

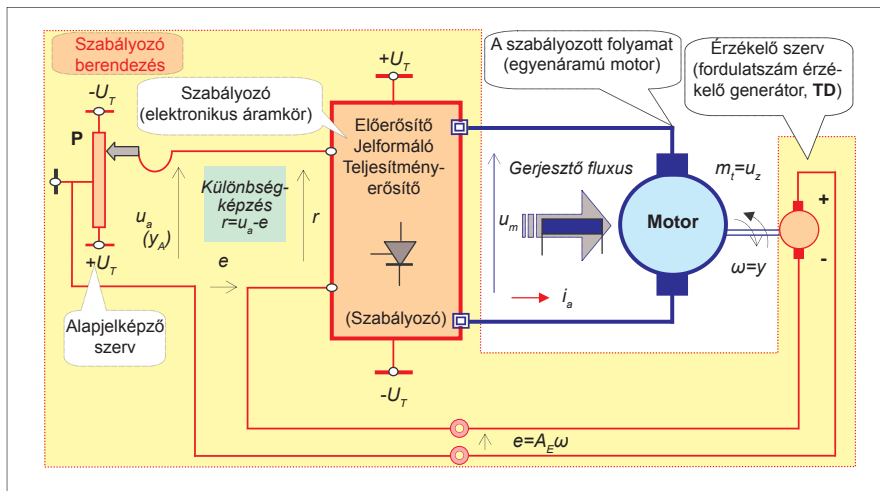
Szabályozástechnika - 2.

Dr. Szilágyi Béla – Dr. Juhász Ferencné

A cikksorozat folytatásában a szabályozási rendszerek szerkezeti vázlatának ismertetését egy arányos- és egy integrálszabályozás példájának a leírásával folytatjuk, majd kitérünk a szabályozási folyamat legfontosabb működési tulajdonságainak az összefoglalására, a teljes irányítási rendszer matematikai modelljét jelentő differenciálegyenletek szerepére és a negatív visszacsatolás működésére.

Egyenáramú villamos motor fordulatszámának szabályozása (arányos szabályozás)

A szabályozási feladat az állandó gerjesztő fluxusú egyenáramú motor $y = \omega$ [rad/s] szögsebességének (illetve az ennek megfelelő fordulatszámának) állandó értéken tartása, függetlenül az $u_z = m_t$ [Nm] terhelő nyomaték változásaitól. Mivel az állandó gerjesztésű egyenáramú motor fordulatszáma 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 (gépkezelői) közreműködés nélkül is megvalósíthatjuk¹. A **fordulatszám-szabályozás szerkezeti-áramköri elrendezése** látható az 1. ábrán. Ezen a szerkezeti vázlaton a külső gerjesztésű egyenáramú motor képviseli a szabályozott folyamatot, szabályozott jellemző a motor fordulatszáma, illetve az ennek megfelelő $y = \omega$ szögsebesség.



1. ábra Egyenáramú motor automatikus fordulatszám-szabályozásának szerkezeti-áramköri vázlat

A fordulatszám-mérő TD generátor (érzékelőszerv: tachométer dinamó) állítja elő az $y = \omega$ fordulatszám mindenkorai tényleges értékének megfelelő e [V] ellenőrző jelet, amely arányos a gép fordulatszámával: $e = A_E y = A_E \omega$, ahol A_E az **érzékelőszerv átviteli tényezője**. A fordulatszám kívánt értékét (az y_A alapértéket)

¹ Az egyenáramú gép fordulatszámának kézi szabályozásakor mérőműszerrel kell mérni a motor fordulatszámát, és ha ez a fordulatszám megváltozna, a gépkezelő – egy célszerűen kiválasztott, beállítható feszültséget szolgáltató tápegység feszültségének változtatásával – növeli vagy csökkenti a motor u_m kapocsfeszültségét. Az automatikus szabályozó a gépkezelő szerepét veszi át.

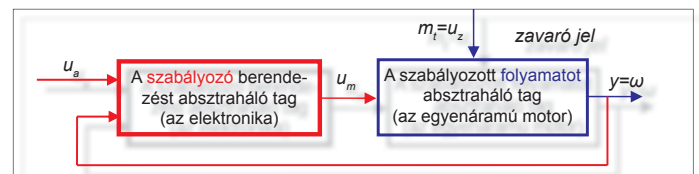
az alapjel képző szerv (potenciométer, P) u_a [V] alapjele reprezentálja. Az alapjel és a szabályozott jellemző különbségének képzése (a hibával arányos r [V] rendelkező jel² előállítás) most igen egyszerű, miután u_a és e jelek jelhordozója villamos egyenfeszültség. Ezért a két feszültség „szembekapcsolásával” 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.

Az adott szerkezeti vázlattal rendelkező fordulatszám-szabályozás hatásvázlata 2. ábrán látható:

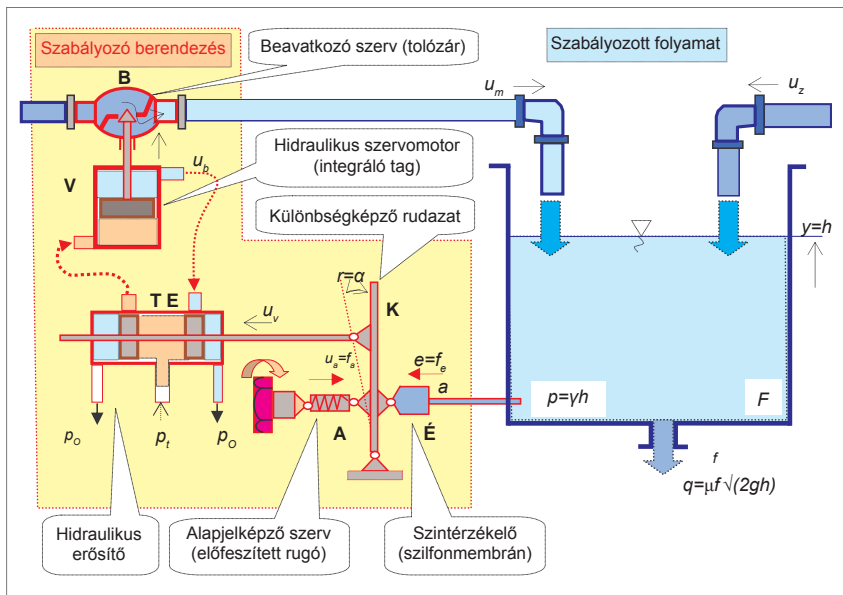
Szintszabályozás szerkezeti vázlat (integrálszabályozás)

A szabályozási feladat egy szabadkiömléssel rendelkező tartály $y = h$ [m] folyadékszint-helyzetének az állandó értéken való tartása, függetlenül attól, hogy a tartályba beáramló víz u_z [m³/s] térfogatsebessége hogyan vál-

2. ábra Egyenáramú motor automatikus fordulatszám-szabályozásának hatásvázlata



² Az u_a alapjel úgy aránylik a szabályozott jellemző y_A alapértékéhez (a szabályozott jellemző előírt értékhez), ahogy az e ellenőrző jel az y tényleges értékhez: $u_a / y_A = e / y = A_E$. 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 Tartály szintszabályozása

tozik. Erre lehetőséget az teremt, hogy az u_z térfogatsebesség szinthezetre gyakorolt nemkívánatos hatását az u_m [m³/s] térfogatsebesség szándékolt megváltoztatásával egyenlítőjük ki. Az F [m²] keresztmetszetű hengeres tartály szintszabályozásának szerkezeti vázlatát tartalmazza az 3. ábra.

Az $y=h$ szinthezettel (a szabályozott jellemzővel) arányos az érzékelési helyen keletkező γ [N/m³] fajsfűlyű folyadék $p=\gamma h$ [N/m²] hidrosztatikus nyomása, amit az a [m²] keresztmetszetű szilfonmembrán (érzékelőszerv) $f_e=pa=\gamma ha$ [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 tolózár, amelynek nyitásával vagy zárásával befolyásolható a tartályba áramló u_m térfogatsebesség (a módosított jellemző). Az ábrán egy olyan egyensúlyi helyzetet tüntettünk fel, amikor is az u_m és u_z térfogatsebességek állandó értékek és a h_0 szinthezet $q_0=\mu f\sqrt{2gh_0}=u_{m0}+u_{z0}$ [m³/s] kiáramló térfogatsebességet³ tart fenn. Ebben az állapotban $f_{a0}=f_{e0}$, a különbségképző rudazat függőleges, és a hidraulikus erősítő vezérlőtollatyuú elzárják a p_t [N/m²] hidraulikus tápnyomás elől a szervomotort. A tolózár ekkor egy adott u_{b0} [m] pozícióban áll. Ha ebben az egyensúlyi helyzetben például az u_{z0} térfogatsebesség (a zavaró jel) Δu_z értékkel megnövekszik, ez az y_0 az e_0 az r_0 , az u_{v0} , az u_{b0} és az u_{m0} jelek Δy , Δe , Δr , Δu_v , 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 tolózarat. Ez az u_m térfogatsebesség, és azon keresztül az y szinthezet csökkenéséhez vezet. Új egyensúly akkor áll be, ha a tolózár mozgása megszűnik. Ez pedig akkor következik be, ha a különbségképző rudazat ismét függőleges helyzetbe kerül, vagyis amikor a szinthezet 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

³ Ezt a q_0 térfogatsebességet a tartály alján lévő hidrosztatikus nyomás határozza meg, és a h_0 szinthezet $q_0=\mu f\sqrt{2gh_0}=k\sqrt{h_0}$ nemlineáris függvénye (μ a kifolyási tényező, f [m²] a kifolyási keresztmetszet, g [m/s²] a nehézségi gyorsulás). A szinthezet nyugalmi helyzetében az $u_{m0}+u_{z0}$ beáramló térfogatsebességek összegének szükségszerűen azonosnak kell lenniük a q_0 kiáramló térfogatsebességgel, ezért nyugalmi helyzetben $q_0=u_{m0}+u_{z0}$, és ennek alapján $h_0=h(u_{m0},u_{z0})=(u_{m0}+u_{z0})^2/(2\mu^2f^2g)$.

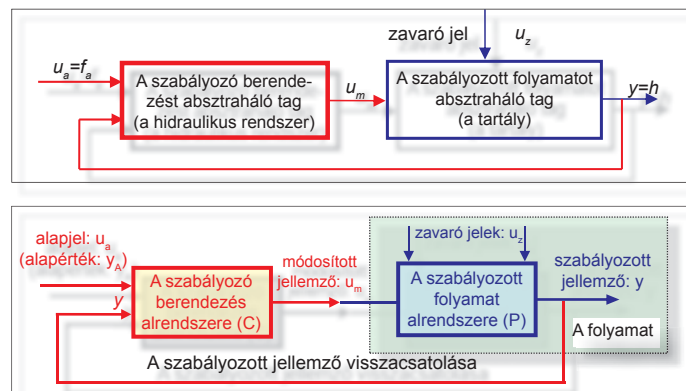
legyen. Ebből pedig az is következik, hogy az y szinthezet mindig ugyanarra az értékre áll be, függetlenül az u_z térfogatsebesség megváltozott állandó értékétől, vagyis **állandósult állapotban az r hibajel (és így a $h=y_a-y$ hiba is) zérus**. Ez az integrálszabályozásoknak egy jellegzetesen előnyös ismérve, és a hidraulikus erősítő és szervomotor integráló tulajdonságából származtatható.

A szintszabályozás szerkezeti vázlatának megfelelő hatásvázlat a 4. ábrán látható.

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 szabályozóberendezésben (controller; C) realizálódó szabályozási algoritmustól függően, **szándékoltan** befolyásolja. A szabályozási rendszer

jelátviteli viszonyait – absztrahált formában – megjelenítő, általánosan érvényes hatásvázlat az 5. ábrán látható:

4. ábra Tartály szintszabályozásának hatásvázlata



5. ábra Az „egyhurkos” szabályozás hatásvázlata

A hatásvázlaton a teljes szabályozóberendezést (érzékelő, alapjelképző, különbségképző, előerősítő, jelformáló, teljesítményerősítő, végrehajtó, helyzetbeállító, beavatkozó szerveket, valamint 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, áramkört, 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 bojlert, az egyenáramú motort, a tartályt), a szabályozóberendezést (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 az y_0 egyensúlyi értéke, és ha igen, akkor mekkora ez az érték? → (Stabilitásvizsgálat, analízis)
- Milyen elvek alapján, milyen paraméterekkel kell megválasztani a szabályozóberendezés jelátviteli tulajdonságait leíró függvényeket? → (Algoritmustervezés)

- Az alapjelet (például a bojlerben lévő víz hőmérsékletének, a motor szögsebességének, a tartály szinthelyzetének az előírt értékét megjelenítő jelet) egy magasabb értékre állítjuk (mert melegebb vizet, nagyobb fordulatszámot, magasabb szinthelyzetet szeretnénk előállítani). Létrejön-e, és ha igen, akkor milyen módon, és mekkora idő alatt a szabályozott jellemző új egyensúlyi értéke? Milyen lehetőség van a beállási idő lerövidítésére? → (A követési tulajdonságok analízise)
- A zavarójel (például a bojler betáplált vízmennyisége, a motor terhelőnyomatéka, a tartály u_z térfogatsebessége) megváltozásának hatására létrejön-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 hőmérséklet-szabályozásban alkalmazott állásos szabályozó élettartalma a K kapcsoló kapcsolási számától függ. Milyen módon növelhető ez az élettartam? A fordulatszám-szabályozás és a szintszabályozás folytonos szabályozóberendezéseinek elemei milyen konstrukcióban épüljenek fel? → (Hardvertervezés)
- 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 irányítóberendezés 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**⁴ 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, hogy 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 hőmérséklet-ingadozások következményeként stb. – változhatnak. Az irányítóberendezés 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:

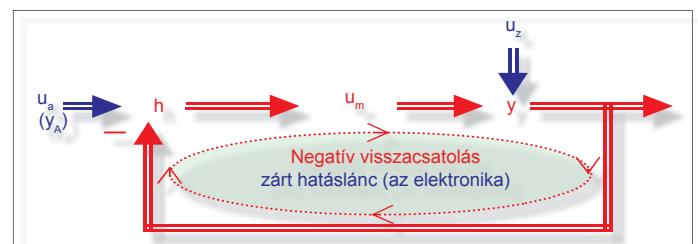
$$T_m T_v \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_m \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_p u_m(t) - k_z \left(u_z(t) + T_v \frac{du_z(t)}{dt} \right)$$

⁴ Ez a megállapítás addig érvényes, amíg a rendszer a működési tartományában van. Ha a szervomotor felütöközik, vagy a tartályban túlfolyás állna elő, a rendszer a működési tartományát elhagyta.

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

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 ($T_m, T_v, k_p, k_z, F, \mu, f, g$ 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 (kivánt) értékét (az u_a alapjel által képviselt y_A alapértéket), előállítjuk a kivánt és a tényleges érték $h=y_A-y$ különbségét (a hibát vagy az ezzel arányos $u_a-e=u_a-A_E y$ 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 jellemzőnek olyan módon kell megváltoznia, amely y növekedését eredményezi⁵). A szabályozási struktúrában a jelek egy zárt hurkú **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 6. ábra szemlélteti.



6. ábra A zárthurkú hatáslánc

A nyílakkal jelzett vonalak az $ok \Rightarrow okozat$ 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).

A szabályozástechnika tudományágának egyik legfontosabb fogalma a **negatív visszacsatolás**⁶ (a szabályozást a **negatív visszacsatolás elvén megvalósuló irányításnak** is definiálhatjuk).

A folytatásban rátérünk a szerkezeti vázlat, működési vázlat, hatásvázlat általánosítási fokozatok megismerése után a szabályozóberendezés szerveinek a tárgyalására.

(Folytatjuk!)

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

⁵ A szabályozások vizsgálata során használt matematikai modellek különféle típusai: **statikus-dinamikus, lineáris-nemlineáris, determinisztikus-stochasztikus, koncentrált paraméterű-elosztott paraméterű, folytonos idejű-diszkrét idejű**.

⁶ 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 folyamat valamely y -ra szándékolt 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 feladat megoldását jelentheti (pl. utasszállító repülőgép pilótájának helyettesítése robotpilótával stb.).