

## Bevezetés

Könyvünk az irányításelmélet és az irányítástervezés, valamint a megvalósítás kérdéseivel foglalkozik. Az elméleti és módszertani kérdéseken túl kiemelt alkalmazási területként a földi és légi járművek, valamint kisebb mértékben ezek forgalmi folyamatainak modellezését és irányítását tárgyaljuk.

A bemutatott anyag a BME közlekedésmérnöki oktatásában több szinten került tárgyalásra, illetve jelenik meg, így a hagyományos ötéves képzésen kívül a nemrég indított BSc-, MSc-, és a PhD-képzésben is.

A tárgyalási mód a rendszer- és irányításelméletben szokásos matematikai formalizmusra épül. A könnyebb érthetőség érdekében kimondunk ugyan formális tételeket és definíciókat, de csak könnyen követhető konstruktív bizonyításokat és levezetéseket használunk. Más esetekben a fogalmakat és eredményeket pontosan idézzük, és a bizonyításokra hivatkozunk.

A bemutatott elmélet és módszertan alkalmazását számos példa segíti. A könnyebb áttekinthetőség érdekében külön ábra- és példajegyzéket mellékelünk.

### Rendszer- és irányításelmélet

A irányítástechnika pontosabb megfogalmazáshoz meg kell ismerkednünk a rendszer- és irányításelmélet alapjaival. Az irányítástechnika célja, hogy adott rendszerek viselkedését általunk kívánt tulajdonságúvá tegye, továbbá hogy a rendszerek viselkedését megadott szempontoknak, céloknak megfelelővé vagy optimálissá.

Példaként említünk egy fűtési rendszert, ahol a cél a fűtött közeg vagy helyiség hőmérsékletének adott értéken való tartása. Ezt értéktartó szabályozással tudjuk megvalósítani, a megkívánt rendszertulajdonság az adott helyen mért hőmérséklet állandó értéke. Egy autó adott sebességgel való haladását szintén értéktartó sebességszabályozással lehet biztosítani. Egy repülőgép adott pályán való mozgását úgynevezett követő szabályozással tudjuk megoldani. Robotok irányításánál az előírt pályákon való mozgást szintén követő szabályozással oldjuk meg.

A *rendszerelmélet* formálisan leírja és jellemzi adott (mesterségesen létrehozott vagy természetileg adott) rendszer tulajdonságait egységes, saját fogalomrendszerre építve.

Maguk a rendszerek a valóságban sokfélék lehetnek, tipikusan az egyes diszciplínák szerint tekintve elektromechanikai, mechatronikai, elektronikai, ökológiai, ökonometriai, biológiai, kvantum, illetve információs rendszerek.

Alkalmazási szempontból – a fenti diszciplínák közül – elsősorban a műszaki tudomány területeihez tartozó dinamikus rendszereket említjük. Ilyenek a közúti forgalmi rendszerek, mint dinamikus folyamatok; a gépjárművek, illetve a rajtuk alkalmazott irányítási rendszerek, mint pl. az elektronikus fékezés, kormányzás, valamint az autonóm járművek navigációs rendszerei. Hasonlóképp dinamikus rendszer a légi forgalom és a légi járművek, az információáramlás az interneten, valamint az ad hoc hálózatokon.

Az *irányításelmélet* a formális leírás és/vagy megfigyelt viselkedés (mérési adatok) alapján elméleti alapokat és módszertant ad a komplex rendszerek analíziséhez és tervezéséhez úgy, hogy teljesüljenek előírt tulajdonságok, képesek legyenek környezeti változásokhoz adaptálódni, bizonytalanságokra robusztusak legyenek.

Az irányítási rendszer megvalósítása mérnöki rendszerekben információvisszacsatolást és számítógépes algoritmusok alkalmazását jelenti. Az információk tipikusan érzékelt és/vagy kommunikált információk lehetnek.

A továbbiakban rövid történeti áttekintést adunk a rendszer- és irányításelmélet kialakulásáról és néhány, a tudományág fejlődése szempontjából alapvető eredményről.

## **Történeti áttekintés, új kutatási irányok**

A továbbiakban a teljesség igénye nélkül áttekintést adunk a rendszer- és irányításelmélet fejlődésének főbb mérföldköveiről és azon új témakörökről, amik a jelenlegi főbb irányokat jelentik. Történetileg az előzményeket

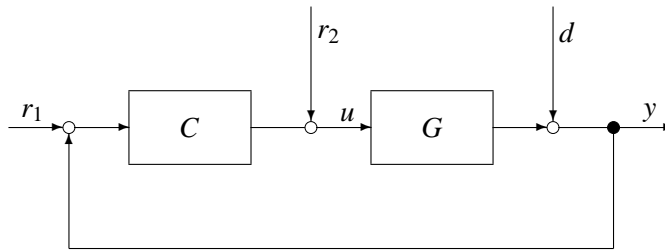
az 1880-as évektől vizsgálhatnánk, amikor megjelent a mozgás szabályozásának igénye (szélmalmok őrlőkövei közötti távolság tartása a változó szélviszonyok mellett, gőzgépek szabályozása, szervomechanizmusok), majd ezt követték az elektromos hálózatokhoz kapcsolódó feladatok (feszültség szabályozás, visszacsatolt erősítők). Ezeket a feladatokat mechanikai, hidraulikai és pneumatikai eszközökkel, mint az automatika építő elemeivel oldották meg. Mai – intelligensnek is nevezett – rendszereinkben a modern szenzorok, mikroelektronika és informatika alkalmazása dominál. Ezt az ívet próbáljuk a '30-as évektől kezdődően áttekinteni és egyúttal bevezetni a mai terminológiában használt fontosabb fogalmakat is.

A rendszerelméletben a rendszereket érő hatásokat gerjesztő vagy bemenő jeleknek, zajoknak, míg a mérhető vagy számolható jellemzőket kimenő jeleknek nevezzük. Formálisan a jeleket függvényekkel írjuk le, amelyek tulajdonságaiktól függően valamilyen függvénytér elemei. A rendszereket a bemenő jeleikre kifejített hatásuk modellezésével írhatjuk le. A korai (XX. század eleji) rendszerfogalom a linearitásra épült a tipikus bemenőjelosztályok mint impulzus- vagy egységugrásfüggvények rögzítése mellett. Fontos fogalom a frekvenciafüggvény, amely lineáris, pontosabban lineáris időinvariáns (LTI) rendszerek esetén adott frekvenciájú szinuszos bemenőjelre a frekvencia függvényében a jel erősítését, illetve a bemenőjel és kimenőjel közötti fáziseltolást írja le.

A Bode és Nyquist nevével jellemzett, 1930-as évektől induló *klasszikus* periódusban az alapvető szabályozási feladat a stabilitásra és zajelnyomásra való tervezés volt, amin belül egy soros dinamikus szabályozó és visszacsatolás segítségével a zárt rendszer erősítés- és fázisfüggvényeit tervezték meg [12]. A szabályozási kör blokkdiagramját a 0.1. ábrán láthatjuk. Ezt a megközelítést az ipari gyakorlatban ma is elterjedten alkalmazzák: szabályozó tipikusan arányos (P), integráló (I), differenciáló (D) vagy PI, PD, PID.

Későbbiekben az optimális rendszerek és irányítások elmélete jelentette az új irányokat, amikor időtartományban, a rendszert leíró differenciálegyenletek és egy, az optimális viselkedést leíró funkcionál alapján határozzák meg az irányító jelet. A variációszámítás alkalmazásai mellett új elméletek jelentek meg, így a Pontryagin-féle maximumelv [56], a Bellman-féle dinamikus programozás [11], sztochasztikus rendszereknél pedig a Wiener- és később a Kalman-féle szűréselmélet [69; 38].

A *modern irányításelméletnek* nevezett korszakot R. E. Kalman alapvető cikkei indították el [37; 38], amelyekben bevezette az állapottér-elméletet



0.1. ábra. A klasszikus szabályozási kör blokkdiagramja ( $u$ : bemenőjel,  $y$ : kimenőjel,  $r_1$ : referencia- vagy alapjel,  $r_2$ : bemeneten ható zavarójel,  $d$ : kimeneten ható zavarójel). A szabályozó tipikusan P, PI, PD, PID.

és -modelleket (időtartománybeli megközelítés), valamint a hozzájuk kapcsolódó megfigyelhetőség, irányíthatóság fogalmakat. Ezekre építve megoldotta a kvadratikus értelemben optimális  $LQ$  (*Linear Quadratic*) irányítási problémát, amelyben az optimális irányítás egy kvadratikus funkcionál minimalizálása mellett a statikus állapot visszacsatolásával számítható. A visszacsatolás erősítését az ún. mátrix Riccati-féle differenciál-, vagy stacionárius esetben az algebrai egyenlet megoldásából származtathatjuk.

Az  $LQ$ -irányításnak megoldása sztochasztikus állapot és megfigyelési zajok jelenlétében az ún.  $LQG$  optimális irányítás. Numerikus módszereket tekintve a rendszeranalízis és -szintézis lineáris algebrai eszközök, továbbá a Riccati-egyenlet megoldó módszereinek alkalmazását igényli.

A lineáris rendszerek elméletét tekintve a nyolcvanas években fejlődött ki az ún. algebrai és a geometriai rendszerelmélet, az eredmények kiváló összefoglalása H. H. Rosenbrock [59], T. Kailath [35], és M. Wonham [70] monográfiáiban található meg.

Néhány gyakorlati alkalmazás sikertelensége ráirányította a figyelmet az  $LQ$ -,  $LQG$ -irányításoknak a rendszert leíró modell közelítő volta miatti érzékenységre. Emiatt indult el kb. 1975-től az MIT-n (Massachusetts Institute of Technology) a klasszikus frekvenciatartománybeli megközelítés és az állapottermódzerek egymást kiegészítő tulajdonságainak együttes alkalmazása, amiből a *robustus irányítások klasszikus-modern elmélete* fejlődött ki, ld. M. Athans, M. Safonov, G. Stein, J. Doyle eredményeit [64; 26; 61]. Ennek a megközelítésnek lényeges eleme a sokváltozós rendszerek erősítésének a frekvenciafüggvény mátrixok szinguláris értékfüggvényeivel való

definiálása és az ezek alapján levezetett, a frekvenciafüggvény bizonytalanságainak modelljét is figyelembe vevő robusztus stabilitásra való tervezés. A robusztus szabályozások formális optimalizálási feladatként való kezelését és a kidolgozott elméletet  $\mathcal{H}_\infty$  irányításelméletnek nevezzük [71; 72; 74; 7].

Megemlítjük még a  $\mu$ - vagy strukturált szingulárisérték-analízist és -szintézist, ami elsősorban J. C. Doyle [25] nevéhez fűződik (ld. még [7]), valamint az  $\mathcal{L}_\infty$  indukált norma minimalizálására épülő irányítás tervezésére kidolgozott  $l_1$  optimális irányításelméletet (Dahleh és Pearson, [21]).

A nemlineáris modelleket elterjedten alkalmazzák a fizikai szemléletmód megtartásának fontossága miatt a mechanikai és jármű modellekben. A nemlineáris rendszerek irányításának jó összefoglalását találjuk Isidori könyvében (1985) és a [34]-ben is.

Nemlineáris rendszerek elméletében az alkalmazott matematikai eszközök bonyolultsága miatt gondot jelent ezek alkalmazása az irányítás tervezésében. Az LPV (*Linear Parameter Varying*) rendszerek [8; 9; 14; 6] bevezetése alternatívát kínál számos rendszerelméleti és irányítási probléma hatékony lineáris algebrai eszközökkel való megoldására, így alkalmazásuk igen fontossá vált a földi és légi járművek irányításában.

Fontos megemlíteni a hazai irányításelméleti iskolákat, amelyekben az oktatás és kutatás nemzetközi szinten is elismert.

A klasszikus és modern irányításelmélet legjelesebb magyar képviselői Csáki Frigyes [19], Vámos Tibor [68], Tuschák Róbert [66], Frigyes Andor [29] professzorok. Őket követően Keviczky László, Bányász Csilla [39], és tanítványaik hoztak létre olyan szakmai-tudományos közösséget, amelyben az orosz, svéd, német, angol és amerikai iskolák szellemisége egyaránt megjelent, és önálló hozzájárulásai jelentősek voltak a rendszeridentifikáció, sokváltozós és nemlineáris rendszerek, valamint ezek alkalmazása területén. Lantos Béla [43], Vajk István [67], és Bars Ruth professzorok és tanítványaik munkája szintén nemzetközi fórumokon jelenik meg.

A járműdinamika modellezésében és irányításában nemzetközi szinten kiemelkedő iskolát teremtett Michelberger Pál, Keresztes Albert és Várlaki Péter [46; 47; 48]. Őket követték a járműfejlesztésekben is egyedülálló eredményeket elérő Palkovics László [55] és munkatársai.

A rendszer- és irányításelmélet eredményeit, valamint az ezek alkalmazásában folyó kutatásokat, rendszerfejlesztéseket jól követhetjük az IFAC, IEEE szimpóziumain és kongresszusain, illetve ezek kiadványaiban, folyóirataiban (mint például *IFAC Automatica*, *IEEE Transactions*). Részletesebb

tájékoztatót a [www.ifac.org](http://www.ifac.org) és [www.ieeecss.org](http://www.ieeecss.org) honlapokon találhatunk.

## **A könyv felépítése**

A könyv első részében a lineáris időinvariáns rendszerek klasszikus analizésével és szintézisével (tervezésével) foglalkozunk.

Az 1. és a 2. fejezetekben tárgyaljuk az idő- és frekvenciatartománybeli rendszerleírásokat tipikus bemenőjelekre, és mindkét tartományban bemutatjuk a rendszerstabilitási kritériumokat.

A 3. fejezet a zárt, visszacsatolt rendszerek stabilitásával és minőségi kritériumaival foglalkozik, itt kerülnek bemutatásra a klasszikus P, PI soros szabályozók tervezésének módszerei és alkalmazásuk villamos targonca, gépjárműkormányzás és négyrotoros helikopter irányításának tervezésére. A fejezet a robusztus stabilitási tesztek levezetésével és alkalmazásával zárul.

A könyv második részében a 4. fejezet az állapotér-elméletbe vezet be. Megmutatja a kapcsolatot a klasszikus, súlyfüggvényre és frekvenciafüggvényre épülő rendszerleírásokkal, és részletesen foglalkozik a dinamikus rendszerek különböző állapotér-reprezentációival és ezek kapcsolatával. A megértést számos példa segíti.

Az 5. fejezet az R. E. Kalman által bevezetett alapvető rendszertulajdonságokat: a megfigyelhetőséget, irányíthatóságot és minimalitást mutatja be.

A 6. fejezet az állapot-visszacsatolásra épülő tervezési módszerekkel foglalkozik, a pólusallokáció módszerével mutatja be az inverz inga és egy gépjármű aktív felfüggesztési irányításának tervezését.

A 7. fejezetben az LQ-irányítás és LQ-szervó (követő szabályozás) probléma megoldását mutatjuk be. Alkalmazási példák: gépjármű irányítása fékezéssel, négyrotoros helikopter.

A 8. fejezetben az állapotmegfigyelőkkel, sztochasztikus esetben a Kalman-szűrővel és LQG-tervezéssel foglalkozunk. Alkalmazásokat mutatunk be repülőgép hosszirányú dinamikájának és gépjármű aktív felfüggesztésének irányítására.

A 9. fejezetben a folytonos idejű dinamika alapján tervezett szabályozók digitális számítógépen való implementálásának kérdéseivel foglalkozunk, és a folytonos idejű rendszerekkel analóg módon megadjuk a diszkrét idejű rendszerek analizésében és irányítástervezésében fontos eredményeket.

A Függelékben a Laplace-, Fourier-transzformációkra, a mátrixszámításra és a lineáris algebrára egy rövid összefoglalót adunk.