

Szabályozástechnika - 1.

Dr. Szilágyi Béla – Dr. Juhász Ferencné

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

A cikksorozat tervezett témái

1. A szabályozás mint a kulturális evolúció egy jelensége. A negatív visszacsatolás. Érzékelés (**szenzor**), a szabályozási algoritmus realizálása (**kontroller**), beavatkozás (**aktuátor**).
2. A jelterjedés leírása. A hatáslánc. Szerkezeti vázlat, működési vázlat, hatásvázlat. A szabályozás egyensúlyi helyzete. Állásos, arányos és integrálszabályozás. A zavarelhárítás hatásmechanizmusa.
3. A dinamikus rendszer leírásának matematikai modelljei. Az állapotegyenlet. A munkaponti linearizálás és a lineáris modell. A 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 feladatok ellátásában.
6. A PID-szabályozó paramétereinek illesztése a folyamat adataihoz. (A szabályozó rendszertechnikai méretezése).
7. Az irányíthatóság és a megfigyelhetőség fogalmi. A folyamat dinamikus tulajdonságainak befolyásolása állapot-visszacsatolással. 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 hibridrendszer matematikai modellje. ADC-, DAC-jelátalakítás, mintavételezés és zérusrendű tartás. A diszkrét jelek tulajdonságai. A *Z* transzformáció. Az impulzusátviteli függvény.
10. A hibridszabályozás 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.

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 lehet-

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 ösztönyszerű, 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 ettől 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 könyvét *Watt*nak dedikálja, az alábbiak szerint:*

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 időben senki sem járult annyival az ember erejének növeléséhez, mint éppen Ön, tökéletesíve a gőzgépet, amelyről Ön azt vallja, hogy Dr. Blacktól kapott inspirációk alapján tudta azt véghezvinni.

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 kitarotán hajtogatta Dr. Black, és ugyanakkor sűket 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 gyakorlati részeseivé válnak (pl. *Ljapunov* 1892-ben kidolgozott stabilitáselmélete).

J. Watt vezette be a teljesítmény mérésére a lóerő (LE) fogalmát (Egy ló 1 perc alatt 33 000 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 információegység 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 teremtetette meg azt a lehetőséget, hogy az általános dinamikus rendszereknek - így a visszacsatolt lineáris szabályozásoknak is - a rendszerelmélete ki alakuljon. *J. Watt* - alapvetően a **kísérletekre** és az ezekből levonható tapasztalatokra alapozva - ezen ismeretek hiányában is maradandót alkotott.

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

Irányítás lépései	Funkciók
Információszerzés 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

1. táblázat

séges. (Pl. úrművek, robotika, nukleáris technika, vegyipari reaktortechnika, földi, vízi, légi járműirányítás, elektronikus berendezések, számítógépek, híradástechnikai eszközök, villamos hajtások, a CNC-megmunkálás szerszámgépei, energetikai folyamatok, orvoselektronikai 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 irányítóberendezéssel oldható meg (pl. háztartási villanybojler hőmérséklet-szabályozása állásos szabályozóval). Léteznek azonban jelentősen komplikáltabb folyamatok, ezek irányítása nagy bonyolultságú, komplex feladatokat ellátó irányítóberendezéseket igényelnek (pl. atomerőmű reaktor-turbina-villamos generátor blokkegységének számítógépes folyamatirányítása). Az irányítani kívánt folyamatok tehát sokrétűek, az irányítóberendezés azonban általában egységes elvek alapján épül fel. *A rendszerelméleti tárgyalás pedig teljesen független a folyamat, illetve az irányítóberendezés szerkezeti kialakításától.*

A különféle technológiai folyamatok irányítása az 1. táblázatban felsorolt mechanizmusok szerint történik.

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, leküzdv 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 helyzetről, az időjárási 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 tengely-

kapcsoló működtetésével szétkapcsolhatja az energiaátalakító rendszert a hajtóműtől, az időjárási viszonyoktól függően be- vagy kikapcsolja az ablaktörlő lapátokat hajtó szervomotorokat és a klímaberendezést, a forgalmi szituációktól függően fékez, gázt ad és manőverez, kezeli a navigációs rendszert. Ha a „normális” üzemben zavarok lépnek fel, 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, kipörgésgátló, blokkolás gátló, automatikus sebességváltás, világítás automatikus ki-be kapcsolása, automatikus klímaszabályozás, olajnyomás-szabályozás, a segédenergia rendszer feszültségének 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 részvételtől teljesen tehermentesíteni lehessen. Az irányításra jellemző **érzékelés, ítéletalkotás (az információk feldolgozása), rendelkezésadás, és beavatkozás** funkciói nemcsak 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 és a terepváltozás okozta terhelések nemkívánatosan változtathatják a jármű sebességét. Az automatikus irányítórendszer 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 (rendelkezésadás a beavatkozásra). 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 irányítórendszer „kikapcsol”, és ismételt aktivizálása csak újabb vezetői utasításra történik.

Hasonló elvnek megfelelően működik a motor hőmérséklet-szabályozásának irányítási rendszere is. Egy hőmérséklet-érzékelő (pl. gőzteniós hőmérő) méri a hűtővíz tényleges v hőmérsékletét, és ha ez egy beállított v_a előírt értéket meghalad, akkor az irányítórendszer nyitja a vízáramba tett szelepet, és bekap-

csolja a hűtőventillátort. Ezeket a funkciókat szerkezetileg 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 12 V, 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 szórakoztatóelektronikát, és ez szolgáltatja azt a segédenergiát is, ami a gépjármű elindításához és az egyéb irányítási rendszerek működtetéséhez is szükséges. Mindezen okok miatt a villamos segédenergia-forrással szemben jogos igény, hogy ennek 12 V feszültség szintje a mindenkori terheléstől, illetve a motor fordulatszámától függetlenül állandó legyen. Ezt az elvárást a jármű **feszültség szabályozási rendszere** elégíti ki. Érzékelőszerv méri a feszültség u aktuális értékét, amely összehasonlítható ennek kívánt $u_a = 12\text{ V}$ 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 gerjesztőáramát, aminek eredményeként a feszültségegyensúly helyreáll. A **feszültség szabályozó** gondoskodik az akkumulátor megfelelő töltöttségének biztonságáról is.

A jármű vezetője – mint egy 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 – érzékelőszerveivel (látás, hallás, szaglás, egyensúlyérzés stb.) beszerzett információk alapján – vezeti a járművet (végtagjainak segítségével motorikusan kezeli a kormányt, a féket, a gázpedált, a sebességváltót, a kezelőszerveket). Ez szintén az emberi agy tevékenységének az eredménye. Ha a technikailag megoldottnak tekinthető, és a termosztát által végrehajtott motor hőmérséklet-szabályozást (a hűtővíz hőmérséklet-növekedésének hatására a gőzteniós hőmérő nyitja a hűtővíz mennyiségét befolyásoló szelepet, és bekapcsolja a hűtőventillátort) hasonlítjuk az emberi test hőmérsékletének szabályozásához, szembevetően 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 utánzatok. Napjaink élettani, biológiai kutatásainak jelentős területei az emberi agy működésének „megfejtésére” irányulnak. Az élettani folyamatok sokrétűsége és bonyolultsága miatt gyorsan megszerezhető eredményekkel ezek a kutatások nem kecsegtetnek.

Az irányítási feladatok ellátásában az információszerzés eszközei az **érzékelőszervek (szenzorok)**. Az információfeldolgozás eszköze a **szabályozó (kontroller)**, 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 kí-

vánt 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 szabályozóberendezés 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 **integrálszabályozás** működését vannak hivatva bemutatni. Egyszerűségüknél fogva alkalmasak a statikus és a dinamikus jelenségek szemléltetésére.

Melegvítároló hőmérséklet-szabályozása (állásos szabályozás)

A szabályozási rendszer működésének bemutatására tekintsük egy igen egyszerű, a háztartások jelentős részében megtalálható melegvítároló (villanybojler) hőmérséklet-szabályozásának 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 tartása¹. Ez egy állásos szabályozó² alkalmazásával (amely a villamos fűtés ki-be kapcsolásával oldja meg az irányítási feladatot), a **háztartási igényeket kielégítő pontossággal** biztosítható. Az ábrán vázolt melegvítároló egy átfolyós rendszerű, a vízvezeték-hálózat p_T [N/m²] nyomása alatt álló hengeres tartály, amelybe beáramló hideg víz térfogatsebessége w [m³/s] és hőmérséklete v_v [°C]. A tartályban lévő vizet az R [Ω] fűtellenálláson 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 $v - v_k$ hőmérséklet-különbségtől függő hőmennyiség távozik a v_k [°C] hőmérsékletű környezetbe, ezért 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 $u_{z1} = w$, $u_{z2} = v_v$, $u_{z3} = v_k$ jelek változásaitól. A szabályozási feladat az adott elrendezés szerint üzemelő rendszerben úgy valósul meg, hogy az **E** gőzteniós hőmérővel³ érzékeljük a bojlerben lévő víz $y = v$ **tényleges** hőmérsékletét, és ha ez eltér egy előzetesen beállított $y_A = v_A$ **előírt**

¹ Az $y = v$ [°C] tényleges vízhőmérséklet a folyamat **szabályozott jellemzője**, melynek beállítható (előírt) értéke az $y_A = v_A$ **alapérték**.

² A kétállású állásos szabályozó kimenő jelének – miközben a bemenő jele befutja a működésének teljes intervallumát – két diszkrét értéke van. Az adott példában ez a fűtellenálláson 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.

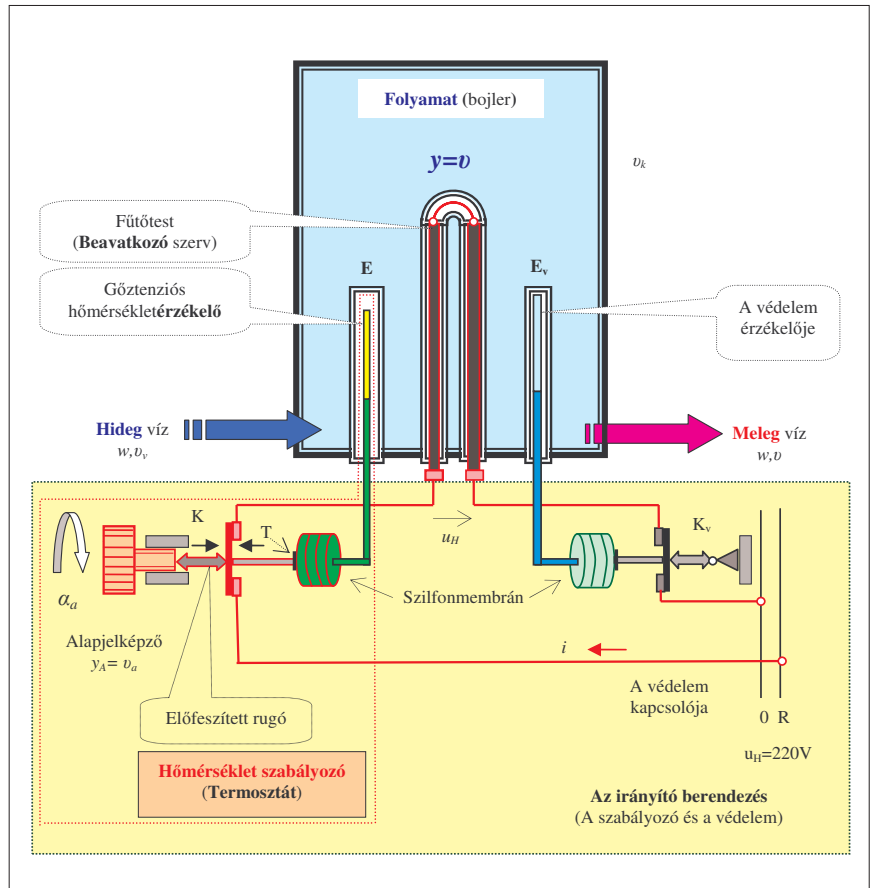
³ A gőzteniós hőmérő a bojlerben lévő víz $y = v$ [°C] hőmérsékletét a vele arányos gőzteniós nyomássá alakítja át. Szerkezeti kialakítása egy vékonyfalú, jó hővezető képességű részcső, amely párologni képes folyadékkal (pl. klórbenzollal) van félig feltöltve. Ha a víz hőmérséklete növekszik, a csőben lévő folyadék párolgásának intenzitása is növekszik, ami növeli a gőznyomást is. Ez a nyomás alakul át a szilfonmembránon a vízhőmérséklettel arányos erővé.

értéktől (az **alapértéktől**), akkor az u_H hálózati feszültségnek az R ellenállásra történő ki- vagy bekapcsolásával a hővé alakuló villamos teljesítményt befolyásoljuk. A rendszer *szerkezeti vázlatát* az 1. ábra szemlélteti.

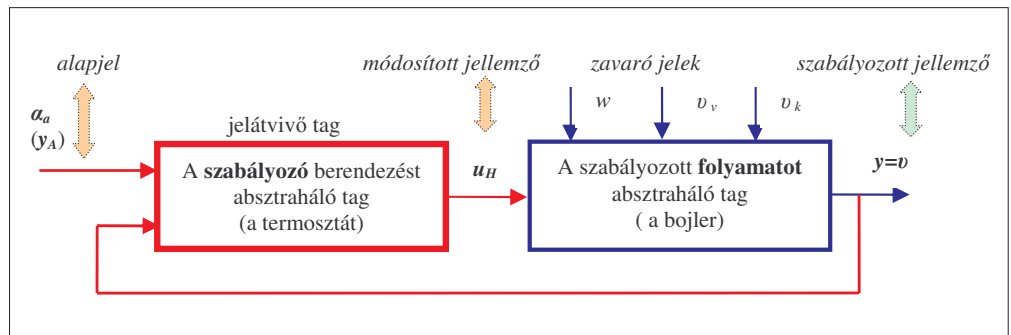
Az alkalmazott szabályozóberendezés (a termosztát) a hőmérséklet-érzékelőn túlmenően egy ún. szilfonmembrán, a v_a alapjelet reprezentáló előfeszített rugót és egy K kapcsolót is tartalmaz. A hőmérséklet növekedésekor a gőzteniós hőmérőben a nyomás növekszik, ez a szilfonmembránon erővé alakul, amely 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 érzékelőszerv gőzteniós 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 hiszterézis⁴, illetve a folyamat idő-késleltetési befolyásolják.

A tartályba egy másik érzékelőszerv is be van építve (E_v), ennek védelmi feladata van. Ha ugyanis a szabályozó kontaktusai a 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 kerül⁵.

Az irányításban lejátszódó jelenségek leírására a hatásvázlattal történő absztrakciót használjuk. Ebben elvonatkoztatunk a szerkezeti-áramköri kialakítás tényleges elrendezésétől. Jelátvivő tagokkal ábrázoljuk a folyamatot (pl. a bojler), és a teljes szabályozóberendezést (pl. a gőzteniós hőmérséklet-érzékelőt, a szilfonmembrán, 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



1. ábra Villanybojler hőmérséklet-szabályozásának szerkezeti vázlata



2. ábra Villanybojler hőmérséklet-szabályozásának hatásvázlata

hidegvíz w térfogatsebessége, v_v hőmérséklete és a v_k környezeti hőmérséklet), kimenő jele az $y=v$ szabályozott jellemző. A szabályozóberendezést 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), 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 a 2. ábrán látható.

A folytatásban az arányos és az integrálszabályozásra mutatunk példát, majd a folyamatleírás egyes fázisait elemezzük.

(Folytatjuk!)

⁴ A hiszterézis minden állásos kapcsoló természetes tulajdonsága, és azt jelenti, hogy nem pontosan ugyanazon bemenőjel értéknél történik a kimenő jel ki- és bekapcsolása.

⁵ A Challenger-, 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.