemző különbségének képzése (a hibával arányos r [V] rendelkező jel⁸ előállítás) most igen egyszerű, miután u_a és e jelek jelhordozója villamos egyenfeszültség. Ezért a két feszültség „szembekapcsolásával” a rendelkező jel jön létre. Az r rendelkező jellel befolyásolható a szabályozó u_m kimenő jele (a módosított jellemző), amely most a motor kapocsfeszültsége. A zavarelhárítás hatásmechanizmusa: ha a terhelőnyomaték növekedése miatt a gép fordulatszáma *csökken*, akkor az érzékelő szerv e kimenő jele is csökken. Állandó u_{a0} alapjel mellett az r rendelkező jel növekszik, ami a motor u_m kapocsfeszültségét *növeli*. Ez a kapocsfeszültség növekedés a fordulatszám terhelés okozta csökkenését mérsékelni igyekszik. Ha stabilis a zárt szabályozási rendszer, akkor állandó u_{a0} alapjel, és u_{z0} zavaró jelek mellett a szabályozási hurok minden jele előbb–utóbb az egyensúlyi értékére áll be. A szabályozás jellegzetes tulajdonsága, hogy egy tetszőleges $y_0=\omega_0>0$ szögsebesség fenntartásához $u_{m0}>0$, illetve az $u_{m0}>0$ fenntartásához $r_0>0$ jelek szükségesek, vagyis az **állandósult állapotban az $r_0=u_{a0}-A_E \omega >0$ hibajel nem lehet zérus**. Ez az arányos szabályozásoknak egy jellegzetes ismérve.

⁵ A hiszterézis minden állásos kapcsoló természetes tulajdonsága, és azt jelenti, hogy nem pontosan ugyanazon bemenőjel értéknél történik a kimenő jel ki-, és bekapcsolása.

⁶ A *Chellanger*, a *Columbia*, és a *Csernobil* katasztrófák intő példák arra nézve, hogy az irányítási feladatok megoldása mellett a védelmi rendszerek kialakítására is fokozott figyelmet kell fordítani.

⁷ Az egyenáramú gép fordulatszámának kézi szabályozásakor mérőműszerrel kell mérni a motor fordulatszámát, és ha ez a fordulatszám megváltozna, a gépkészlelő – egy célszerűen kiválasztott, beállítható feszültséget szolgáltató tápegység feszültségének változtatásával – növeli-, vagy csökkenti a motor u_m kapocsfeszültségét. Az automatikus szabályozó a gépkészlelő szerepkörét veszi át.

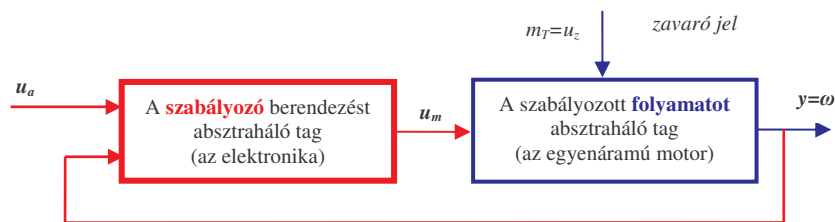
⁸ Az u_a alapjel úgy aránylik szabályozott jellemző y_A alapértékéhez (a szabályozott jellemző előírt értékéhez), ahogy az e ellenőrző jel az y tényleges értékéhez: $u_a/y_A = e/y = A_E$. A rendelkező jel pedig $r = u_a - e = u_a - A_E y = y_A A_E - y A_E = A_E (y_A - y) = A_E h$, ahol $h = y_A - y$ a hiba. Az r rendelkező jelet – mivel arányos a szabályozott jellemző előírt-, és tényleges értékének különbségével, hibajelnek is nevezik.



3. ábra

Egyenáramú motor automatikus fordulatszám szabályozásának szerkezeti-áramköri vázlata

Az adott szerkezeti vázlattal rendelkező fordulatszám-szabályozás hatásvázlata:



4. ábra

Egyenáramú motor automatikus fordulatszám szabályozásának hatásvázlata

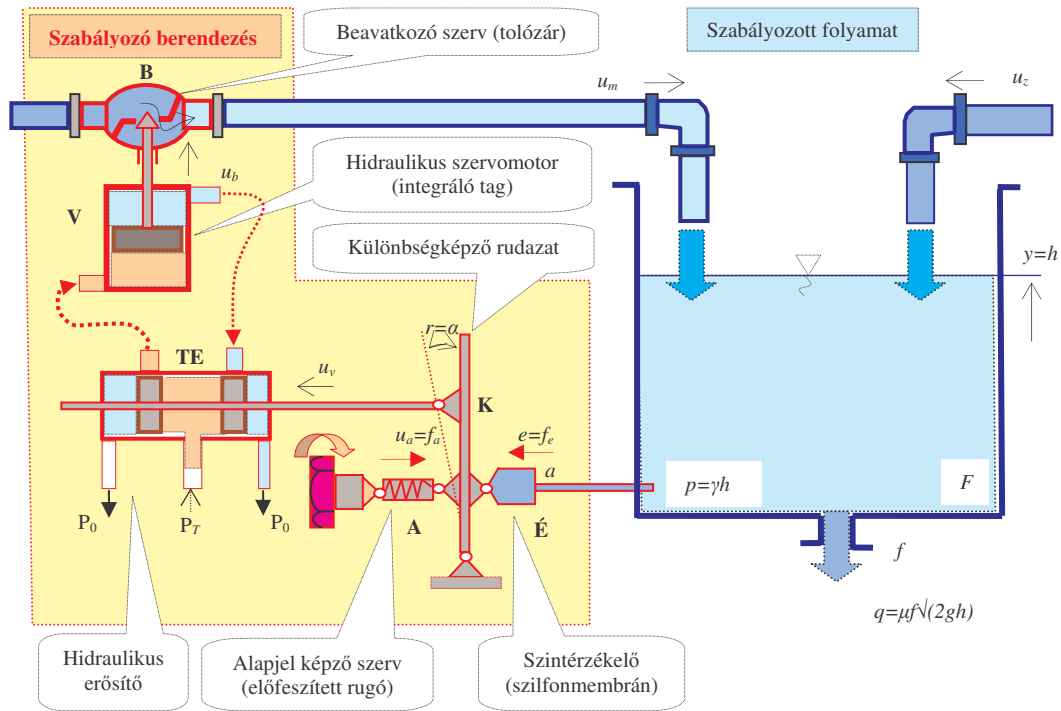
Szintszabályozás szerkezeti vázlata (integrálszabályozás)

A szabályozási feladat egy szabadkiömléssel rendelkező tartály $y=h$ [m] folyadékszint helyzetének az állandó értéken való tartása, függetlenül attól, hogy a tartályba beáramló u_z [m³/sec] folyadékhozam hogyan változik. Erre lehetőséget az terem, hogy az u_z hozam szinthelyzetre gyakorolt nemkívánatos hatását az u_m [m³/sec] hozam szándékos megváltoztatásával egyenlítsük ki. Az F [m²] keresztmetszetű hengeres tartály **szintszabályozásának** szerkezeti vázlatát tartalmazza az 5. ábra.

Az $y=h$ szinthelyzettel (a szabályozott jellemzővel) arányos az érzékelési helyen keletkező γ [N/m³] fajsúlyú folyadék $p=\gamma h$ [N/m²] hidrosztatikus nyomása, amit az a [m²] keresztmetszetű szilfonmembrán (érzékelő szerv) $f_e = pa = \gamma ha$ [N] erővé alakít át. Ez az f_e erő – az y szabályozott jellemzővel arányos – ellenőrző jel. Az f_e erőt ellensúlyozza az előfeszített rugóban keletkező f_a [N] rugóerő. Ennek a rugóerőnek az az értéke, amelyik a rendszer egyensúlyi állapotához tartozik, a rendszer $u_a = f_a$ [N] alapjele. A beavatkozó szerv egy tolzár, amelynek nyitásával, vagy zárásával befolyásolható a tartályba áramló u_m hozam (a módosított jellemző). Az ábrán egy olyan egyensúlyi helyzetet tüntettünk fel, amikor is az u_m és u_z hozamok állandó értékek, és a h_0 szinthelyzet $q_0 = \mu f \sqrt{2gh_0} = u_{m0} + u_{z0}$ [m³/sec] kiáramló hozamot⁹ tart fenn. Ebben az állapotban $f_{a0} = f_{e0}$, a különbségképző rudazat függőleges, és a hidraulikus erősítő vezérlő tolatyú elzárják a P_T [N/m²] hidraulikus tápnyomás elől a szervomotort. A tolzár ekkor egy adott u_{b0} [m] pozícióban áll. Ha ebben az egyensúlyi helyzetben például az u_{z0} hozam (a zavaró jel) Δu_z értékkel megnövekszik, ez az y_0 , az e_0 , az r_0 , az u_{a0} , az u_{b0} , és az u_{m0} jelek Δy , Δe , Δr , Δu_a , Δu_b , és Δu_m értékekkel történő megváltozásait vonja maga után. Az Δu_v elmozdulás a hidraulikus tápegység P_T nyomását a szervomotor dugattyújának alsó felére kapcsolja, aminek hatására a szervomotor mozgásba jön, és zárja a tolzárát. Ez az u_m hozam, és azon keresztül az y szinthelyzet csökkenéséhez vezet. Új egyensúly akkor áll be, ha a tolzár mozgása megszűnik. Ez pedig akkor következik be, ha a különbségképző rudazat ismét függőleges helyzetbe kerül, vagyis amikor **a szinthelyzet az eredeti y_0 értékére visszaáll**. A vázolt szabályozásban egyensúly kizárólag akkor állhat elő, amikor a K rudazat függőleges, mert ez teremti meg azt a lehetőséget, hogy a szervomotor nyugalmi helyzetben legyen. Ebből pedig az is következik, hogy az y szinthelyzet mindig ugyanarra az értékre áll be, függetlenül az u_z hozam megváltozott

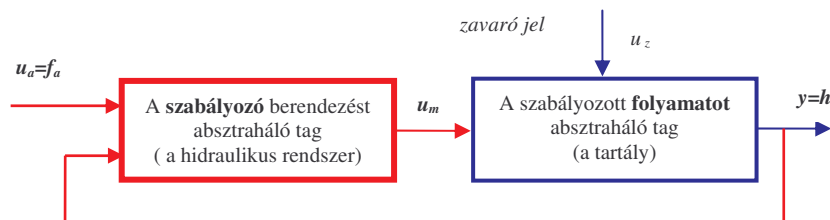
⁹ Ezt a q_0 hozamot a tartály alján lévő hidrosztatikus nyomás határozza meg, és a h_0 szinthelyzet $q_0 = \mu f \sqrt{2gh_0} = k \sqrt{h_0}$ nemlineáris függvénye (μ a kifolyási tényező, f [m²] a kifolyási keresztmetszet, g [m/sec²] a nehézségi gyorsulás). A szinthelyzet nyugalmi helyzetében az $u_{m0} + u_{z0}$ beáramló hozamok összegének szükségszerűen azonosnak kell lennie a q_0 kiáramló hozammal, ezért nyugalmi helyzetben $q_0 = u_{m0} + u_{z0}$ és ennek alapján $h_0 = h(u_{m0}, u_{z0}) = (u_{m0} + u_{z0})^2 / (2 \mu^2 f^2 g)$.

állandó értékétől¹⁰, vagyis **állandósult állapotban az r hibajel (és így a $h=y_a-y$ hiba is) zérus**. Ez az integrálszabályozásoknak egy jellegzetesen előnyös ismérve, és a hidraulikus erősítő és szervomotor integráló tulajdonságából származtatható.



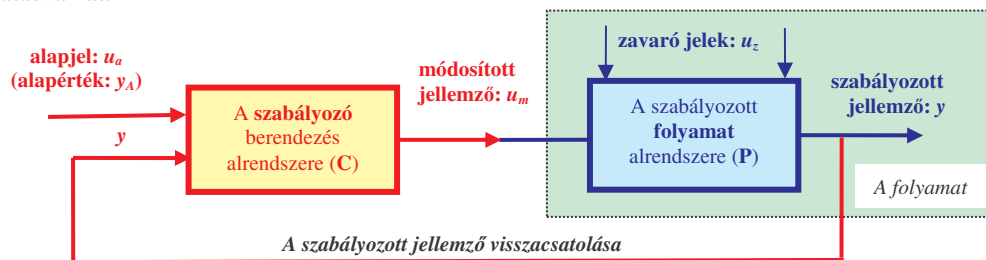
5. ábra
Tartály szintszabályozása

A szintszabályozás szerkezeti vázlatának megfelelő hatásvázlat a 6. ábrán látható.



6. ábra
Tartály szintszabályozásának hatásvázlata

A bevezető példák alkalmat adnak a szabályozási feladat megfogalmazásának általánosítására. Az irányított folyamat (*process*, **P**) valamely y mértékadó jellemzőjét (a szabályozott jellemzőt, amelyet az automatikus irányítás segítségével szabályozni kívánunk) az u_z zavaró jelek *nemkívánatosan*–, az u_m módosított jellemző pedig a szabályozó berendezésben (*controller*, **C**) realizálódó szabályozási algoritmustól függően, *szándékosan* befolyásolja. A szabályozási rendszer jelátviteli viszonyait – absztrahált formában – megjelenítő, általánosan érvényes hatásvázlat:



7. ábra
Az „egyhurkos” szabályozás hatásvázlata

¹⁰ Ez a megállapítás addig érvényes, amíg a rendszer a működési tartományában van. Ha a szervomotor felüttközik, vagy a tartályban túlfolyás állna elő, a rendszer a működési tartományát elhagyta.

A hatásvázlaton a teljes szabályozó berendezést (érzékelő-, alapjel képző-, különbségképző-, előerősítő-, jelformáló-, teljesítményerősítő-, végrehajtó-, helyzetbeállító-, beavatkozó szerveket, valamint az ezek működtetéséhez szükséges járulékos berendezéseket), és az irányított folyamatot (a szabályozott szakaszt) bemenő–kimenő jeleket tartalmazó jelátvivő tagokkal absztraháltuk. Az absztrakcióval elvonatkoztatunk a tényleges szerkezeti-, áramköri-, technológiai-, stb. megoldásoktól, és kizárólag a bemenő-, kimenő jelek közötti függvénykapcsolatokra „fókuszálunk”. A szerkezeti vázlat, vagy a hatásvázlat alapján több kérdés fogalmazható meg az irányítási rendszer működési tulajdonságait illetően. Ezek közül néhány fontosabb:

- Milyen matematikai modellel lehet leírni a folyamatot* (pl. a bojler, az egyenáramú motort, a tartályt), *a szabályozó berendezést* (pl. a termosztátot, a motort szabályozó elektronikát, a hidraulikus erősítőt és szervomotort), *illetve a teljes szabályozási rendszert? A hatásvázlat bemenő-, és kimenő jelei között milyen függvénykapcsolatok vannak?* **(Modellalkotás)**
- Adott, állandó értékű u_{a0} alapjel-, és u_{z0} zavaró jelek mellett létrejöhet-e az y szabályozott jellemzőnek y_0 egyensúlyi értéke, és ha igen, akkor mekkora ez az érték?* **(Stabilitásvizsgálat, analízis)**
- Milyen elvek alapján, milyen paraméterekkel kell megválasztani a szabályozó berendezés jelátviteli tulajdonságait leíró függvényeket?* **(Algoritmus tervezés)**
- Az alapjelet* (például a bojlerben lévő víz hőmérsékletének-, a motor szögsebességének-, a tartály színhelyzetének, az előírt értékét megjelenítő jelet) *egy magasabb értékre állítjuk* (mert melegebb vizet-, nagyobb fordulatszámot-, magasabb színhelyzetet szeretnénk előállítani). *Létre jön-e, és ha igen, akkor milyen módon, és mekkora idő alatt a szabályozott jellemző új egyensúlyi értéke? Milyen lehetőség van a beállási idő lerövidítésének?* **(A követési tulajdonságok analízise)**
- A zavarójel* (például a bojler betáplált vízmennyiségének-, a motor terhelőnyomatékának-, a tartály u_z hozamának) *megváltozásának hatására létre jön-e, és ha igen, akkor milyen módon, és mekkora idő alatt a szabályozott jellemző új egyensúlyi értéke? Milyen lehetőség van a zavarás szabályozott jellemzőre gyakorolt nemkívánatos hatásának-, és a beállási idő lerövidítésének csökkentésére?* **(A zavarelhárítási tulajdonságok analízise)**
- A hőmérsékletszabályozásban alkalmazott állásos szabályozó élettartalma a K kapcsoló kapcsolási számától függ. Milyen módon növelhető ez az élettartam? A fordulatszám–szabályozás-, és a szintszabályozás folytonos szabályozó berendezéseinek elemei milyen konstrukcióban épüljenek fel?* **(Hardver tervezés)**
- Milyen folytonos szabályozóval lehetne helyettesíteni az állásos szabályozót, és ez a helyettesítés javítana-e a rendszer működésén? Mi lenne ennek az ára?* **(Gazdaságossági vizsgálat)**
- stb., stb.,....*

Miután mind az irányító berendezés, mind az irányított folyamat **dinamikus rendszer**, az ezeket leíró függvénykapcsolatok többnyire magas rendszámú, a jelek időbeli differenciálhányadosait is tartalmazó **differenciálegyenletek**. Ezeket a differenciálegyenleteket a jelátvivő tagokkal leírt fizikai rendszerek **matematikai modelljének**¹¹ tekintjük. A szabályozástechnika talán legproblematisabb fejezete annak a matematikai modellnek a megalkotása, amely több–kevesebb pontossággal képes leírni a tényleges fizikai rendszer valóságos tulajdonságait. Ezt a matematikai modellt a fizikai törvényeken alapuló leírás segítségével lehet meghatározni. Ilyen törvények az anyag-, és energia megmaradásának elvei, a mechanika *Newton* törvényei és *Lagrange* energiatételei, az elektrotechnika *Kirchhoff* egyenletei, az áramlástan *Bernoulli* tételei, a hőtan gáztörvényei, stb.). A rendszer analízise során tekintetbe kell vennünk, hogy az a matematikai modell, amelynek alapján az egyes tagokat, vagy a teljes rendszer vizsgáljuk, olyan módon keletkezik, melynek során több, másodlagos jelenséget nem veszünk figyelembe, *elhanyagolásokat* teszünk. Mindezek miatt a matematikai modell elvileg nem lehet tökéletes, és csupán közelítőleg írja le a valóságos jelenségeket. A tényleges fizikai folyamat paraméterei az idő folyamán – az „öregedési” jelenségek miatt, a munkapont változásának hatására, a hőmérsékletingadozások következményeként, stb. – változhatnak. Az irányító berendezés tervezésekor ezt figyelembe kell venni, és a megfelelő mértékű paraméterérzékenységet (a „robosztusságot”) tudatosan ki kell alakítani. A teljes irányítási rendszer, és benne mindkét alrendszer matematikai modelljei igen változatosak lehetnek.

Példa

A korábban tárgyalt hajtásszabályozásban az állandó gerjesztésű egyenáramú motor-, illetve a szintszabályozásban a tartály-, differenciálegyenlet alakjában megjeleníthető matematikai modelljei:

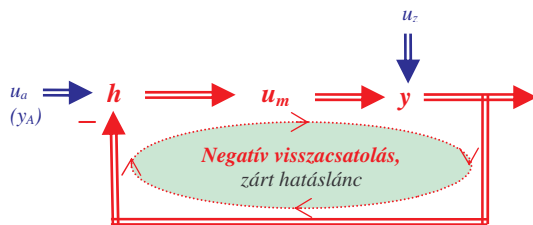
¹¹ A szabályozások vizsgálata során használt matematikai modellek különféle típusai: **statikus–dinamikus**, **lineáris–nemlineáris**, **determinisztikus–stochasztikus**, **koncentrált paraméterű–elosztott paraméterű**, **folytonosidejű–diszkrétidejű**.

$$T_m T_v \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_m \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_p u_m(t) - k_z \left(u_z(t) + T_v \frac{du_z(t)}{dt} \right)$$

$$F \frac{dy(t)}{dt} + \mu f \sqrt{2gy(t)} = u_m(t) + u_z(t)$$

Ezek a differenciálegyenletek az adott példákban a folyamatok tulajdonságait írják le. A motor matematikai modellje másodrendű, állandó együtthatójú, lineáris differenciálegyenlet, a tartály matematikai modellje elsőrendű, nemlineáris differenciálegyenlet (T_m , T_v , k_p , k_z , F , μ , f , g technológiai paraméterek).

A szabályozással megvalósuló irányítás alapelve a **negatív visszacsatolás**. A zavarásoknak a szabályozott jellemzőre gyakorolt nemkívánatos hatását olyan módon igyekszünk mérsékelni, vagy megszüntetni, hogy kijelöljük a szabályozott jellemzőnek az előírt (kívánt) értékét (az u_a alapjel által képviselt y_A alapértéket), előállítjuk a kívánt és a tényleges érték $h=y_A-y$ különbségét (a hibát, vagy az ezzel arányos $u_a-e=u_a-Ay$ hibajelet), és ennek alapján az u_m módosított jellemzőt úgy változtatjuk, hogy ez a hiba csökkenjen. (Ha például az u_z zavarójel növekedése csökkenti az y szabályozott jellemző értékét, akkor a h hiba növekszik, és ennek hatására u_m módosított jellemzőt olyan módon kell megváltoztatnia, amely y növekedését eredményezi¹²). A szabályozási struktúrában a jelek egy zárthurkú **hatásláncban** terjednek. Ennek a jelterjedésnek alapvető sajátossága, hogy a hatáslánc egy tetszőleges helyén megváltozott jel a hatásláncon végigfutva, a megváltozás helyére ellentétes előjellel érkezik vissza. A jelek közötti oksági viszonyokat a 8. ábra szemlélteti.



A nyilakkal jelzett vonalak az **ok→okozat** relációkat jelölik, például az y_A alapértéket megjelenítő u_a alapjel és az y szabályozott jellemző tényleges értékei hozzák létre a $h=y_A-y$ függvénykapcsolatnak megfelelően a h hibajelet, a h hibajel az u_m módosított jellemzőt, az u_m módosított jellemző és az u_z zavaró jellemző az y szabályozott jellemzőt, stb. A szabályozás célja: az y szabályozott jellemző a lehető legpontosabban kövesse az y_A alapértéket (követés), és a lehető legjobban hárítsa el az u_z zavarás y -ra kifejtett nemkívánatos hatását (zavarelhárítás).

8. ábra

A zárt hurkú hatáslánc

A Szabályozástechnika tudományágának egyik legfontosabb fogalma a negatív visszacsatolás¹³ (a szabályozást, a **negatív visszacsatolás elvén megvalósuló irányításnak** is definiálhatjuk).

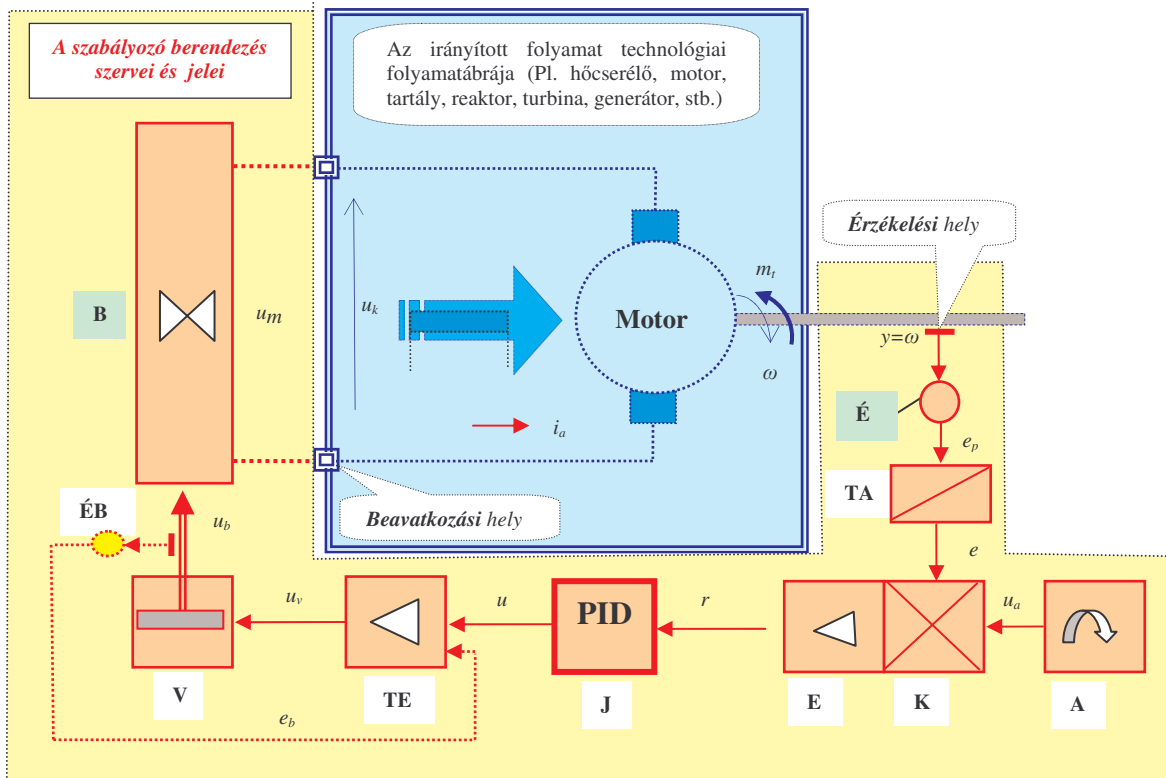
Szerkezeti vázlat, működési vázlat, hatásvázlat. A szabályozó berendezés szerve

A rendszertechnikai vizsgálatokhoz célszerűen a szabályozás hatásvázlata alkalmas. Ennek megalkotásához a szerkezeti vázlatból kiindulva – az absztrakció mélyítésével – a működési vázlaton keresztül vezet az út. A szerkezeti vázlat mellett (a szabályozási rendszer jelterjedésének ábrázolására), a rendszer **működési vázlata** is felhasználható. Ezen a működési vázlaton a technológiai folyamatábrával van feltüntetve a szabályozott folyamat (pl. melegvíztároló, egyenáramú motor, tartály, villamos gép, vegyipari reaktor, hőcserélő, kazán, turbina, villamos generátor, vagy más tetszőleges technológia), a folyamatához illesztett, és az irányítási rendszerben szerepet játszó, funkcionális feladatokat ellátó **szervek** pedig, szabványokban rögzített jelképrendszerrel kerülnek ábrázolásra. Az egyenáramú motor fordulatszám-szabályozása esetében például ezt a működési vázlatot a 9. ábra mutatja.

Az ábrán vázolt, és a következő táblázatban felsorolt szervek, a nevükben jelölt **szabályozástechnikai részfeladatokat ellátó**, kimenő-bemenő jellel rendelkező **funkcionális szerkezeti egységek**. A szervek mindegyike önmagában is egy-egy dinamikus rendszer, ami a fizikai működésmód természetes velejárója. Mindegyik szerv kimenő jele a bemenő jelének a függvénye. Igényesebb követelményeket kielégítő szervek önmagukban is visszacsatolásokat tartalmazhatnak. A jelformáló szerv – eltérően az összes többi szervtől – szándékolatlan tervezett dinamikával rendelkezik, melynek célja az eredő szabályozási rendszer minőségi tulajdonságainak javítása.

¹² Ha az irányítást egy gépkezelő személy végzi, kézi irányításról van szó. Ekkor az irányítást végző személy – például egy mérőműszer mutatójának skála menti elmozdulásának figyelésével – érzékeli az irányított folyamat valamely y mértékadó jellemzőjét, és ha ez eltér a műszer skáláján megjelölt y_A alapértéktől, egy beavatkozó szerv segítségével úgy változtatja meg a folyamatot, hogy a folyamat valamely y -ra szándékoltnak befolyást gyakorló jellemzőjét (a módosított jellemzőt), hogy ez az eltérés csökkenjen. Az automatikus szabályozás alkalmazásával lényegét tekintve az emberi irányításnak ezt a szerepkörét kell önműködő szerkezetekkel átvenni. Ez az irányítási szerepkör nem ritkán bonyolult feladatot megoldását jelentheti (pl. utasszállító repülőgép pilótájának kiváltása robotpilótával, stb.).

¹³ Létre lehet hozni pozitívan visszacsatolt dinamikus rendszereket is, a **szabályozás azonban kizárólag negatív visszacsatolásban üzemelhet**. A pozitív visszacsatolás szándékoltnak alkalmazására akkor kerülhet sor, ha valamely szerv erősítési tényezőjét kell megnövelni, vagy integráló tagot kell megvalósítani. A pozitív visszacsatolás struktúrája fokozottan hajlamos a labilitásra.



9.ábra

A fordulatszám–szabályozási rendszer működési vázlatja és a szabályozó berendezés szervei és jelei

Szerv	Bemenő jel	Kimenő jel
Érzékelő szerv (É)	Szabályozott jellemző (y)	Primer ellenőrző jel (e_p)
Távadó (TA)	Primer ellenőrző jel (e_p)	Ellenőrző jel (e)
Alapjellel képző szerv (A)	(vezető jel)	Alapjel (u_a)
Különbésképző szerv és előerősítő (KE)	Ellenőrző jel (e), alapjel (u_a)	Rendelkező jel (r)
Jelformáló szerv (J)	Rendelkező jel (r)	Irányító jel (u)
Teljesítményerősítő (TE)	Irányító jel (u)	Végrehajtó jel (u_v)
Végrehajtó szerv (V)	Végrehajtó jel (u_v)	Beavatkozó jel (u_b)
Beavatkozó szerv (B)	Beavatkozó jel (u_b)	Módosított jellemző (u_m)
Helyzetbeállító érzékelő szerve (ÉB)	Beavatkozó jel (u_b)	Pozíció jel (e_b)

A szabályozási rendszer szervei és jelei

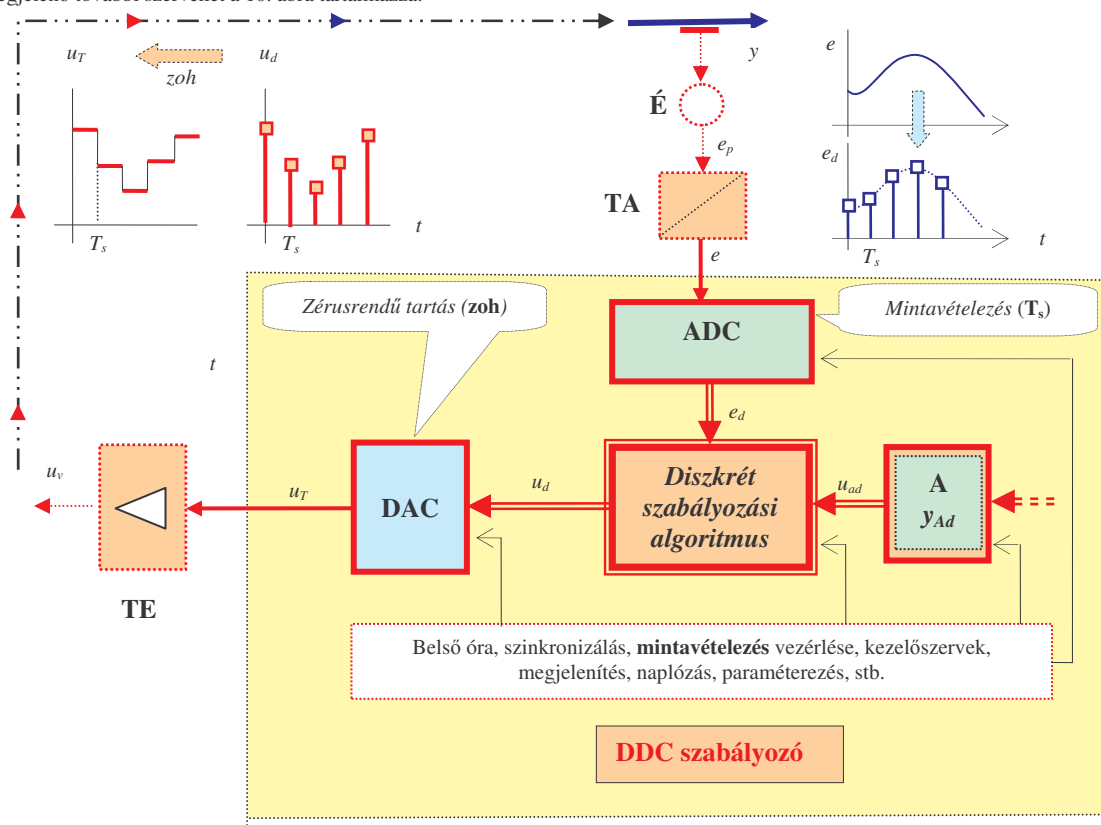
Az **érzékelő szerv** (É) feladata a szabályozott jellemzővel arányos, különbségképzésre alkalmas, e_p ellenőrző jel előállítása. Alapvető követelménye a pontosság, ideális esetben az e_p jel szigorúan arányos az y szabályozott jellemzővel. A **távadó** (TA) rendszerint egységes jeltartományra (4–20 mA, 0–5 mA, 0–10 V, stb.) alakítja át a primer érzékelő e_p ellenőrző jelét, és alkalmassá teszi az üzemben belüli jelátvitelre. Az érzékelő szerv, és a távadó együttes jelátviteli tulajdonságának lehetőség szerint az $e=A_E y$ lineáris, időkéés nélküli függvénykapcsolatot kell megvalósítania az y és e jelek között, ahol A_E az érzékelés átviteli tényezője. Az **alpjellel képző szerv** (A) állítja elő a szabályozott jellemző előírt értékét (az y_A alapértéket) megjelenítő u_a alapjelet. Az u_a alapjel úgy aránylik a szabályozott jellemző y_A előírt értékéhez, mint ahogy az e ellenőrző jel aránylik a szabályozott jellemző y tényleges értékéhez: $u_a/y_A = e/y = A_E$, vagyis $u_a = A_E y_A$. **Értéktartó** szabályozásokban az irányítási cél a szabályozott jellemző állandó értékének a biztosítása. Ekkor az alapjel egy időben állandó érték, az alapjellel képző szerv pedig egyfajta stabilizátor. **Követő** szabályozások szabályozott jellemzőjének úgy kell változnia, ahogy azt az időben változó $u_a(t)$ alapjel előírja. Ekkor az alapjellel képző szerv egy menetdiagramot előállító programadó. Más esetekben az alapjel lehet egy másik folyamat, valamely tetszőleges jellemzőjét megjelenítő jel, ilyen esetben az alapjellel képző szerv az érzékelő szervnek megfelelő készülék, amelynek bemenő jele a vezető jel. A **különbésképző szerv** (K) hozza létre az alapjel-, és az ellenőrző jel különbségét, és előállítja a különbséggel arányos $r = k(u_a - e)$ rendelkező jelet (itt valósul meg a negatív visszacsatolás!). Az ellenőrző jel, és az alapjel – miután ezeket a jeleket nagypontosságú műszerek állítják elő – energiatartalma igen alacsony, ezért a további jelfeldolgozás céljából az $u_a - e$ hibajelet a különbségképző szerv egy **előerősítővel** (E) a jelfeldolgozáshoz szükséges energiaszintre is emeli. Az előerősítőt rendszerint egy **jelformáló (kompenzáló) szerv** (J) követi, amelynek feladata az u irányító jel előállítása. Ez az u irányító jel általában a rendelkező jellel, illetve ennek integráljával-, és differenciálhányadosával arányos jelkomponenseket tartalmaz ($u = K_p r + K_i \int r dt + K_d dr/dt$), a megfelelő minőségű szabályozás megvalósítására (PID kompenzáció). A kompenzáló szerv u kimenő jelét egy **teljesítményerősítő** (TE) erősíti. A teljesítményerősítő feladata a beavatkozáshoz szükséges teljesítmény biztosítása. A teljesítményerősítéshez villamos-, pneumatikus-, vagy hidraulikus segédenergiát lehet felhasználni, ennek megfelelően villamos (félvezetős-, mágneses-, forgógépes, stb. típusok), pneumatikus (torló lemezes-, erőkompenzációs, stb. típusok), és hidraulikus (sugárcsöves-, vezérlő tolatyús-, stb. típusok) erősítőkről lehet szó. Ezek kimenő teljesítménye a W nagyságrendtől a több 100 kW nagyságrendig is terjedhet. Mindezek következményeként a teljesítményerősítő kimenő jelének (a u_v végrehajtó jelnek) a jelhordozója villamos feszültség, illetve munkalevegő-, vagy munkafolyadék nyomása. A

teljesítményerősítő és a beavatkozó szerv illesztési funkcióját látja el a **végrehajtó szerv (V)**, amelynek kimenő jele az u_b *beavatkozó jel*. Ha a beavatkozó jel elmozdulás (ez folyamatszabályozásokban gyakori eset, mivel a beavatkozó szerv sokszor a közegáramlás útját szűkítő szelep), akkor a végrehajtó szerv a teljesítményerősítő kimenő jelét elmozdulásra alakítja át. Ilyenkor a végrehajtó szerv villamos-, pneumatikus-, vagy hidraulikus **szervomotor**. Gyakori eset, hogy a szervomotor kimeneti elmozdulását érzékelő szerv méri, és ennek beállítására egy belső visszacsatolást tartalmazó szabályozási rendszert alakítanak ki. Ekkor a teljesítményerősítőt **helyzetbeállítónak** nevezik. A **beavatkozó szerv (B)** segítségével lehet a folyamat valamely mértékadó jellemzőjét (a *módosított jellemzőt*) szándékoltan befolyásolni annak érdekében, hogy a szabályozott jellemző a kívánalmaink szerint változzon: kövesse az alapjelet, illetve hártsa el a zavarások szabályozott jellemzőre kifejtett nemkívánatos hatását.

Előfordul, hogy az előzőekben felsorolt szervek nem mindegyike szerepel egy adott szabályozási rendszerben, vagy néhány funkcionális egység egy készülékbe van összeépítve. Ennek tipikus példája az, mikor egy készülékbe (a **szabályozóba**) kerül az alapelképző szerv, a különbségképző szerv, az előerősítő, és a kompenzáló szerv. Gyakran képez közös készüléket az érzékelő szerv és a távadó, illetve a teljesítményerősítő, a végrehajtó szerv és a beavatkozó szerv¹⁴ is.

Az a hely, ahol a szabályozó berendezés közvetlenül kapcsolódik a szabályozott folyamathoz, az érzékelési-, illetve a beavatkozási hely. Az érzékelő szerv és a távadó, illetve a beavatkozó szerv és a végrehajtó szerv folyamatközeli (terepi) berendezések, szerkezeti kialakításuk ennek megfelelő kell, hogy legyen.

Az irányítási algoritmus realizálásának egyre gyakrabban alkalmazásra kerülő szerkezeti egysége a *folyamatirányító digitális számítógép*. Ekkor a távadó által előállított, folytonosidejű e ellenőrző jelet **analog–digitális** átalakító (ADC) T_s időütemezéssel (*sampling time*) **mintavételezi**, és kódolt, diszkrét értékészletű, diszkrét idejű e_d digitális jellel alakítja át. A **DDC (Direct Digital Control) szabályozó** fogadja a diszkrét e_d ellenőrző jelet, memóriájában tárolja, vagy külső jelforrásból kapja az u_{ad} diszkrét alapjelet, előállítja ezek $r_d = u_{ad} - e_d$ különbségét, és rendszerint egy diszkrét PID algoritmus alkalmazásával létrehozza a diszkrét u_d irányító jelet. Ez a diszkrét irányító jel kerül a **digitális–analog (DAC)** átalakítóra, amely a digitális jelet dekódolja, és olyan, rendszerint „lépcsős lefolyású” analog u_T jellel alakítja, amely a mintavételezési időpontok között is folytonosidejű jelet tart fenn a folyamat bemenetén (**zero order holding**¹⁵, *zoh*). Az ilyen módon keletkező hibrid szabályozásban a szabályozási hurok egy részén folytonos, folyamatos analog jelek (folytonos idejű, FI jelek), egy másik részén pedig, diszkrét, mintavételezett digitális jelek (diszkrét idejű, DI jelek) az információhordozók. A hibrid rendszerben egyidejűleg jelenlévő FI-, és DI típusú jeleket a rendszer matematikai modelljének megalkotásakor figyelembe kell venni¹⁶. A hibrid rendszerben megjelenő további szerveket a 10. ábra tartalmazza.



10. ábra
Hibrid szabályozás szervei, és működési vázlata

¹⁴ A fordulatszám szabályozásában például az elektronikus teljesítményerősítő különféle áramkörei látják el a különbségképző szerv, az előerősítő, a kompenzáló szerv, a végrehajtó szerv, és a beavatkozó szerv funkciót.

¹⁵ A zérusrendű tartás (a DAC *zoh* funkciója) a leggyakrabban alkalmazott eljárás a mintavételezések közötti **állandó** jel fenntartására. Léteznek másfajta megoldások is (pl. elsőrendű tartás, másodrendű tartás, stb.). Az elsőrendű tartás két mintavétel között az utolsó két mintából extrapolált, időben lineárisan változó jelet tart fenn.

¹⁶ A folytonos idejű (**FI**) jelek időben folytonos időfüggvények [pl. $f(t) = \exp(at)\sin(bt)$]. A diszkrét idejű (**DI**) jelek a kT_s ($k: 0, 1, 2, \dots, k, \dots, \infty$) diszkrét időben értelmezett mintasorozatok (pl. az $f(t)$ folytonos idejű jelből T_s mintavételezési ütemezéssel származtatható diszkrét idejű mintasorozat: $f(kT_s) = \{0, \exp(aT_s)\sin(bT_s), \exp(a2T_s)\sin(b2T_s), \dots, \exp(akT_s)\sin(bkT_s), \dots\}$).

Szerv	Bemenő jel	Kimenő jel
Analog–digitális átalakító (ADC)	Ellenőrző jel (e_p)	Diszkrét ellenőrző jel (e_d)
Digitális–analog átalakító (DAC)	Diszkrét irányító jel (u_d)	Tartott irányító jel (u_T)
Diszkrét alapjelképző szerv (A)	(vezető jel)	Diszkrét alapjel (u_a)
DDC szabályozó (DDC)	Diszkrét alapjel (u_{ad})	Diszkrét ellenőrző jel (e_d)
	Diszkrét ellenőrző jel (e_d)	Diszkrét irányító jel (u_d)

Folytonos idejű jelek: y, e_p, e, u_T, u_v . **Diszkrét idejű jelek:** e_d, u_{ad}, u_d . **T_s :** a mintavételezési idő.

Megjegyzés

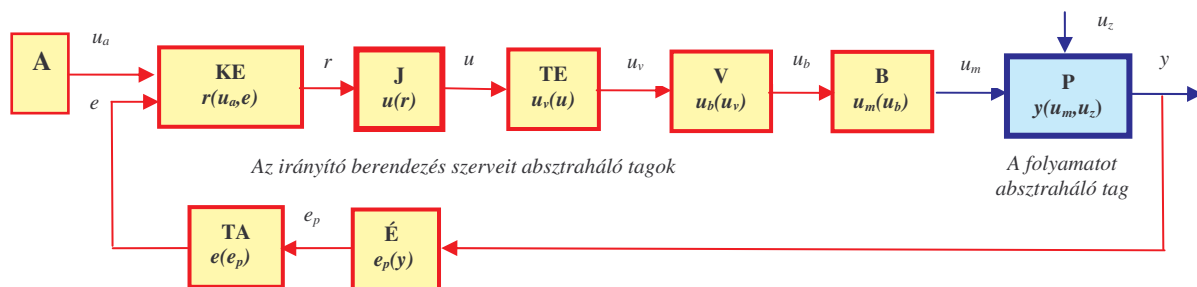
Az előzőekben felsorolt szerveken túlmenően több olyan **járlékos szerv** is szükséges az irányítási rendszer üzemeltetéséhez, amelyeknek ugyan nincs elsődleges funkcionális szerepe az irányítás működési mechanizmusában, nélkülük azonban nem lehetne működtetni a szabályozási rendszert. Ilyen járlékos szervek például a segédenergiát biztosító elektronikus, pneumatikus és hidraulikus tápegységek, az üzemelést felügyelő védelmi, jelző és naplózó berendezések, a kézi–automatikus átkapcsolás eszközei, a pneumatika, és a hidraulika szűrő berendezései, stb.

A szerkezeti vázlat a szabályozások felépítését részletekbe menően tartalmazza, és ezért – miután az irányítások igen sokfélék – igen változatos képet mutatnak. A működési vázlat¹⁷ az irányító berendezés szerveit már egységes jelképrendszerrel ábrázolja, függetlenül attól, hogy az adott szerv milyen fizikai elven működik. A folyamat ezen a vázlaton még a technológiai folyamatábrájával szerepel, a szabályozó berendezés viszont már egy adott mértékben absztrahált.

A hatásvázlat

A rendszertechnikai analízis, és szintézis szempontjából el lehet tekinteni attól, hogy egy adott szerv, vagy készülék milyen szabályozástechnikai funkciót lát el, mi a fizikai működési elve, és az adott funkciót milyen módon realizálja. **A rendszertechnikai vizsgálatok szempontjából az a meghatározó, hogy az egyes szervek kimenő jelei (mint okozatok), milyen függvénykapcsolatban vannak a bemenő jelekkel (az okokkal).** Ennek a függvénykapcsolatnak a szemléltetésére, és leírására vezetjük be a **jelátvivő tag** fogalmát. A szabályozási körben terjedő hatásmechanizmust, a jelek terjedésének útját (a hatásláncot), jelátvivő tagokkal absztrahált módon írhatjuk le, ahol is kizárólag azt ábrázoljuk, hogy a tagok egymáshoz képest milyen struktúrát alkotnak, egyes tagok hogyan működhetnek más tagokat, illetve az egyes tagok bemenő jelei milyen függvénykapcsolatnak megfelelően hozzák létre a kimenő jeleiket. Az ilyen elvek alapján felépített **hatásvázlat** elvonatkozott a tényleges szerkezetektől, lehetőséget teremtve ezzel arra, hogy a **különböző szabályozási rendszereket egységes elvek alapján** tárgyaljuk. A szabályozás esetében például minden funkcionális szervet, és magát a szabályozott folyamatot is, jellemezhetjük egy–egy jelátvivő taggal. Az egyes tagok jelátviteli tulajdonságait tetszőleges csoportosításban, egy eredőben összevonhatjuk, sőt, végső soron a teljes zárt rendszert is egyetlen eredő tag írhatja le. A folytonos idejű rendszer hatásvázlatainak lehetséges változatait a következő ábrákon mutatjuk be.

A 11. ábra hatásvázlatán minden szervet egy–egy taggal absztraháltunk, a jelátvivő tagokat jelképező téglalapokba megjelöltük, hogy a működési vázlat melyik szervét jellemzik, és feltüntettük azt a függvénykapcsolatot is, amelyik a tagot – statikus tulajdonságait tekintve – leírja¹⁸. Általános esetben minden szerv önmagában is egy dinamikus rendszer, ilyen esetben minden tagot egy–egy differenciálegyenlet modellez.

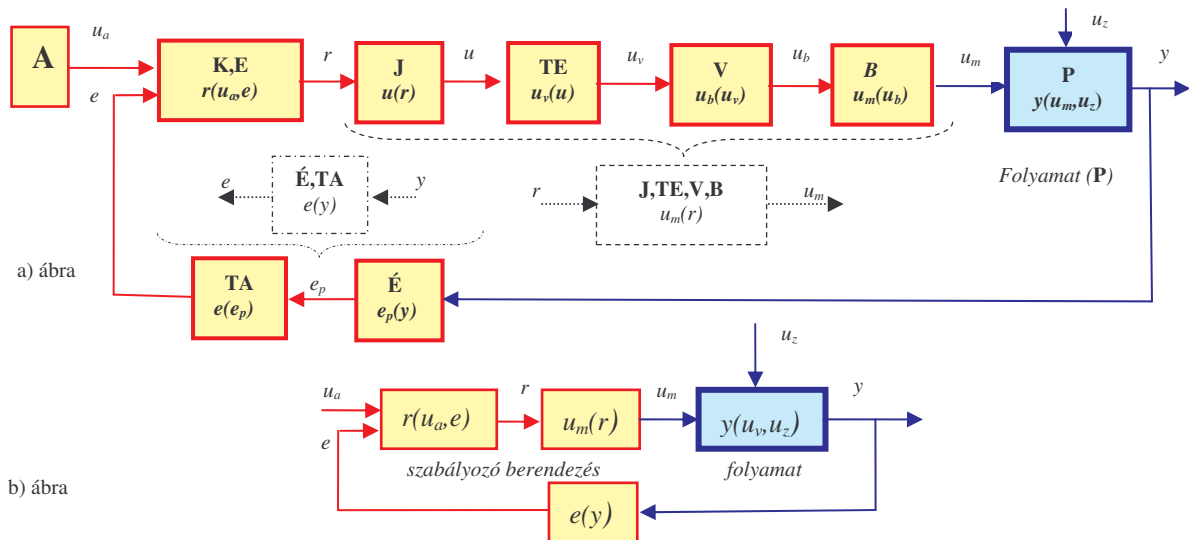


11. ábra
A hatásvázlaton minden szerv, és a szabályozott folyamat, egy–egy jelátvivő taggal absztrahált

¹⁷ A működési vázlatot blokkvázlatnak is nevezik.

¹⁸ Az egyes szervek működése során is érhetik zavaró hatások a szabályozási rendszert. Ennek tipikus példája a teljesítményerősítő, melynek u_v kimenő jelét (a végrehajtó jel) nem csupán ennek az u bemenő jele (az irányító jel) befolyásolja, hanem a segédenergia forrásának jellemzői is. Hogy ez a befolyás elhanyagolható legyen, stabilizált tápegységekről célszerű működtetni a teljesítményerősítőt. A szerveknél belépő zavarásokat – megfelelő méretezés esetében – általában elhanyagolhatjuk. Annál kellemetlenebb egy zavaró hatás, minél jobban a szabályozási hurok előrevezető ágának az elején „támadja” a zárt rendszert.

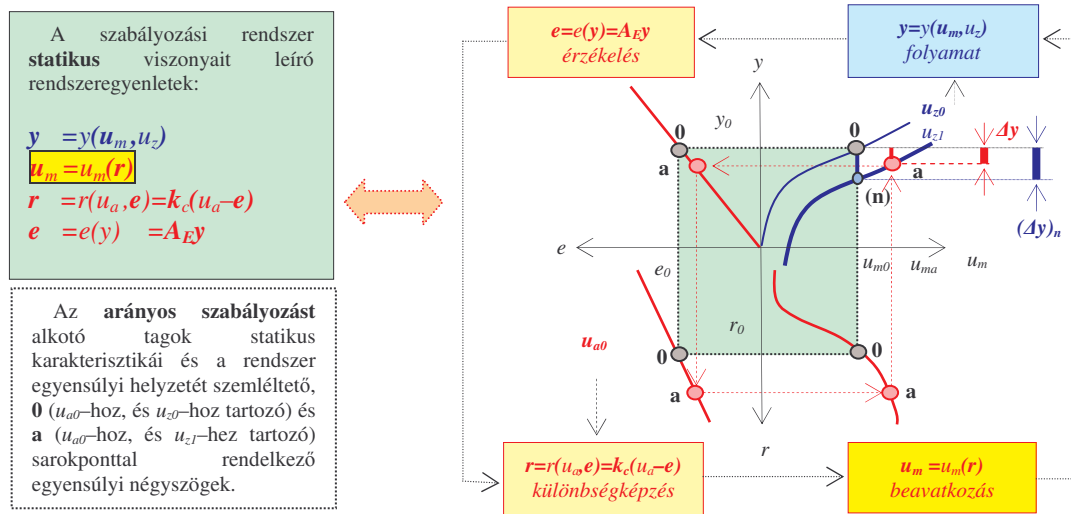
A 12.a) ábrán az egymással soros kapcsolást alkotó, és összevonásra szánt tagokat jelöltük meg. Ezeket az összevonásokat célszerűségi szempontok határozzák meg. Egy lehetséges kialakítás¹⁹:



12. ábra

Sorosan kapcsolt tagok egy lehetséges összevonása

A 12.b) ábrán egyes, soros kapcsolást alkotó tagcsoportok összevonásával kapott hatásvázlatot ábrázoltunk. Ezen a hatásvázlaton négy tag szerepel. Ha e tagok önbeálló tulajdonsággal rendelkeznek²⁰, akkor mindegyiknek létezik a kimenő jel–bemenő jel függvénykapcsolatot meghatározó **statikus jelleggörbéje**, amely egy négy–negyedes koordináta rendszerben ábrázolható (13. ábra). Az egyes tagok bemenő–kimenő jelei között értelmezhető statikus (az állandósult állapotbeli viszonyokat meghatározó) függvénykapcsolatok, és ezek grafikonjai:



13. ábra

Arányos szabályozás jelátvivő tagjainak statikus karakterisztikái

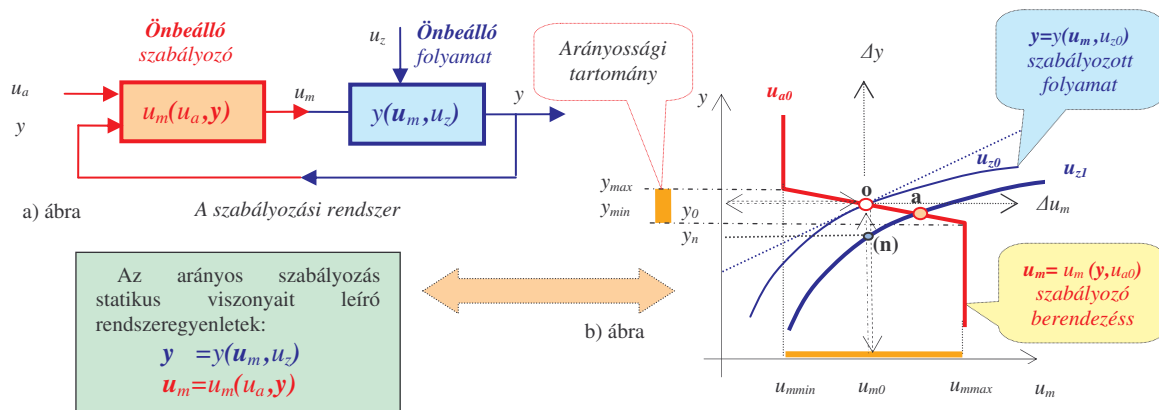
Ezekben a függvénykapcsolatokban az r rendelkező jel az u_a alapjelnek, és az e ellenőrző jelnek általában lineáris függvénye: $r = k_c(u_a - e)$, és hasonlóan általában lineáris az e ellenőrző jel és az y szabályozott jellemző

¹⁹ Egy más kialakításban a **TE,V,B** szerkezet, és a **P** folyamatot lehet egy taggá összevonni, ekkor a 12.b) ábra hatásvázlatán az u_m módosított jellemző helyett a jelformáló u kimenő jele (az irányító jel) szerepel.

²⁰ Az önbeálló dinamikus tag állandó értékű u bemenő jelre – állandósult állapotában – állandó értékű y kimenőjel választ ad. Ez az állandósult kimenő jel értéke a bemenő jelnek $y = y(u)$ függvénye. Ennek a függvénynek egy grafikon formában megjelenített ábrája a tag statikus karakterisztikája, amely karakterisztika általában nemlineáris kapcsolatot ábrázol az u és az y jelek között. Ha a szabályozási kör mindegyik tagja önbeálló, **arányos szabályozásról** van szó. Ilyen szabályozás a bojler hőmérséklet szabályozása, és a villamos motor fordulatszám–szabályozása. A tartály szintszabályozásában a hidraulikus erősítő és szervomotor integráló tag (az u_b jel az r jel integráljával–, vagy más megfogalmazásban, az u_b beavatkozó jel du_b/dt sebessége az r jellel – arányos). Ha a hatáslánc valamelyik tagja integráló tulajdonságú, **integrálszabályozásról** van szó.

közötti függvénykapcsolat is: $e=A_E y$. Nincs ez így a folyamatot tartalmazó $y=y(u_m, u_z)$ függvény-, illetve a beavatkozó szervet is tartalmazó $u_m=u_m(r)$ függvény esetében. A folyamatok rendszerint eleve nemlineáris tulajdonságúak, a beavatkozó szervek pedig, működési tartományuk határhelyzetében betelítődnek, vagy „felütőköznek”. A 13. ábrán feltüntetett jelleggörbékből láthatóan egy y_0 jelnek az u_{z0} melletti fenntartásához u_{m0} jel szükséges. Ennek az u_{m0} jelnek a biztosításához, a különbségképző szervnek r_0 jelet kell szolgáltatnia. Miután az $e_0=A_E y_0$ ellenőrző jelet y_0 hozza létre, az u_{a0} alapjelnek akkorának kell lennie, hogy $k_c(u_{a0}-e_0)=r_0$ legyen. Az egyensúlyi helyzet egy **(0)** sarokpontú négyszög koordinátaival jön létre. Így van ez akkor is, ha a zavaró jel u_{z1} -re változik meg, az új egyensúlyi helyzet ekkor – a tranzienst jelenségek „lecsengését” követően, ha ezek a tranziensek egyáltalában képesek megszűnni – az a sarokpontokkal rendelkező **egyensúlyi négyszög** mellett alakul ki.²¹ A statikus viszonyokat leíró négy egyenletben adott u_{a0} alapjel-, és u_{z0} zavarójel mellett az y_0 , u_{m0} , r_0 , e_0 jeleket lehet kiszámítani, vagyis a négy egyenletből álló, négy ismeretlenes, nemlineáris, algebrai egyenletrendszer megoldását kell megkeresni. Ennek grafikus eljárását szemlélteti a 13. ábra. A folyamatot leíró $y \sim u_m$ síkon megjelöltük az **(n)** pontot is. Ha a szabályozó nem változtatná meg az u_m módosított jellemzőt, az u_{z1} -re növekedett zavarás az y jelet erre a pontra állítaná be, létrehozva a szabályozott jellemző $(\Delta y)_n$ mértékű megváltozását²². Szabályozás mellett az **a** jelű pontban jön létre az egyensúlyi állapot, és ekkor $\Delta y \ll (\Delta y)_n$, vagyis létrejött a zavarás szabályozott jellemzőre gyakorolt nemkívánatos hatásának mérséklése. Ideális viszonyok mellett $\Delta y=0$ lenne, ezt azonban arányos szabályozással elérni elvileg nem lehet.

A hatásvázlat további átalakítását jelenti, ha egy-egy taggal ábrázoljuk az u_m , u_z bemenő, és y kimenő jellel rendelkező folyamatot (a szabályozott szakaszt: $y=y(u_m, u_z)$), illetve az y , u_a bemenő jelű, és u_m kimenő jelű tagcsoportot (a teljes szabályozó berendezést: $u_m=u_m(u_a, y)$, lásd 14.a) ábra). Ha ezek mindegyike önbeálló tag, akkor az $u_m \sim y$ koordináta rendszerben léteznek a folyamatot, illetve a teljes szabályozó berendezést leíró tagok statikus jelleggörbéi, melyeknek metszéspontja a rendszer egyensúlyi munkapontja²³ (lásd 14.b) ábra). Ezekon a jelleggörbéken az irányító berendezést olyan statikus karakterisztikával ábrázoltuk, amelyik azt szemlélteti, hogy a szabályozó berendezés a módosított jellemzőt csupán az $u_{mmin} < u_m < u_{mmax}$ intervallumban képes változtatni (a szabályozó berendezés statikus karakterisztikája a **telítődés** tulajdonságát tartalmazza). A szabályozó berendezés y bemenő jelének az $y_{max} < y < y_{min}$ tartománya az arányossági tartomány. Ha y szabályozott jellemző ebben a tartományban változik, akkor ez az u_m módosított jellemző változását is maga után vonja.



14. ábra
Arányos szabályozás egyensúlyi munkapontja

Az arányos szabályozás zavarelhárítási hatásmechanizmusa

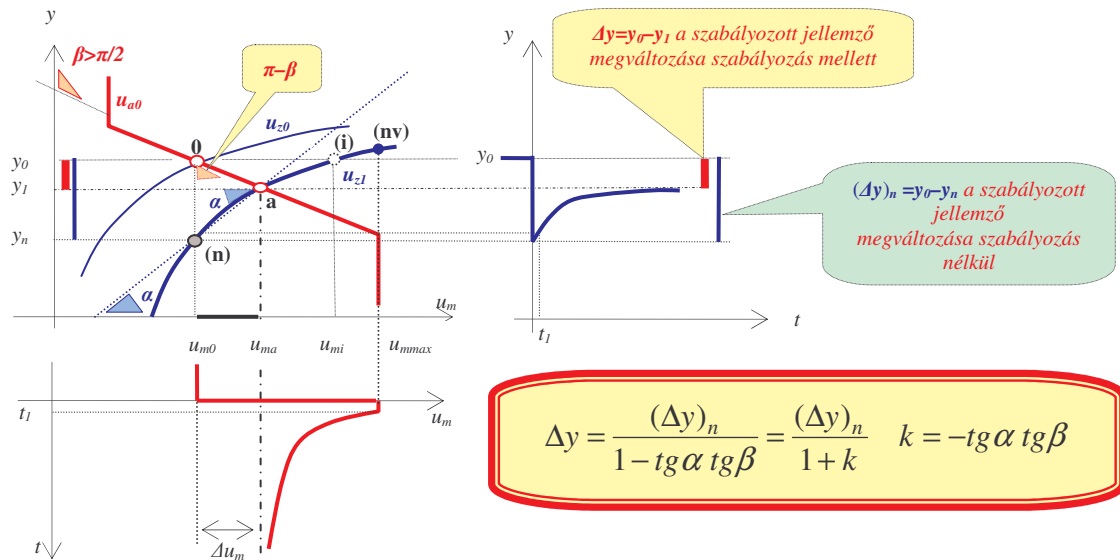
Az y szabályozott jellemző és az u_{a0} alapjel által – a működési tartományban – meghatározott u_m módosított jellemző $u_{mmin} < u_m < u_{mmax}$ intervallumban változik, és úgy tervezhető, hogy itt lineáris legyen. Ha a folyamat statikus karakterisztikájához a **0** egyensúlyi pontban érintőt húzunk, akkor a **0** pont környezetében a folyamat $y=y(u_m, u_z)$ nemlineáris karakterisztikáját ezzel az érintővel – vagyis egy egyenes egyenletével – közelíthetjük. Alkalmasan megválasztott koordináta–transzformációval a koordináta rendszer origóját a **0** pontba helyezhetjük,

²¹ Figyeljük meg, hogy az $r=r(u_a, e)$ karakterisztika kivételével mindegyiknek a meredeksége az egyensúlyi pontban pozitív érték. Az $r=r(u_a, e)=k_c(u_a-e)$ függvény $\partial r(u_a, e)/\partial e|_0 = -k_c < 0$ negatív meredeksége jelenti meg a zárt rendszer negatív visszacsatolását.

²² Ilyen eset akkor keletkezne, ha nem lenne szabályozás (például a hatáslánc az r rendelkező jel hatásvonalában fel lenne nyitva, aminek eredménye az lenne, hogy a megváltozott rendelkező jel nem tudna az u_m módosított jellemzőre hatást gyakorolni).

²³ Az egyensúlyi négyszög szerepet ekkor a **(0)** jelű egyensúlyi pont veszi át. A rendszer statikus tulajdonságainak tanulmányozásakor vegyük figyelembe, hogy a statikus karakterisztikákat az $y \sim u_m$ koordináta rendszerben ábrázoljuk. A **szabályozó** berendezést leíró $u_m=u_m(u_a, y)$ statikus jelleggörbe paramétere az u_a alapjel, **független** változója (bemenő jele) az y szabályozott jellemző, **függő** változója (kimenő jele) az u_m módosított jellemző. A **folyamatot** leíró $y=y(u_m, u_z)$ statikus karakterisztika paramétere az u_z zavarójel, **független** változója (bemenő jele) az u_m módosított jellemző, **függő** változója (kimenő jele) az y szabályozott jellemző.

és ezért a **0** pont környezetében a nemlineáris függvények helyett – a jelek kis változásait feltételezve – lineáris egyenletekkel dolgozhatunk. Ez az eljárás (a munkaponti linearizálás) a vizsgálatokat jelentősen egyszerűsíti, és természetesen csak akkor alkalmazható, ha a nemlineáris függvényeknek a munkapontban létezik az érintője. Az arányos szabályozás zavarelhárítási hatásmechanizmusa szemléletesen mutatható be, ha a szabályozó berendezést időképletelés nélküli tagnak tekintjük. A folyamatról feltételezzük, hogy a zavarás időképletelés nélkül hat y -ra, az u_m módosított jellemző pedig egytárolós jelképleteléssel tudja a szabályozott jellemzőt befolyásolni. Ez utóbbi feltételezés azt jelenti, hogy a folyamat bemenetén működtetett Δu_{m0} =állandó gerjesztés az y szabályozott jellemzőt $\Delta y(t)=k_p(1-e^{-tT})\Delta u_{m0}$ szerint változtatja. A zárt szabályozási rendszerben a **0** munkapontból az **a** munkapontba történő átmenet tranzienst folyamatait a 15. ábra szemlélteti:



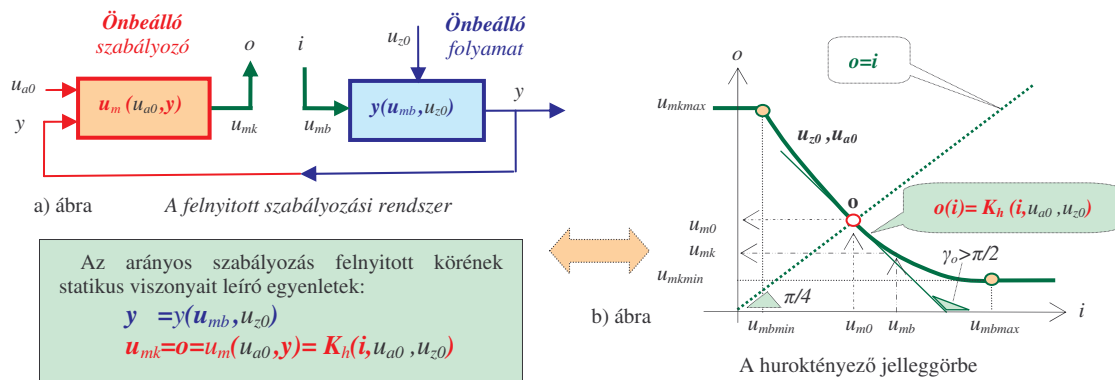
15. ábra
Arányos szabályozás zavarelhárításának hatásmechanizmusa

A **0** egyensúlyi munkapontban, nyugalmi helyzetben lévő rendszer zavaró jele u_{z0} -ról u_{z1} -re ugrásszerűen változik. Ennek hatására az y szabályozott jellemző y_0 -ról azonnal y_n -re csökken (lásd **(n)** pont), és ezért az u_m módosított jellemző u_{m0} -ról képletelés nélkül u_{mmax} -ra ugrik. A megváltozott u_m miatt a folyamat u_{z1} -hez tartozó karakterisztikáján az **(n)** pontból az **(nv)** pont felé tart a rendszer. A módosított jellemző $u_m=u_{mmax}$ marad egészen addig, míg a szabályozó a telítésből ki nem kerül (t_1 időpont). Ha ez bekövetkezik, az u_m – az y szabályozott jellemző növekedése miatt – csökkenni kezd, és végül a rendszer az **a** pontban ismét egyensúlyi helyzetbe kerül. Láthatóan a szabályozott jellemző zavarás miatti megváltozása szabályozás nélkül $(\Delta y)_n$, szabályozás mellett pedig $\Delta y < (\Delta y)_n$. A Δy értékét a szabályozó berendezés statikus karakterisztikájának $\beta > \pi/2$ szöge alapvetően befolyásolja, $\beta \rightarrow \pi/2$ esetében $\Delta y \rightarrow 0$. A folyamat jelleggörbéjét az **(n)**–**a** pontokon átmenő szelővel közelíthetjük, ennek meredeksége $[\partial y(u_m, u_z) / \partial u_m]_0 \approx tg \alpha$. **0(n)a** háromszög adatait felhasználva kapjuk:

$$\begin{aligned}
 tg \alpha &= \frac{y_1 - y_n}{u_{m1} - u_{m0}} & tg(\pi - \beta) &= \frac{u_{m1} - u_{m0}}{y_0 - y_1} \\
 tg \alpha tg(\pi - \beta) &= \frac{y_1 - y_n}{u_{m1} - u_{m0}} \cdot \frac{u_{m1} - u_{m0}}{y_0 - y_1} = \frac{y_1 - y_n}{y_0 - y_1} = \\
 &= \frac{y_1 - y_0 + y_0 - y_n}{y_0 - y_1} = -\frac{y_0 - y_1}{y_0 - y_1} + \frac{y_0 - y_n}{y_0 - y_1} = -1 + \frac{(\Delta y)_n}{\Delta y} \\
 1 - tg \alpha tg \beta &= \frac{(\Delta y)_n}{\Delta y} \\
 \Delta y &= \frac{(\Delta y)_n}{1 - tg \alpha tg \beta} = \frac{(\Delta y)_n}{1 + k}
 \end{aligned}$$

Ez az összefüggés az arányos szabályozások egyik fontos képlete. **Azt mutatja meg, hogy ha egy adott zavarójel, szabályozás nélkül, állandósult állapotban, a szabályozott jellemző $(\Delta y)_n$ megváltozását idézi elő, akkor ugyanakkora zavarás, arányos szabályozás mellett, csupán $\Delta y = (\Delta y)_n / (1 + k) < (\Delta y)_n$ nemkívánatos változást okoz, szintén a rendszer állandósult állapotában.** Ebben a képletben $tg \beta < 0$ a szabályozó berendezés statikus karakterisztikájának a meredeksége a szabályozó arányossági tartományában, a $tg \alpha > 0$ a

folyamat karakterisztikájának a meredeksége az **a** egyensúlyi munkapontban. A szabályozás $k = -tg\alpha\beta > 0$ **hurokerősítése** szabja meg a statikus zavarelhárítás minőségét. A $tg\alpha$ a folyamat sajátossága, technológiai adottság, a szabályozó tervezőjének a $tg\beta$ megválasztásában van bizonyos mozgáster. Bármennyire is kívánatos lenne Δy csökkentésének érdekében a k körerősítés növelése,²⁴ ez nem tehető meg következmények nélkül. Ha ugyanis a folyamat modelljében több energiáról, és holtidő okozta jelkésltetés is jelen van, akkor egy adott k_{krt} kritikus körerősítés mellett a rendszer labilissá válhat²⁵. Az $1/|tg\alpha\beta|$ tényezőt az arányos szabályozás **statizmusának** nevezik. Minél kisebb a statizmus, annál nagyobb a labilitás veszélye. Egy „gondolatkísérlettel” az u_m hatásvonalában felnyitva a hatásláncot (lásd 16.a) ábra), és – állandó u_{a0} , u_{z0} jelek mellett – a folyamat bemenetén működtetünk egy $i = u_{mb}$ input jelet, akkor ez stacioner állapotban, a folyamat kimenetén $y = o$, a nyitott kör kimenetén $o = u_{mk}$ output jelet eredményez. Ha az i egy adott intervallumban felvesszük a nyitott kör $o(i)$ statikus karakterisztikáját (a huroktényező jelleggörbét), eredményül az 16.b) ábrán vázolt görbét kapjuk.



16. ábra Arányos szabályozás huroktényező jelleggörbéje

Ennek a karakterisztikának (a negatív visszacsatolás miatt), szükségszerűen negatív meredekséggel kell rendelkeznie, és metszenie kell az $o=i$ egységnyi meredekségű egyenest (**o** jelű pont). Ha e metszésponthoz tartozó $i_0 = u_{m0}$ jelet működtetünk a nyitott kör bemenetén, akkor a kimeneten ezzel azonos $o_0 = u_{m0} = i_0 = u_{m0}$ kimenőjel keletkezik. (Ha itt zárnánk a rendszert, akkor a **o** pontnak megfelelő egyensúlyi pontban lennénk). Az **o** pontban lévő $\partial o(i)/\partial i|_o = tg\gamma_o < 0$ meredekség a $K_{h0} < 0$ huroktényező, melynek $absK_{h0}$ értéke az arányos szabályozás k hurokerősítése. Az elvi elrendezés alapján az arányos szabályozási rendszer felnyitott körén egy tényleges mérés is elvégezhető. A korábban már ismertetett, külső gerjesztésű egyenáramú motor fordulatszám-szabályozása, hasonló elvek szerint működő arányos szabályozás.

Integrálszabályozás zavarelhárításának hatásmechanizmusa

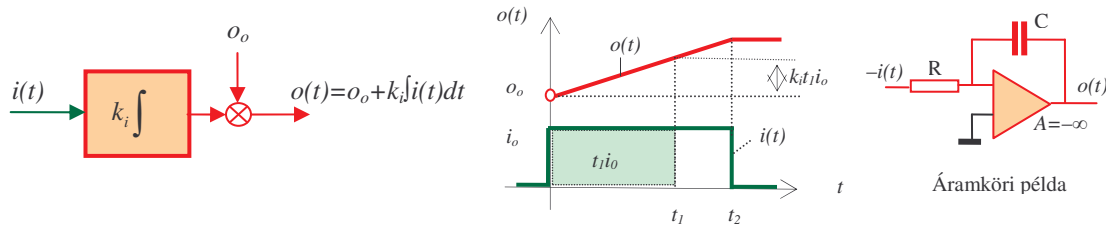
Az arányos szabályozásban a szabályozó a zavarás hatásának mérséklését olyan módon hajtja végre, hogy a zavarás felléptének időpillanatában megnöveli az u_m módosított jellemző értékét, majd az y növekedésének hatására ezt alkalmas módon „visszaveszi” az új egyensúlyi pontnak megfelelő értékre. Mindeközben az u_m az (**i**) pontnak megfelelő u_{mi} értéket is felveszi (lásd 15. ábra), és ha ezt fenn lehetne tartani, teljes mértékű zavarelhárítás valósulhatna meg. Az arányos szabályozásban azonban kizárólag a statikus karakterisztikák metszéspontjában alakulhat ki egyensúlyi helyzet, márpedig az (**i**) pont e feltételnek nem felel meg. Ebből is az látszik, hogy az arányos szabályozás teljes mértékű zavarelhárítást végrehajtani sem képes. Ennek megoldására az integrálszabályozás alkalmas.

Az integrálszabályozás esetében a szabályozási körben legalább egy un. szabad integráló tagot kell beiktatni, amely rendszerint a jelformáló-, vagy a végrehajtó szervben van beépítve. Az integráló tag $o(t)$ (output) kimenő jelét az $i(t)$ (input) bemenő jelének időszerinti integráljaként állítja elő az $o(t) = o_0 + k_i \int i(t) dt$ összefüggésnek megfelelően, aminek fizikai jelentése szerint $o(t)$ kimenő jel csak akkor lehet állandó, ha az $i(t)$ bemenő jel zérus (k_i az integrálási átviteli tényező). Más megfogalmazásban: az integráló tag $o(t)$ kimenőjelének $do(t)/dt$ sebessége arányos az $i(t)$ bemenő jelével: $do(t)/dt = k_i i(t)$. Ez utóbbi képlet az integráló tag differenciálegyenlete. Mindezekből az is következik, hogy az integráló tagnak nem értelmezhető a statikus jelleggörbéje, mivel állandó bemenő jelre időben lineárisan növekvő kimenőjel választ ad²⁶. Az integráló tag tulajdonságait a 17. ábra szemlélteti.

²⁴ k akkor növekszik, ha $\beta \rightarrow \pi/2$.

²⁵ A rendszer labilitása azt jelenti, hogy a hatáslánc minden jele időben oszcilláló, vagy növekvő amplitúdójú lengőmozgást végez, mindaddig, míg valamelyik eleme be nem „telítődik”, vagy tönkre nem megy. Ez megengedhetlen üzemiállapot, mivel a rendszer nem képes az alapfeladatainak (az alapjel követésnek, és a zavarás elhárításának) az ellátására.

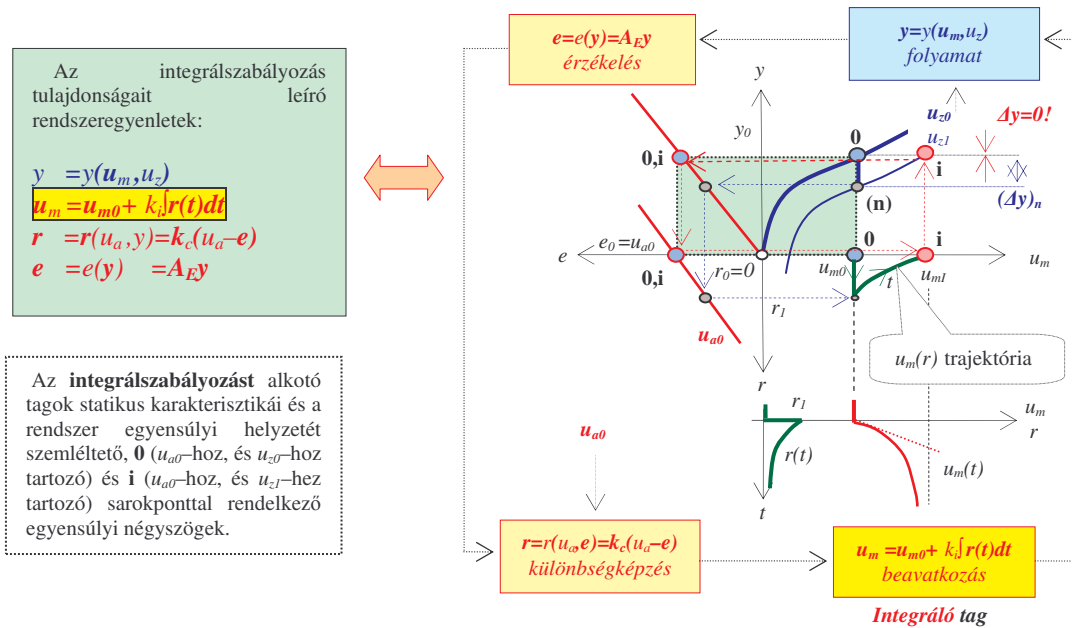
²⁶ A szintszabályozási példában a hidraulikus erősítő és szervomotor tölti be az integráló tag funkcióját.



17. ábra

Az integráló tag hatásvázlata, és tulajdonságának szemléltetése az $i(t)$ -re adott $o(t)$ válasszal

A következőkben olyan rendszer zavarelhárítási tulajdonságait tárgyaljuk, melyben a szabályozott folyamat továbbra is egytárolós, önbeálló, de a hatáslánc $u_m \sim r$ függvénykapcsolatát az $u_m(t) = u_{m0} + k_i \int r(t) dt$ integráló tag írja le. A rendszeregyenleteket, és az önbeálló tagok statikus jelleggörbéit a 18. ábrán adjuk meg.

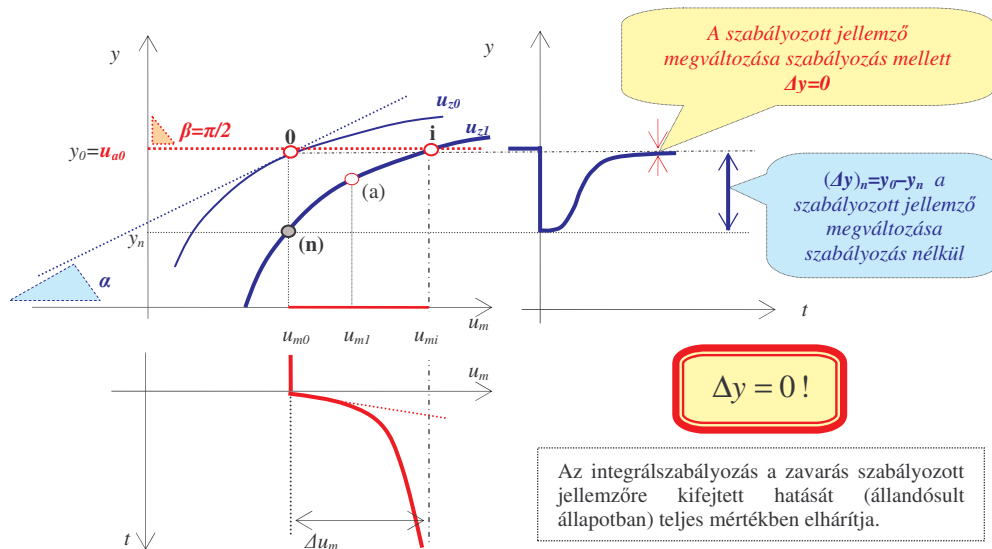


18. ábra

Az integrálszabályozás egyensúlyi munkapontja

Ha a folyamat statikus jelleggörbéjén az (u_{m0}, y_0) koordinátákkal rendelkező $\mathbf{0}$ pont a rendszer egyensúlyi helyzetének felel meg, akkor a hatáslánc $y_0 \rightarrow e_0 = u_{a0} \rightarrow r_0 = \mathbf{0} \rightarrow u_{m0} \rightarrow y_0$ állandó értékű jelei és u_{z0} zavarójel mellett, a szabályozás nyugalmi helyzetében van. Ez azért lehetséges, mert az integráló tulajdonságokkal rendelkező beavatkozó szerv $r_0 = \mathbf{0}$ mellett is képes az u_{m0} jelet fenntartani. Ha a zavarójel ugrásszerűen u_{z1} -re megváltozik, az r jel r_1 -re szintén ugrásszerűen megnő, ami kiváltja az u_m növekedését is. Az $u_m \sim r$ koordináta rendszerben most a statikus karakterisztika nem értelmezhető, ezért egy $u_m(r)$ trajektória²⁷ mutatja az u_m növekedésének időbeli lefolyását, amelyet az $u_m(t)$ és $r(t)$ időfüggvények megadásával is szemléltetünk. Az u_m mindaddig változik, amíg r nem lesz ismét zérus, ami viszont csak akkor következhet be, ha y – a megváltozott zavarás ellenére – az eredeti y_0 értékére visszaáll. A statikus-, és dinamikus tulajdonságok az $u_m \sim y$ koordináta rendszerben is szemléltethetők (19. ábra).

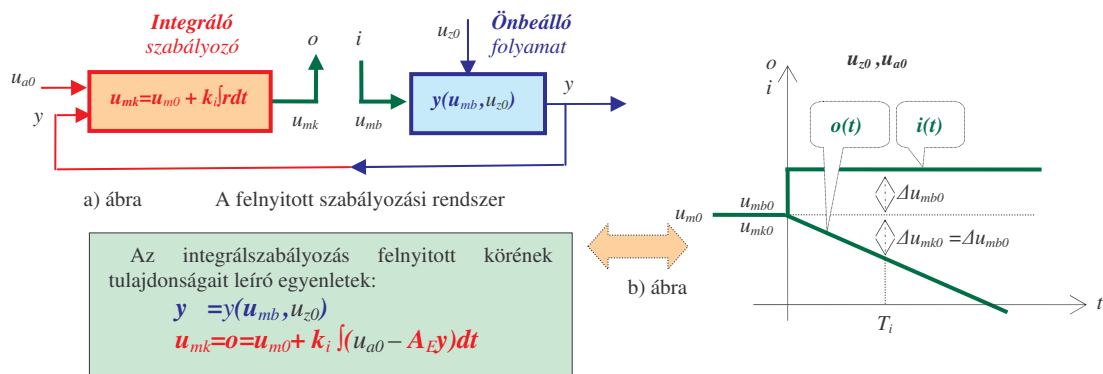
²⁷ Az $u_m(r)$ síkon – a beavatkozás integráló tulajdonsága miatt – nem értelmezhető a beavatkozó szerv statikus karakterisztikája. Ezért itt egy trajektóriával írjuk le az $u_m(r)$ kapcsolatot. Ez a trajektória az $u_m \sim r$ koordináta rendszerben az $r(t)$ és $u_m(t)$ időfüggvények azonos t értékekhez tartozó $u_m(r)$ pontjainak mértani helye, miközben a t idő befutja a $0 < t < \infty$ intervallumot. A trajektóriára tett nyíl az idő növekedésének irányát jelenti.



19. ábra
Az integrálszabályozás zavarelhárításának hatásmechanizmusa

A 0 és i pontokat pontvonalal összekötő egyenes olyan arányos szabályozó statikus karakterisztikájának felel meg, melynek – a $\beta=\pi/2$ szög miatt – a körerősítése $k=\infty$, statizmusa zérus. Az integrálszabályozást ezért zérus statizmusú, **astatikus** szabályozásnak is nevezik. **Lényeges tulajdonsága, hogy a zavarás hatását (állandósult állapotban) teljes mértékben kompenzálni képes, mivel mindaddig változtatja az u_m módosított jellemzőt, amíg az y szabályozott jellemző az eredeti értékére vissza nem áll.** Az összehasonlítás céljából a folyamat statikus karakterisztikáján megjelöltük az arányos szabályozás a jelű lehetséges egyensúlyi pontját is. A zavarás hatására keletkezett $u_m(t)$ időfüggvény a $t=0$ időpontban – a beavatkozás integráló jellege miatt – változatlan marad, ezért az integrálszabályozás az arányos szabályozáshoz képest lassabban hárítja el a zavarást.

Ha a 0 egyensúlyi pontban üzemelő integrálszabályozás hatásláncát a módosított jellemző u_{m0} értéke mellett felnyitjuk, akkor olyan i bemenő-, és o kimenő jelű eredő tag keletkezik, melynek egyik tagja (jelen esetben a szabályozó berendezést absztraháló tag) integráló tulajdonságú, és ennek következtében a nyitott kört is ez tulajdonság jellemzi. Ebből pedig az következik, hogy a nyitott körnek nem értelmezhető a statikus karakterisztikája (a huroktényező jelleggörbéje). Adjunk az u_{a0} , u_{z0} , valamint $u_{mb0}=u_{m0}$, y_0 , $u_{mk0}=u_{m0}$ adatokkal nyugalmi helyzetben lévő nyitott kör i bemenetére ugrásszerűen változó $\Delta u_{mb0} > 0$ bemenő jelet (lásd a 20. ábrát).



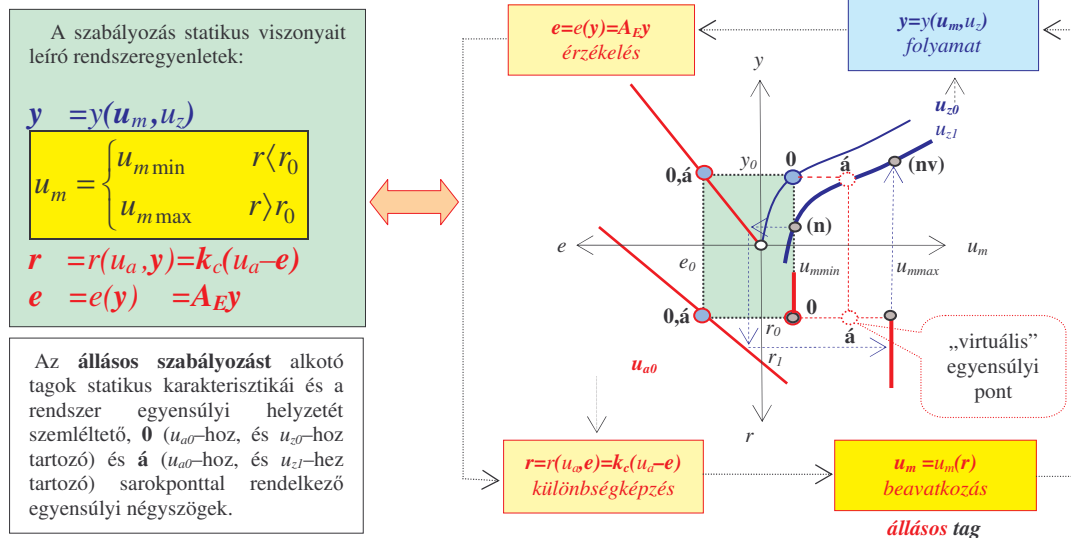
20. ábra Az integrálszabályozás felnyitott körének ugrásjelre adott válasza

Ennek hatására – feltételezve, hogy a folyamat jelkésleltetése elhanyagolható – az önbeálló folyamat y kimenő jele Δy értékkel megnő, az r rendelkező jel pedig Δr értékkel csökken. Ez a Δr lesz az integráló szabályozó bemenő jele, ami az u_{mk} kimenő jelének az időben lineárisan változó csökkenését váltja ki. Ez a folyamat mindaddig tartana, amíg valamelyik elem telítődésbe nem kerülne. T_i idő telik el addig, amíg az o kimeneten akkora lesz a jelváltozás, mint amekkora bemenő jelet kapcsoltunk az i bemenetre. Ez az idő a nyitott kör integrálási ideje, melynek reciproka az integrálszabályozás integrálási körerősítése.

A korábban tárgyalt tartály szintszabályozása integrálszabályozás.

Az állásos szabályozás zavarelhárítási folyamata

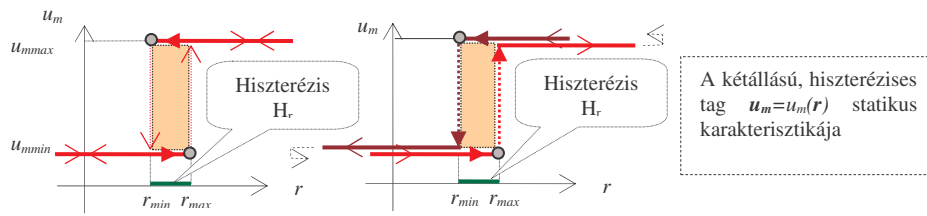
A zavarás hatásának teljes kompenzációja – legalább is látszólag – az állásos szabályozó alkalmazásával is megoldható. Az állásos szabályozás statikus viszonyait leíró függvényeket, és karakterisztikákat²⁸ a 21. ábramutatja.



21. ábra
Állásos szabályozás virtuális egyensúlyi helyzete

Tekintsük most a beavatkozást leíró $u_m = u_m(r)$ függvényt egy olyan kétállású állásos tagnak, amely az u_m módosított jellemzőnek $r < r_0$ rendelkező jel mellett kizárólag $u_{m \min}$, és $r > r_0$ mellett kizárólag $u_{m \max}$ értékeket enged felvenni. Matematikai értelemben az $u_m = u_m(r)$ függvénynek az r_0 helyen szakadása van, az u_m módosított jellemző $u_{m \min} < u_m < u_{m \max}$ intervallumban értékeket felvenni nem képes, márpedig a rendszer működési tartománya éppen ebben az intervallumban van. Ez azonban egy látszólagos ellentmondás.

Ha a folyamat statikus karakterisztikáján a 0 egyensúlyi pontban vagyunk, a zavaró jel u_{z0} értéke mellett a hatáslánc jelei $y_0 \rightarrow e_0 \rightarrow r_0 \rightarrow u_{m \min} \rightarrow y_0$. Az ugrásszerűen u_{z1} -re változó zavarás az y szabályozott jellemzőt azonnal y_n értékre csökkenti, aminek következményeként az r rendelkező jel is r_1 -re vált, és ezért a módosított jellemző is $u_{m \max}$ -ra ugrik. A transziens jelenség a folyamat u_{z1} -hez tartozó karakterisztikáján kísérhető nyomon. Ezen az (n) pontból kiindulva a rendszer mozgása az (nv) pont felé tart, így az y növekedésével elindul a zavarelhárítás hatásmechanizmusa. Változás akkor következik be, ha y növekedése eléri a y_0 értéket (a folyamat jelleggörbéjén ekkor az á jelű „virtuális” egyensúlyi pontba jutunk), mivel ekkor az r_0 -ra csökkent rendelkező jel a módosított jellemzőt $u_{m \min}$ -re visszaváltja. Ennek hatására az y csökkenni kezdene, de ∂y differenciálisan kis csökkenése azonnal $u_{m \max}$ váltást okozna, ami ∂y differenciálisan kis növekedését eredményezné, stb. Látszólag tehát az á pontban marad a rendszer (vagyis megvalósul a teljes mértékű zavarelhárítás), de ez úgy realizálódik, hogy az állásos tag végtelen nagy frekvenciával kapcsolgat $u_{m \max}$ és $u_{m \min}$ értékek között, ezzel egy u_{m1}^* középértékű módosított jellemzőt fenntartva. A valóság azonban ettől eltér, aminek egyik oka abban van, hogy egyrészt ideális kapcsoló nem létezik, másrészt a folyamat is több energiatárolás-, és holtidős késleltetést is tartalmazhat. Most csupán a kapcsoló nem ideális voltával foglalkozunk, ami abban nyilvánul meg, hogy a valóságnak megfelelően az állásos szabályozó hiszterézisét is figyelembe vesszük²⁹ (22. ábra).

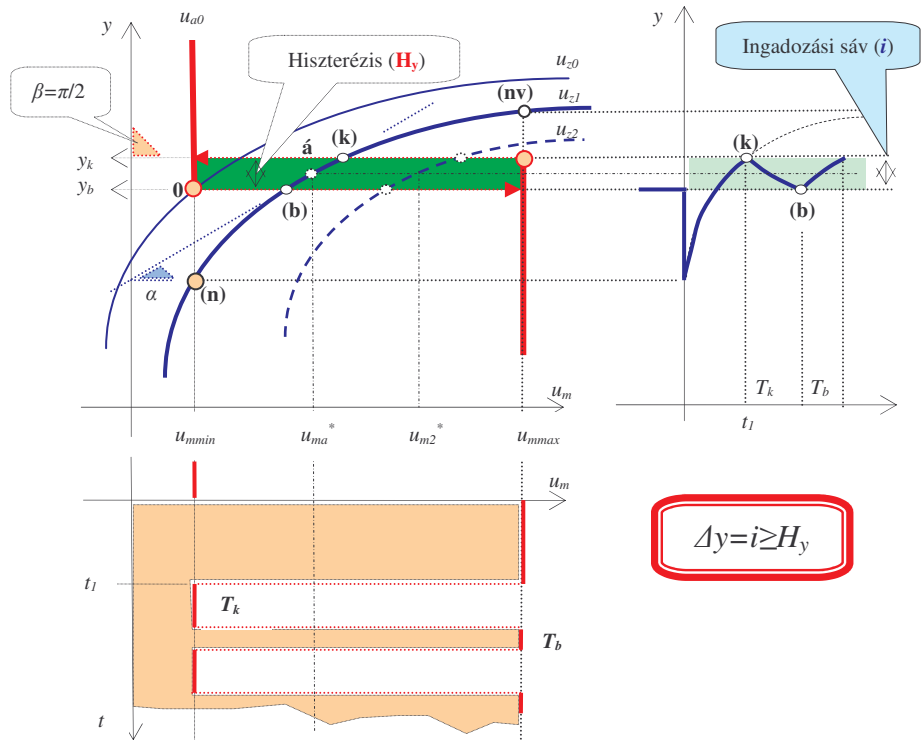


22. ábra
Kétállású hiszterézises tag statikus karakterisztikája

²⁸ Vegyük észre, hogy az $u_m(r)$ síknegyedben ábrázolt statikus jelleggörbének az r_0 helyen szakadása van.

²⁹ A hiszterézises tag $u_m = u_m(r)$ statikus függvénykapcsolatának matematikai leírása nehézkes, a függvénykapcsolatnak a statikus karakterisztikával történő szemléltetése viszont igen egyszerű, és szemléletes.

Az $u_m \sim y$ koordináta rendszerre átvérve az állásos szabályozás statikus jelleggörbéit, és időfüggvényeit a 23. ábra tartalmazza.



23. ábra
Állásos szabályozás zavarelhárítási hatásmechanizmusa

Ha a zavarás felléptét követően az u_m jel u_{mmax} -ra vált, akkor a folyamat u_{z1} -hez tartozó statikus karakterisztikáján az (n) pontból kiindulva, az (nv) pont felé mozgunk. Az y értéke y_n -ről kiindulva növekszik, és amikor eléri a (k) pontnak megfelelő y_k értéket, a kapcsoló a módosított jellemzőt u_{mmin} -re kapcsolja (ez a t_l időpont, és ettől az időponttól kezdődően – a hiszterézis hurok sorozatos körbejárásával – egy kvázistacioner üzemmódot jön létre). Az u_{mmin} miatt y csökken, és ha eléri a (b) pontnak megfelelő y_b értéket, a kapcsoló u_{mmax} -ra vált, stb. Az y szabályozott jellemző kvázistacioner állapotban a hiszterézis által megsabott $\Delta y = i \geq H_y$ ingadozási sávban periodikusan változik³⁰. Ennek az ingadozási sávnak az értéke (a működési tartományban) **nem függ a zavarás nagyságától**, és ha a hiszterézis kicsi, az ingadozási sáv is az³¹. A hiszterézist a szabályozás tervezője választhatja meg. Indokolatlanul alacsony értékre való választása mégsem tanácsos, mert ez nagy kapcsolási frekvenciát eredményez, amit pl. az elektromechanikus kapcsoló élettartamát lerövidíti. Az állásos szabályozást egyszerűsége, alacsony ára miatt széleskörűen alkalmazzák. Félvezetős állásos tag esetében még a nagyfrekvenciás kapcsolgatás sem jelent gondot. A korábban tárgyalt melegvíztároló hőmérséklet szabályozása kétállású szabályozóval valósul meg.

Mint az előzőekben láttuk, a szabályozási kör hatásláncán kialakuló jelterjedési viszonyok tárgyalására kialakítható egy olyan leírás, amelyben jelentős összevonások (tömörítés) után egy-egy taggal írjuk le a teljes szabályozó berendezést, és a szabályozott folyamatot.³² Ez az összevonás a rendszertechnikai leírásnak hatékony eszköze. Nyomatékosan kell azonban hangsúlyoznunk, hogy az arányos-, és az állásos szabályozás $u_m = u_m(u_a, y)$, $y = y(u_m, u_z)$ függvényei az önbeálló szabályozó berendezés-, és az önbeálló szabályozott folyamat **statikus jelátviteli viszonyait jellemezték**. A valóságban mindkét tag **dinamikus** rendszert absztrahál, ezért általános esetben, a kimenő-, és a bemenő jelek között, differenciálegyenletek írják le a kapcsolatokat³³. Az

³⁰ Az i ingadozási sáv akkor nagyobb, mint a H hiszterézis, ha a folyamat egynél több energiátárolásból származó késleltetést, vagy holtidőt tartalmaz.

³¹ Ez akkor van így, ha a folyamat holtidő mentes, és egy energiátároló okozta jelkésleltetése van.

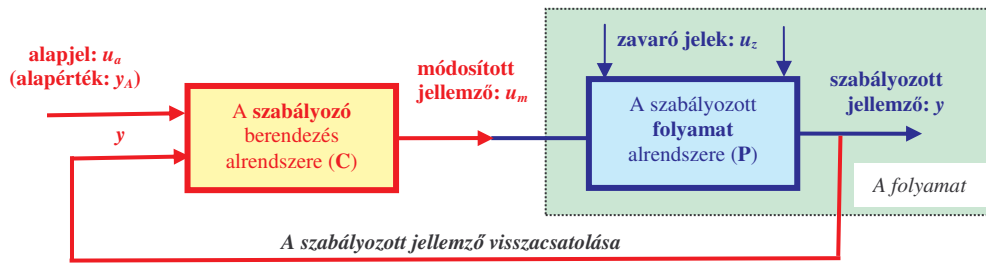
³² A dinamikus rendszer hatásvázlatának alapján végzett analízis során az is lehetséges, hogy a jelátviteli tulajdonságok leírásakor a tömörítés helyett egy részletezést hajtunk végre. Ilyen részletezés például az, amikor lineáris alaptaggal (arányos-, integráló-, és összegző taggal) építjük fel a lineáris dinamikus rendszer hatásvázlatát (lásd az átviteli függvény felbontása alaptaggal).

³³ A folyamatokban jelentkező jelkésleltetések technológiai adottságok, és igen széles skálán mozognak (pl. elektromechanikus rendszerek: msec, sec; hidraulikus folyamatok: sec, 10 sec; termikus folyamatok: 100 sec, 3600 sec, stb.). A szabályozók energiátárolásból származó késleltetései sokszor nagyságrendekkel kisebbek a folyamat késleltetéseihez képest, nem ritkán szándékolt késleltetést kell a szabályozóba létrehozni annak érdekében, hogy a zárt rendszer minőségi tulajdonságait javítani lehessen.

integrálszabályozásban ezen túlmenően az is előfordulhat, hogy valamelyik (vagy mindkét) tagnak a statikus karakterisztikája nem is értelmezhető, mert a szabályozó, vagy a folyamat, *integráló* tulajdonságú. A dinamikus tulajdonságok miatt az is lehetséges, hogy a szabályozási rendszer egyensúlyi pontja (a stabilis szabályozó, és a stabilis folyamat ellenére) – a *zárt rendszer labilis* működésének következményeként – létre sem jöhet. A stabilitás a rendszer alapkövetelménye, ezért a **szabályozások stabilitásvizsgálata** a rendszeranalízis egyik igen fontos tématerülete³⁴. A statikus üzemviszonyok tanulmányozásán túlmenően fontos kérdés, hogy a dinamikus rendszer a **0** egyensúlyi pontjából milyen időfüggvényekkel „megy át” (és egyáltalában „átmegy-e”?) az **a**–, a virtuális **á**–, vagy az **i** jelű egyensúlyi pontjába, és ha átmegy, akkor a kialakuló tranzien folyamatokra a szabályozó dinamikájának célirányos megválasztásával milyen befolyásunk lehet?

A bevezető részben az *arányos*–, az *integrál*–, és az *állásos* szabályozások *zavarelhárítási* kérdéskörével foglalkoztunk. Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a szabályozások üzemtanának legalább ilyen fontos kérdése az is, hogy időben változó $u_a(t)$ alapjelet a szabályozott jellemző milyen módon képes *követni*.

Az „egyhurkos” szabályozás hatásvázlatát a 24. ábra mutatja.



24. ábra
Az „egyhurkos” szabályozás hatásvázlata

Általános esetben – miután két dinamikus alrendszer együttműködéséről van szó – mind a folyamatot, mind a szabályozó berendezést, és a teljes visszacsatolt rendszert is, kisebb–nagyobb rendszámú *differenciálegyenletek* írják le. A folyamat (**P**), és a szabályozó berendezés (**C**) differenciálegyenlete általában implicit alakban tartalmazza a kimenő–, és bemenő jeleken túlmenően ezek időszerinti (a folyamat esetében maximálisan n_p rendű, a szabályozó esetében n_c rendű) differenciálhányadosait is. A folyamat bemenő jelei az u_m módosított jellemző, és az u_z zavaró jelek, kimenő jele az y szabályozott jellemző. A teljes szabályozó berendezést absztraháló tag bemenő jelei az y_A alapértéket megjelenítő u_a alapjel, és az y szabályozott jellemző, kimenő jele az u_m módosított jellemző. Az egy szabályozott jellemzővel, és ennek megfelelően egy alapjellel rendelkező („egyhurkos”) szabályozási rendszer mindkét jelátvivő tagja un. **MISO** (**multi input–single output**→több bemenetű, egy kimenetű) tagok, és a zárthurkú hatáslánc a közös u_m jellel, valamint az y szabályozott jellemzőnek a szabályozó bemenetére történő negatív visszacsatolásával jön létre. A bemenő–, és kimenő jelek között felépíthető matematikai modell mindkét alrendszer esetében az

$$\begin{aligned}
 P \left(\underbrace{\frac{d^{n_p} y(t)}{dt^{n_p}}, \dots, y(t)}_{\text{kimenő jel}}, \underbrace{\frac{d^{n_p} u_m(t)}{dt^{n_p}}, \dots, u_m(t)}_{\text{bemenő jelek}}, \underbrace{\frac{d^{n_p} u_z(t)}{dt^{n_p}}, \dots, u_z(t)}_{\text{zavaró jelek}} \right) &= 0 \\
 C \left(\underbrace{\frac{d^{n_c} u_m(t)}{dt^{n_c}}, \dots, u_m(t)}_{\text{kimenő jel}}, \underbrace{\frac{d^{n_c} u_a(t)}{dt^{n_c}}, \dots, u_a(t)}_{\text{bemenő jelek}}, \underbrace{\frac{d^{n_c} y(t)}{dt^{n_c}}, \dots, y(t)}_{\text{szabályozott jellemző}} \right) &= 0
 \end{aligned}$$

implicit alakban felírható $P=0$, $C=0$ differenciálegyenletekből álló differenciálegyenlet rendszer. Ebben a bemenő jelek legmagasabb rendű differenciálhányadosainak rendszáma – itt nem részletezett realizálhatósági feltételek miatt – nem haladhatja meg a kimenőjel differenciálhányadosainak rendszámát³⁵. A két, n_p és n_c rendű differenciálegyenletből álló differenciálegyenlet rendszer a visszacsatolt szabályozásnak is a matematikai modellje, mivel az $u_m(t)$ és az $y(t)$ jelekkel a két rendszer egymáshoz is csatolva van.

Ha az egyensúlyi helyzeteken túlmenően a tranzien viselkedést is tanulmányozni kívánjuk, akkor rendszerint előzetesen felvett $u_a(t)$ és $u_z(t)$ determinisztikus vizsgáló jelekre [pl. *Dirac* delta: $\delta(t)$, egységugrás: $\mathbf{1}(t)$, sebességugrás: $t\mathbf{1}(t)$, gyorsulásugrás: $(t^2/2)\mathbf{1}(t)$, harmonikus jel: $\sin(\omega t)\mathbf{1}(t)$] kell a differenciálegyenlet rendszert az $y(t)$, és $u_m(t)$ jelekre megoldani. Az implicit alak kezelése nehézkes, ezért a tagok matematikai modelljét – ha

³⁴ A dinamikus rendszereknek számos stabilitás fogalma létezik. A szabályozások esetében a rendszer stabilitásának azt az értelmezését használjuk, hogy állandó értékű u_{a0} alapjel, és u_{z0} zavaró jelek hatására $t \rightarrow \infty$ mellett létrejön-e a módosított jellemző $u_m(\infty) = u_{m0}$, és a szabályozott jellemző $y(\infty) = y_0$ jeleknek az állandó értéke? Ha igen, akkor a szabályozási rendszer aszimptotikusan stabilis. Ez egyébként azt is jelenti, hogy a hatáslánc minden szervének bemenő–, és kimenő jele is – az egyensúlyi helyzetben – állandó értéket vesz fel.

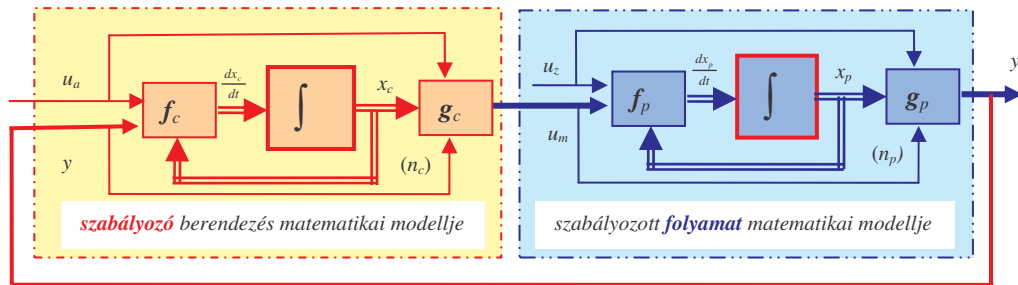
³⁵ A folyamat esetében most csak egy zavarójelet veszünk számításba.

ez megtehető – más alakban írjuk fel. Bevezetve a folyamat n_p számú $x_p(t)$, és a szabályozó n_c számú $x_c(t)$ állapotváltozóit, mindkét alrendszert n_p, n_c számú *elsőrendű* közönséges, nemlineáris differenciálegyenletekből álló differenciálegyenlet rendszerrel, és a kimenő jeleiket meghatározó egy–egy nemlineáris algebrai egyenlettel modellezhetjük. Ez a differenciálegyenlet rendszer, és az ezt kísérő algebrai egyenlet, az alrendszerek ún. **állapotegyenletei**. Vektor differenciálegyenlet alakban felírható alakjuk:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_p(t)}{dt} &= f_p[x_p(t), u_m(t), u_z(t)] \\ y(t) &= g_p[x_p(t), u_m(t), u_z(t)] \end{aligned} \right\} \text{ a folyamat állapotegyenlete}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_c(t)}{dt} &= f_c[x_c(t), u_a(t), y(t)] \\ u_m(t) &= g_c[x_c(t), u_a(t), y(t)] \end{aligned} \right\} \text{ a szabályozó berendezés állapotegyenlete}$$

Ezek az állapotegyenletek azt fejezik ki, hogy mindkét alrendszer y és u_m kimenő jele a saját x_p és x_c állapotváltozóitól, és a bemenő jeleiktől függ az $y=g_p(x_p, u_m, u_z)$ és $u_m=g_c(x_c, u_a, y)$ nemlineáris algebrai egyenletnek megfelelően. Az $x_p(t)$ és $x_c(t)$ állapotváltozók szintén az alrendszerek bemenő jeleiktől függenek, de ezt a függvénykapcsolatot az f_p, f_c differenciálegyenlet rendszerek határozzák meg. Mindezeket hatásvázlaton is részletezve a 25. ábrát kaphatjuk.



25. ábra
A szabályozás dinamikus alrendszereinek leírása állapotegyenletekkel

Ez a hatásvázlat azt szemlélteti, hogy a $dx_c(t)/dt, dx_p(t)/dt$ állapotsebességeket integráló tagok bemenetein működtetve, azok kimenetein jönnek létre az $x_c(t), x_p(t)$ állapotváltozók. Az állapotváltozók, és a bemenő jelek – az f_c és f_p függvényeknek megfelelően – állítják elő az alrendszerek integrátorainak bemenő jeleit, az állapotsebességeket³⁶.

Az alrendszerek dinamikus tulajdonságait leíró hatásvázlat részek láthatóan azonos típusú részstruktúrákat tartalmaznak a szabályozó-, és a folyamat vonatkozásában is, annak ellenére, hogy ezek fizikai megvalósulásokban teljesen eltérő szerkezeteket, áramköröket, berendezéseket, stb. jellemeznek. Ez azért van, mert a szabályozó berendezés is, és a folyamat is, egy–egy dinamikus alrendszer, és ezek leírására az egységesen értelmezett állapotegyenleteket használjuk. Természetesen, a szabályozó, illetve a folyamat konkrét f_p, g_p, f_c, g_c függvényei lényegesen eltérhetnek egymástól, mivel más–más funkcionális feladatokat ellátó szerkezetek matematikai modelljeiről van szó (lásd a korábban tárgyalt szerkezeti-, és működési vázlatokat).

A hatásvázlattal azt kívántuk érzékeltetni, hogy a dinamikus viszonyok analízise (például annak vizsgálata, hogy a rendszer az egyik egyensúlyi pontjából miként megy át egy másik egyensúlyi pontjába) lényegesen nehezebb feladat a statikus üzemviszonyok tanulmányozásánál. Ha állandó u_{a0} alapjel, és u_{z0} zavarójel mellett az *eredő dinamikus rendszer stabilis*³⁷, akkor létrejönnek az állapotváltozók x_{p0}, x_{c0} , és a kimenő jelek y_0, u_{m0} egyensúlyi értékei, vagyis van a rendszernek stabilis egyensúlyi helyzete, illetve stabilis egyensúlyi munkapontja. Ebben az egyensúlyi állapotban a rendszer jelei időben nem változnak, ezért a $dx_c(t)/dt|_{t=\infty}, dx_p(t)/dt|_{t=\infty}$ állapotsebességek értékei zérusok. Az egyensúlyi helyzet x_{p0}, x_{c0} , és y_0, u_{m0} koordinátái tehát ki kell, hogy elégítsék a dinamikus modellből származtatható

³⁶ Az $x(t)$ állapotváltozókat-, és a $dx(t)/dt$ állapotsebességeket jelképező, nyílakkal ellátott dupla vonalak a hatásirányon túlmenően azt is jelentik, hogy a szabályozónak n_c -, a folyamatnak n_p számú állapotváltozója van. Az integráló tagok száma azonos az állapotváltozók számával.

³⁷ A rendszer stabilitása azt jelenti, hogy állandó u_{a0}, u_{z0} bemenő jeleket kapcsolva a rendszer bemenetére, a tranzien folyamatok „lecsengenek”, és $t \rightarrow \infty$ mellett az állapotváltozók is, és a kimenő jelek is egy $x_{c0}, x_{p0}, y_0, u_{m0}$ állandósult értékre állnak be.

$$\left. \begin{aligned} 0 &= f_p(x_{p0}, u_{m0}, u_{z0}) \\ y_0 &= g_p(x_{p0}, u_{m0}, u_{z0}) \end{aligned} \right\} \text{folyamat}$$

$$\left. \begin{aligned} 0 &= f_c(x_{c0}, u_{a0}, y_0) \\ u_{m0} &= g_c(x_{c0}, u_{a0}, y_0) \end{aligned} \right\} \text{szabályozó}$$

nemlineáris algebrai egyenletrendszer³⁸. (A megelőző vizsgálatokban – arányos, integráló, és állásos szabályozások eseteiben – ennek az egyensúlyi helyzetnek az üzemtanát tárgyaltuk, az alrendszerek statikus karakterisztikáinak az alapján).

Az ideálisan működő rendszer $y(t)$ szabályozott jellemzőjének időfüggvénye azonos lenne az $y_A(t)=u_a(t)/A_E$ alapérték időfüggvényével, vagyis pontos **alapelkövetés**, és teljes mértékű **zavarelhárítás** (értéktartás) valósulna meg. Ilyen rendszer létrehozásának azonban realitása nincs, valóságos körülmények között mind az alapjelkövetésben, mind a zavarelhárításban hibák keletkeznek. Ennek elsődleges oka a dinamikus rendszerek tehetetlensége, és a jelterjedés véges sebessége (energia tárolásból, és holtidőből származó késleltetések). A rendszertechnikai tervezés célkitűzése az, hogy a szabályozó berendezés f_c , g_c matematikai modelljét úgy válasszuk meg, hogy ennek eredményeként a zárt szabályozási rendszer **stabilis** legyen, és ezen túlmenően *a követési, és az értéktartási hibák minimálisak legyenek*. Ahhoz, hogy ennek a követelményeknek a kielégítésére alkalmas szabályozó berendezést létrehozassuk, előzetesen egy analízis keretei között a visszacsatolt rendszer statikus, és dinamikus tulajdonságainak tanulmányozását is el kell végeznünk. Ennek lehet majd az eredménye, hogy *a zárt rendszerrel szemben reális követelményeket támasszunk*, és ez vezet majd el ahhoz is, hogy a fizikailag realizálható szabályozó berendezést megalkossuk.

Az előzőekben felírt nemlineáris állapotegyenletek alkalmasak lehetnek a rendszer dinamikus tulajdonságainak vizsgálatára, de az alkalmazott analízis módszerei jelentős mértékben függenek az f_c , g_c , f_p , g_p nemlineáris függvények típusaitól. Abban a speciális esetben azonban, ha ezek a függvények lineáris kapcsolatokat adnak meg a változók között, az állapotegyenletek jelentősen egyszerűsödnek, és az analízis módszerei és eredményei – legalább is ebben a függvényosztályban – általánosan érvényesek. A lineáris rendszer állapotegyenlete is az alrendszerek állapotegyenleteiből épül fel. Ekkor:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_p(t)}{dt} &= A_p x_p(t) + B_{pm} u_m(t) + B_{pz} u_z(t) \\ y(t) &= C_p x_p(t) + D_{pm} u_m(t) + D_{pz} u_z(t) \end{aligned} \right\} \text{folyamat}$$

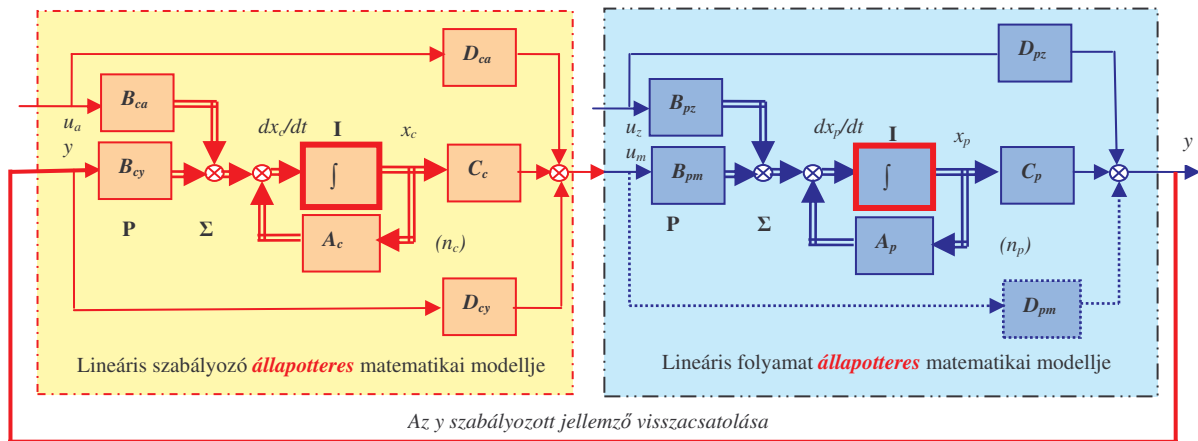
$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_c(t)}{dt} &= A_c x_c(t) + B_{ca} u_a(t) + B_{cy} y(t) \\ u_m(t) &= C_c x_c(t) + D_{ca} u_a(t) + D_{cy} y(t) \end{aligned} \right\} \text{szabályozó}$$

Ezekben az egyenletekben az A , B , C , D paraméterek a lineáris alrendszerek paramétermátrixai. A lineáris állapotegyenletek matematikai modelljeivel³⁹ leírt **lineáris rendszernek** egységes, jól kidolgozott rendszerelmélete van, amelynek eredményei a nemlineáris rendszerek néhány osztályában is felhasználhatók. Ha az egyensúlyi pontban a nemlineáris függvények linearizálhatóak, akkor ennek „kis” környezetében lejátszódó tranziensek matematikai modellezésére is egy közelítő lineáris állapotegyenlet modellel dolgozhatunk. A lineáris szabályozási rendszer hatásvázlata az alrendszerek állapotegyenleteinek alapján építhető fel. Az integráló tagok bemenetein a $dx_c(t)/dt$, $dx_p(t)/dt$ állapotsebességeket működtetve, ezek kimenetein az állapotsebességek integráljai, vagyis maguk az $x_c(t)$, $x_p(t)$ állapotváltozók jönnek létre, hasonlóan, mint ahogy ez a nemlineáris rendszereknél láttuk. Az állapotsebességek jelen esetben – az f_c és f_p lineáris függvénykapcsolatnak megfelelően – az integrátorok kimenetein megjelenő állapotváltozók, és az alrendszerek bemenő jeleinek *lineáris kombinációi*. A szabályozó berendezés, és a folyamat alrendszereinek kimenő jelei – a g_c , g_p lineáris függvényeknek megfelelően – szintén az állapotváltozókból, és a bemenő jelekből állíthatók elő. A két alrendszer most is azzal kapcsolódik össze, hogy a szabályozó $u_m(t)$ kimenő jele egyben a folyamat egyik bemenő jele, illetve a folyamat $y(t)$ kimenő jele egyben a szabályozó egyik bemenő jele⁴⁰. Mindezek a tulajdonságok az állapotegyenletekkel egyenértékűen, a lineáris rendszer hatásvázlatán is szemléltethetők (26. ábra).

³⁸ Az eredeti implicit függvényekkel, az u_{a0} , u_{z0} állandó bemenő jelekre vonatkozó u_{m0} , y_{z0} egyensúlyi helyzet koordinátáit a $P(y_0, u_{m0}, u_{z0})=0$, $C(u_{m0}, u_{a0}, y_0)=0$ nemlineáris egyenletrendszer megoldása szolgáltatná.

³⁹ A jelek és a paraméterek jellemzői: $x_p(t)$, $x_c(t)$: n_p és n_c méretű oszlopvektorok, $y(t)$, $u_m(t)$, $u_a(t)$, $u_z(t)$: skaláris mennyiségek, A_p , A_c : n_p , n_c méretű négyzetes mátrixok, B_p ($n_p \times I$), B_c ($n_c \times I$): oszlopvektorok, C_p ($I \times n_p$), C_c ($I \times n_c$): sorvektorok, D_p , D_c : skaláris paraméterek.

⁴⁰ Ha a szabályozó berendezés, és a folyamat *önbeálló* tulajdonságú, akkor létezik ezek mindegyikének a statikus karakterisztikája, amely karakterisztika – lineáris rendszer esetében – u_a -ban, illetve u_z -ben paraméterezett egyenes. A karakterisztikák meredekségeinek szorzata az arányos szabályozás hurokterjedője.



26. ábra

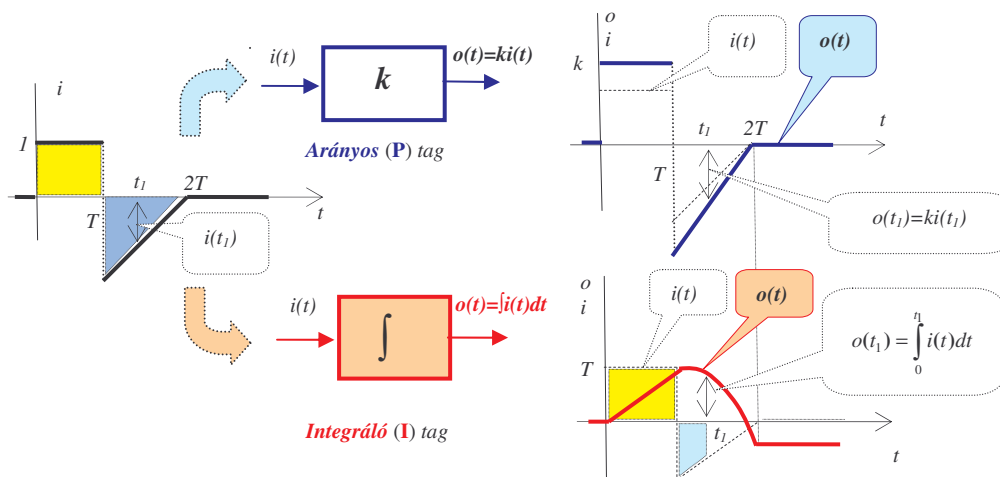
A lineáris szabályozás dinamikus alrendszerének leírása lineáris állapotegyenletekkel

A lineáris szabályozás hatásvázlatnak lényeges tulajdonsága, hogy struktúrája **P** (proporcionális, arányos)-, **I** (integráló)-, és **Σ** (összegző) **lineáris altagokból** épül fel. Az arányos tagok időkélesztetés nélkül állítják elő az $i(t)$ bemenő (input) jelekkel arányos $o(t)$ kimenő (output) jeleket: $o(t)=Ki(t)$, az összegző tagok kimenő jelei a bemenő jeleknek az összege: $o(t)=\Sigma i_i(t)$.

Alapvetően különböző az integráló tag jelátviteli tulajdonsága, miután ennek $o(t)$ kimenő jele az $i(t)$ bemenő jelének az időszerinti integrálja: $o(t)=o_0+\int i(t)dt$ (o_0 a kezdeti feltétel). Ebből pedig az is következik, hogy **az I tag $o(t)$ kimenő jele csak akkor lehet állandó, ha $i(t)$ bemenő jele zérus. Ezzel szemben, ha a bemenő jel $i(t)=i_0$ állandó, az I tag kimenő jele az időben lineárisan változik: $o(t)=o_0+\int i_0 dt=o_0+i_0t$. Az integráló tag **dinamikus** altag. Az integráló tag szerepe különlegesen jelentős, mivel ez a lineáris, és nemlineáris dinamikus rendszerek mindegyikében szükségszerűen jelen van⁴¹. Az integráló tag néhány fontos tulajdonsága:**

- **kimenő jele akkor lehet állandó, ha bemenő jele zérus,**
- **kimenő jele bizonyosan változik, ha bemenő jele nem zérus,**
- **kimenő jele véges bemenő jel ugrásra az ugrás pillanatában **változatlan** marad,**
- **kimenő jele időben lineárisan növekszik, ha bemenő jele i_0 =állandó>0,**
- **kimenőjelenek a **változási sebessége** az i_0 bemenő jellel arányos,**
- **kimenő jelének a t_1 időpontban felvett $o(t_1)$ értéke az $i(t)$ bemenő jelnek a teljes „előéletétől” ($a - \infty < t < t_1$ időpontokban felvett értékeitől) függ.**

A P és I tag jelátviteli tulajdosságainak összehasonlítását a 27. ábrán szemléltetjük.



27. ábra

Arányos-, és integráló tag adott $u(t)$ bemenő jelre keletkező $y(t)$ válaszainak összehasonlítása

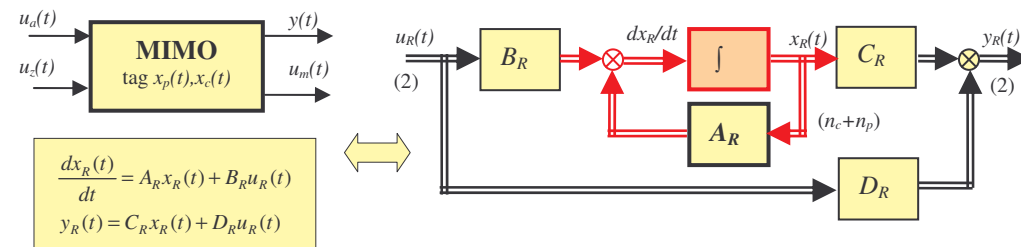
⁴¹ A nemlineáris rendszerekben a **lineáris altagokon** túlmenően az $o=f(i)$ nemlineáris algebrai függvénykapcsolatot szimbolizáló nemlineáris tagok (függvénygenerátorok) –, illetve nemlineáris matematikai műveleteket végző tagok (szorzó, hányados képző, stb.) is szerepet játszanak. A **dinamikus** rendszer n rendszáma az integráló tagok számával azonos, ezek minimális száma egy.

A hatásvázlat P és Σ tagjai **algebrai tagok**, az I tagok **dinamikus tagok**. Figyeljük meg, hogy az alrendszer integráló tagjai az A_c , és A_p arányos tagokkal vannak visszacsatolva, ezek a belső visszacsatolások jelenítik meg a szabályozó, és a folyamat jelkéleltetéseit (A_c a szabályozó-, A_p a folyamat **állapotmátrixai**). Az y szabályozott jellemző **negatív visszacsatolása** a szabályozó bemenetére a „fő” visszacsatolás, ennek eredménye a zárt hatáslánc. A hatásvázlat alapján megfigyelhetjük, hogy az u_a alapjel, vagy az y szabályozott jellemző hirtelen (ugrásszerű) megváltozására a szabályozó az u_m módosított jellemzőt időkéleltetés nélkül, azonnal megváltoztatja, ha a D_{c0} , és a D_{cy} tényezők nem zérusok. Ez a szabályozónak egy kedvező tulajdonsága, mivel a bemenő jeleinek megváltozására, a kimenő jel megváltozásával időkéleltetés nélkül képes reagálni. A folyamatok jelentős részében ettől eltérően, az u_m módosított jellemző ugrásszerű megváltozására az y szabályozott jellemző csak időkéleltetéssel reagál, ezért általában a folyamat D_{pm} paramétere $D_{pm}=0$.

Megjegyzés

A hatásvázlat tanulmányozásával láthatjuk, hogy $D_{cy}D_{pm} \neq 0$ mellett a hatáslánc elővezető ágában az $y(t) \rightarrow D_{cy} \rightarrow u_m(t) \rightarrow D_{pm} \rightarrow y(t)$ útvonalon a rendszerben keletkezik egy algebrai tagokat tartalmazó visszacsatolt hurok (algebrai hurok). Ez elvileg a rendszer stabilitásában jelentős problémák okozója lehet. A gyakorlati esetekben előforduló technológiai folyamatok modelljeiben azonban $D_{pm}=0$, ami ezt az algebrai hurkot mintegy felszakítja.

A lineáris szabályozás hatásvázlatából láthatóan a zárt rendszernek két bemenő jele $[u_a(t), u_c(t)]$ -, két kimenő jele $[y(t), u_m(t)]$ -, és n_p számú $x_p(t)$ -, illetve n_c számú $x_c(t)$ állapotváltozója van. (MIMO multi input, multi output rendszer). Ha az állapotváltozókat az $x_R(t) = [x_p(t) \ x_c(t)]^T$ -, a bemenő jeleket $u_R(t) = [u_a(t) \ u_c(t)]^T$ -, a kimenő jeleket pedig az $y_R(t) = [y(t) \ u_m(t)]^T$ oszlopvektorokba összevonjuk⁴², akkor az eredő visszacsatolt rendszer állapotegyenletét is felírhatjuk. Ennek alakja, és az ehhez rendelhető hatásvázlat a 28. ábrán látható.



28. ábra

Az eredő lineáris rendszer **állapotegyenlete**, és **hatásvázlata**

Az eredő visszacsatolt rendszert is egy normálalakban felírható állapotegyenlet jellemzi, amely az adott esetben n_p+n_c számú elsőrendű lineáris differenciálegyenletet tartalmazó differenciálegyenlet rendszerből, és két darab lineáris algebrai egyenletből áll. Az eredő rendszer A_R , B_R , C_R , D_R paramétermátrixai a folyamat A_p , B_p , C_p , D_p -, és a szabályozó A_c , B_c , C_c , D_c paramétereiből határozhatók meg. Az eredő rendszer dinamikus viselkedését az integráló tag A_R állapotmátrixon keresztül történő visszacsatolása determinálja, amiben az alrendszer (a folyamat, és a szabályozó) saját dinamikája, és az y szabályozott jellemző negatív visszacsatolása is megjelenik. Ennek az állapotegyenletnek adott $u_R(t)$ gerjesztésre, és $x_R(0)$ kezdeti feltételre vonatkozó $x_R(t)$, $y_R(t)$ megoldására jól kidolgozott **analitikus**-, és **numerikus** (számítógépes) módszerek vannak. Az eredő rendszer időtartományban történő analizisét elsősorban állapotegyenletre alapozhatjuk. Ennek nagy előnye, hogy a kimenőjeleken túlmenően, az állapotváltozók időfüggvényeit is szolgáltatja. A lineáris rendszerek transziens folyamatait analitikusan kezelhetők, vagyis adott $u_a(t)$, és $u_c(t)$ gerjesztő jelekre keletkezett $y(t)$, és $u_m(t)$ válasz időfüggvényeknek van matematikailag levezethető analitikus megoldó képlete.

A szabályozási rendszer eredő hatásvázlatát szemlélve alapvető elvárás, hogy állandó $u_R(t)=u_{R0}$ bemenő jelek hatásának kitett szabályozásban $t \rightarrow \infty$ mellett létrejöjjön az $y_R(t)$ kimenő jeleknek egy $y_R(\infty)=y_{R0}$ állandósult értéke. Mivel $y_R(t)=C_R x_R(t)+D_R u_{R0}$, ezért ennek az egyensúlyi helyzet kialakulásának az is feltétele, hogy az $x_R(t)$ állapotváltozóknak is létrejöjjön az $x_R(\infty)=x_{R0}$ állandó értéke. Ez utóbbi viszont csak akkor lehetséges, ha az integráló tagok bemenő jelei (a $dx_R(t)/dt$ állapotsebességek) $t \rightarrow \infty$ mellett zérushoz tartanak, mivel az integráló tagok kizárólag zérus bemenő jel mellett képesek „nyugalmi” helyzetbe kerülni, amikor is kimenetükön az állandó x_{R0} jön létre. Ha ez az üzemállapot létrejön, az eredő lineáris rendszer **aszimptotikusan stabilis**. A hatásvázlatból kiolvashatóan ennek az állapotnak létrejöttét kizárólag az A_R állapotmátrix befolyásolja. Az eredő állapotegyenlet alapján a visszacsatolt rendszer aszimptotikus stabilitásának feltétele matematikailag is megfogalmazható: **aszimptotikusan stabilis⁴³ a szabályozási rendszer, ha az A_R eredő állapotmátrixánk**

⁴² T a transzponálás jele, az adott alkalmazásban sorvektorból oszlopvektort állít elő.

⁴³ Aszimptotikusan stabilis a lineáris rendszer, ha $u_a(t)=u_c(t)=\delta(t)$ Dirac delta gerjesztésre adott $y(t)$, $u_m(t)$ válaszai $t \rightarrow \infty$ mellett zérushoz tartanak. Ezzel egyenértékű megfogalmazás: aszimptotikusan stabilis a lineáris rendszer, ha $u_a(t)=u_c(t)=I(t)$ egységugrás gerjesztésre adott $y(t)$, $u_m(t)$ válaszai $t \rightarrow \infty$ mellett $y(\infty)=y_0$ állandó, $u_m(\infty)=u_{m0}$ állandó értékhez tartanak, vagyis a rendszer önbeálló.

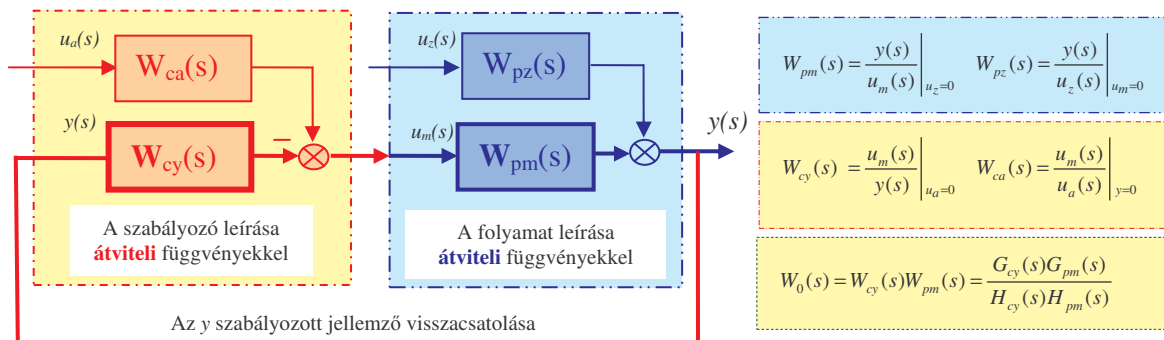
minden λ_{Ri} sajátértékére a $real(\lambda_{Ri}) < 0$ feltétel fennáll. Az aszimptotikusan stabilis lineáris rendszer esetében, az állandó $u_R(t) = u_{R0}$ hatására keletkező $x_R(t)$, $y_R(t)$ jelek $x_R(\infty) = x_{R0}$, és $y_R(\infty) = y_{R0}$ állandósult értékei:

$$\left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=\infty} = 0 = A_R x_R(\infty) + B_R u_{R0} \quad \Rightarrow \quad x_R(\infty) = x_{R0} = -A_R^{-1} B_R u_{R0}$$

$$y(t) \Big|_{t=\infty} = C_R x_R(\infty) + D_R u_{R0} \quad \Rightarrow \quad y_R(\infty) = y_{R0} = [-C_R A_R^{-1} B_R + D_R] u_{R0}$$

A lineáris rendszerekre érvényes a **szuperpozíció elve**. Ennek egyik jelentése például az, hogy abban az esetben, ha az $u_a(t)$, és $u_z(t)$ gerjesztésekre külön, külön meghatározzuk az $y_a(t)$, $y_z(t)$, és $u_{ma}(t)$, $u_{mz}(t)$ részválaszokat, akkor ezek $y(t) = y_a(t) + y_z(t)$, és $u_m(t) = u_{ma}(t) + u_{mz}(t)$ összegeként áll elő a rendszer eredő válasza, ha $u_a(t)$ és $u_z(t)$ egyidejűleg lépnek fel a rendszer bemenetein. A lineáris rendszerek egyfajta vizsgálati módszere (a **frekvencia módszer**) azon alapszik, hogy a gerjesztő jelek egy osztálya $0 < \omega < \infty$ körfrekvenciájú, különböző amplitúdójú-, és fázisú *harmonikus* jelekre bonthatók fel, vagyis ezek komponenseiből tevődnek össze. Ha a különböző frekvenciájú komponensekre adott részválaszokat meghatározzuk, akkor az eredeti gerjesztésre adott válasz a részválaszok összegeként adódik. A frekvencia módszer alapján a gyakorlati tervezésben is jól alkalmazható tervezési eljárások keletkeztek.

A lineáris matematikai modellnek nagy előnye, hogy a t időtartomány differenciálegyenletei helyett – a Laplace integrál–transzformáció alkalmazásával – az s Laplace operátor tartományban algebrai kifejezésekkel dolgozhatunk, ami az analízist, és a szintézist jelentősen egyszerűsíti⁴⁴. Ezekben az algebrai egyenletekben a differenciálegyenletek szerepkörét az átviteli függvények⁴⁵ veszik át, megteremtve ezzel annak a lehetőségét, hogy a transziens folyamatokat is algebrai problémaként kezeljük. A lineáris tagokra felírhatjuk a két bemenő-, egy kimenő jelű alrendszerek $y(s)/u_m(s) = W_{pm}(s)$, $y(s)/u_z(s) = W_{pz}(s)$, illetve $u_m(s)/y(s) = -W_{cy}(s)$, $u_m(s)/u_a(s) = W_{ca}(s)$ átviteli függvényeit⁴⁶. A hatásvázlat $W_{cy}(s)$, $W_{ca}(s)$ átviteli függvényei a szabályozó berendezés-, a $W_{pm}(s)$, $W_{pz}(s)$ átviteli függvények pedig a folyamat dinamikus modelljei az s operátor tartományban. A zárthurkú hatásláncban $W_{cy}(s)$, és $W_{pm}(s)$ szerepelnek, a negatív visszacsatolás $W_{cy}(s)$ előjelében jut érvényre. Ez azt jelenti, hogy abban az esetben, ha a statikus viszonyok között a folyamat u_z bemenő jelének növekedése az y kimenőjel *csökkenését* idézi elő, akkor ennek a szabályozó u_m kimenetén olyan hatást kell kiváltania, amelynek eredményeként y *növekszik*. Ezekkel – a szuperpozíció tétele alapján – az operátor tartományban a 29. ábra hatásvázlata jellemzi az eredő zárt rendszert.



29. ábra
Lineáris szabályozás leírása az alrendszerek átviteli függvényeivel

Bevezetve a nyitott hurok eredő átviteli függvényének $W_0(s) = W_{cy}(s)W_{pm}(s)$ fogalmát, az $y(s)$, $u_m(s)$ kimenő jelek, valamint az $u_a(s)$, és $u_z(s)$ bemenő jelek között felírható függvénykapcsolatok egyszerű algebrai műveletekkel számíthatók⁴⁷. A rendszeregyenletek az operátor tartományban:

⁴⁴ Ez a tulajdonság a Laplace transzformáció linearitási tételeiből, illetve az $L\{dx(t)/dt\} = sL\{x(t)\} - x(0)$ differenciálási szabályából származik. Nemlineáris rendszerek analízise, és szintézise lényegesen körülményesebb, a differenciálegyenlet rendszer megoldásának ekkor a numerikus módszerei jöhetnek szóba (Adams, Runge–Kutta stb. módszerek). Nemlineáris rendszerek vizsgálatára a Laplace transzformáció nem használható!

⁴⁵ Az $i(t)$ bemenő jelű-, és $o(t)$ kimenő jelű lineáris SISO (single input–single output, egy bemenetű, egy kimenetű) tag $W(s)$ átviteli függvénye a kimenő jel $o(s)$ Laplace transzformáltjának, és a bemenő jel $i(s)$ Laplace transzformáltjának hányadosa, zérus kezdeti feltételek mellett: $W(s) = o(s)/i(s)$. Az átviteli függvény a lineáris SISO tag differenciálegyenletének az s tartományban értelmezett alakja.

⁴⁶ A lineáris SISO tag átviteli függvénye $W(s) = G(s)/H(s)$ alakban adódik, ahol a $G(s)$ számláló, és a $H(s)$ nevező általában az s operátor polinomjai. Az alrendszerek A , B , C , D paramétermátrixaiból a $W(s)$ átviteli függvény meghatározható.

⁴⁷ Ezek az algebrai műveletek lényegesen egyszerűbbek, mint a differenciálegyenlet rendszer megoldása, de ennek „ára” az, hogy a megoldást nem az időtartományban, hanem az s Laplace operátor tartományában kapjuk. Kellő tapasztalat alapján az s operátor tartományban kapott $y(s)$, $u_m(s)$ megoldásokból is következtetni lehet az $y(t)$, $u_m(t)$ időfüggvények alakulására anélkül, hogy ezeket ténylegesen meghatároznánk. A zárt hatáslánc részei a $W_{cy}(s)$, és a $W_{pm}(s)$ átviteli függvények, amelyeknek a szabályozás alapelve szerint *negatív visszacsatolást* kell alkotniuk.

$$\begin{aligned} y(s) &= W_{pm}(s)u_m(s) + W_{pz}(s)u_z(s) && \Rightarrow \text{folyamat} \\ u_m(s) &= W_{ca}(s)u_a(s) - W_{cy}(s)y(s) && \Rightarrow \text{szabályozó} \end{aligned}$$

Ezekből az $y(s)=y[u_a(s),u_z(s)]$, és az $u_m(s)=u_m[u_a(s),u_z(s)]$ függvények:

$$\begin{aligned} y(s) &= W_{pm}(s)[W_{ca}(s)u_a(s) - W_{cy}(s)y(s)] + W_{pz}(s)u_z(s) \\ [1 + W_0(s)]y(s) &= W_{pm}(s)W_{ca}(s)u_a(s) + W_{pz}(s)u_z(s) \\ y(s) &= \frac{W_{pm}(s)W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)}u_a(s) + \frac{W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)}u_z(s) \\ u_m(s) &= W_{ca}(s)u_a(s) - W_{cy}(s)[W_{pm}(s)u_m(s) + W_{pz}(s)u_z(s)] \\ [1 + W_0(s)]u_m(s) &= W_{ca}(s)u_a(s) - W_{cy}(s)W_{pz}(s)u_z(s) \\ u_m(s) &= \frac{W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)}u_a(s) - \frac{W_{cy}W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)}u_z(s) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u_m(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_{pm}(s)W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)} & \frac{W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)} \\ \frac{W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)} & -\frac{W_{cy}W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a(s) \\ u_z(s) \end{bmatrix} = \frac{W_0(s)}{1 + W_0(s)} \begin{bmatrix} \frac{W_{ca}(s)}{W_{cy}(s)} & \frac{W_{pz}(s)}{W_0(s)} \\ \frac{W_{ca}(s)}{W_0(s)} & -\frac{W_{pz}(s)}{W_{pm}(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a(s) \\ u_z(s) \end{bmatrix}$$

A mátrixegyenlet alakjában felírt összefüggés lényegét tekintve a lineáris rendszer állapotegyenletének az $y(s)$, $u_m(s)$ megoldása az s Laplace operátor tartományában, adott $u_a(s)$, és $u_z(s)$ gerjesztésekre. Ha az $y(t)$, $u_m(t)$ időfüggvények ismeretére is szükségünk van, ezek inverz Laplace transzformációval határozhatók meg:

$$\begin{bmatrix} y(t) \\ u_m(t) \end{bmatrix} = L^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} y(s) \\ u_m(s) \end{bmatrix} \right\} = L^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{W_{pm}(s)W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)}u_a(s) & \frac{W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)}u_z(s) \\ \frac{W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)}u_a(s) & -\frac{W_{cy}W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)}u_z(s) \end{bmatrix} \right\}$$

A lineáris rendszer stabilitási feltételeinek vizsgálata is viszonylag egyszerű. A stabilitás ekkor rendszerjellemező tulajdonság, és kizárólag a rendszerparaméterektől függ. Ha determinisztikus vizsgálati jeleknek az $u_a(t)=u_z(t)=\delta(t)$ Dirac impulzust⁴⁸ választjuk, akkor az ennek hatására keletkező $y(t)$ és $u_m(t)$ válaszoktól (ezeket a válaszokat a zárt szabályozási rendszer **súlyfüggvényeinek** nevezzük) joggal várható el, hogy $t \rightarrow \infty$ esetében zérushoz tartanak, mivel $t > 0$ mellett a bemenő jelek is zérus értékűek. Az $L\{\delta(t)\}=1$ figyelembevételével:

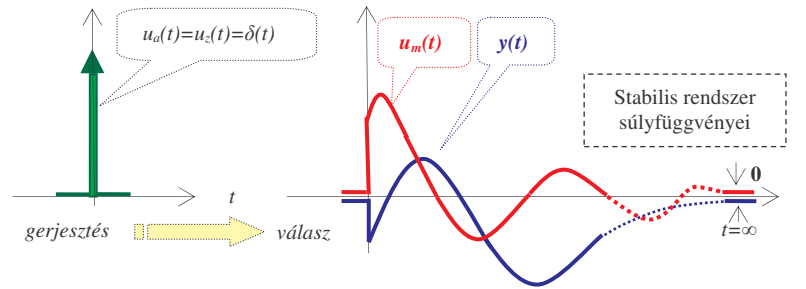
$$\begin{bmatrix} y(t) \\ u_m(t) \end{bmatrix} = L^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} y(s) \\ u_m(s) \end{bmatrix} \right\} = L^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{W_{pm}(s)W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)} & \frac{W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)} \\ \frac{W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)} & -\frac{W_{cy}W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} L^{-1} \left\{ \frac{W_{pm}(s)W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)} \right\} & L^{-1} \left\{ \frac{W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)} \right\} \\ L^{-1} \left\{ \frac{W_{ca}(s)}{1 + W_0(s)} \right\} & L^{-1} \left\{ -\frac{W_{cy}W_{pz}(s)}{1 + W_0(s)} \right\} \end{bmatrix}$$

Az inverz transzformációt (itt nem részletezett eljárással) elvégezve stabilis rendszer esetében az $y(t)$, $u_m(t)$ kimenő jeleknek mind az u_a -tól, mind pedig az u_z -től függő összetevőinek zérushoz kell tartania, miközben $t \rightarrow \infty$.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} y(t) \\ u_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

A gerjesztés-válasz időfüggvények minőségét alakulását aszimptotikusan stabilis rendszer mellett a 30. ábra mutatja.

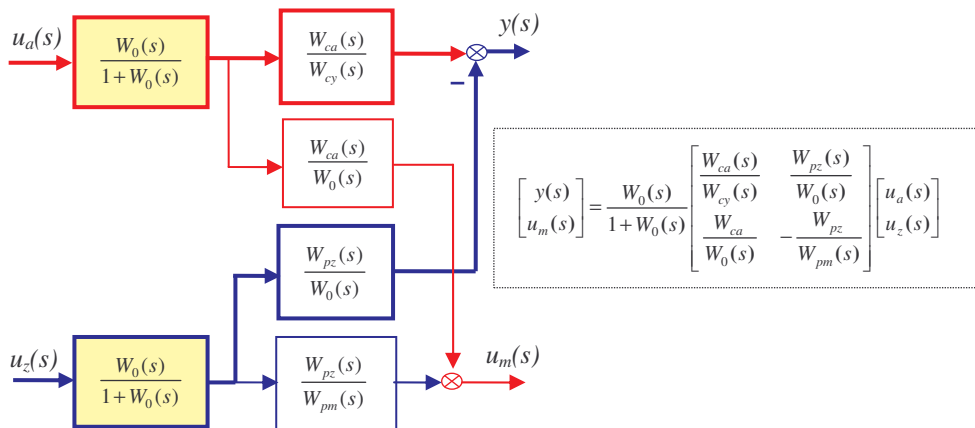
⁴⁸ A $\delta(t)$ egységnyi jelterületű Dirac impulzus matematikai vizsgálati jel, amely a $t=0$ időpont kivételével mindenütt zérus, a $t=0$ pontban viszont ∞ . Ezen túlmenően még $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1$. A SISO tag $u(t)=\delta(t)$ vizsgálati jelre adott $y(t)=w(t)$ válasza, a tag súlyfüggvénye.



30. ábra

Az aszimptotikus stabilitás szemléltetése a zárt szabályozási rendszer súlyfüggvényeivel

Az eredő rendszernek az s operátortartományban történő leírása az átviteli függvényekkel is megtehető. Az $y(s)$, $u_m(s)$ kimenő jeleket a rendszer $u_a(s)$, $u_z(s)$ bemenő jelei határozzák meg, a 31. ábra hatásvázlatnak megfelelően.



31. ábra

A zárt rendszer hatásvázlatának egy más alakja

Adott u_{a0} , és u_{z0} állandó gerjesztő jelek mellett **a lineáris rendszernek egyetlen egyensúlyi pontja van**, szemben a nemlineáris rendszerrel, amelynek több egyensúlyi pontja is lehet. A lineáris arányos szabályozási rendszer k hurokerősítése nem függ a gerjesztő jelektől, és az egyensúlyi pont koordinátáitól. A stabilis rendszer egyensúlyi pontjának koordinátáit a $dx_p/dt=0$, $dx_c/dt=0$ feltételekhez tartozó lineáris algebrai egyenletek megoldásával kaphatjuk. Ezek a lineáris állapotegyenlet matematikai modelljének esetében:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= A_p x_{p0} + B_{pm} u_{m0} + B_{pz} u_{z0} \\ y_0 &= C_p x_{p0} + D_{pm} u_{m0} + D_{pz} u_{z0} \end{aligned} \right\} \text{folyamat}$$

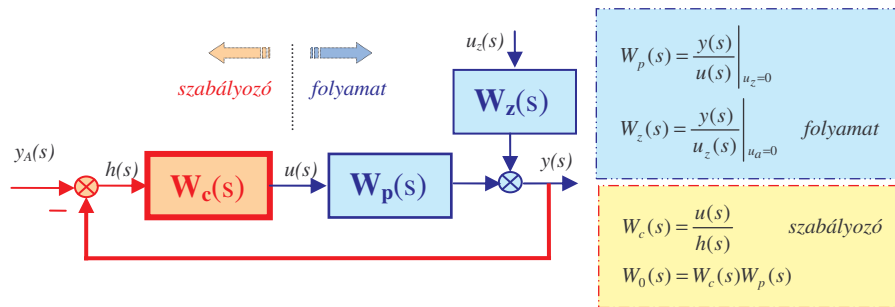
$$\left. \begin{aligned} 0 &= A_c x_{c0} + B_{ca} u_{a0} + B_{cy} y_0 \\ u_{m0} &= C_c x_{c0} + D_{ca} u_{a0} + D_{cy} y_0 \end{aligned} \right\} \text{szabályozó}$$

Az A , B , C , D paraméterek, valamint az u_{a0} , u_{z0} gerjesztések ismeretében x_{p0} , x_{c0} , u_{m0} , y_0 analitikusan számítható.

Az arányos szabályozások üzemtani tulajdonságainak a statikus karakterisztikák alapján történő tárgyalása során láttuk, hogy igen egyszerű megfontolások alapján bemutathatóvá vált, hogy például a stabilis arányos szabályozás k hurokerősítésének növelésével csökkenthető volt a zavarás szabályozott jellemzőre kifejtett nemkívánatos hatása, legalább is a rendszer állandósult állapotában: $\Delta y = (\Delta y)_n / (1+k)$. Ez a tulajdonság a k körerősítés növelését igényelné, de ennek a stabilitási követelmények határt szabnak. Az, hogy ez a határ hol van, csak a rendszer tranziens analízise alapján határozható meg.

A lineáris szabályozás általános hatásvázlatának alapján a szabályozó berendezéssel szembeni követelményeket átfoglalozhatjuk. **A technológiai folyamatot leíró tag A_p , B_p , C_p , D_p paraméterei (vagy a $W_{pm}(s)$ és $W_{pz}(s)$ átviteli függvényei) adott értékek. Ezek ismeretében kell meghatározni a szabályozó berendezést definiáló tag A_c , B_c , C_c , D_c adatait (vagy a $W_{cy}(s)$ és $W_{ca}(s)$ átviteli függvényeit) olyan módon, hogy a zárt szabályozási rendszer az előírt alapjelkövetési, és zavarelhárítási követelményeknek megfeleljen.** A dinamikus modell alapján érzékelhető, hogy ennek a kérdésnek a megválaszolása a rendszer részletes analízisét igényli.

Az egyhurkos⁴⁹ szabályozások átviteli függvényekkel definiált dinamikus modelljén egy egyszerűsített hatásvázlaton egy különbségképző taggal szimbolizálhatjuk az u_a alapjelnek megfelelő y_A alapérték, és az y szabályozott jellemző tényleges értékének különbségképzését (a $h=y_A-y$ hiba előállítását, és a *negatív visszacsatolást*), és a $W_c(s)$ átviteli függvénnyel írjuk le a h hibajel-, és az u irányító jel közötti dinamikus kapcsolatot. Az u irányító jel, az u_z zavaró jellemző, és az y szabályozott jellemző közötti kapcsolatot a $W_p(s)$, $W_z(s)$ átviteli függvényekkel jellemezzük. Most tehát nem a módosított jellemzőnél, hanem az u irányító jelnél „vágjuk ketté” a zárt rendszert, vagyis a teljesítményerősítőt, a végrehajtó szervet, és a beavatkozó szervet a folyamat részének tekintjük. Az így felépíthető hatásvázlat egyszerűen kezelhető, és igen jó áttekintést ad a hatáslánc struktúrájáról, és jelentős előnye, hogy a szabályozó jelátviteli tulajdonságait az egyetlen $W_c(s)$ átviteli függvénnyel írja le. Ennek az egyszerűsített struktúrának az alkalmazásával a méretezés is a $W_c(s)$ meghatározására egyszerűsödik. Az egyszerűsített hatásvázlat a 32. ábrán látható.



32. ábra
A zárt szabályozási rendszer egyszerűsített hatásvázlata

A hatásvázlat alapján a rendszeregyenletek:

$$\begin{aligned} y(s) &= W_p(s)u(s) + W_z(s)u_z(s) \\ u(s) &= W_c(s)h(s) \\ h(s) &= y_A(s) - y(s) \end{aligned}$$

Ezekből meghatározhatjuk, hogy az y szabályozott jellemző, az u irányító jel, és a h hibajel miként függ az y_A alapértéktől, és az u_z zavaró jeltől. Jelölje a nyitott hurok eredő átviteli függvényét a $W_0(s)=W_c(s)W_p(s)$ kifejezés. A részletszámítások mellőzésével kapjuk:

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \\ h(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} & \frac{W_z(s)}{1+W_0(s)} \\ \frac{W_c(s)}{1+W_0(s)} & -\frac{W_c W_z(s)}{1+W_0(s)} \\ \frac{1}{1+W_0(s)} & -\frac{W_z(s)}{1+W_0(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A(s) \\ u_z(s) \end{bmatrix} = \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{W_z(s)}{W_0(s)} \\ \frac{1}{W_p(s)} & -\frac{W_z(s)}{W_p(s)} \\ \frac{1}{W_0(s)} & -\frac{W_z(s)}{W_0(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A(s) \\ u_z(s) \end{bmatrix}$$

Megjegyzés

Abban az *idealizált* esetben, ha a hatásvázlat mindhárom tagja időkésettetés nélküli arányos tag⁵⁰, az átviteli függvények $W_c(s)=k_c>0$, $W_p(s)=k_p>0$, $W_z(s)=k_z$, és ekkor *arányos szabályozásról* van szó. A körerősítés értéke $k=k_c k_p > 0$. Az y szabályozott jellemző, és az u irányító jel függése az állandó u_a alapjeltől, és az u_z zavaró jeltől:

⁴⁹ Az „egyhurkos” megnevezés itt azt jelenti, hogy a rendszernek egy y szabályozott jellemzője –, és ennek megfelelően egy u_a alapjele van. Ezt a struktúrát a szakirodalom „egyváltozós” rendszernek is nevezi.

⁵⁰ A szabályozási hatáslánc tagjai ekkor dinamikát nem tartalmaznak, vagyis algebrai rendszeregyenletekről van szó. Ekkor a hatásvázlat is algebrai hurokot alkot.

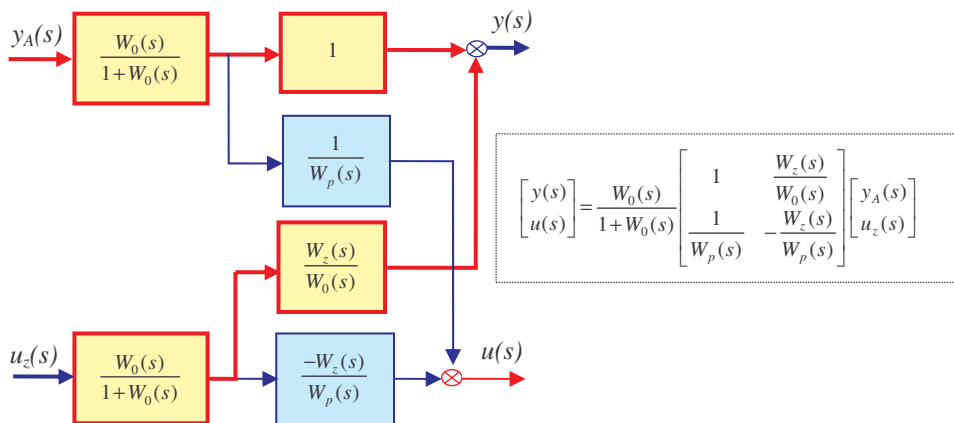
$$\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k}{1+k} & \frac{k_z}{1+k} \\ \frac{k_c}{1+k} & -\frac{k_c k_z}{1+k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A \\ u_z \end{bmatrix} = \frac{k}{1+k} \begin{bmatrix} 1 & \frac{k_z}{k} \\ \frac{1}{k_p} & -\frac{k_z}{k_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A \\ u_z \end{bmatrix}$$

ha $k \gg 1$:

$$\begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} 1 & \frac{k_z}{k} \\ \frac{1}{k_p} & -\frac{k_z}{k_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A \\ u_z \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{aligned} y &\cong y_A + \frac{k_z}{k} u_z \\ u &\cong \frac{1}{k_p} (y_A - k_z u_z) \end{aligned}$$

Ha $k \gg 1$, akkor $k/(1+k) \approx 1$, $k_z/k \ll k_z$, és ezért $y \approx y_A + (k_z/k)u_z$, ami a statikus vizsgálat korábban kapott eredményeit igazolja vissza $[\Delta y = (\Delta y)_n / (1+k) = (k_z u_z) / (1+k) \approx (k_z u_z) / k]$.

Az egyszerűsített eredő rendszer s operátortartományban történő leírása az átviteli függvényekkel most is megtehető. Az $y(s)$, $u(s)$ kimenő jeleket a rendszer $y_A(s)$, $u_z(s)$ bemenő jelei határozzák meg, a 33. ábra hatásvázlatnak megfelelően.



33. ábra
Az egyszerűsített hatásvázlat egy más alakja

A zárt rendszert leíró matematikai modellből láthatjuk, hogy a dinamikus viszonyok meghatározásában a

$$W_R(s) = \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} = \frac{\frac{G_0(s)}{H_0(s)}}{1 + \frac{G_0(s)}{H_0(s)}} = \frac{G_0(s)}{H_0(s) + G_0(s)} = \frac{G_R(s)}{H_R(s)}$$

eredő átviteli függvényének meghatározó szerepe van. Ebben $W_0(s) = W_c(s)W_p(s) = G_0(s)/H_0(s)$ a **nyitott kör eredő átviteli függvénye**. A szabályozás tervezése során a $W_c(s)$ megválasztásában van a szabályozástechnikuskak mozgásteret, miután $W_p(s)$, és $W_z(s)$ technológiai adottság. A $W_R(s)$ átviteli függvény az $y(s)$ szabályozott jellemző -, és az $y_A(s)$ alapérték Laplace transzformáltjainak $y(s)/y_A(s)$ hányadosa, a **zárt rendszer alapértékre vonatkozó eredő átviteli függvénye**.

Az adott egyszerűsített modell alapján a szabályozási rendszer aszimptotikus stabilitásának követelménye szintén megfogalmazható: **stabilis a zárt szabályozási rendszer, ha az $1+W_0(s)=0$ karakterisztikus egyenletének⁵¹ minden p_{Ri} gyökére ($W_R(s)$ minden p_{Ri} pólusára⁵²) a $real(p_{Ri}) < 0$ feltétel teljesül**. Egy ezzel egyenértékű megfogalmazásban a p_{Ri} pólusok mindegyike negatív valós részű, ha a $W_0(s)$ számlálójából, és nevezőjéből képzett $G_0(s)+H_0(s)$ kifejezés Hurwitz polinom.

Az átviteli függvények alapján az $y_A(s)$, $u_z(s)$ gerjesztésekre keletkező $y(s)$, $u(s)$ válaszokat az s tartományban

⁵¹ Ezt a karakterisztikus egyenletet $H_R(s)=0$, vagy $G_0(s)+H_0(s)=0$ alakban is kezelhetjük.

⁵² Ezek a p_{Ri} pólusok azonosak az eredő rendszer A_R állapotmátrixának λ_{Ri} sajátértékeivel ($\lambda_{Ri}=p_{Ri}$). A zárt rendszer súlyfüggvényei $exp(\lambda_{Ri}t)$ szerint változó időfüggvény komponensekből tevődnek össze, amelyek $t \rightarrow \infty$ mellett akkor tartanak zérushoz, ha $real(\lambda_{Ri}) < 0$. A sajátértékek (illetve a pólusok) száma ugyanaz, mint a rendszer $n=n_c+n_p$ rendszáma. A stabilitási kritériumokat a következő anyagrészekben részletesen tárgyaljuk.

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{W_z(s)}{W_0(s)} \\ \frac{1}{W_p(s)} & -\frac{W_z(s)}{W_p(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A(s) \\ u_z(s) \end{bmatrix}$$

alakban kapjuk, de most az x_p , és x_c állapotváltozók „rejtve” maradnak. Ennek ellenére az átviteli függvényekre alapozott analízis igen hasznos, mert a szabályozó **rendszertervezési méretezésében** kiválóan használható. Ehhez az analízishez a zárt rendszer fentiek szerint értelmezett egysívesített hatásvázlatát használjuk. Az egyszerűsített hatásvázlat alapján a szabályozó rendszertervezési méretezése alatt $W_c(s)$ átviteli függvényének meghatározását értjük. $W_c(s)$ méretezésekor figyelembe veendő szempont, hogy ennek megválasztásával a nyitott kör $W_0(s)=W_c(s)W_p(s)$ átviteli függvénye is meghatározásra kerül. A $W_c(s)$ megválasztásának elsődleges szempontja a zárt rendszer aszimptotikus stabilitásának biztosítása. Ezen túlmenően azonban a hatásvázlat alapján az is látszik, hogy a zárt körben az $u_z(s)$ zavaró jelnek az $y(s)$ szabályozott jellemzőre való befolyása

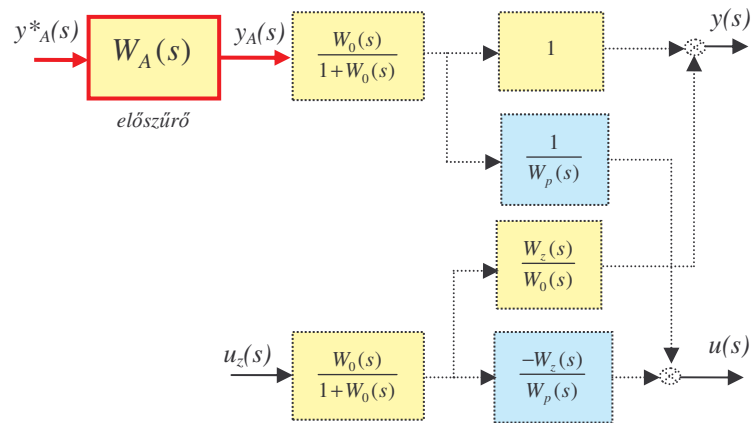
$$y(s)|_{y_A=0} = \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} \frac{W_z(s)}{W_0(s)} u_z(s) = \frac{W_z(s)}{1+W_0(s)} u_z(s)$$

mértékben történik. Ez a befolyásolás akkor kicsi, ha $W_0(s) \gg 1$. Ha tehát a szabályozó $W_c(s)$ átviteli függvényét a stabilitás-, és a zavarelhárítás szempontjai alapján méreteztük, akkor ez a nyitott kör $W_0(s)$ átviteli függvényének a megválasztását is jelenti. Ekkor a zárt körben az $y_A(s)$ alapértéknek az $y(s)$ szabályozott jellemzőre való befolyása

$$y(s)|_{u_z=0} = \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} y_A(s)$$

Mindez azt is jelenti, hogy $W_c(s)$ megválasztásával az $y(u_z)$, és az $y(y_A)$ függvénykapcsolatok is meghatározásra kerülnek (egy szabadságfokú rendszer).

Ésszerű kíváncsi, hogy az $y(y_A)$ -, és az $y(u_z)$ függvénykapcsolatra egymástól független befolyásolási lehetőségünk legyen. Ennek legegyszerűbb formája, hogy a rendszer alapérték bemenetére egy $W_A(s)$ átviteli függvényű, un. előszűrőt teszünk. Ezzel egy két szabadságfokú rendszerhez juthatunk, ahol is $W_c(s)$ a stabilizálási és az érték tartási (a zavarelhárítási) -, a $W_A(s)$ a követési feladatok ellátását van hivatva elősegíteni. Ábrán szemléltetve:



34. ábra
A két szabadságfokú rendszer hatásvázlata

Az $y(s)$ -, és $u(s)$ kimenő jelek a két szabadságfokú rendszer mellett:

$$\begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{W_z(s)}{W_0(s)} \\ \frac{1}{W_p(s)} & -\frac{W_z(s)}{W_p(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A(s) \\ u_z(s) \end{bmatrix} = \frac{W_0(s)}{1+W_0(s)} \begin{bmatrix} W_A(s) & \frac{W_z(s)}{W_0(s)} \\ \frac{W_A(s)}{W_p(s)} & -\frac{W_z(s)}{W_p(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_A^*(s) \\ u_z(s) \end{bmatrix}$$

A szabályozások vizsgálatához mind az **állapotegyenletekre**-, mind pedig az **átviteli függvényekre** alapozott módszereket egyaránt használjuk. Az állapotegyenletekre alapozott leírás a rendszeranalízisben játszik fontos szerepet, mivel a bemenő-, és kimenő jeleken túlmenően a rendszer állapotváltozóit is tartalmazza. Az átviteli függvények alapján történő vizsgálatokban ugyan az állapotváltozók rejtve maradnak, de a módszer kiválóan

használható a szabályozó rendszertechnikai méretezésekor. Mind az analízist, mind pedig szintézist kiváló számítógépes eljárások támogatják, és segítik, ezek megismerését, és felhasználását erőteljesen ajánljuk⁵³.

A következőkben tárgyalt részekben az egyhurkos lineáris szabályozásoknak azokkal a témáival foglalkozunk, amelyek alapján a tranziens tulajdonságok vizsgálhatók, a szabályozóval szemben támasztott követelmények megfogalmazhatók, és ezek alapján a szabályozó méretezhető.

⁵³ A **MATLAB**[®] mérnöki számításokra kifejlesztett programcsomag. Jelentősen támogatja a különféle matematikai feladatok (például: függvénytan, komplex függvénytan, mátrixalgebra, polinom műveletek, differenciálegyenletek, differenciaegyenletek, stb.) feldolgozását. Különböző *toolbox*-ai (például: **Control System Toolbox**, **Nonlinear Control Design Blockset**, **Robust Control Toolbox**, **Fuzzy Logic Toolbox**, **System Identification Toolbox**, stb.) a szabályozástechnikai feladatok megoldását segíti. A **SIMULINK** programcsomag dinamikus rendszerek szimulációs vizsgálatában jelent komoly támogatást. A *Symbolic Math Toolbox* szimbolikus matematikai számításokat tesz lehetővé. Hasonló programok: **MAPLE**[®], **Lab VIEW**[®] és a **SCILAB**, **OCTAV** szabad felhasználású programok.