

A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLÉSHEZ KAPCSOLÓDVA...

Tanulmány a pilóta nélküli légi járművek működésével és
üzembentartásával kapcsolatban

Dr. Szegedi Péter

ISBN 978-963-12-5224-8

2016

Szerkesztők:

Dr. Békési Bertold* alezredes, PhD.

Dr. Szegedi Péter* alezredes, PhD.

*Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Fedélzeti Rendszerek Tanszék

Lektorok:

Prof. Dr. Óvári Gyula* ny. ezredes, CSc.

Dr. Kavas László* alezredes, PhD.

*Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

Dr. Békési Bertold alezredes, PhD.

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Fedélzeti Rendszerek Tanszék

© Szegedi Péter, Szolnok, 2016.

ORCID: orcid.org/0000-0002-6968-6456

1. Kiadás

ISBN 978-963-12-5224-8

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	3
A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLÉSHEZ IS „SZÜKSÉGES BEVEZETÉS”	5
PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉPEK	9
<i>A pilóta nélküli repülőgépek története</i>	10
<i>A pilóta nélküli eszközök üzemeltetése, a humán faktor</i>	13
<i>A repülőgépek tervezésének folyamata</i>	22
<i>A mechatronikai rendszerek általános felépítése</i>	24
REPÜLŐGÉPEK TÉRBELI MOZGÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE	26
<i>A repülőgép háromdimenziós mozgásának matematikai modellje</i>	26
Koordinátarendszerek.....	26
A repülőgépek mozgásegyenletei.....	28
Hosszirányú linearizált mozgásegyenletek.....	31
Oldalirányú linearizált mozgásegyenletek	33
A repülőgép állapotegyenletei.....	34
A repülőgép átviteli függvényei	35
REPÜLŐGÉPEK STABILITÁSA, MEGFIGYELHETŐSÉGE ÉS IRÁNYÍTHATÓSÁGA	38
<i>Lineáris zárt szabályozási rendszerek stabilitása</i>	38
<i>Megfigyelhetőség</i>	39
<i>Irányíthatóság</i>	40
A SZABÁLYOZÓTERVEZÉS MÓDSZEREI ÉS ALGORITMUSAI	41
Szabályozótervezés klasszikus módszerei.....	41
<i>Frekvencia tartománybeli módszerek</i>	41
<i>A Bode-diagram</i>	41
<i>Időtartománybeli módszerek</i>	43
<i>Modern szabályozótervezési eljárások</i>	46
<i>A pólus áthelyezés módszere</i>	47
<i>Az LQR módszer</i>	48
ROBOTPILÓTA (AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ) RENDSZEREK	53
<i>A robotpilóták irányítástechnikai minőségi követelményei</i>	56

A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZERÉNEK ANALÍZISE..	57
<i>A pilóta nélküli repülőgép idő-, és frekvenciatartománybeli analízise.....</i>	<i>57</i>
<i>A zárt szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata</i>	<i>59</i>
A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZER ZAVARELHÁRÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA.....	60
<i>A külső zavarások determinisztikus matematikai modellezése.....</i>	<i>60</i>
<i>A külső zavarások sztochasztikus matematikai modellezése</i>	<i>60</i>
<i>A zárt repülésszabályozó rendszer zavarelhárításának vizsgálata</i>	<i>61</i>
<i>A sávszűrővel működő magasságstabilizáló rendszer analízise</i>	<i>65</i>
<i>A PDT1-es sávszűrős szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata.....</i>	<i>66</i>
<i>A PDT1-es magasságstabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata</i>	<i>71</i>
FELHASZNÁLT IRODALOM.....	77

A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLÉSHEZ IS „SZÜKSÉGES BEVEZETÉS”

Minden egy nagy álommal kezdődött, a repülés álmával. A történetírásból, a régi idők regéiből és mondáiból ismerjük, hogy már az ókor embere is ábrándozott a repülésről. A középkorban az emberek az égboltot Isten birodalmának, titokzatos és misztikus világnak tartották, de a szárnyalás vágya tovább élt. Erről az első elképzelések egyike a madarak mozgásának utánzása volt. A korai kísérletek alapvető hibái az ember izomerejének túlbecsülése, illetve az aerodinamikai ismeretek teljes hiánya voltak. Leonardo da Vinci (1452–1519), a XV. századi művész, gondolkodó és hadimérnök úgy vélte, hogy a repülés rejtélyének megfejtéséhez a közeget, a levegő áramlását, illetve a madarak szárnymozgását kell tanulmányozni. A legelső között volt, akik tudományos alapon próbáltak repülőszervezeteket tervezni. Mások, mint a francia származású Joseph-Michel Montgolfier (1740–1810) és öccse Jacques-Étienne Montgolfier (1745–1799), akik személyes megfigyelésüknek köszönhető ötletük alapján kezdtek kísérletekbe. Megtöltöttek egy „zsákot” (ballont) meleg levegővel, ami felemel egy kosarat. Kísérleteik eredményeként 1782 novemberében egy selyemből készített ballon 30 méter magasságba emelkedett, majd 1783-ban az első ember is elhagyta a földfelszín levegőnél könnyebb repülőeszközzel.

A repülés szempontjából meghatározó áramló közeg két, fontos jellemzőjének (sebesség és nyomás) összefüggéseit Daniel Bernoulli (1700–1782) fedezte fel és definiálta.

1799-ben George Cayley (1773–1857) angol tudós, feltaláló felismerte az aerodinamikai felhajtóerő és az ellenállás lényegét. A levegőnél nehezebb testek repülésével foglalkozó kísérleteivel hozzájárult az aerodinamika alapvető törvényeinek meghatározásához [24]. Otto Lilienthal (1848–1896) öccsével (Gustav Lilienthal) együtt fogalmazta meg a repülés három alapvető feltételét, a felhajtóerőt, a hajtóerőt, illetve a kormányzást. 1890-es években megépített egy siklórepülőgépet, amellyel sikeres kísérleti repüléseket hajtott végre, bizonyítva a levegőnél nehezebb repülőszervezet létrehozhatóságát. Az 1899-ben kezdett kísérleteik eredményeként Wilbur Wright (1867–1912) és Orville Wright (1871–1948) kifejlesztették, megépítették az első irányítható, motorral hajtott, levegőnél nehezebb repülésre alkalmas eszközt, és kidolgozták a repülőgépek kormányozhatóságának ma is érvényes alapelveit. 1903. december 17-én, Orville Wright-nak az észak carolina-i Kitty Hawk homokdűnéi között sikerült megtennie 12 másodperc

alatt, 39 méteres távot 3–4 m/s sebességgel, ellenszélben, az emberiség történetének első¹ motorral hajtott repülőgépével, amelyet Flyer (azaz „Repülő”) névre kereszteltek.

Az aviatika úttörői, kutatói, kísérletezői a repülés kérdését tudományos és technikai kihívásként is kezelték, a levegőnél könnyebb és nehezebb repülőszervezetek sokaságát képzeltek el. A mindennapi életből vett ötletek és a gyarapodó ismeretek következményeként egyre közelebb kerülve a valóban működő modellek megépítéséhez, sikeres és sikertelen kísérleteket folytattak, akár a még nem elégséges tudás és technológia hiányában feláldozva életüket is. Ezek a felismerések, felfedezések és elért eredmények teremtették meg az alapját annak, hogy a levegőnél könnyebb és nehezebb szervezetek, „repülő tárgyak” a levegőbe emelkedhessenek, irányított és tudatos manővereket hajtsanak végre, hasznos feladatokat lássanak el és visszatérhessenek a földre. Munkásságukkal megteremtették a folyamatosan fejlődő repüléstudomány alapjait, ezen belül a hagyományos és pilóta nélküli repülőgépek üzemeltetéséhez, fejlődéséhez szükséges olyan alapismereteket, amelyek szükségesek, de már nem elégségesek a jelen kor alkalmazói és kutatói számára. Az eredményt Leonardo da Vinci fogalmazta meg századokkal ezelőtt:

„A nagy madár elindul majd, első útjára. Bámulatba fogja ejteni az egész világot, hírét hirdeti minden írás, és születési helyét az örök dicsőség fénye ragyogja be.”

[1][2][3][4][5][7]

¹ Egyes korabeli információk szerint, egy Alekszandr Fjodorovics Mozsajszkij által tervezett, 10 lóerős gőzgéppel hajtott repülőgépet 1882. július 20-án próbálták ki. Bár van olyan híradás mely szerint a levegőbe emelkedett, és egy rövid, 20–30 méteres szökkenést hajthatott végre. (online), url: http://hu.wikipedia.org/wiki/Alekszandr_Fjodorovics_Mozsajszkij (2016.03.03) ennek hitelessége azonban a légi jármű ismert teljesítmény, tömeg és formai kialakítási adatai ismeretében megalapozottan kétségbe vonható.

BEVEZETÉS

Sajnos nem múlik el úgy év, hogy ne történne valahol, valamilyen katonai konfliktus, (terror cselekmény, vagy környezeti) katasztrófa, ami emberi életet követel. Az ilyen veszteségek megelőzésének, csökkentésének egyik lehetséges módja a pilóta nélküli repülőgépeket (UAV – **U**n**m**anned **A**erial **V**ehicle) alkalmazása, minden lehetséges magas sérülési vagy mortalitási valószínűségű feladatra.

A közvélemény a katonai és nem katonai akciókban az anyagi kárt sokkal jobban tolerálja, mint az embervesztést. Egyrészt, például, bevetés során katapultált pilóta kimentése költséges, és további emberéleteket is követelhet. Másrészt, a repülésben az ember a korszerű technológiák alkalmazásának egyik akadály, mert jelenléte kényes ergonómiai szabályok szerint berendezett, munkára alkalmas teret, és az életfeltételek biztosítását kívánja a repülőgépben. Emiatt a pilóta nélküli eszközök megépítése, üzemeltetése még olcsóbb is, mint a repülőgép vezetők által irányított repülőgépeké [12].

Tipikus katonai légi tevékenységek, mint például megelőző csapások, vagy légi harcok megvívása folyamán az ember által vezetett és a személyzet nélküli repülőgépek együttes alkalmazása biztosíthatja az alkalmazott eszközök hatékonyabb felhasználását, és a saját erők fokozottabb megóvását. Például a pilóta által vezetett légi jármű előtt repülő UAV-ken helyezik el a felderítő, és csapásmérő eszközöket – amelyeket a hajózó saját fedélzeti rendszere részeként üzemeltet (drónok és repülőgépek hálózatos, rajban történő üzemeltetése).

Az öbölháborúk, illetve más XX. sz. végi, XXI. sz. eleji háborúk tapasztalatai azt mutatják, hogy a „precíziós”² fegyverek bevetésének gyakorisága nőtt. A jelenlegi megsemmisítő eszközök ismeretében megalapozottan feltételezhetjük, hogy amit nem, vagy csak nehezen, illetve kis távolságról tudunk felfedezni, csak azt lehet hatékonyan védeni [13]. A különböző termikus, elektromos, vagy egyéb kisugárzott, visszavert, detektálható jelek csökkentésének lehetősége lehet a kisebb geometriai méretek alkalmazása, ami a támadó és a védelmi műveletekben való használhatóságot egyaránt növelheti.

Ahhoz, hogy a repülőgépek hajózó személyzet nélkül képesek legyenek különböző katonai és nem katonai feladatok ellátására, szükséges biztosítanunk távvezérelhetőségük, illetve

² Maj Jack Sine: Defining the “Precision Weapon” in Effects-Based Terms
<http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/apj/apj06/spr06/sine.html>

a repülési útvonaluk előre programozhatósága mellett a fedélzeten elhelyezett felderítő, és egyéb mérő, illetve érzékelő eszközök üzemeltetésének megfelelő körülményeit.

Repülés közben a külső kormánysszervek kitérése, vagy külső zajok következtében fellépő nagy dinamikájú irányváltatások hatására fellépő erők károsan befolyásolhatják a repülőgépen elhelyezett eszközök felhasználását, vagy akár a berendezések épségét, illetve csökkenthetik a repülőgép repülési biztonságát. Az UAV-k stabilitásának, repülésbiztonságának növelésére olyan robotpilóta, vagy repülésszabályzó rendszer kiépítése indokolt, ami teljesíti a szabványokban leírt, illetve a felhasználó által megfogalmazott elvárásokat.

A mai, modern repülőgépek digitális számítógép vezérlésű integrált repülésszabályzóval rendelkeznek, amelyek együttműködnek más fedélzeti berendezésekkel, mint például a rádiólokátor, az inerciális, vagy rádiónavigációs eszközök, a GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem), és a fedélzeti fegyverrendszer. A számítógépes folyamatirányítás hardver eszközeit az ún. „Commercial off the Shelves (COTS)” technológia szerint válogatják össze. A szoftver eszközöket (operációs rendszer, alkalmazói szoftverek) az egyes repülőgépeken a megoldandó feladatoknak megfelelően készítik el. A szabályozási kör szoftvereinek elkészítése és telepítése a fedélzetre több lépcsőben történik. Az első lépcsőben, amelyet szokás előzetes tervezésnek is nevezni, a szabályzó berendezések első verzióit, programjait laboratóriumokban készítik el. A tipikusan alkalmazott tervező programok: MATLAB[®], MATRIX_x, Eigpack stb. Az előzetes tervezés után a vizsgálatokon átment rendszer (hardver, szoftver) földi körülmények között statikus kabinú szimulátor számítógépére kerül, ahol „berepülnek”. A program végső vizsgálata ezután FMS (**F**ull **M**ission **S**imulator) szimulátoron történik. Amennyiben sikeresek a próbák, akkor valós körülmények között, repülőgépek fedélzetére telepítve folytatják az ellenőrzéseket. A sikeres tesztsorozatok után az adott repülőgép típusra telepíthető a program, és megkezdődhet az „igazi repülés”.

A feladatok sokrétűsége multifunkcionális repülőgépek alkalmazását teszi szükségessé, amelyek bevetés után, rövid idejű átalakítással (megfelelő szoftver és/vagy konténer cseréje) az új harc feladat sajátosságainak megfelelően, átfegyverezhetőek és gyorsan újra bevethetőek. A pilóta nélküli repülőgépek ilyen eszközök, (a rajtuk elhelyezhető fedélzeti hasznos terhelések függvényében) katonai, és polgári feladatok széles spektrumát képesek ellátni.

PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉPEK

A repülésben gyakran a repülőgép fedélzetén tartózkodó ember a korszerű technológiák alkalmazásának egyik akadálya. Ezeknél, a pilóta nélküli légi járművek általában jóval mostohább körülmények között is üzemeltethetőek, többségük nagyobb gyorsulást, túlterhelést, hideget vagy meleget stb. képes elviselni. Üzemeltetésük viszonylag olcsó, hiszen nem kell külön rendszereket alkalmazni a pilóta megfelelő életkörülményeinek biztosítására. Az UAV-k alkalmazásának további előnye, hogy lényegesen kisebb a járulékos üzemeltetési költségük.

A drónok nagy bonyolultságú, összetett elektronikai-mechanikai rendszerek, amelyek a legkülönbözőbb katonai, polgári, feladat-végrehajtásban kapnak szerepet, mint embert helyettesítő, kiegészítő eszköz. Ezek a szerkezetek összetett, a technológiák fejlődését tükröző, műszaki alkotások, amelyekben a mechanika, hidraulika, elektrotechnika, irányítástechnika, elektronika, informatika stb. ismeretei ötvöződnek, e tudományterületek kutatási eredményeit felhasználják, illetve beépítik. Összetettségük abból is adódik, hogy „önálló” mozgásuk biztosításához minden olyan (az idő függvényében változó) paramétert pontosan ismerni kell, amely szükséges a működésükhöz, (ehhez a valóságban mindig társul valamilyen mértékű paraméter bizonytalanság, hiba), így az érzékelésekből és mérésekből származó jelek feldolgozása igazából számos különböző differenciálegyenlet³ folyamatosan megoldását jelenti. Megoldásukhoz szükséges ismerni/becsülni az egyenletek paramétereit, és ezt az egész matematikai problémát valós időben és folyamatosan kell kezelni. Például a légi robotok pozíciójának és orientációjának időpillanatról időpillanatra történő meghatározása, ami még távolról sem jelenti a feladat (mechanikai szempontból vett) teljes értékű leírását.

Ezek a komplex rendszerek a környezetükből gyűjtik az autonóm működésükhöz szükséges információkat, szenzorok segítségével érzékelik pozíciójukat és egy döntési folyamat eredményeként működésüket, helyzetüket, mozgásukat (hat szabadságfokú⁴) a három dimenziós térben korrigálják [10][14][21][22].

³ Blakelock, J. H. Automatic Control of Aircrafts and Missiles, John Wiley & Sons, New York, 1965.; McLean, D. Automatic Flight Control Systems, Prentice Hall, New York, 1990.

⁴ A dinamikai rendszerek fontos jellemzője a szabadságfok, amely megmutatja, hogy a tömeg mozgását hány egymástól független koordinátával adhatjuk meg.

A pilóta nélküli repülőgépek története

A pilóta nélküli repülő eszközök fejlesztése a múlt század elején kezdődött el. Az amerikai hadsereg 1917 óta érdeklődik a pilóta nélküli légi járművek iránt. A Szovjetunióban az 1920-as években kezdődtek meg a kutatások egy, a távolból irányítható repülőgéppel kapcsolatosan. A Lavorkin által tervezett „Burya” volt a legnagyobb pilóta nélküli repülő eszköz, amit a Szovjetunióban építettek. Ez a 97 tonnás robotrepülőgép (18–20) km magasan, 3500 km/h sebességgel repült és 1957. szeptember 1-én indították el először.

Németországban a második világháborúban a Mistel program (1943–45) keretében ún. „apa-fia” megoldásokkal kísérleteztek a titkos peenemüdei Luftwaffe légi bázison. Ennek a programnak a lényege, hogy egy JU88 repülőgép a hátán szállított, illetve onnan indított egy Bf109 repülőgépet.

Az elmúlt évtizedekben a pilóta nélküli repülő eszközök számos és változatos formája alakult ki, így az újabb és újabb technikai újítások alkalmazásával a felhasználási területük is szélesedett. Az Amerikai Egyesült Államokban a Védelmi Minisztérium a különböző pilóta nélküli repülő eszközöket a végrehajtandó feladatnak, repülési idejének és hatótávolságuknak megfelelően osztályozza. Megkülönböztetnek manőverező pilóta nélküli eszközöket (Maneuver Unmanned Aerial Vehicle – M-UAV), amelyek mintegy 3 órát képesek a levegőben tölteni, hatótávolságuk 50 km. Ezek legkisebb családját alkotják, a mini és a mikro UAV-k, amelyekhez elsők között a Georgia Műszaki Kutatóintézet és a Cambridge-i Egyetem kutatói egy „újszerű”, csapkodó szárny meghajtást kezdtek fejleszteni. Az ötletet a rovarok és kisebb madarak repülésének tanulmányozása adta. A mikro légi jármű „Entomopter” néven vált ismertté, csapkodó szárnyai meghajtását egy előre, hátra mozgást végző vegyi izom biztosítja. A kutatók a „Entomopter”-nek nem csak a katonai alkalmazás területén, hanem az űrkutatásban is nagy jövőt jósolnak.

Az Aero Vironment cég kifejlesztett egy – „Fekete Özvegy” névre keresztelt – mikro, pilóta nélküli repülő eszközt, mely 120 mm hosszú és csupán 57 gramm tömegű. Egy másik példa a „Black Hornet”, amely könnyen elfér egy katona kezébe (203,2 mm hosszú, a rotor átmérő: 120 mm). A kis méretű kb. 15 g tömegű (kamerával együtt 18 g) távirányított 3 kamerával felszerelt repülő szerkezet, 25–30 percet képes a levegőben tartózkodni, és maximális repülési sebessége kb. 22 km/h. A katonák közvetlenül irányítják, illetve előzetesen beprogramozzák, hogy repüljön a megadott koordinátákra, GPS-t használva,

majd térjen vissza a bázisra, miután felderítette az ellenség pozícióját. E modell az afganisztáni bevetésekben is bizonyította képességeit.

A következő csoportba az egyesített, harcászati pilóta nélküli repülő eszközök (Joint Tactical Unmanned Aerial Vehicle – JT-UAV) tartoznak, amelyek az ellenség légterében 8–10 órát tölthetnek és mintegy 200 km hatótávolságúak. Ilyenek például: (1) az USA Haditengerészeti Kutatólaboratóriuma által kifejlesztett „SENDER” típusú UAV. Ez egy olyan elektromos meghajtású drón, amelynek szárny fesztávolsága 1,2 m, tömege 4,5 kg. Képes mintegy 1,2 kg tömegű hasznos terhet szállítani, maximum 170 km távolságra.

Az MQ-9⁵ Reaper egy közepes repülési magasságú, nagy hatótávolságú, felfegyverzett, több célra alkalmazható, légcsavaros gázturbinával meghajtott pilóta nélküli repülőgép, amely egyaránt képes távirányított és autonóm repülésekre. A jelentős repülési idő, illetve a fedélzetén található nagy hatótávolságú szenzorok és kommunikációs rendszer, valamint a precíziós fegyverzet egyedülálló képességet biztosít arra, hogy autonóm módon hajtsa végre a teljes megsemmisítési folyamatot, (keresés, meghatározás, követés, célpont meghatározás, végrehajtás és kiértékelés). Az elsődlegesen megsemmisítendő dinamikus célpontok ellen bevetett drón feladatai között szerepelhet pl.: hírszerzés, megfigyelés (adatgyűjtés), felderítés, vagy szárazföldi csapatok légi támogatása, harci kutató és mentő feladatok, precíziós csapás, konvoj felügyelet, célmegjelölés, légi vezetési állomás stb. is. A fedélzeti fegyverei között szerepelhet például: GBU-12 Paveway II lézer korrekciós bomba, az AGM-114P Hellfire II levegő-föld típusú rakéta, AIM-9 Sidewinder, vagy a GBU-38 JDAM, illetve a jövőben az AIM-92 Stinger is lehet hogy helyet kap a fedélzeti arzenálban.

A Reaper egy UAV rendszer része, amely egy szenzorokkal, fegyverzettel felszerelt pilóta nélküli repülőgépet, egy földi irányító állomást (PPSL⁶ műholdas kapcsolattal), tartalék felszereléseket, illetve operátorokat és műszaki személyzetet foglal magába, akár 24 órás időtartamú műveletek végrehajtásához. Az alapszemélyzet két fő: a pilóta és a szenzor operátor, aki működteti a szenzorokat és a fegyvereket.

A harmadik csoportba azok a pilóta nélküli repülő eszközök (Unmanned Aerial Vehicle Endurance – UAV-E) sorolhatók, amelyek 24 órás folyamatos repülésre, többcélú feladat végrehajtására készíthetők fel és mintegy 800 km, vagy nagyobb hatótávolságúak. Ezek

⁵ M – multirole; Q – remotely piloted aircraft system; 9 – the ninth in the series of remotely piloted aircraft systems

⁶ Predator Primary Satellite Link

a távirányított vagy robotrepülőgépek a Föld és a világűr megfigyelésében és a távközlésben kiegészíthetik vagy pótolhatják a műholdakat és az űrhajókat.

Egy 1995-ben megkezdett kísérleti programban a Northrop Grumman kifejlesztette a RQ-4A Global Hawk nevű felderítő pilóta nélküli repülőgépet, az U-2 kémrepülőgép XXI. századi megfelelőjét. A felderítő eszköz 35 méter fesztávolságú és 13,5 méter hosszú. Képességeit az afganisztáni hadszíntéren már harci körülmények között bizonyította: együttesen alkalmazták a mára már közismertté vált Predátorral. A Global Hawk a harcvezetés, a döntéselőkészítők és a parancsnokok számára közel valós idejű felderítési, megfigyelési és hírszerzési információkat biztosít, illetve alkalmas nagy kiterjedésű földrajzi területek felett történő járőrözés közbeni mozgó célpont detektálásra és célmegjelölésre. Fedélzeti radarja napi 138 000 km² felszín részletes átkutatására képes. Mozgó földi célok keresése esetén a lokátor percenként 15 000 km²-t kutat át úgy, hogy automatikusan kiejt vizsgálódása köréből mindent, ami 7,5 km/h-nál lassabban halad. A másik fontos érzékelő egy kombinált (hagyományos- és infra) kamerarendszer, amely térképező üzemmódban napi 104 000 km²-t fényképez le, illetve felderítés esetén napi 1900 nagyfelbontású képet készít.

A Helios a NASA pilóta nélküli repülőgépének prototípusa volt, bizonyította, hogy az UAS-ok képesek 30 500 m magasságba emelkedni. Ezt a 75 m fesztávolságú repülőszerkezetet a szárny tetejére szerelt napelemek⁷ látták el energiával. Megfigyelési és távközlési feladatokat láthatnak el a hozzá hasonló jövőbeni eszközök a mai műholdakhoz hasonlóan, de lényegesen olcsóbban.

Napjainkban a világ több országában is fejlesztenek és gyártanak UAV-eket. 2001 tavaszán az UCAV-k (Unmanned Combat Aerial Vehicle) új korszaka azzal a kísérleti lövészzettel kezdődött el, amikor egy „Predator” kódnevű hadműveleti felderítési feladatok ellátására kifejlesztett és használt pilóta nélküli repülőgépre egy Hellfire páncéltörő rakétát szereltek. A drónt kivezették a célkörzetbe, ahol megkereste, felderítette, azonosította a célpontul kijelölt harckocsit, majd ezután a harckocsit megsemmisítette a fedélzeti páncéltörő rakétájával. Ezzel a kísérlettel bebizonyosodott, hogy a pilóta nélküli repülőeszközök alkalmazhatók csapásmérésre is.

⁷ Szegedi Péter: A maximális teljesítményű pont követésének lehetőségei napelemes rendszerekben 2. Repüléstudományi Közlemények 1997/1, p. 122. „A napelem egy fotoelektromos generátor, a Nap elektromágneses sugárzásának (fényének) energiáját közvetlenül elektromos energiává alakító félvezetőkből álló áramforrás. Egy-egy elem igen vékony, nagy tisztaságú egykristályos szilícium lap, (gallium-arzenid), amelynek két eltérő tulajdonságú rétege van. A két réteg között a napfény hatására elektromos feszültség keletkezik.”

A fejlesztések egy újabb filozófiája, hogy a nagy madárrajok összehangolt támadási és védekezési eljárásaihoz hasonlóan, együtt mozgó UAV-rajokat terveznek. A sok, hálózatba kötött fedélzeti számítógép, a többféle érzékelő, amelyből az egyik repülőgépen lehet az egyik, a másikon a másik, együttesen rugalmas és csak nehezen rombolható fegyverrendszert alkothat. A fejlesztés alatt álló pilóta nélküli eszközök, az emberi értékek szerint nem értelmes, érző lények, de a (pl. Moore-törvény szerint)⁸ fejlődő számítástechnikai teljesítményük olyan lehetőségeket biztosíthat, amelyek a helyzet, szituáció előrejelző és felismerő, illetve alkalmazkodó és döntéshozó képességeiket is jelentősen megnövelhetik. Hovatovább, a harci szerepkörüket kiterjesztve, a robotok felruházhatóak élethalál feletti döntések meghozatalának lehetőségével, helyettesítve, egyben óvva a saját kiképzett katonákat, mentesítve őket az ilyen elhatározás dilemmái okozta pszichológiai terhektől is [29][31][33][34][35][36][37][38].

A pilóta nélküli eszközök üzemeltetése, a humán faktor

A technológiai fejlődés magasabb szintjét képviselő új repülőgépek – legyenek azok hagyományos (pilóta a fedélzeten), vagy UAV-k – rendszerbeállítására az üzemeltetés technikai és a humán oldalát egyaránt megújulásra készíti. Új követelmények jelennek meg a szervezetek felépítésével és a szervezetben feladatokat ellátó vezetőkkel, illetve a szakszeméllyel szemben, az adott légi járműveknél alkalmazott üzemeltetési és üzemeltetési stratégiájának megfelelően, azok megvalósítása érdekében.

A repülőtechnika szakszerű, komplex működtetése összetett feladat, amelyhez széleskörű természettudományos ismereteken alapuló interdiszciplináris tudással, kiemelten megfelelő szintű és tartalmú műszaki ismeretekkel és szemlélettel rendelkező üzemeltető állományra van szükség. Az egyes légi járműveknél alkalmazott üzemeltetési stratégiák elsősorban a gyártó által meghatározott és a jármű tervezésekor, építésekor alkalmazott műszaki-konstrukciós jellegzetességek határozzák meg. A repülőeszközöket, azok rendszereit, berendezéseit mind a levegőben (részfeladatokat ellátva), mind a földön szigorúan szabályozott előírások mentén üzemeltetik, ellenőrzik, javítják a speciálisan e célra létrehozott szervezetek és személyi állományaik.

⁸ Moore-törvénye az a tapasztalati megfigyelés, mely szerint a technológiai fejlődésben az integrált áramkörök összetettsége – a legalacsonyabb árú ilyen komponens figyelembe véve – körülbelül 18 hónaponként megduplázódik, (<https://hu.wikipedia.org/wiki/Moore-t%C3%B6rv%C3%A9ny>)

Az üzemeltetés egyrészt az a tevékenység, ami a pilótanélküli eszköz repülési ideje alatt történik, a légi üzemeltetéshez tartozik, és a légi jármű szakembere (repülőgépvezető, operátor stb.) végzi. Másrészt, amely elsődlegesen a földön tartózkodó eszközön kerül végrehajtásra, és a repülőeszköz (a gyártó által meghatározott technológiai utasításokban leírt) műszaki (repülésre alkalmas) állapotának fenntartására irányul.

A repülés előtt, közben és után végzett karbantartási munkákat annak érdekében végzik, hogy a légi jármű biztonságos, a technológiákban leírtak szerinti működése biztosított legyen.

Az újabb repülőeszközök rendelkezhetnek fedélzeti érzékelő-ellenőrző berendezésekkel, amelyek képesek a rendszerek működését megfigyelni, és az ellenőrzések eredményeit tárolni, továbbítani. Az így megszerzett információkat a megfelelő ismeretekkel rendelkező szakállomány képes értelmezni, elemezni, ezáltal az üzemeltetés, karbantartás hatékonyságát növelni. A megfelelő számú jól képzett szakember alapfeltétele a repülőeszközök üzemeltető és üzemeltető szervezetek működésének, és az elvárt minőségű feladat-végrehajtás biztosításának. A hatékony, gyors, költségkímélő üzemeltetési eljárások megvalósításának, illetve az üzemeltetési stratégiaváltás végrehajtásának feltétele: (1) a légi jármű technológiai alkalmassága, (2) a földi üzemeltetési alrendszer megléte, felszereltsége, minősége; (3) a karbantartó szervezet struktúrája. Közép- és hosszútávon azok a javító és üzemeltető apparátusok képesek megfelelni a velük szemben támasztott követelményeknek, amelyek a megfelelő számú szakemberrel rendelkeznek, akik jól képzettek, a szükséges és/vagy naprakész, a gyakorlatban jól alkalmazható tudással birtokában vannak.

A karbantartási munkák közé sorolhatók a szerelési tevékenységek, hibafeltárások, javítások, szoftver frissítések üzemanyagtöltés, a felszállás előtti és a repülések utáni javítások, ellenőrzések stb. Tulajdonképpen minden olyan tevékenység, amely célja a megelőzés és a helyesbítés, hibaelhárítás, vagyis a hadrafoghatóság biztosítása, fenntartása. Ezen feladatok egy része, mint például a hibakeresés nem egyszerűen, rutinból végezhető feladat, hanem problémamegoldást, rendszerszemléletet, speciális ismereteket és nem utolsósorban csapatmunkát igénylő tevékenységek [40][42][43][60].

Az organizáció működésének tudatossá tétele, folyamatos fenntartása, fejlesztése alapvető, annak érdekében, hogy hatékony és kellően flexibilis legyen a szervezetben és érdekében tevékenykedő emberek munkája (viselkedésmódja, egymás közötti viszonya). A

hatások felfedése, megértése és jellemzőinek elemzése segíti a folyamat során felmerülő előre látható és nem várt események kezelését, a tudatosság növelését.

Szervezetek csoportok, tagjai egyéniségének, jellemének, kapcsolatainak kialakításában számos tényező vesz részt, amelyek közül a kultúra (pl.: a tanulás) az, amely közvetlenül körbevesz mindenkit, és alapvetően meghatározza gondolkodását és cselekedeteit. „*A vállalati kultúra múltbéli tradíciók és jelenlegi rendszerek informális integrációjaként működik és alapot szolgáltat a jövőbeli innovációknak.*”⁹ vagy „*A szervezeti kultúra fogalom tágabb értelmű, kifejezve azt, hogy a kultúra fogalma nem csak a profit-orientált vállalatok, hanem a nonprofit szervezetek esetében is értelmezhető.*”¹⁰ Az organizáció kultúráját¹¹ a történelme, a technológia, a külső környezet, a dolgozók jellegzetessége, és a felsővezetés stb., mint komplex hatások befolyásolják és alapvetően meghatározzák. A kultúra minőségére és működésére az organizációban tevékenykedő egyének, mint biológiai, pszichológiai lények kompetenciái, elkötelezettségei, illetve az ott dolgozó emberek munkaközössége és együttes tevékenysége is hatással van. A szervezeti kultúra pedig befolyásolja a szolgáltatás, a feladatvégzés minőségét, a humán erőforrás politikát, a munkahelyi légkört, lényegében mindent, ami összefügg azzal, amiért a szervezetet létrehozták, és amiért tevékenykedik. Ezek a hatások a tér és idő függvényei, (vezetők és beosztottak által is folyamatosan alakított) így minden szervezetnek egyedi, és csak rá jellemző [54][55][56][57].

A pilóta nélküli rendszereket üzemeltető szervezeteknél végzett munkafeladatok már annyira összetettek és speciálisak, hogy a vezető/parancsnok lehet, hogy már nem is ismerheti azokat teljes mélységben, így a vezetéssel megbízott személyeknek nyitottnak kell lenniük az új dolgokra, és ezt a nyitottságot fejleszteniük is kell. Az ilyen típusú vezetők és szakemberek rendelkeznek azokat a tudáselemekkel, ismeretekkel, amelyeket nap mint nap alkalmazniuk kell, számukra alapvető:

⁹ Kovács Zoltán: Kultúrák versengése a globalizáció korszakában A nemzeti kultúra jellemzőinek és összefüggéseinek vizsgálata a Trompenaars–modell alapján, doktori (PhD) értekezés, Pannon Egyetem Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola, Veszprém, 2006, p. 285. (online), url: http://konyvtar.uni-pannon.hu/doktori/2006/Kovacs_Zoltan_dissertation.pdf (2016.03.03), 30. o.

¹⁰ Kovács Zoltán: Kultúrák versengése a globalizáció korszakában A nemzeti kultúra jellemzőinek és összefüggéseinek vizsgálata a Trompenaars–modell alapján, doktori (PhD) értekezés, Pannon Egyetem Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola, Veszprém, 2006, p. 285. (online), url: http://konyvtar.uni-pannon.hu/doktori/2006/Kovacs_Zoltan_dissertation.pdf (2016.03.03), 30. o.

¹¹ Langer Katalin: Karriertervezés–Személyiségmarketing, Szent István Egyetem Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar, Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő, 2008, ISBN 978–963–269–043–8, 143. o.

- a folyamatok, folyamatrendszerek működésének megértése, elfogadása, azok vezetése, irányítása és meglévő tudásuk gyakorlati alkalmazása, fejlesztése;
- a feladatok tervezése, és a tervezettől való eltérések kezelése;
- az emberi természetet, viselkedés adott szintű ismerete;
- a hatékony és eredményes munka menedzselése;
- az elkötelezettség a szervezeti célok mellett, mint például, mint a minőség, a szervezet életben tartása, a munkahelyek megtartása;
- a szervezeti tudás gondozása, a magasan képzett, belsőleg motivált emberek munkájának menedzselése (vezetni olyan dolgozókat, akik a munkájukhoz a vezetőnél sokkalta jobban értenek) stb.;
- az alárendeltek, dolgozók segítése abban, hogy jobban, eredményesebben végezhessék a munkájukat;
- a közös dolgon munkálkodók egy teambe tartozhatnak akkor is, ha más-más szakterületet képviselnek;
- a kvantitatív és a kvalitatív ellenőrzési eszközök arányos és közös alkalmazása;
- a dolgozók motiváltságának, képességeik fejlesztésének, illetve az önmagunkkal szemben támasztott teljesítményigény/igényesség fenntartása;
- a minőség alapú szervezeti gondolkodás és kultúra terjesztése mindenki feladata és felelőssége.

A komplex fegyverrendszer részeként működtetett drónok hadrafoghatóságának biztosításához katonai és szakmai-katonai, mérnöki ismereteket a gyakorlati, mindennapi munkavégzése során alkalmazni tudó repülő-műszaki állomány képzése/kiképzése szükséges. Olyan repülőműszakiak, akik kellően motiváltak és képesek: (1) elkötelezetten és az előre definiált minőségben teljesíteni feladataikat; (2) színvonalasan megfelelni a velük szemben támasztott magas elvárásoknak; (3) felelősségteljes döntéseket hozni; (4) üzemeltetni és üzemben tartani a rájuk bízott eszközöket.

Ha a rendszer szempontjából vizsgáljuk a helyzetet, a régebbi és új technológiák, technikák együttes üzemeltetésekor (akár eltérő üzemeltetési stratégiák alapján működtetett berendezések) vagy az eszközök és a tudás folyamatos, sőt egyre gyorsuló megújulását kell biztosítani, vagy az új, a régi, régebbi és még régebbi berendezések üzemeltetését külön-külön többlet erőforrások és ráfordítások alkalmazásával kell biztosítani. A régi eszközök együttes használata az új és újabb eszközökkel hatványozottan „ráfördítés igé-

nyessé” (költség és munkaerő egyaránt) teszi alkalmazásukat. Nem csupán a szerkezetek avulnak el, alkatrészeik válnak egyre nehezebben pótolhatóvá, helyettesíthetővé, de azok az üzemeltetési, hálózatszervezési, működtetési stb. elvek és módszerek is, amelyekbe valaha illeszkedtek. Részben–egészben más környezetben, más problémákat, más feladat–végrehajtási rendben oldottak meg a felhasználóik, üzemeltetőik, mint amilyenekkel ma szembesülnek.

A szervezeti működések ebben a helyzetben való fenntartása terén jelentős problémát jelent a megszokott eszközök kiesése – hogyan éli túl a szervezet, ha valamiért nem működik egyik rendszer? De még krízis sem kell – hasonlóan kellemetlen illeszkedési zavarokat okoz, ha a hozzá képest túl régi, vagy túl modern (vagy csak más!) technológiákat, tudásokat, gyakorlatokat, szabályokat stb. kell összhangba hozni.

A komoly elméleti és gyakorlati felkészítést igénylő rendszerek vegyes, akár nemzetközi környezetben való üzemeltetése olyan megfelelően sokoldalúvá képzett, vagyis a régi és az új ismeretekkel és rugalmas, megoldáskereső beállítottsággal egyaránt rendelkező, gyakorlott szakember-gárda segítségével valósulhat meg, amelynek kialakítása és felkészítése költséges, ugyanakkor eredményességük az üzemeltetett eszközök és eszközrendszerek képességei, valamint a felhasználási körülmények (pl. intézményi szabályok és más korlátok) – által erősen behatárolt.

A jelen technológiai fejlődési üteme még sohasem látott méreteket öltött, és egyre gyorsul. A szükséges kvalifikált munkaerő megszerzése, megtartása elengedhetetlen, a folyamatos fejlesztése már elképzelhetetlennek tűnik – a globalizálódó munkaerő–piaci versenyben, mivel szinte képtelenség versenyezni a vállalati szférával, nemzetközi intézményekkel, a nyugat-európai és amerikai lehetőségekkel stb. Az elérhető erőforrások jelenlegi szintjén a megbízható ismeretekre, a jelenleg használt rendszerek kiaknázatlan lehetőségeire fókuszálás hozhat eredményeket. Figyelembe véve a jelenleg is használt eszközök amortizációját, az a kép bontakozhat ki a felületes megfigyelő előtt, hogy a gyakorlatban már csak eszmei értékekkel rendelkező berendezéseket kell hálózatban, összehangoltan működtetni a technikai fejlődés legkülönbözőbb szintjeit képviselő, illetve a legkorszerűbb rendszerekkel. Az ilyen „sokgenerációs” eltérő üzemeltetési stratégiájú rendszerek üzemeltetéséhez szükséges tudás fenntartása, fejlesztése út lehet a cél eléréséhez.

A centralizált organizációk természetüknél fogva hajlamosak arra, hogy az szervezeti tudás-gondozást, mint felesleges, a centralizáció elvével szemben menő tevékenységet elhanyagolják. Így akár tönkre is tehetik a belső innováció, a motiváltság építés, a munkahelyi szakmai és személyiségfejlődés, sőt a szervezetfejlődés és – megújulás legfontosabb építőelemeit. Az elhanyagolt, nem fejlesztett tudás, képesség hamar elveszti relevanciáját, alkalmazhatóságát, túlhalad rajta a kor. Ezt a hajlamot leküzdendő külön, vezetői, szakmai tudatosságra, figyelemre és erőfeszítésre van szükség [30][46][47][48][49][50][51][52][53].

A karbantartó szervezetek alapvetően természetesnek, sőt eleminek és adottknak veszik az idealizált, rendezett, szervezett tudás meglétét. A belső, fellelhető egyéni tudások összegyűjtése, rendszerezése és közös, elérhető, össz-szervezeti tudássá alakítása érdeke az organizációknak. Ehhez olyan érzékelő és reagáló rendszerfolyamatok kialakítására és működtetésére van szükség, amelyek képesek felkutatni, felfedni, megmutatni és értelmezni azokat a potenciális problémákat, melyekből valószínűleg válság alakulhatna ki. Ehhez elengedhetetlen (1) a munkatársak ismereteinek folyamatos és célirányos begyűjtése és rendezése, (2) az információk folyamatos feldolgozása és az eredmények folyamatos megosztása, a tudásátadás folyamatosságának és színvonalasságának biztosítása, valamint (3) a fenti folyamatokat működtető szervezeti háttér és feltételek (egységek, elemek, funkciók, munkaköri feladatok, erőforrások, jogosultságok stb.) biztosítása.

A szervezeti tudás tudatos és célirányos menedzselésének egyik legfontosabb jellemzője a naprakészség, ami bizonyos agilitást és rugalmasságot is megkövetel a résztvevőktől. Az eredményességet segítő személyiségjellemzők (elemzőképesség, kreativitás, intuitivitás, kapcsolatépítő készségek, gyakorlatiasság stb.) megléte természetesen segít az egyént és a szervezetet a tudás megszerzésében, az átadásában és alkalmazásában, ugyanakkor tanulhatók, fejleszthetők (tanulandók, fejlesztendők) is. A szervezeti tudásmenedzselés-rendszerek kialakításának és fejlesztésének tehát a megfelelő képességfejlesztő szimulációs tréningek és egyéb (főleg belső, munkahelyi) képzések is szerves részei lesznek, akár a szervezeti mentoring-tevékenység kiegészítéseként, akár annak kialakításához és fejlesztéséhez hozzájáruló folyamatként.

A jelenleg elvárható biztos és aktuális tudással is tulajdonképpen már rendelkező szervezetek (megfelelő szakmai segítséggel és vezetői támogatás mellett) képesek lehetnek felmérni a saját jövőbeli teljesítményükre vonatkozó hatásokat. A szervezet által elvárt kompetenciákhoz rendelt szakmai, tárgyi ismeretek (explicit tudás), a problémamegoldó

képességek és a tapasztalatból szerzett intuíciók, sejtések és érzések (implicit vagy tacit tudás) megtartása, fejlesztése alapvető szervezeti érdek. Elsődleges elvárásként fogalmazódik meg, hogy a munkatársak tudása folyamatosan, időkorlát nélkül elérhető legyen a többiek számára. Ehhez létfontosságú, hogy ismerjük, miként jönnek létre az új ismeretek és az új ötletek, hogyan konvertálhatók új értékke (termékké, szolgáltatássá, szervezeti produktummá, eredménnyé, tkp. bármilyen pozitív outputtá). Az elméleti háttér továbbra is a formalizált tudás (definíciók, modellek, alkalmazási példák, elvi megoldások, alap kutatásokból származó ismeretek stb.). Az alkalmazók, a gyakorlati szakemberek erre építve tevékenységüket, az elméleti kereteket mintegy feltöltik a gyakorlatban használt tapasztalataikkal, azzal a szakismerettel (know-how), ami az évek során megszerzett, egy szűk területre koncentrálódó munkájuk során gyűjtenek, fejlesztenek, alakítanak [41][44][45][50][51].

Az adott ismeretekkel rendelkező szakembergárda ideiglenes biztosítása segíthető például a tapasztalt szakemberek visszafoglalkoztatásával, azonban a több tíz év alatt megszerzett tapasztalat a néhány félév alatt az iskolapadban szerzett, általában inkább alapozó jellegű ismeretekkel nem helyettesíthető. Valódi szakemberré a szükséges alaptudás megszerzése után a gyakorlat tesz. Ha a munkahelyi indoktrinációs és szocializációs folyamatok nem ezzel egy irányba hatnak, hanem éppen hogy ellentétesként, a hagyomány nevében és a lehetőségek adott szűkösségére hivatkozva változásellenesen, akkor bármilyen iskolai felkészítést kapott is a munkatárs, kénytelen-kelletlen igazodni fog a közösségi nyomás alatt a többiekhez és elavult, hibás, akadályozó gondolkodási és tevékenységi képletekkel fog operálni, vagy ha erre képtelen, elhagyja a szervezetet. Amennyiben pedig mindez a szervezeti imázsban is tükröződni fog, egy idő után már leginkább csak gondolkodni és fejlődni nem akaró munkaerőhöz fog hozzájutni. A folyamatos tanulás, fejlődés biztosítása tehát elemi előfeltétele a munkahelyi motiváció, humán erőforrás-fejlesztés sikerének, illetve a fluktuáció lassításának, valamint a munkaerő-piaci lehetőségek javításának.

Új tudás leginkább különböző ismeretek kölcsönhatásából keletkezik, létrehozása szempontjából tehát igen fontos, hogy a folyamatban résztvevők csoportja milyen összetételű. Szeretünk titkolózni, hiszen a tudás állítólag kizárólagos birtoklása látszólag erősíti saját fontosság tudatunkat és a közösségbeli pozícióinkat. Egy olyan szervezetben, ahol a hata-

lom forrása valóban a szaktudás, ez működne is – a helyzet tragikomikumának fő forrása, hogy ezen szervezeteinkben a hatalom legfőbb forrása a pozíció.

Fontos szerepet játszanak az emberi közvetítők, a mintát nyújtók, a segítők, „a tudás birtokosai” (ill. az ő szakmai felkészültségük, kommunikációs képességük, személyes motiváltságuk stb.), illetve azok interakciói, kapcsolatai, együttműködése, viszonyuk a felettesekhez és beosztottakhoz, a szervezethez és a szabályokhoz stb.

Az ilyen fajta tudásátadás közel sem akkor a leghatékonyabb, ha az oktatottak minden kritika nélkül alárendelik magukat a „mester” gépies utánzásának, olyankor ugyanis nem azt ismerik meg az új ismeretet szerzők, hogy mit-miért, hanem, hogy „így kell”, vagy éppen „nem így kell” csinálni. Az tudja igazán elsajátítani az ismereteket, aki nem mindig és nem okvetlenül veti alá magát kritika nélkül a másik utánzásának. Az automatizálható mozdulatok stb. gépies utánzása, a drill a tanulási folyamat szakaszai (betanulás, elmélet elsajátítása, menedzsment elsajátítása, gyakorlatszerzés) során csak az elsőben, a betanítás-betanulás fázisában elengedhetetlen fontosságú, utána már akadályoz. Csak az a tudás valóban a miénk, amelyet mi magunk is alkalmazni és fejleszteni tudunk.

Ha a fentiekből kiindulva a mindennapi valóságot és a magunk szervezeteit szemügyre vesszük, néhány kellemetlen kérdés merülhet fel. Ilyen például, hogy hogyan működik a gyakorlatban az egyéni, a csoportos és a szervezeti tanulási folyamat? Például a közvetítői szinteken tevékenykedő, szakoktatóként és szakemberként is dolgozó állomány képzése hol, hogyan és milyen elvárások szerint indulhat meg, illetve folyhat? Nem ragadhatunk-e benne az elméletben, nem válik-e csapdává, különösen akkor, ha csak szűken azt kapja az oktatott, ami a felettesei szerint számára időszerű és fontos? Lehetséges-e, hogy néhány tudásátadó generáció után az ismeret rítusokká merevedik, és ha igen, hogyan, illetve mit lehet tenni ez ellen? Milyen hatással vannak a tudásfejlesztő-tanuló szervezetek a közösségekre? Javítható-e a (nem munkahelyi) közösségek problémamegoldó képessége, ha alkalmazottként tanuló szervezetekben működnek a tagjaik? A fentebb vázolt menetű ismeretátadási rendszer lehet-e cél, ill. megfelelő módszer a parancsnokok, vezetők, mérnökök, egyáltalán szakemberek képzésekor? Milyen kiegészítésekkel?

A saját személyiség, a meglevő tapasztalatokkal való kreatív összevetés, valamint az internalizáció, vagyis a régi és új ismeretek, érzések, benyomások összeépülése nagyjából egységes rendszerré éppúgy, mint pl. a tudatos kockázatvállalás képességének erősítése is része a megfelelő mélységű és minőségű ismeret elsajátításának, és előfeltétele

annak az innovációnak, amely nélkül a szaktevékenységek (vagy igazából bármilyen tevékenység) egyik formájában sincs siker és eredmény. A „majmolás”, a feltételek és gondolkodás nélküli drill fontos eszköz a tanulási folyamatok legelején, de ha túlságosan nagy hangsúlyt kapva kitölti a további tanulási lépések helyét is, csak megöli az egyének és ezáltal a szervezetek fejlődőképességét. A rejtett tudás formális (tömeges) úton való átadásának lehetősége egyelőre még nyitott kérdés, de a tanulásra alkalmas gyakorlati tapasztalatszerzési lehetőségek bővítése, úgy tűnik, a 21. században prioritás lesz.

A „puha” és „kemény” módszerek, megközelítések különféle elegyítése fejlesztően foghatni a jövő organizációira, ha nem hagyjuk, hogy a kvantitatív hozzáállás kiszorítsa a kvalitatív, a verbális és vizuális gondolkodás sokkal kevésbé pontos, ám sokkal kreatívabb és sokoldalúbb lehetőségeit. A gondolkodó emberek képzésének, fejlesztésének ez a sokoldalúság az egyik alapfeltétele.

A dinamikusan változó környezet esetén a biztonság látszatát kelthetik az időben és térben közelebbi esetleg távolabbi, más környezetben működő tapasztalatok és események adaptációi, amelyek a szervezet túlélési esélyeit alapvetően megkérdőjelezhetik. A kényes egyensúly megtalálása a régi és új ismeretek alkalmazásakor a túlélés alapfeltétele, de a stratégiai szemlélet fontossága aligha kérdőjelezhető meg. A szervezet jövőjével kapcsolatosan elmondható, hogy erősen behatárolt a múltbeli képességei által, ami viszont nem azt jelenti, hogy minden esetben el kell vetni (vagy akár hogy el kell fogadni) a múltat, sokkal inkább azt foglalja magába, hogy folyamatosan újra kell értékelni. Az adott szakma jövője szempontjából a régi rutinok, beidegződések elvetése legalább olyan fontos eleme a fejlődésnek, mint a (változást nem gátló) hagyományok ápolása vagy az új tudás megszerzése; s éppen ez, a régi, elavult jellemzők eltűnésének lassúsága lehet a leggyengébb láncszeme. Ennek a hatását, a rendszer (környezet-hajtotta, ezért csak nehezen kikövetkeztethető) mozgásából és komplexitásából fakadó bizonytalansággal járó veszélyeket csökkenthetik azok a formális és informális intézmények, amelyeket a közös szokások, rutinok, bevett, de folyamatosan újraalakuló és frissülő gyakorlatok, szabályok és törvények alakítanak ki, és amelyek meghatározzák az egyének, szervezetrészek, szervezetek kapcsolatát, működését.

A tudás (a tacit tudást is beleértve), a tapasztalatra és gyakorlottságra építkezve, erősen kötődik ahhoz a közösséghez, egyénhez, amely létrehozta, így a szervezetfejlesztési tevékenységünk (legyen az oktatási, vagy közszolgálati, vagy akár termelési) során rájuk

javasolt koncentrálni, mert ők biztosíthatják a megfelelő alapot az új létrehozásához, a megrendelői elvárások és a környezeti követelmények teljesítéséhez. Ez az alkalmazkodási folyamat magába foglalja a meglévő képességek, technológiák, elvek, működési folyamatok jobb kiaknázását vagy kibontakoztatását, szabványosítását, fejlesztését, átalakítását és megváltoztatását, újrendezését, illetve az új alternatívákkal való kísérletezést is. Egyre világosabb, mennyire létfontosságú annak az ismerete, hogy hogyan születnek az új ismeretek, az új ötletek, és ezek hogyan konvertálhatók eredménnyé, terméké, szolgáltatássá.

Megfogalmazható, hogy a személyes és szervezeti kapcsolatok megléte és működtetése egyre fontosabb szerepet kap. Azonban a tanulásra, fejlődésre alkalmas lehetőségek megjelenése nem olyan probléma, amit el kell kerülni, hanem még a váratlanul adódó lehetőségeket is ki kell használni, csak érintőlegesen mérlegelve az időkorlátok vagy a hasznosság szempontjait, mivel a rendszer számára elsődleges, hogy a munkatársaik tudása folyamatosan elérhető legyen, gyarapodjon és fejlődjön [39][40][41][42][43][45][48][49][50][52].

A repülőgépek tervezésének folyamata

A repülőgép-tervezés komplex, sok kihívást tartalmazó szellemi tevékenység, ami a megrendelőtől érkező igények, feltételek, követelmények, és/vagy a gyártótól érkezett észrevételek, visszajelzések szintézise alapján, új kezdeményezések, ötletek, és technológiák alkalmazásával megy végbe.

A tervezési feladat kiírását követően egy ciklikusan ismétlődő, egyre részletesebb kidolgozást feltételező folyamat indul el, ami a végső megvalósításhoz vezethet, eredményezve a repülőeszköz prototípus elkészítését, esetleges sorozatgyártását és üzemeltetését.

A repülőszerkezet tervezésének, építésének, üzemeltetésének léteznek általánosan elfogadott lépései, amelyek a tervezés alapját jelentik. A megszületett ötlettől az új repülőgép elkészültéig a tervezés több egymást követő fázisra osztható:

- Koncepcionális tervezési fázis (Conceptual design);
- előzetes tervezési fázis (Preliminary design);
- a mindenre kiterjedő, részletező tervezési fázis (Detail design);
- a JSF (Joint Strike Fighter, F-35) fejlesztése során alkalmaznak egy előzetes tervezési felülvizsgálat fázist (Preliminary design review).

A koncepcionális tervezési fázis a vonatkozó előírások megfogalmazásával indul. Eldöntendő kérdés, hogy a terv megfelel-e a nemzeti, nemzetközi előírásoknak, képes-e repülni, optimális-e az elrendezése. Ez a tervezés egyik, talán legfontosabb pillanata, amikor meghatározzák a követelményeket, és azokat a jellemzőket, amelyeket a repülőgépnek teljesítenie kell. A megfogalmazott elvárásokat kiegészítik azok az ajánlások, amelyek a repülési képességre vonatkoznak, és szabványokban rögzítettek az elmúlt néhány tíz év sikeres vagy sikertelen fejlesztéseinek, gyártásainak, üzemeltetéseinek eredményeként.

A tervezési folyamat következő lépcsője az előzetes tervezési fázis. Ebben a stádiumban kisebb változtatásokat hajtanak végre a repülőeszköz konfigurációjában. Ebben a tervezési időszakban az alapvető strukturális beállításokat, áramlástani számításokat, szélcsatornás vizsgálatokat és a szabályozási rendszerek analíziseit, szintéziseit végzik. A tesztek olyan nemkívánatos aerodinamikai jelenségek, zavarások, vagy váratlan stabilitási problémák feltárására irányulnak, amelyek megoldása előremozdítja a konfiguráció tökéletesedését. Az előzetes tervezési folyamat végére elkészül, és precízen definiált a repülőgép konfigurációja. A folyamat végén meghozzák a legfontosabb döntések egyikét, kezdődhet-e a részletes tervezés.

A mindenre kiterjedő, vagy részletező tervezési folyamatban a repülőszerkezet „csak egy gép”, amit meg kell építeni. Precíz tervezés eredményeként minden főtartó, borítólemez, berendezés stb. a helyére kerül. A gyártáshoz szükséges szerszámokat, eszközöket, és sablonokat megtervezték. A berendezéseket, a repülési szimulátort stb. kifejlesztették.

A részletes tervezés és a tesztrepülőgép megépítése után az előzetes tervezési felülvizsgálat tervezési fázisban a tesztpéldányhoz képest végső, a sorozatgyártásra alkalmas aerodinamikai forma, rendszerintegráció kialakítása, a szerkezeti tömeg előírásosra csökkentése a cél.

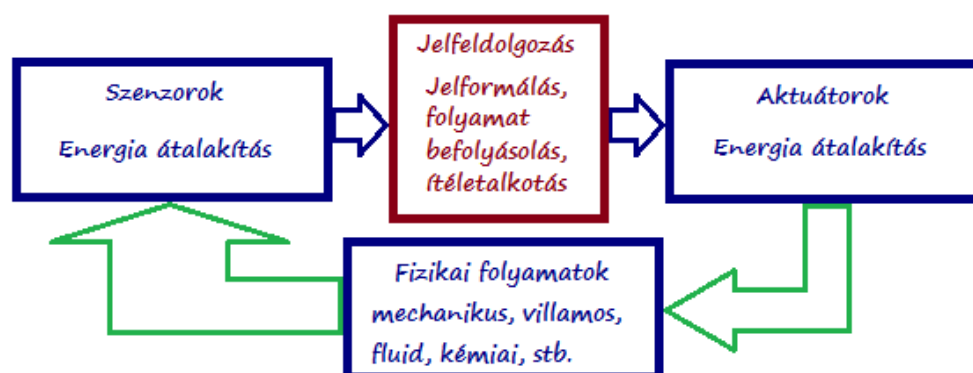
A fejlesztés folyamán a mérnök csapatok egymással párhuzamosan, és folyamatosan egyeztetve végzik a tevékenységüket. Az előzetes tervezési fázis egyik fejlesztési feladata a repülésszabályzó rendszer előzetes tervezése, melynek folyamán digitális számítógépek felhasználásával, idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálatok segítségével tervezik meg a robotpilótát [18][19][20].

A mechatronikai rendszerek általános felépítése

A mechatronika¹² rendszerek a gépészet, az elektronika és az informatika elveivel, törvényeivel magyarázható és ezen tudományterületeken elfogadott törvényszerűségek alapján működő szerkezetek, amelyek érzékelőiken keresztül felismerik környezetüket, azok meghatározott változásait, rendelkeznek kiértékelő, döntést hozó és végrehajtó alrendszerekkel, egységekkel. A feladattól függően az optimális működés, feladat végrehajtás érdekében tervezik és valósítják meg. Ezek a berendezések mindennapi életünk részeként az élet különböző területein segítik munkánkat, életünket, ott vannak például:

- otthonainkban, mint „okos” konyhai berendezések, játékok stb.;
- az iparban, mint automata gyártósorok, vagy NC megmunkáló eszközök, ipari robotok stb.;
- de jelen vannak a repülésben is, mint pilóta nélküli repülő eszközök, mint repülőgép-irányító, és navigáló rendszerek vagy éppen biztonsági, utasbiztonsági rendszerek stb.

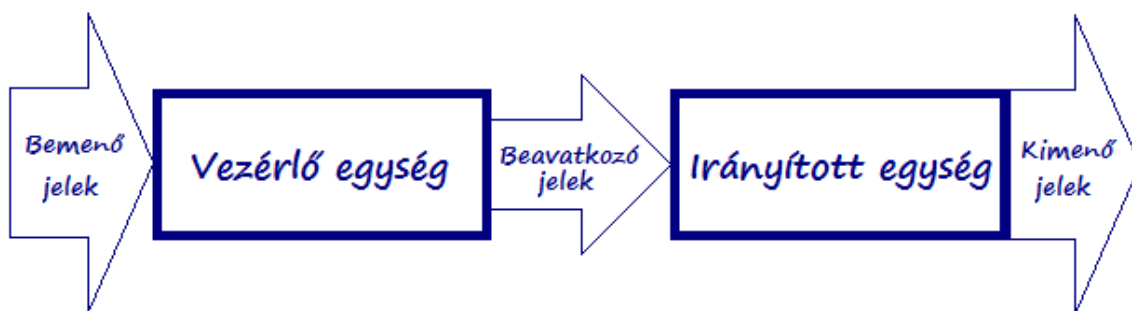
Megtalálhatók bennük azok a funkcionális egységek, amelyek biztosítják a feladat végrehajtását. Fellelhetők a szenzorok (érzékelők), amelyek biztosítják a környezet, illetve változásának detektálását, a jelfeldolgozó, döntéshozó egység, amely az érzékelőtől érkező jeleket kiértékeli, majd egy szabályrendszer alapján létrehozzák az aktuátorok (végrehajtó egységek) bemenő jeleit, amelyek hatnak a környezetre, illetve befolyásolják a szabályozott jellemzőt, válaszokat generál, 1. ábra. Rendszerint elő van írva, például hogy a rendszer adott pontján milyen legyen az elmozdulás, kitérés vagy akármilyen más mechanikai, egyéb paraméter.



1. ábra A mechatronikai rendszer általános felépítése

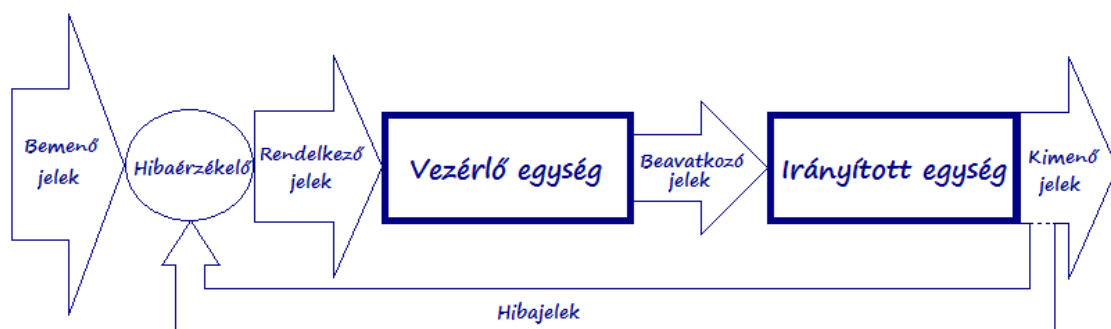
¹² „Napjainkra világossá vált, hogy a mechatronika inkább tekinthető korszerű mérnöki személelmódnak, ...”; [http://www.mogi.bme.hu/letoltes/MECHATRONIKAI%20&%20IR%C3%81NY%C3%8DT%C3%81STECHNIKAI%20T%C3%81RGYAK/MECHATRONIKA%20ALAPJAI%20\(MECHATRONIKA%20BSC\)/Mechatronika_a_lapjai_bevazeto_k.pdf](http://www.mogi.bme.hu/letoltes/MECHATRONIKAI%20&%20IR%C3%81NY%C3%8DT%C3%81STECHNIKAI%20T%C3%81RGYAK/MECHATRONIKA%20ALAPJAI%20(MECHATRONIKA%20BSC)/Mechatronika_a_lapjai_bevazeto_k.pdf) (2016.03.03)

Egy mechatronikai rendszert több alrendszerre lehet felosztani (1. ábra), amelyek kölcsönös kapcsolatban vannak egymással, amelyek működését és kapcsolatát egymással fizikai elvek alapján, matematika összefüggések felhasználásával írhatunk le, vagyis modellezhetjük, illetve érthetjük meg működésüket. Mindkét esetben a cél, hogy az elvárt, meghatározott feladat végrehajtás érdekében tisztázott legyen a működése. Az okozati kapcsolatok ismertek és a működés külső, belső paraméterei beazonosítottak legyenek. Adatokat fogad, átalakít, jeleket dolgoz fel és jelez, vagy éppen beavatkozik. Szabályzástechnikai értelemben ezeket a rendszereket két alapegységre bonthatjuk, 2, 3. ábrákon látható módon, egy vezérlő és egy irányított egységre.



2. ábra A vezérlés elv vázlata

Amint a 2. és a 3. ábrán látható, a bemenőjeleket a vezérlő egység alakítja át beavatkozó jelekké, majd ezek képezik az irányított egység gerjesztéseit. A bemutatott működési vázlatok a vezérlési, illetve szabályozási folyamatokat szemléltetik.



3. ábra A szabályzás elvi vázlata

A folyamatok irányításának legegyszerűbb megoldása a vezérlés (2. ábra), a pontosabb irányítást, az eredmény követését csak a szabályozás (3. ábra) teszi lehetővé [21][22][23][25][26][27][28].

REPÜLŐGÉPEK TÉRBELI MOZGÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

A repülőgép háromdimenziós mozgásának matematikai modellje

A repülőgépek aerodinamikai erők és nyomatékok eredőjének hatására térbeli mozgást végeznek. A repülőgépre ható erők, nyomatékok és a repülőgép mozgási jellege közötti összefüggéseket, továbbá a repülési pálya, sebesség és gyorsulás kapcsolatát Newton I., II. törvényei határozzák meg. A repülőgép mozgásának egzakt meghatározásához, a mozgási- és nyomatéki egyenletek felírásához, szükséges definiálni egy vonatkoztatási rendszert. A fejezet témájával a [10][14][58][59] szakirodalmak részletesebben foglalkoznak.

Koordinátarendszerek

A mozgás viszonylagosságából eredően elsődlegesen a vonatkoztatási rendszert kell meghatározni és egyértelműen rögzíteni. A hat szabadságfokú mozgásra képes repülőgépek térbeli mozgásának leírására a vizsgálatoktól függően számos koordinátarendszer használata javasolt. A mozgásegyenletek felírásakor egyértelművé kell tenni, hogy milyen koordinátarendszerben történik a vizsgálat. A használt koordinátarendszerek egymástól nem függetlenek, eltolással és/vagy elforgatással egymásba transzformálhatók. Az inerciarendszerek feladatnak megfelelő megválasztása lényegesen leegyszerűsíti a mozgásegyenletek felírását, és megoldását. A repülésmechanikában használt térbeli koordinátarendszerek derékszögűek és jobb sodrású rendszert alkotnak, kezdőpontjuk a repülőgép súlypontja. A leggyakrabban használt koordinátarendszerek:

- *Földhöz rögzített koordinátarendszer*

Az y_0 függőleges tengely, a helyi függőleges irányát adja, iránya ellentétes a nehézségi gyorsulás vektorának irányával. Az x_0 és z_0 tengelyek vízszintes síkban fekszenek, irányuk tetszőleges (pl. az x_0 tengely az északi irányt jelzi).

- *Repülőgéphez rögzített ún. „test”, vagy „húr” koordinátarendszer*, tengelyei mereven rögzítve vannak a repülőgéphez. Az x_1 (hossz-) tengely a szimmetriasíkban fekszik és párhuzamos a közepes aerodinamikai húrral, illetve a szárny zérus felhajtóerő irányával, esetleg a hajtómű tengely irányával, vagy a repülőgép valami más mértani vonalával. Az x_1 tengely pozitív iránya előre mutat. Az y_1 tengely a szimmetriasíkban fekszik, és pozi-

tív iránya normál repülési helyzetben felfelé irányul (az x_1y_1 , sík a repülőgép szimmetriasíkjá). A z_1 (kereszt-) tengely a gép súlypontjából a szimmetriasíkra merőlegesen indul ki, pozitív iránya a jobb szárny felé mutat. (A repülőgéphez rögzített húr koordinátarendszer, tengelyei jó közelítéssel egybeesnek a repülőgép főtehetetlenségi tengelyeivel).

- *Aerodinamikai vagy „szél” koordinátarendszer*, az x tengely párhuzamos a sebességgel, (így a légellenállás irányával is), pozitív iránya a repülés irányával egyezik meg, (a légellenállás ebben a koordinátarendszerben negatív). Általános esetben csúszással történő repülés esetén a sebesség vektora, illetve az x tengely nem fekszik a szimmetriasíokban. Az y tengely a szimmetriasíokban fekszik (a szimmetriasík és az x tengelyre a kezdőpontban emelt merőleges sík metszévonalá). Pozitív iránya pozitív állásszög esetén egybeesik a felhajtóerő irányával. A z (oldaleroő) tengely merőleges az xy síkra, pozitív iránya a repülés irányába nézve jobbra mutat.

A repülőgép a földhöz viszonyított helyzetét, a *húr*, és a *Földhöz rögzített koordinátarendszer* közötti összefüggés adja. A két koordinátarendszer kapcsolatát a ϑ bólintási szög, a ψ repülőgép irányyszög, és a γ dőlésszög segítségével adhatjuk meg. A gép hossz-tengelyének hajlását az x_1 tengely és a z_0x_0 vízszintes sík közötti ϑ szög jellemzi. A z_0x_0 vízszintes síkban az x'' egyenes és a tetszés szerint irányított x_0 tengely által alkotott ψ szög (iránytű-szögnek is nevezik, a repülőgépbe épített iránytű ezt a szöget jelzi) a repülőgép Földhöz viszonyított helyzetét jellemzi. Az y_1 tengelynek az x_1 tengelyen átmenő függőleges síkkal bezárt szöge a γ szög. A dőlésszög a repülőgép súlyerő irányához viszonyított helyzetét adja meg.

A repülési pálya, illetve a repülőgépen keletkező légerők Földhöz viszonyított helyzetét a *szél*, és a *Földhöz rögzített koordinátarendszerek* közötti összefüggés adja meg. Az inerciarendszerek kapcsolatát a pálya hajlásszög Θ , a tényleges irányyszög (azimutuszög) χ , és a felhajtóerő dőlésszöge μ jellemzi. Az x tengely és a z_0x_0 vízszintes sík által bezárt szög a pálya hajlásszög. A χ szög a z_0x_0 vízszintes síkban az x''' egyenes és az x_0 tengely közötti szög. A repülőgép ténylegesen ebbe az irányba repül, annak ellenére, hogy az iránytűje a ψ szöget mutatja. A harmadik jellemző a felhajtóerő dőlésszöge, az y tengelynek az x tengelyen átmenő függőleges síkkal bezárt szöge.

A *húr-* és a *szél koordinátarendszer* kapcsolatát az α állásszög, és a β csúszási szög adja. Az x_1 tengelynek a (zx) síkkal bezárt szöge az állásszög. Az x_1 tengelynek (a sebességi vektornak) az (xy) szimmetria) síkkal bezárt szöge a csúszási szög. Az α , és a β szögek a repülőgép repülési sebességéhez, illetve a repülési pályájához, és a légerőkhöz viszonyított helyzetét adják meg.

A repülőgépek mozgásegyenletei

A kormányzott repülés végrehajtásához a repülőgépre ható erők és nyomatékok egyensúlyát bontjuk meg időlegesen. A repülőgépek térbeli mozgását – a könnyebb vizsgálódás érdekében – bontsuk két részre: három egymásra merőleges tengely mentén végbemenő haladó mozgásra, és e három tengely körüli forgómozgásra. Így a mozgás két egymástól független elemi mozgás eredőjére bontható:

- adott pályán a tömegközéppont sebességével történő haladó mozgás;
- a súlyponton átmenő pillanatnyi forgástengely körüli forgó mozgás.

Matematikai modell segítségével vizsgálhatjuk, hogy a repülőgép hogyan reagál a különböző zavarásokra, továbbá információhoz juthatunk kormányozhatóságáról és stabilitásáról. Ez a matematikai apparátus a repülőgép általános mozgásegyenlet-rendszere, ami a repülőgépek automatikus vezérlését biztosító rendszerek alapja, a tömegközéppont mozgását leíró erő vektoregyenletekből (három komponens egyenlet) és a tömegközéppont körüli forgást leíró nyomatéki vektoregyenletekből (három nyomatéki komponens egyenlet) áll.

A repülőgép mozgásegyenleteit általában a repülőgéphez rögzített „húr” koordinátarendszerben adjuk meg. A repülőgép mozgását a tömegközéppontjába helyezett origójú Földhöz rögzített koordinátarendszerhez viszonyítjuk. Ennek eredményeként a tömegközéppontban két koordinátarendszer kezdőpontja helyezkedik el. A vonatkoztatási rendszerek egymáshoz képest egy pillanatnyi forgástengely körül ω szögsebességgel forognak. A két koordinátarendszer pillanatnyi helyzetét a ψ repülőgép irányyszög, a θ bólintási szög és a γ bedöntési adja meg, ezek a szögek határozzák meg a repülőgép térbeli helyzetét is.

Elméleti mechanikából ismert, hogy egy tetszőleges \mathbf{A} vektor hosszának időbeli változásával annak szöghelyzete is változhat egy nyugvó és egy, az előzőhöz képest $\boldsymbol{\omega}$ szögsebességgel forgó koordinátarendszerekből tekintve, vagyis:

$$\frac{d}{dt}\{\mathbf{A}\}_{\text{álló}} = \frac{d}{dt}\mathbf{A}|_{\text{mozgó}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{A} \quad (1)$$

Az (1) egyenletben a $\frac{d}{dt}\{\mathbf{A}\}_{\text{álló}}$ az álló, míg $\frac{d}{dt}\mathbf{A}|_{\text{mozgó}}$ a mozgó koordinátarendszerre vonatkozó idő szerinti deriválást jelent. Az \mathbf{A} vektor helyébe a repülőgép \mathbf{v} sebesség vektorát helyettesítve, a repülőgép m tömegét állandónak feltételezve a súlypont mozgását leíró vektoregyenlethez jutunk:

$$m \frac{d}{dt}\{\mathbf{v}\}_{\text{álló}} = m \left(\frac{d}{dt}\mathbf{v}|_{\text{mozgó}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \right) = \sum \mathbf{F} \quad (2)$$

ahol: $\sum \mathbf{F}$ – repülő szerkezetekre egyenesvonalú repülés közben ható erők eredője. Repülés közben (szuperszonikus repülési sebesség eléréséig) a repülőgépekre három erő hat: \mathbf{G} súlyerő, \mathbf{R} teljes aerodinamikai erő és \mathbf{F}_p propulziós erő toló-, vagy vonóereje.

Az \mathbf{A} vektor legyen azonos a perdület vektorral ($\boldsymbol{\pi}$), ekkor a súlypont körüli forgás nyomatéki vektoregyenletét kapjuk:

$$\frac{d}{dt}\{\boldsymbol{\pi}\}_{\text{álló}} = \frac{d}{dt}\boldsymbol{\pi}|_{\text{mozgó}} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\pi} = \sum \mathbf{M} \quad (3)$$

A repülőgép súlypont mozgásának komponens egyenletei a „húr” koordinátarendszer mentén:

$$\begin{aligned} m(\dot{v}_x + \omega_y v_z - \omega_z v_y) &= X + F_p - G \sin \vartheta \\ m(\dot{v}_y + \omega_z v_x - \omega_x v_z) &= Y - G \cos \vartheta \cdot \cos \gamma \\ m(\dot{v}_z + \omega_x v_y - \omega_y v_x) &= Z + G \cos \vartheta \cdot \sin \gamma \end{aligned} \quad (4)$$

Az (4) egyenletben v_x (egyenes vonalú mozgás sebessége), v_y (függőleges irányú sebesség), v_z (keresztirányú sebesség) a repülőgép \mathbf{v} sebesség vektorának komponensei. Az ω_x (dőlési vagy orsózó szögsebesség), ω_y (legyezőmozgás szögsebessége), ω_z (bólintási szögsebesség) a repülőgép $\boldsymbol{\omega}$ szögsebesség vektorának alkotó elemei. Az \mathbf{R} eredő légerő vektorának koordináta tengelyek irányába eső összetevői X homlokellenállás

vagy légellenállás ($X = C_x \frac{\rho v^2}{2} S$ – ahol ρ a levegő sűrűsége, S a szárnyfelület, C_x ellenállási tényező), Y felhajtóerő ($Y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S$, ahol C_y felhajtóerő tényező), Z oldal-erő ($Z = C_z \frac{\rho v^2}{2} S$, ahol C_z oldal-erő tényező).

A repülőgép forgó mozgásának nyomatéki komponens egyenleteit az (3) egyenletből származtathatjuk. Merev repülőgép esetén a perdületvektor $\pi = \mathbf{J}\omega$ (\mathbf{J} tehetetlenségi tenzor). Ha a repülőgép szimmetrikus felépítésű, akkor a tehetetlenségi tenzora szimmetrikus, és a repülőgép főtehetetlenségi irányai jó közelítéssel egybeesnek a „húr” koordinátarendszer tengelyeivel, így a nyomatéki komponens egyenletek, (2) egyenlet alapján, írhatók fel:

$$\begin{aligned} I_{xx} \dot{\omega}_x - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z &= M_x \\ I_{yy} \dot{\omega}_y - (I_z - I_x) \omega_z \omega_x &= M_y \\ I_{zz} \dot{\omega}_z - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y &= M_z \end{aligned} \quad (5)$$

Az (5) egyenletben az I_{xx} ; I_{yy} ; I_{zz} a repülőgép főtehetetlenségi nyomatékai, $M_x = m_x \frac{\rho v^2 S l}{2}$ (dőlési nyomaték), $M_y = m_y \frac{\rho v^2 S l}{2}$ (legyező nyomaték), $M_z = m_z \frac{\rho v^2 S b}{2}$ (bólintási nyomaték) az \mathbf{M} -nek a külső erők súlypontra vett nyomatékának összetevői (l – fesztávolság, b – közepes aerodinamikai húr (KAH) $m_x; m_y; m_z$ – dőlési, legyező, bólintási nyomatéki tényezők).

A mozgásegyenletekben szereplő ω szögsebesség, a repülőgép helyzetét meghatározó ψ , ϑ , γ szögek és idő szerinti deriváltjaik közötti kapcsolat:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\psi} \sin \vartheta + \dot{\gamma} \\ \omega_y &= \dot{\psi} \cos \vartheta \cos \gamma + \dot{\vartheta} \sin \gamma \\ \omega_z &= -\dot{\psi} \cos \vartheta \sin \gamma + \dot{\vartheta} \cos \gamma \end{aligned} \quad (6)$$

Az (6) egyenleteket behelyettesítve az (5) és (4) egyenletekbe hat dinamikai nemlineáris inhomogén differenciál egyenletet kapunk — a repülőgép hat szabadságfokának megfelelően — hat ismeretlen függvény, $v_x(t)$, $v_y(t)$, $v_z(t)$, $\psi(t)$, $\vartheta(t)$, $\gamma(t)$ meghatározására.

Mérnöki gyakorlatban a nemlineáris inhomogén differenciál egyenletrendszer kezelése nehézkes. A modellek egyszerűsítése során alkalmazhatjuk azt az elvet, hogy a repülőgép hossz- és oldalirányú mozgása gyakorlatilag egymástól függetlenül megy végbe, ha a repülőgép mozgása során a repülési magasság változása elhanyagolható, a levegő sűrűsége állandó. Így a mozgásegyenletek két részre bonthatók. Hosszirányú (szimmetrikus) mozgásegyenletekre, az (4), (5) egyenletekből $v_z = 0$; $\omega_x = 0$; $\omega_y = 0$; $\gamma = 0$ feltételek figyelembevételével:

$$\begin{aligned} m(\dot{v}_x - \omega_z v_y) &= X + F_p - G \sin \vartheta \\ m(\dot{v}_y + \omega_z v_x) &= Y - G \cos \vartheta \\ I_{zz} \dot{\omega}_z &= M_z \end{aligned} \quad (7)$$

és oldalirányú (aszimmetrikus) mozgásegyenletekre, az (4) és (5) egyenletekből $\omega_z = 0$; $v_x = konst$; $v_y = konst$; $\vartheta = konst$ feltételek figyelembevételével:

$$\begin{aligned} m(\dot{v}_z + \omega_x \dot{v}_y - \omega_y \dot{v}_x) &= Z + G \cos \vartheta \sin \gamma \\ I_{xx} \dot{\omega}_x &= M_x \\ I_{yy} \dot{\omega}_y &= M_y \end{aligned} \quad (8)$$

Az (6) egyenletből az $\omega_x = \dot{\psi} \sin \vartheta + \dot{\gamma}$, az $\omega_y = \dot{\psi} \cos \vartheta$ és az $\omega_z = \dot{\vartheta}$ kinematikai összefüggéseket kaphatjuk. Az (7) és (8) egyenletek jobb oldalán álló erők, nyomatékok, összetevőinek összege meghatározható a repülőgép vezérlőszervei kitérése alapján.

A légijárművek stabilitás vizsgálatához, vagy automatikus vezérlőrendszerük minőségi jellemzőinek meghatározásához az (7), (8) nemlineáris mozgásegyenletek alkalmazása helyett, az (7), (8) egyenletekből a mérnöki gyakorlatban jól használható lineáris algebrai egyenletrendszert képzünk. A linearizálás munkaponti feltétele, hogy a repülőgép kis bólintási szögű vízszintes, egyenes vonalú állandósult repülést hajt végre $v_0 = konst$, $\Theta_0 = konst$, $\vartheta_0 = konst$, $\alpha_0 = konst$, és a $t=t_0$ időpillanatban bekövetkező zavarás hatására a magasságváltozás olyan mértékű, hogy a levegő sűrűsége nem változik.

Hosszirányú linearizált mozgásegyenletek

A „szél” koordinátarendszerben a hosszirányú mozgás egyenleteiben (9) szereplő F_p , G , X , Y erők és M_z bólintási nyomaték hatnak a repülőgépre. A mozgást v , x , α , Θ , ϑ , ω_z

paraméterek jellemzik, a bemenőjelek δ_{HVK} (hajtómű vezérlőkar), és δ_m (magassági kormány) helyzete.

$$\begin{aligned} m \dot{v} &= -X + F_p \cos \alpha - G \sin \Theta \\ m v \dot{\Theta} &= Y - G \cos \Theta + F_p \sin \alpha \\ I_{zz} \ddot{\Theta} &= M_z \end{aligned} \quad (9)$$

Kis zavarások esetén ($\alpha \rightarrow 0$, $\Theta \rightarrow 0$) a következő egyszerűsítéseket lehet elvégezni: $\sin \alpha \approx 0$; $\sin \Theta \approx 0$; $\cos \Theta \approx 1$; $\cos \alpha \approx 1$. Az (9) egyenletek egyszerűsítése után a szimmetrikus egyenletek:

$$\begin{aligned} m \dot{v} &\cong -X + F_p \\ m v \dot{\Theta} &\cong Y - G \\ I_{zz} \ddot{\Theta} &= M_z \end{aligned} \quad (10)$$

Az (10) egyenletekben található, a repülőgépre repülés közben ható, erőket és nyomatékokat meghatározó paraméterek:

- A *hajtómű vonóerő (tolóerő)* függvénye a repülési sebességnek és a hajtómű vezérlőkar helyzetének, $F_p = F_p(v, \delta_{HVK}, \dots) \cong F_p(v, \delta_{HVK})$;
- az *ellenállás* függvénye a repülési sebességnek, a repülőgép homlok keresztmetszetének, az állásszögnek, és a magassági kormány helyzetének, $X = X(v, \alpha, \delta_m, \dots) \cong X(v, \alpha, \delta_m)$;
- a *felhajtóerő* függvénye az állásszögnek, a repülési sebességnek, a felhajtóerő termelő felület nagyságának, és a magassági kormány helyzetének, $Y = Y(\alpha, v, \delta_m, \dots) \cong Y(\alpha, v, \delta_m)$;
- a *bólintó nyomaték* függvénye a sebességnek, az állásszögnek, a bólintási szögsebességnek, a magassági kormány helyzetének és a hajtómű vezérlőkar állásának, $M_z = M_z(v, \alpha, \omega_z, \delta_m, \delta_{HVK}, \dots) \cong M_z(v, \alpha, \omega_z, \delta_m, \delta_{HVK})$;
- a *súlyerő összetevője* függvénye, G állandó értéke mellett, a pályahajlásszögnek.

A linearizált dimenzió nélküli hosszirányú (11) mozgásegyenletek (az egyszerűbb felírás érdekében a $a_X^v = \frac{\partial a_X}{\partial v}$ stb. jelöléseket használom):

$$\begin{aligned}
\dot{v} + a_x^v \Delta v + a_x^\Theta \Delta \Theta + a_x^\alpha \Delta \alpha &= a_x^{\delta_{HVK}} \Delta \delta_{HVK} \\
\dot{\Theta} + a_y^v \Delta v + a_y^\Theta \Delta \Theta + a_y^\alpha \Delta \alpha &= 0 \\
\dot{\omega}_z + a_{m_z}^v \Delta v + a_{m_z}^\Theta \Delta \Theta + a_{m_z}^{\omega_z} \Delta \omega_z + a_{m_z}^\alpha \Delta \alpha &= a_{m_z}^{\delta_{mK}} \Delta \delta_m \\
\dot{\alpha} + a_y^v \Delta v + a_y^\Theta \Delta \Theta - \omega_z - a_y^\alpha \Delta \alpha &= 0
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
a_x^v &= \frac{1}{\tau} \left(C_x + \frac{v C_x^v}{2} \right) - \frac{\cos \alpha F_p^v}{m}; \quad a_x^\Theta = \frac{g \cos \Theta}{v}; \quad a_x^\alpha = \frac{C_x^\alpha}{2\tau} + \frac{F_p \sin \alpha}{m v}; \\
a_x^{\delta_{HVK}} &= \frac{F_p^{\delta_{HVK}} \cos \alpha}{m v}; \quad a_y^v = \frac{1}{\tau} \left(C_y + \frac{v C_y^v}{2} \right) - \frac{F_p^v \sin \alpha}{m}; \\
a_y^\Theta &= -\frac{g \sin \Theta}{v}; \quad a_y^\alpha = -\frac{C_y^\alpha}{2\tau} - \frac{F_p \cos \alpha}{m v}; \quad a_{m_z}^v = -\chi \left(v m_z^v + 2 m_z + \frac{b m_z^\alpha a_y^\alpha}{v} \right); \tag{12} \\
a_{m_z}^\Theta &= -\chi \frac{b m_z^\alpha a_y^\Theta}{v}; \quad a_{m_z}^{\omega_z} = -\chi \frac{b}{v} \left(m_z^{\omega_z} + m_z^\alpha \right); \quad a_{m_z}^\alpha = -\chi \left(m_z^\alpha + \frac{b m_z^\alpha a_y^\alpha}{v} \right); \\
a_{m_z}^{\delta_m} &= \chi m_z^{\delta_m}; \quad \chi = \frac{\rho v^2 S b}{2 I_z}; \quad \tau = \frac{m}{\rho v S}, \text{ aerodinamikai idő}
\end{aligned}$$

Oldalirányú linearizált mozgásegyenletek

Az oldalirányú mozgást a Z oldalirányú erők és az M_x bedöntési, M_y legyező nyomatékok hozzák létre. A mozgást a v_x , ω_x , ω_y paraméterek változása jellemzi. Vezérlő jelek a csűrők $\delta_{cs}(t)$ és az oldalkormányok $\delta_o(t)$ kitéréseinek időfüggvényei. A „húr” koordináta-rendszerben az oldalirányú mozgás egyenletei:

$$\begin{aligned}
m (\dot{v}_z - \omega_y v_x) &= Z + G \cos \vartheta \\
I_{xx} \dot{\omega}_x &= M_x \\
I_{yy} \dot{\omega}_y &= M_y
\end{aligned} \tag{13}$$

Az (13) egyenletben szereplő, a repülőgépre repülés közben ható, erők, nyomatékok a következő paraméterektől függenek:

- Az *oldalero* függvénye a repülési sebességnek, a szárny felületének és az aerodinamikai oldalero együtthatójának, $Z = Z(\rho, v, S, C_z, \dots) \cong Z(\rho, v, S, C_z)$;
- a *bedöntési nyomaték* függvénye a levegő sűrűségének, a repülési sebességnek, a szárny felületnek, a szárnyszélességnek (fesz távolság) és a bedöntési nyomatéki tényezőnek, $M_x = M_x(\rho, v, S, l, m_x, \delta_o, \delta_{cs}, \dots) \cong M_x(\rho, v, S, l, m_x, \delta_o, \delta_{cs})$;

- a *legyező nyomaték* függvénye a levegő sűrűségének, a repülési sebességnek, a szárny felületnek, a fesztávnak és a legyező nyomatéki tényezőnek, $M_y = M_y(\rho, v, S, l, m_y, \delta_o, \delta_{cs}, \dots) \cong M_y(\rho, v, S, l, m_y, \delta_o, \delta_{cs})$;
- a *súlyerő összetevője* függvénye G állandó értéke mellett a pályahajlásszögnek és a felhajtóerő dőlésszögének.

A repülőgép linearizált dimenzió nélküli oldalirányú mozgásegyenletei:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x + a_{m_x}^{\omega_x} \Delta\omega_x + a_{m_x}^{\omega_y} \Delta\omega_y + a_{m_x}^{\beta} \Delta\beta &= a_{m_x}^{\delta_{cs}} \Delta\delta_{cs} + a_{m_x}^{\delta_o} \Delta\delta_o \\ \dot{\omega}_y + a_{m_y}^{\omega_x} \Delta\omega_x + a_{m_y}^{\omega_y} \Delta\omega_y + a_{m_y}^{\beta} \Delta\beta &= a_{m_y}^{\delta_{cs}} \Delta\delta_{cs} + a_{m_y}^{\delta_o} \Delta\delta_o \\ \dot{\beta} &= \omega_y - a_z^{\beta} \Delta\beta - a_z^{\gamma} \Delta\gamma \\ \dot{\gamma} &= \omega_x \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} a_{m_x}^{\omega_x} &= -\frac{m l^2}{2 \tau I_x} m_x^{\omega_x}; & a_{m_x}^{\omega_y} &= -\frac{m l^2}{2 \tau I_x} m_x^{\omega_y}; & a_{m_x}^{\beta} &= -\frac{m l v}{2 \tau I_x} m_x^{\beta}; \\ a_{m_x}^{\delta_{cs}} &= -\frac{m l v}{2 \tau I_x} m_x^{\delta_{cs}}; & a_{m_x}^{\delta_o} &= -\frac{m l v}{2 \tau I_x} m_x^{\delta_o}; \\ a_{m_y}^{\omega_x} &= \frac{m l^2}{2 \tau I_y} m_y^{\omega_x}; & a_{m_y}^{\omega_y} &= \frac{m l^2}{2 \tau I_y} m_y^{\omega_y}; & a_{m_y}^{\beta} &= \frac{m l v}{2 \tau I_y} m_y^{\beta}; \\ a_{m_y}^{\delta_{cs}} &= \frac{m l v}{2 \tau I_y} m_y^{\delta_{cs}}; & a_{m_y}^{\delta_o} &= \frac{m l v}{2 \tau I_y} m_y^{\delta_o}; \\ a_z^{\beta} &= -\frac{C_z^{\beta}}{2 \tau}; & C_z^{\beta} &= \frac{\partial C_z}{\partial \beta}; & a_z^{\gamma} &= -\frac{g}{v} \end{aligned} \quad (15)$$

A repülőgép állapotegyenletei

A lineáris repülésdinamikai rendszer állapotmódszeres analizálásához szükséges a linearizált mozgásegyenletek mátrix segítségével történő meghatározása. Az (11) és (14) egyenletrendszerek a következő alakban írhatók fel:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \end{aligned} \quad (16)$$

Az (16) egyenletben szereplő \mathbf{x} ($n \times 1$) dimenziójú állapotvektor, \mathbf{A} ($n \times n$) méretű rendszer, vagy állapot mátrix, \mathbf{B} ($n \times r$) méretű bemeneti mátrix, \mathbf{u} ($r \times 1$) dimenziójú bemeneti, vagy irányítási oszlopvektor, \mathbf{y} ($q \times 1$) dimenziójú kimeneti oszlopvektor, \mathbf{C} ($q \times n$) méretű kimeneti vagy segéd mátrix, \mathbf{D} ($q \times r$) méretű előrevezetési mátrix.

A szimmetrikus mozgásegyenletet mátrixos alakban:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\Theta} \\ \dot{\omega}_z \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_x^v & -a_x^\Theta & 0 & -a_x^\alpha \\ -a_y^v & -a_y^\Theta & 0 & -a_y^\alpha \\ -a_{m_z}^v & -a_{m_z}^\Theta & -a_{m_z}^{\omega_z} & -a_{m_z}^\alpha \\ a_y^v & a_y^\Theta & 1 & a_y^\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \Theta \\ \omega_z \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x^{\delta_{HVK}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & a_{m_z}^{\delta_m} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{HVK} \\ \delta_m \end{bmatrix} \quad (17)$$

Az aszimmetrikus mozgásegyenlet mátrixos alakban:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{m_x}^{\omega_x} & -a_{m_x}^{\omega_y} & -a_{m_x}^\beta & 0 \\ -a_{m_y}^{\omega_x} & -a_{m_y}^{\omega_y} & -a_{m_y}^\beta & 0 \\ 0 & 1 & -a_z^\beta & -a_z^\gamma \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{m_x}^{\delta_{cs}} & a_{m_x}^{\delta_o} \\ a_{m_y}^{\delta_{cs}} & a_{m_y}^{\delta_o} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{cs} \\ \delta_o \end{bmatrix} \quad (18)$$

Zérus kezdeti feltételek esetén az (11) és (14) egyenletek Laplace transzformáltja:

- szimmetrikus mozgás esetén:

$$\begin{aligned} s v(s) + a_x^v v(s) + a_x^\Theta \Theta(s) + a_x^\alpha \alpha(s) &= a_x^{\delta_{HVK}} \delta_{HVK}(s) \\ s \Theta(s) + a_y^v v(s) + a_y^\Theta \Theta(s) + a_y^\alpha \alpha(s) &= 0 \\ s \omega_z(s) + a_{m_z}^v v(s) + a_{m_z}^\Theta \Theta(s) + a_{m_z}^{\omega_z} \omega_z(s) + a_{m_z}^\alpha \alpha(s) &= a_{m_z}^{\delta_m} \delta_m(s) \\ s \alpha(s) - a_y^v v(s) - a_y^\Theta \Theta(s) - \omega_z(s) - a_y^\alpha \alpha(s) &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

- aszimmetrikus mozgás esetén:

$$\begin{aligned} s \omega_x(s) + a_{m_x}^{\omega_x} \omega_x(s) + a_{m_x}^{\omega_y} \omega_y(s) + a_{m_x}^\beta \beta(s) &= a_{m_x}^{\delta_{cs}} \delta_{cs}(s) + a_{m_x}^{\delta_o} \delta_o(s) \\ s \omega_y(s) + a_{m_y}^{\omega_x} \omega_x(s) + a_{m_y}^{\omega_y} \omega_y(s) + a_{m_y}^\beta \beta(s) &= a_{m_y}^{\delta_{cs}} \delta_{cs}(s) + a_{m_y}^{\delta_o} \delta_o(s) \\ s \beta(s) &= \omega_y(s) - a_z^\beta \beta(s) - a_z^\gamma \gamma(s) \\ s \gamma(s) &= \omega_x(s) \end{aligned} \quad (20)$$

A repülőgép átviteli függvényei

A repülőgép átviteli függvényeit a (11) és (14) homogén, lineáris, állandó együtthatójú egyenletekből kiindulva határozhatjuk meg. A repülőgép átviteli függvényei ismeretében vizsgálhatjuk a repülőgép kormányozhatóságát, és stabilitását. Az átviteli függvényekben bemenőjelnek a repülőgép kormányfelületeinek szögkitérésével arányos mennyiséget, kimenő jelnek a szimmetrikus, vagy az aszimmetrikus mozgás jellemzőit értjük. (A kormányfelületek szöghelyzet változását negatív előjellel véve a mozgás paramétereiket pozitív előjellel kapjuk meg.) Az (19) egyenletekből felírhatjuk a hosszirányú mozgás (21) egyenleteit. Az (20) egyenletekből kiindulva az oldalirányú mozgás karakterisztikus (23)

egyenleteit határozhatjuk meg. A hosszirányú mozgás átviteli függvényeit az (22) egyenletek, az oldalirányú mozgás átviteli függvényeit az (24) egyenletek definiálják.

$$\begin{aligned}
 & s^4 + (a_{m_z}^{\omega_z} + a_x^v + a_y^\Theta - a_y^\alpha) s^3 + \\
 & + [a_y^v (a_x^\alpha - a_x^\Theta) - a_x^v (a_y^\alpha - a_y^\Theta) + a_{m_z}^\alpha + a_{m_z}^{\omega_z} (a_x^v + a_y^\Theta - a_y^\alpha)] s^2 + \\
 & + \{a_{m_z}^{\omega_z} [a_y^v (a_x^\alpha - a_x^\Theta) - a_x^v (a_y^\alpha - a_y^\Theta)] + (a_x^v a_{m_z}^\alpha - a_x^\alpha a_{m_z}^v) + (a_y^\Theta a_{m_z}^\alpha - a_y^\alpha a_{m_z}^\Theta)\} s + \\
 & + [a_{m_z}^\alpha (a_x^v a_y^\Theta - a_x^\Theta a_y^v) + a_{m_z}^\Theta (a_x^\alpha a_y^v - a_x^v a_y^\alpha) + a_{m_z}^v (a_x^\Theta a_y^\alpha - a_x^\alpha a_y^\Theta)] = 0
 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 Y_1(s) &= \frac{\alpha(s)}{-\delta_m(s)}; Y_2(s) = \frac{\omega_z(s)}{-\delta_m(s)}; Y_3(s) = \frac{v_x(s)}{-\delta_m(s)}; Y_4(s) = \frac{\Theta(s)}{-\delta_m(s)} \\
 Y_5(s) &= \frac{\alpha(s)}{-\delta_{HVK}(s)}; Y_6(s) = \frac{\omega_z(s)}{-\delta_{HVK}(s)}; Y_7(s) = \frac{v_x(s)}{-\delta_{HVK}(s)}; Y_8(s) = \frac{\Theta(s)}{-\delta_{HVK}(s)}.
 \end{aligned} \quad (22)$$

Az átviteli függvények lehetőséget teremtenek — a repülőgép mozgásmódjainak tekintetében — a rövid és hosszú periódusú, illetve bedöntés, és elfordulás szerinti mozgás tanulmányozására. A hosszirányú mozgás tranziens folyamata két eltérő frekvenciájú lengő mozgásra osztható (kivétel a függőlegesen le, és felszálló repülőgép). Az állásszög és a bólintási szög (α, ϑ) változásának periódus ideje kicsi, ezért rövid periodikus mozgásnak nevezik (RPM). A rövid periódusú mozgás befejezése után ($\alpha \approx 0$) a sebességvektor változása válik jelentőssé, ez a hosszú periódusú mozgás (HPM). A rövid periódusú mozgás esetén a sebesség vektor és a pályaszög változása tekinthető nullának ($\Delta v \approx 0, \Delta \Theta \approx 0$).

$$\begin{aligned}
 & s^4 + (a_{m_y}^{\omega_y} + a_{m_x}^{\omega_x} + a_z^\beta) s^3 + [a_{m_x}^{\omega_x} (a_{m_y}^{\omega_y} + a_z^\beta) + a_{m_y}^{\omega_y} a_z^\beta + a_{m_y}^\beta - a_{m_x}^{\omega_x} a_{m_y}^\beta] s^2 + \\
 & + [a_{m_x}^{\omega_x} (a_{m_y}^{\omega_y} a_z^\beta + a_{m_y}^\beta) - a_{m_x}^{\omega_x} (a_{m_y}^{\omega_y} a_z^\beta + a_{m_x}^\beta) - a_{m_x}^\beta a_z^\gamma] s + \\
 & + a_z^\gamma (a_{m_x}^{\omega_x} a_{m_y}^\beta - a_{m_y}^{\omega_y} a_{m_x}^\beta) = 0
 \end{aligned} \quad (23)$$

Az oldalirányú mozgás két eltérő mozgás fajtára osztható, legyező mozgásra és bedöntés szerinti mozgásra. Így egyszerűsíthetők az aszimmetrikus átviteli függvények:

- kis értékű csúszásszögek esetén ($\beta \cong 0$): $a_{m_x}^\beta \beta \cong 0$; $a_{m_y}^\beta \beta \cong 0$;
- ha az egyes irányítási csatornák között (csűrőlapok, oldalkormány) között kis értékű forgatónyomatékok hatnak, $a_{m_x}^{\omega_y} \cong 0$; $a_{m_y}^{\omega_x} \cong 0$;
- ha nincs áthatás az irányítási csatornák között, $a_{m_x}^{\delta_o} = 0$; $a_{m_y}^{\delta_{cs}} = 0$;
- ha csak a csűrőlapok hatását vizsgáljuk, $\delta_o = 0$.

Az oldalirányú mozgás átviteli függvényei:

$$\begin{aligned}
 Y_1(s) &= \frac{\omega_x(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; & Y_2(s) &= \frac{\omega_x(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}; & Y_3(s) &= \frac{\omega_y(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; \\
 Y_4(s) &= \frac{\omega_y(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}; & Y_5(s) &= \frac{\beta(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; & Y_6(s) &= \frac{\beta(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}; \\
 Y_7(s) &= \frac{Y_1(s)}{s} = \frac{\gamma(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; & Y_8(s) &= \frac{Y_2(s)}{s} = \frac{\gamma(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}
 \end{aligned} \tag{24}$$

[8][10][14][58][59][65]

REPÜLŐGÉPEK STABILITÁSA, MEGFIGYELHETŐSÉGE ÉS IRÁNYÍTHATÓSÁGA

Alapvető feladat a szabályozási rendszermodell analízisének három dinamikus tulajdonság az irányíthatóság, a megfigyelhetőség és a stabilitás vizsgálata. A nyitott rendszer analízisének eredményeiből következtethetünk arra, hogy:

- létezik-e olyan szabályozás, amellyel bármilyen alapjel követhető, vagyis irányítható-e a rendszer;
- van-e olyan tetszőlegesen kiválasztott kimenet, amelyről az állapotváltozók becsülhetők, vagy előállíthatók a bemenet és a kimenet ismeretében, vagyis megfigyelhető-e a rendszer. (ha nem, akkor nem lehet állapot-visszacsatolással szabályozni a nyitott rendszert);
- stabilis-e a rendszer (a rendszert egyensúlyi állapotából kitérítve, magára hagyva egyensúlyi állapotba tér-e vissza).

Szabályozási rendszernek tekintve a repülőgépet az átviteli függvény és a súlyfüggvény csak akkor adja meg teljesen és helyesen a viselkedését, ha a rendszer irányítható és megfigyelhető.

Lineáris zárt szabályozási rendszerek stabilitása

Egy instabil rendszer esetén a szabályozás alapvető feladata, a megfogalmazott egyéb feladatok mellett, a szabályozási kör stabilitásának biztosítása a megadott működési tartományon. A stabilitás a szabályozási rendszerekkel szemben támasztott alapkövetelmény, de nem egyértelmű rendszerjellemző, mert a bemenőjeltől és a kezdeti értéktől is függhet. Stabilisnak akkor nevezzük a lineáris szabályozási rendszert, ha egyensúlyi állapotából kitérítve, majd magára hagyva egyensúlyi állapotba tér vissza, azaz:

$$\int_0^{\infty} |f(t)| dt < K \quad (25)$$

alakban fejezhető ki, ahol K véges korlát. A stabilitás feltétele az átmeneti függvényvel kifejezve:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = F \quad (26)$$

$F < \infty$ konstans. Az ugrásfüggvény alakú megváltozás után a szabályozott jellemző egy új állandósult állapotnak megfelelő értéket vesz fel.

A súlyfüggvénnyel kifejezve, nyugalmi helyzetéből kimozdított rendszer stabilis, ha

$$\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0 \quad (27)$$

Ekkor a $w(t)$ egységimpulzus-függvény azt fejezi ki, hogy az Dirac-impulzussal kitérített rendszer az eredeti állapotába tér vissza. Az impulzusválasz-függvény viselkedése alapján a rendszerek stabilitás szempontjából lehetnek:

- statikusan instabilak, ha $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = w_\infty \neq 0$, a rendszer jellemzői a kiinduló értéktől monoton távolodnak mindaddig, amíg valamely határhelyzetet el nem érnek. Ez az instabilitás a rendszer statikus tulajdonságaiból ered, ezért statikus instabilitásnak nevezik. Ha a jellemzők nem a leírt módon változnak, a rendszer statikusan stabil¹³;
- dinamikusan instabilak, ha $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) =$ korlátos periodikus függvény, a rendszer jellemzőinek értéke nem tart határozott érték felé, hanem valamely érték körül tartósan leng, miközben a kitérések amplitúdója állandó vagy növekvő lehet. Az utóbbi esetben a lengés a szerkezet adta szélső határok között folyik. Az instabilitásnak ezt a formája a periodikus instabilitás. A dinamikus stabilitás a szerkezetből csupán fizikai megfontolásokkal rendszerint nem állapítható meg, és megléte alaposabb vizsgálatokat igényel. Természetes, hogy a szabályozások vizsgálatakor elsődleges cél a stabilitás meglétének megállapítása, illetve feltételeinek megteremtése.

Megfigyelhetőség

A megfigyelhetőség az irányíthatósággal rokon fogalom (duális megfelelője). Lineáris rendszerekre szorítkozva azt mondhatjuk, hogy az $x(t_0)$ állapot megfigyelhető, ha $u(t)$ és $x_s(t)$ ismerete a $t_0 \leq t \leq t_v < \infty$ időközben elegendő $x(t_0)$ meghatározásához. Ha ez minden $x(t_0)$ állapotra igaz, akkor a rendszert megfigyelhetőnek mondjuk a t_0 időpontban. Ha minden $x(t_0)$ állapot minden t_0 időpontra megfigyelhető, akkor a rendszert teljesen megfigyelhető. A megfigyelhetőség arra a kérdésre ad választ, hogy a repülőgép, mint egy ismeretlen állapotú rendszer, kimenő és bemenőjelének valamekkora ideig

¹³ A repülésmechanikában a statikus stabilitás alapvetően az aerodinamikai jellemzők derivatív együtthatójának előjelétől függ.

történő mérése után rekonstruálható-e a mérés kezdetén fennálló állapot. Vagyis, ha a kimenő jel nem tartalmaz információt az egyik állapotváltozóról, a mérések eredményeiből nem tudunk visszakövetkeztetni az állapotváltozó értékére, változására. Tehát, ha az y kimenő jellel akarjuk a kezdeti állapotot előállítani, akkor a megfigyelhetőség a duális rendszer irányíthatósági feladatával lesz azonos, azaz megfordított hatásiránnyal vizsgálva a rendszer megfigyelhető, ha az \mathbf{O}_{obs} megfigyelhetőségi hipermátrix, rangja n :

$$\mathbf{C}_0^T = \mathbf{O}_{\text{obs}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{C}\mathbf{A} \\ \vdots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1} \end{bmatrix} = [\mathbf{C}^T \quad \mathbf{A}^T\mathbf{C}^T \quad \dots \quad \mathbf{A}^{T(n-1)}\mathbf{C}^T] \quad (28)$$

A megfigyelhetőség a rendszertől (\mathbf{A}) és a kimenő jelek (\mathbf{C}) kiválasztásától függ.

Irányíthatóság

Ha a rendszer egy $x(t_k)$ kezdeti állapotból az $x(t_v)$ végállapotba hozható az u korlátatlan irányítással véges $t_v - t_0$ idő alatt, akkor az $x(t_k)$ kezdeti állapotot a t_k kezdeti időpontban irányíthatónak nevezzük. Ha a t_k kezdeti időpontban minden $x(t_k)$ állapot irányítható, akkor a rendszer t_k idő pillanatban irányítható. Ha ez t_k választásától független, akkor a rendszert teljesen irányíthatónak, röviden irányíthatónak nevezzük (vagyis, ha egy tetszőleges állapotból egy tetszőleges másik állapotba át lehet vinni a rendszert véges idő alatt megfelelő bemeneti jellel, akkor a rendszer (állapot) irányítható). Az ilyen rendszerben minden $x(t_k)$ állapot minden t_k időpontban irányítható. A repülőgép irányíthatóságának vizsgálati eredményéből egyértelműen eldönthető, hogy a repülőgép bemenőjelével, vagy jeleivel valamennyi kívánt rendszerállapot változás véges idő alatt megvalósítható-e, illetve a kimenő jele tetszőlegesen befolyásolható-e. A Kalman féle rang feltétel kimondja, hogy az n dimenziós rendszer akkor állapot-irányítható, ha az \mathbf{A} (állapot mátrix) és \mathbf{B} (bemeneti mátrix, amelyen keresztül a bemeneti jelek hatnak a rendszerre) mátrixból felépíthető $\mathbf{C}_{\text{contr}}$ irányíthatósági mátrix, rangja n (amelynek determinánsa nem zérus), vagyis:

$$\mathbf{C}_{\text{contr}} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}] \quad (29)$$

Az irányíthatóság a rendszer pólusaitól és az azokhoz rendelhető állapotváltozók kapcsolatától (\mathbf{A}), és az irányító bemenetek kijelölésétől (\mathbf{B}) függ [8][26][61][62][63][64][66][67][70][71].

A SZABÁLYOZÓTERVEZÉS MÓDSZEREI ÉS ALGORITMUSAI

A fejezetben szakirodalmi hivatkozások felhasználásával ismertetésre kerül néhány repülésszabályozó rendszer tervezéséhez felhasználható klasszikus és modern szabályozótervezési eljárás. A fejezet témáját a [26][73][74][75] szakirodalmak részletesebben ismertetik.

Szabályozótervezés klasszikus módszerei

A klasszikus tervezési módszerek a megtervezendő rendszer konfigurációjának rögzítésével (az alkalmas rendszerkonfiguráció választással) jellemezhetők. A szabályozási rendszerek klasszikus tervezése próbálgatásos (fokozatos közelítésű) módszer, nem jelzi előre, hogy létezik-e megoldása az adott tervezési feladatnak [76].

Frekvencia tartománybeli módszerek

A szabályozási rendszerek tervezésének kezdeti szakaszát Nyquist, Hall, Nichols és Bode munkái jellemezték, akik olyan klasszikus módszereket fejlesztettek ki, mint a Nyquist-görbe, a Bode-diagram és a Nichols-görbe. Ezek a „kényelmesen alkalmazható” grafikus módszerek a frekvenciatartományhoz kapcsolódnak. A frekvenciatartománybeli tervezés során a szabályozási rendszer minőségi követelményeit olyan jellemzők segítségével adják meg, mint az erősítési tartalék, a fázistartalék, rezonanciacsúcs és sáv szélesség. A zárt szabályozási rendszer szabályozójának tervezését a gyök-helygörbe módszer, a Bode módszer, és Nyquist módszer és a Nichols módszerek teszik lehetővé. Ezen módszerek közül, tekintettel annak széleskörű alkalmazására, vizsgálataimhoz a Bode módszert, illetve a Bode-diagramot választottam [76][77][78][79][80][81].

A Bode-diagram

Frekvenciatartományban a rendszer viselkedése úgy adható meg teljesen, hogy az ω körfrekvencia 0 és ∞ között változik. Legyen $x_{be}(t) = X_{be} e^{j\omega t} e^{j\varphi_{be}}$ és $x_{ki}(t) = X_{ki} e^{j\omega t} e^{j\varphi_{ki}}$. Az $Y(j\omega)$ frekvenciafüggvény a kimenő x_{ki} és bemenő x_{be} komplex számok hányadosa:

$$Y(j\omega) = \frac{x_{ki}(j\omega)}{x_{be}(j\omega)} = |Y(j\omega)| e^{j \arctg \frac{\text{Im}[Y(j\omega)]}{\text{Re}[Y(j\omega)]}} = |Y(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}; \quad (30)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_{ki}(\omega) - \varphi_{be}(\omega)$$

A (30) kifejezés abszolút értéke $|Y(j\omega)| = A(\omega)$ megmutatja, hogy a vizsgált rendszer hányszorosára növeli valamely ω körfrekvenciájú jel amplitudóját, argumentuma $\arg Y(j\omega) = \varphi(\omega)$ megadja, hogy a kimenő jel fázisban mennyire van eltolva a bemenőjelhez képest. A lineáris léptékből adódó nagyságrendi problémák a logaritmikus vagy Bode-diagram (aszimptotikus vagy logaritmikus frekvencia-jelleggörbe) használatával kerülhetők el. A frekvencia függvény (30) szerint:

$$\log Y(j\omega) = \log A(\omega) + j\varphi(\omega) \log e \quad (31)$$

A $\log A(\omega)$ az amplitudót, a $j\varphi(\omega) \log e$ a fázisszöget írja le. A módszernél külön ábrázoljuk az $A(\omega)$ logaritmusát és a φ fázisszöget, eredményként egyszerűen megszerkeszthető görbéket kapunk. A módszer előnye, hogy a logaritmikus léptékek alkalmazása miatt a törésfrekvenciák alapján jó közelítéssel, egyenes szakaszokkal megrajzolhatók a görbék. A kedvezőbb számértékben való számolás céljából, a logaritmus 20-szorosát használjuk egységként (decibel, [dB]) [14][26][82][75]:

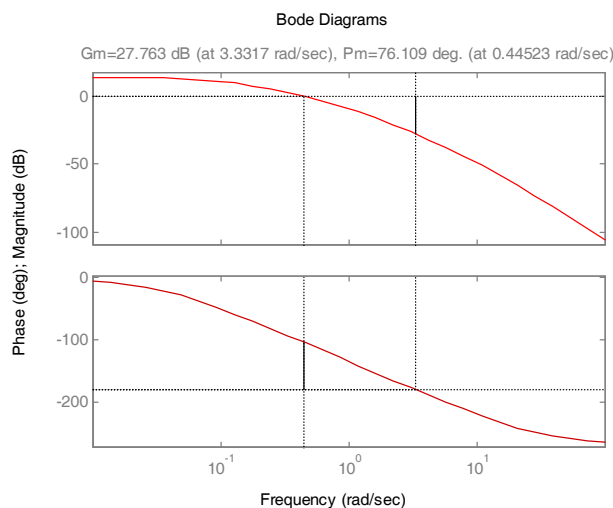
$$A(\omega) = 20 \log |Y(j\omega)| \quad (32)$$

A (31) kifejezésben szereplő $\varphi(j\omega)$ a fázis-körfrekvencia jelleggörbe, kifejezése:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im} Y(j\omega)}{\text{Re} Y(j\omega)} \quad (33)$$

Számazzuk az erősítési-, és fázistartalékokat a Bode-diagramon.

Egy 0 típusú, proporcionális három tárolós (PT3) szabályozási rendszer Bode-diagramja a 4. ábrán látható.



4. ábra Az amplitúdó-, és fázistartalék

A Bode stabilitási kritérium az alábbiak szerint fogalmazható meg:

- ha az $|Y(j\omega)|$ amplitúdó-körfrekvencia jelleggörbe a $-20dB \cdot D^{-1}$ meredekségű szakaszon metszi a $0dB \cdot D^{-1}$ tengelyt, a rendszer stabil;
- ha $|Y(j\omega)|$ görbe a $-40dB \cdot D^{-1}$ meredekségű szakaszon metszi a $0dB \cdot D^{-1}$ tengelyt, a rendszer stabilitása csak a fázis-körfrekvencia jelleggörbe vizsgálatával együtt határozható meg;
- ha $|Y(j\omega)|$ görbe a $-60dB \cdot D^{-1}$ meredekségű szakaszon metszi a $0dB \cdot D^{-1}$ tengelyt, a rendszer instabil.

Időtartománybeli módszerek

1940 végén Norbert Wiener vezette be a szabályozási rendszerek tervezésében a minőségi kritérium (integrálkritérium) fogalmát. Ez megteremtette a lehetőségét, hogy a tervezőmérnökök valamelyik kritériumból kiindulva analitikusan hajthassák végre a tervezést [76]. A tranziens szabályozási folyamatokra vonatkozó minőségi követelmények ellentmondásosak, a gyakorlatban a legkedvezőbb szabályozást az ellentmondó követelmények kompromisszumos teljesítése jellemzi. A sokoldalú követelmények miatt az optimális szabályozási folyamat minden gyakorlati esetre alkalmazható általános érvényű kritériuma nem fogalmazható meg. Az irányító jel a berendezések véges teljesítménye, vagy más műszaki, gazdasági paraméterei miatt nem lehet tetszőleges. Ezért a rendszer állapotegyenleteit olyan korlátozó feltételekkel kell kiegészíteni, amelyek definiálják az állapotváltozók és a bemenőjelek értelmezési tartományát. A korlátozás általában megnehezíti a feladat analitikus megoldását, ezért amennyiben az analitikus tárgyalás lehetősége adott, olyan célfüggvényt választunk, amely külön korlátozás nélkül is garantálja, hogy az optimális megoldás a működési tartományon belül marad. A szabályozástechnikai irodalom pl.: [26][76][83] ajánl olyan kritériumokat, amelyek a követelmények kompromisszumát figyelembe véve a gyakorlatban is eredményesen alkalmazhatók. Ezek a szabályozási kör optimális működésének lineáris integrálkritériumai. Közös jellemzőjük, hogy optimálisnak azt a dinamikus szabályozási folyamatot jelölik meg, amelyre nézve egy bizonyos, általunk célszerűen választott integrál funkcionál (célfüggvény, működési index) szélső értéket ér el [75][83]. Ha az integrálfunkcionált minimálni kell a tervezés során, akkor a kiválasztott célfüggvényt költségfüggvénynek (költségfunkcionálnak) nevezzük. Egy meghatározott állapotváltozás elérése minimális

anyag, energia, üzemanyag fogyasztás vagy költség ráfordításával történik, tehát a rendszer olyan irányítása, amelyben az állapotváltozóknak és az előirt időfüggvényeknek az eltéréséből képzett egyszerű, vagy súlyozott négyzetes időintegrál minimális. Ilyen például a repülőgépek kormányzása minimális üzemanyag felhasználásával, vagy a szabályozók minőségi követelményeinek (kis túllendülés, rövid szabályozási idő, kis lengés szám stb.) teljesítése. Ha a célfüggvényt maximálni szükséges, akkor hasznfüggvénynek (hasznfunkcionálnak) nevezzük [75]. (Pl.: a tervezett rendszer hatásfoka, jósága vagy valamely képesség megvalósítása a lehető legjobb legyen) Az integrálkritérium általános alakja:

$$I = \int_0^{\infty} F[x(t), t] dt \quad (34)$$

ahol: F – a t idő és egy alkalmasan megválasztott $x(t)$ rendelkező jel függvénye.

A szabályozó tervezése esetén az integrálandó $x(t)$ függvényt úgy kell megválasztani, hogy:

- megfelelően jellemezze a szabályozási folyamat minőségét (vegye számításba a túllendülést és a szabályozási időt);
- legyen egyszerűen alkalmazható;
- legyen egyszerűen kifejezhető a rendszerparaméterekkel való kapcsolata.

A felsoroltak egymásnak ellentmondó igények, így többféle integrálkritérium létezik. A leggyakrabban alkalmazott integrálkritériumok az alábbiak [76]:

1. Lineáris integrálok: (IE, Integral of the Error)

$$\begin{aligned} I_{10} &= \int_0^{\infty} x(t) dt \rightarrow \min \\ I_{11} &= \int_0^{\infty} t x(t) dt \rightarrow \min \\ &\vdots \\ I_{1m} &= \int_0^{\infty} t^m x(t) dt \rightarrow \min \end{aligned} \quad (35)$$

2. Általános négyzetes integrálok: A négyzetes integrálkritérium (ISE, Integral of the Squared Error)

$$\begin{aligned}
I_{2(1)} &= \int_0^{\infty} [x^2(t) + \tau_1^2 \dot{x}^2(t)] dt \rightarrow \min \\
&\vdots \\
I_{2(n)} &= \int_0^{\infty} \left\{ x^2(t) + \tau_1^2 \dot{x}^2(t) + \dots + \tau_n^{2n} [x^{(n)}(t)]^2 \right\} dt \rightarrow \min
\end{aligned} \tag{36}$$

3. Egyszerű négyzetes integrálok: (gyakran idővel súlyozott formában használják)

$$\begin{aligned}
I_{20} &= \int_0^{\infty} x^2(t) dt \rightarrow \min \\
I_{21} &= \int_0^{\infty} t x^2(t) dt \rightarrow \min \\
&\vdots \\
I_{2m} &= \int_0^{\infty} t^m x^2(t) dt \rightarrow \min
\end{aligned} \tag{37}$$

Négyzetes integrálkritériumok lényeges előnyei a lineáris kritériumokkal szemben:

- a nagy szabályozási eltéréseket súlyozva veszi figyelembe;
- az aperiodikus és lengő folyamathoz egyaránt használható;
- az integrál értéke a szabályozási kör (rendszer) együttthatóiból meghatározható [83].

4. Abszolút érték integrálok: (IAE, **I**ntegral of the **A**bsolute value of the **E**rror; ITAE, **I**ntegral of **T**ime-multiplied **A**bsolute value of **E**rror)

$$\begin{aligned}
I_{a0} &= \int_0^{\infty} |x(t)| dt \rightarrow \min \\
I_{a1} &= \int_0^{\infty} t |x(t)| dt \rightarrow \min \\
&\vdots \\
I_{am} &= \int_0^{\infty} t^m |x(t)| dt \rightarrow \min
\end{aligned} \tag{38}$$

Az az integrálkritérium tekinthető „ideálisnak”, amelyik a kis szabályozási idő és a kis túllendülés követelményét a legkönnyebben kezelhető méretezési feltételben fejezi ki. A zárt szabályozási rendszer, az irányítástechnikai minőségi követelmények mellett, egyéb más tervezési követelménynek is eleget kell, hogy tegyen. Ilyen követelmény például, a minimális méret, minimális tömeg, és a minimális energiafelhasználás. Az irányítástechn-

nikai és a műszaki-technikai követelmények egyidejű figyelembevétele a gyakorlatban sokszor „előrevetíti”, hogy a korábban ismertetett integrálkritériumok közül melyik alkalmazása célszerű [26].

Modern szabályozótervezési eljárások

A megoldandó feladatok bővülésével a szabályozási körök egyre összetettebbek, és bonyolultabbak lettek. Ez szinte megoldhatatlan probléma elé állította a szakembereket a hagyományos grafo-analitikus tervezési eljárások alkalmazásában. A szabályozási rendszerek hagyományos tervezésének legfőbb hátránya, hogy próbálgatáson alapulnak. A többváltozós MIMO (**M**ulti **I**nput, **M**ulti **O**utput) rendszerek esetében a próbálgatásos módszer gyakran nem ad megfelelő eredményt. Ezért a szabályozáselmélet klasszikus, Bode, Nichols, Nyquist nevével jellemezhető, elsősorban frekvencia tartománybeli analízis és szintézis (tervezési) módszerei az 1960-as évektől kezdődően kiegészültek az új, időtartománybeli rendszer- és irányításelméleti metódusokkal. Ezeket a „modern” irányzatokat a rendszerállapot és az állapotter bevezetése jellemezte, így a hozzájuk illeszkedő tervezési eljárásokat állapotter módszernek nevezzük, és a többváltozós szabályozási rendszerek dinamikájának leírására többnyire ezt alkalmazzuk [84].

A valós szabályozási rendszerek sajátossága, hogy több szabályozott bemenettel és több szabályozott kimenettel rendelkeznek, üzemük során, működésüket külső és belső sztochasztikus zajok gerjesztik. A modern szabályozástechnikában a szabályozók tervezésére ismert számos olyan módszer, amelyek lehetővé teszik azok előzetes tervezését. A megtervezett szabályozó lehet optimális, vagy nem optimális. Az optimális szabályozóval működő rendszer pedig lehet determinisztikus vagy sztochasztikus. Modern-, és posztmodern szabályozástechnikában a többváltozós szabályozási rendszerek soros kompenzátorai tervezésére az alábbi fontosabb módszereket használhatjuk:

- A pólus áthelyezés módszere – nem optimális szabályozótervezési módszer;
- LQR módszer (**L**inear **Q**uadratic **R**egulator) – többváltozós, determinisztikus szabályozótervezési módszer;
- LQG módszer (**L**inear **Q**uadratic **G**aussian) – többváltozós, sztochasztikus külső és belső zajok által gerjesztett szabályozási rendszer tervezésére;
- LQG/LTR módszer (**L**inear **Q**uadratic **G**aussian with **L**oop **T**ransfer **R**ecovery) – hurokátvitel visszaállítás segítségével, a többváltozós, sztochasztikus külső és belső zajok által gerjesztett szabályozási rendszer tervezésére;

- H_∞ módszer – többváltozós szabályozási rendszerek robusztus tervezéséhez;
- μ szitézis módszer – többváltozós szabályozási rendszer robusztus tervezésére, struktúrált és nemstruktúrált paraméterbizonytalanságok figyelembevételével.

A pilóta nélküli repülőgépek robotpilótáival szemben támasztott alapvető követelmény a funkcionális stabilitás. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a robotpilóta előzetes tervezése során első lépésben folytonos–folyamatos működésű rendszert terveznek, amely nem feltétlenül optimális működésű. Tekintettel az előzőekre, a fejezetben a pólus áthelyezés módszerét, illetve az LQR módszer alapösszefüggéseit mutatom be [8][63][85][86][87].

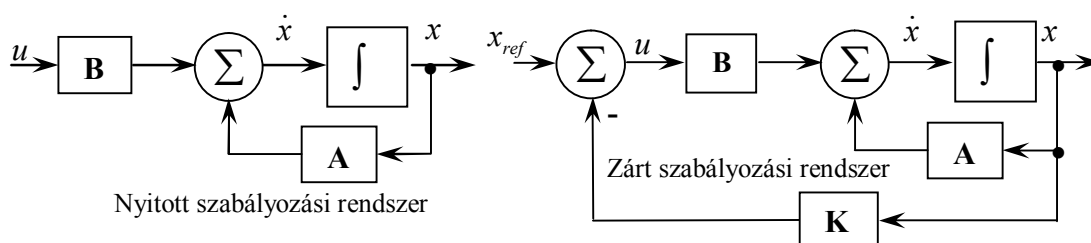
A pólus áthelyezés módszere

A modern szabályozáselmélet — a tervezési feladat megoldása során — a először a matematikai modell felállítását és gyakorlati formába öntését foglalja magába, majd alkalmazza az előkészített matematikai apparátust. Egy ilyen tervezési formula a pólus áthelyezés módszere. Ekkor a nyitott szabályozási rendszer $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$ alakban adott. Feltételezzük, hogy a rendszer teljesen irányítható és megfigyelhető.

A módszer lényege egy olyan szabályozó tervezése, ami biztosítja a zárt rendszer előírt működési tartományán belüli stabilis működést. A vezérlési törvény zérusértékű referencia jel ($x_{ref} = 0$) esetén $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ alakú, vagyis a pillanatnyi állapotot az irányítójel határozza meg. A \mathbf{K} állapot-visszacatolási mátrix megválasztásával biztosíthatjuk, hogy a zárt rendszer pólusai a komplex sík (s tartomány) bal oldalán legyenek. A vezérlési törvényt behelyettesítve az (16) egyenletbe kapjuk a zárt rendszer állapotegyenletét:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x}(t) \quad (39)$$

A nyitott és a zárt szabályozási rendszer az 5. ábrán látható.



5. ábra A nyitott és zárt szabályozási rendszer

Legyen $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$, akkor a karakterisztikus egyenlet:

$$\begin{aligned}\Phi_s &= |s\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}| = (s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot \dots \cdot (s - s_n) = \\ &= s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0\end{aligned}\quad (40)$$

és

$$\Phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + \alpha_1 \mathbf{A}^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \mathbf{A} + \alpha_n \mathbf{I} \quad (41)$$

A Cayley-Hamilton tétel alapján egy n -ed rendű kvadratikus mátrix $m \geq n$ hatványa kifejezhető a $k < n$ hatványok lineáris kombinációjaként, vagyis [74]:

$$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = \tilde{\mathbf{A}}^n + \alpha_1 \tilde{\mathbf{A}}^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \tilde{\mathbf{A}} + \alpha_n \mathbf{I} = 0 \quad (42)$$

$n=3$ közelítést alkalmazva:

$$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = \Phi(\mathbf{A}) - \alpha_2 \mathbf{BK} - \alpha_1 \mathbf{BK}\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{BK}\tilde{\mathbf{A}}^2 - \alpha_1 \mathbf{ABK} - \mathbf{ABK}\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{A}^2 \mathbf{BK} \quad (43)$$

$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = 0$, így:

$$\Phi(\mathbf{A}) = \mathbf{B}(\alpha_2 \mathbf{K} + \alpha_1 \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}}^2) + \mathbf{AB}(\alpha_1 \mathbf{K} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}}) + \mathbf{A}^2 \mathbf{BK} \quad (44)$$

A (44) egyenletből kifejezhető a \mathbf{K} állapot-visszacsatolási mátrix:

$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ 1] \cdot [\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \mathbf{A}^2 \mathbf{B}]^{-1} \cdot \Phi(\mathbf{A}) \quad (45)$$

Tetszőlegesen választott n esetén a \mathbf{K} állapot-visszacsatolási mátrix [74]:

$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \cdot [\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1} \mathbf{B}]^{-1} \cdot \Phi(\mathbf{A}) \quad (46)$$

Az LQR módszer

A korszerű többváltozós, teljes állapot-visszacsatolású optimális szabályozási rendszerek tervezési módszereinek egyike az LQR módszer. A tervezési algoritmus feltételezi, hogy a dinamikus rendszer minden állapotváltozója érzékelőkkel érzékelhető és mérhető, a rendszert külső vagy belső zaj nem gerjeszti. A tervezés négyzetes integrálkritérium minimálásán alapul, melynek eredménye az optimális szabályozás visszacsatolási mátrixa. Előnye, hogy a megoldást próbálgatás nélkül, a matematikai algoritmus egyértelmű megoldásaként kapjuk. Többváltozós, lineáris időben állandó, vagy változó rendszerek tervezésére is használható. Az LQR módszer célja egy olyan rendszer létrehozása, amely egy előzetesen kiválasztott minőségi jellemző elérhető legnagyobb vagy legkisebb értéke, vagy egy tervezési kritérium szempontjából a lehető legjobb, függetlenül a rendszer kezdeti állapotától és irá-

nyításától. A szabályozás úgy történik, hogy a szabályzó berendezés megadott törvényszerűség alapján változtatja a beavatkozó jelet, miközben érzékeli a szabályozott jellemzőt. Attól függően, hogy a beavatkozás kedvező vagy kedvezőtlen irányban változtatja a szabályozott jellemzőt a soron következő beavatkozás értelme ugyanolyan, vagy ellenkező lesz. Így az egymást követő beavatkozó lépések során a szabályozott jellemző egyre jobban közelíti a kívánt értékét [10][74][76].

A dinamikus folyamatok leírására széleskörűen alkalmazzák az állapotegyenleteket. Az optimális szabályozás tervezéséhez szükség van $\mathbf{u}(t)$ vezérlőjelre (jelekre), amely minimálja a költségfüggvényt egy meghatározott $x(t_0)=x_0$ kiindulási állapot esetén azzal a korlátozással, hogy a folyamatot az [8][76]:

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \quad (47)$$

összefüggés írja le. Az $\mathbf{u}(t)$ vezérlő vektor (bemenőjel vagy vezérlőjel vektor) nem azonos a hagyományos tervezés során alkalmazott alapjel fogalmával. Mivel a (47) állapotegyenlet csak a vezérelt folyamatot írja le, az optimális szabályozás problémája azt a tévhitet keltheti, hogy a feladat egy felnyitott kör tervezésére irányul. Amikor azonban a tervezést befejeztük, akkor az optimális szabályozás rendszerint függ a kimenőjeltől, vagy az állapotváltozóktól, tehát zárt szabályozási rendszert kaptunk.

A költségfüggvény az állapotvektor és az irányító vektor skalár függvényének integrálja:

$$J = \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} F[x(t), u(t), t] dt \rightarrow \min \quad (48)$$

ahol F – skalár függvény.

Az optimális rendszerek tervezésében a J költségfüggvény (48) helyettesíti a hagyományos tervezési kritériumokat, mint például maximális túllendülés, csillapítási tényező, erősítési tartalék, fázistartalék. A költségfüggvény megválasztásánál figyelembe kell venni, hogy a megtervezett rendszer a hagyományos minőségi jellemzőkkel könnyebben értelmezhető fizikai előírásoknak is eleget tegyen.

Egy adott lineáris rendszer esetében a tervezés célja megkeresni azt a vezérlési törvényt, ami biztosítja a költségfüggvény vagy célfüggvény minimális értékét:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \rightarrow \min \quad (49)$$

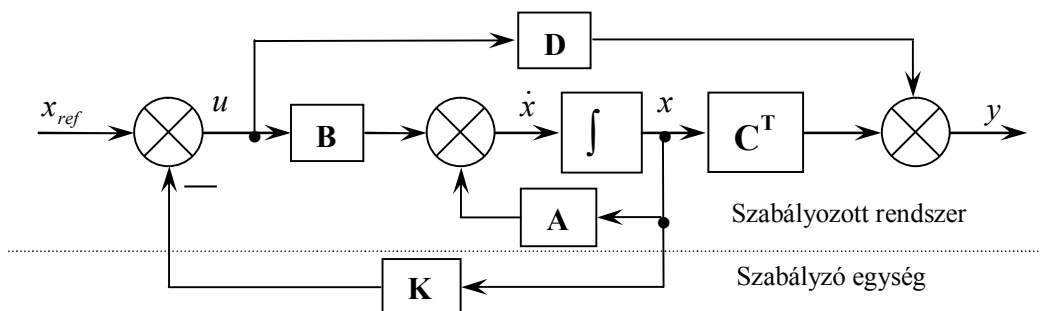
ahol: az \mathbf{x} állapotváltozó vektor, az \mathbf{u} irányító vektor, a $\mathbf{Q} \geq 0$ az állapotváltozók pozitív szemidefinit diagonális súlyozó mátrixa, ami biztosítja, hogy a másodfokú alak bármilyen x_i értéknél pozitív, vagy legfeljebb zérusértékű legyen. Az $\mathbf{R} > 0$ a bemeneti vektor rendezőinek diagonális súlyozó mátrixa. Az integrálandó $\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x}$ kvadratikus alak a minőségi jellemzőkről hordoz információt, az $\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$ kvadratikus alak a költségeket jellemzi. Az $\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$ másodfokú alak $\mathbf{u} = 0$ kivételével sohasem lehet zérus, egyébként a költségfüggvény érzéketlenné válna az egyes irányító jel értékekre. Mindkét kvadratikus (másodfokú) alak skalár mennyiség, mivel $\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n q_i x_i^2(t)$ és az $\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} = \sum_{j=1}^n r_j u_j^2(t)$. A (49) integrál kritériumban a $\mathbf{Q} \geq 0$ és az $\mathbf{R} > 0$ súlyozó mátrixokat úgy változtatjuk, hogy a zárt szabályozási rendszer, 6. ábrán látható, feleljen meg az előírt minőségi követelményeknek.

A tervezés folyamán célszerű figyelembe venni, hogy ha a \mathbf{Q} elemei lényegesen nagyobbak, mint az \mathbf{R} elemei, akkor a szabályozási rendszer nagy túlszabályozással működik, illetve ha az \mathbf{R} elemei lesznek lényegesen nagyobbak, mint a \mathbf{Q} elemei, akkor a szabályozási rendszer működéséhez kevesebb villamos energiára és kisebb hidraulikus erősítőkre van szükség [76][10].

A vizsgált rendszer állapotegyenlete (16) egyenlet szerint adott. Zérusértékű referencia jel esetén az optimális vezérlési törvény [10][88]:

$$\mathbf{u}_{opt}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (50)$$

A (50) vezérlési törvény biztosítja a (49) költségfüggvény minimális értékét, ahol \mathbf{K} az állapot-visszacsatolási mátrix. Az optimális szabályozási rendszer a 6. ábrán látható.



6. ábra A teljes állapot-visszacsatolású szabályozási rendszer hatásvázlata

Legyen $x_{ref} = 0$ és $\mathbf{D} = \mathbf{0}$. A (50) egyenletet az (14) egyenletbe helyettesítve kapjuk:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{x} = [\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]\mathbf{x} \quad (51)$$

A továbbiakban tételezzük fel, hogy $[\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]\mathbf{x}$ mátrix sajátértékei negatív valós részűek. A (49) költségfüggvénybe helyettesítve a (50) vezérlési törvényt:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K} \mathbf{x}] dt = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} \mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} dt \rightarrow \min \quad (52)$$

Az optimális vezérlési törvény (50) meghatározásához keressük a \mathbf{K}_{opt} optimális állapot-visszacsatolási mátrixot [89].

Az integrál kritérium minimálásához használjuk fel Ljapunov második, közvetlen módszerét. A módszer levezetése a [77] irodalomban található. Feltételezzük, hogy bármely \mathbf{x} állapotvektorhoz rendelhető egy valós elemű \mathbf{P} pozitív definit Hermite-féle hermetikus mátrix, amelyre igaz, hogy $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$. Ebben az esetben felírható [32]:

$$\mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} = -\frac{d}{dt} [\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}] \quad (53)$$

Az $\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$ kvadratikus alak deriválása és a (51) egyenlet felhasználása után:

$$\mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} = -\mathbf{x}^T \dot{\mathbf{P}} \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{x}^T \left[[\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]^T \mathbf{P} + \mathbf{P} [\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}] \right] \mathbf{x} \quad (54)$$

Ljapunov második közvetlen módszere szerint, ha az $[\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]$ mátrix sajátértékei negatív valós részűek, akkor $\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}$ pozitív definit mátrix esetén létezik olyan pozitív definit \mathbf{P} amelyre igaz [10]:

$$[\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]^T \mathbf{P} + \mathbf{P} [\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}] = -[\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \quad (55)$$

Felhasználva a (55) Ljapunov-féle mátrixegyenletet a négyzetes integrálkritérium:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} \mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} dt = -[\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}]_{t_0}^{t_{\text{vég}}} = -\mathbf{x}^T(t_{\text{vég}}) \mathbf{P} \mathbf{x}(t_{\text{vég}}) + \mathbf{x}^T(t_0) \mathbf{P} \mathbf{x}(t_0) \quad (56)$$

Mivel az $[\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]$ mátrix sajátértékei negatív valós részűek, ezért $\mathbf{x}(t_{\text{vég}} = \infty) \rightarrow 0$.

A (56) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$J = \mathbf{x}^T(t_0) \mathbf{P} \mathbf{x}(t_0) \quad (57)$$

A (57) egyenletből látható, hogy az integrálkritérium $\mathbf{x}(t_0)$ kezdeti feltételtől is függ. Mivel az \mathbf{R} mátrix pozitív definit Hermite-féle hermitikus mátrix, vagyis $\mathbf{R} = \mathbf{T}^T \mathbf{T}$, \mathbf{T} - reguláris mátrix, felírható a (55) egyenletből, hogy:

$$\left[\mathbf{A}^T - \mathbf{K}^T \mathbf{B}^T \right] \mathbf{P} + \mathbf{P} \left[\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K} \right] + \mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{K} = \mathbf{0} \quad (58)$$

Felhasználva, hogy $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$ és $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{T}^{-1} (\mathbf{T}^T)^{-1}$, a (58) egyenletet átírva kapjuk, hogy:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right]^T \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right] - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (59)$$

A négyzetes integrálkritérium minimálása, az optimális vezérlési törvény \mathbf{K}_{opt} mátrixának meghatározása, az $\mathbf{x}^T \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right]^T \left[\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \right] \mathbf{x}$ szorzat minimálását jelenti. Mivel a szorzat mátrix nem negatív, ezért a (59) kifejezés minimális (zérus) értékét akkor veszi fel, amikor $\mathbf{T} \mathbf{K} = (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$ vagyis $\mathbf{K}_{opt} = \mathbf{T}^{-1} (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$. Az előzőek ismeretében az optimális vezérlési törvény [76]:

$$\mathbf{u}_{opt}(t) = -\mathbf{K}_{opt} \mathbf{x}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t) \quad (60)$$

alakú. A \mathbf{P} mátrix meghatározására alkalmazhatjuk a Riccati-féle mátrixegyenletet:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (61)$$

A (61) egyenlet megoldásához keressük a \mathbf{Q} és \mathbf{R} súlyozó mátrixokat. Az optimálási feladat megoldása adott \mathbf{A} és \mathbf{B} mátrixok alapján:

1. meghatározzuk a \mathbf{Q} , és az \mathbf{R} súlyozó mátrixokat az előzetesen definiált követelményeknek megfelelően;
2. a (61) egyenletet megoldjuk és megkapjuk a \mathbf{P} pozitív definit mátrixot;
3. a \mathbf{P} mátrix ismeretében kiszámítjuk a \mathbf{K}_{opt} optimális visszacsatolási mátrixot;
4. a \mathbf{K}_{opt} behelyettesítésével ismertté válik az optimális vezérlési törvény (60) és kiszámíthatjuk az integrál kritérium (49) minimumát [90].

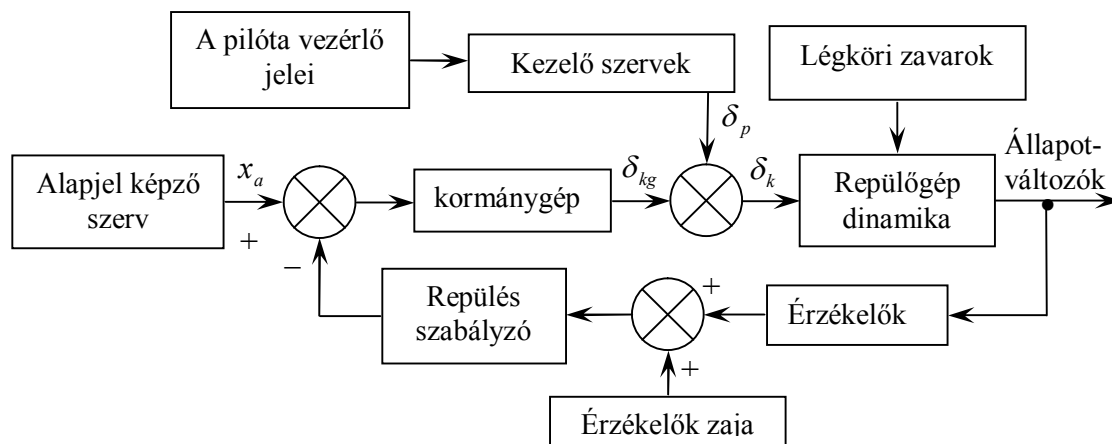
ROBOTPILÓTA (AUTOMATIKUS REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ) RENDSZEREK

A pilóta nélküli repülőgépek irányításához (távirányításához) jól képzett szakszemélyzetre, vagy előre, a repülés megkezdése előtt a földön, illetve repülés közben a robotpilótába programozott útvonaltervre van szükség. A földön, irányító állomáson, vagy a startpont közelében lévő irányító személy, fedélzeti kamera nélkül, megfelelő látási és időjárási viszonyok között, csak a látóhatár széléig képes a repülőgép irányítására. A repülőgépet ért zavarok hatásának kiküszöbölésére, vagy a repülőgép levegőben tartására csak jól képzett személy képes, aki az adott típus légi üzemeltetését már hosszú ideje végzi. Az UAV-kat a végrehajtandó feladatok közül, például felderítési, tüzérségi tűzhelyesbítési, harcmező kárfelmérési, digitális térképezési, célmegjelölési stb. feladatok elvégzésére alkalmazhatják. A teljességigénye nélkül felsorolt tevékenységek ellátására célszerű olyan repülőgép alkalmazása, amely üzemeltetése (bármely repülési feladat irányítása) gyorsan, esetleg a felderítő katona, a határőr, vagy más szakember számára is könnyen elsajátítható.

A pilóta nélküli repülőgépeken alkalmazott hasznos terhelések közé tartoznak például az elektrooptikai és az infravörös felderítő berendezések, melyek felderítési lehetőségei a repülési magasság és a légkör állapotától függően változik. Például a felderítési feladat során a valós idejű képek továbbítása a harceljárás megtervezését (katasztrófa esetén a katasztrófa elhárítását, illetve a károk felmérését) könnyítheti meg. A továbbított képek kiértékelhetőségének feltétele, hogy a képek jól fókuszáltak legyenek, és a célobjektumról érkezzenek. A szándékos, illetve külső zavarás eredményeként érkező manőverparancsok hatásának befolyásolásával biztosítható a fedélzeti berendezések védelme, illetve elősegíthető a megfelelő működtetése. A repülőgép üzemeltetési képességei ilyen irányú növelésének egy lehetséges megoldása robotpilóta (repülésszabályozó) alkalmazása.

A repülőgépek tervezésének korai szakaszában a kormányzás alapvető eszközei a pilóta és a kormányzervek közötti mechanikus erőátviteli eszközök voltak. Ebben az időben a repülőgép térbeli helyzetének meghatározása vizuálisan, beállítása a földi horizonthoz képest manuálisan, illetve egyszerű műszerekkel történt. A repülőgépek fejlődésével a fedélzeti berendezések, többek között a robotpilóták is korszerűsödnek. Ezek az eszközök a repülőgép mozgásjellemzőit állandó értéken tartó, vagy előírt módon megváltoztató automatikus berendezések. Napjainkban a robotpilóta elnevezés mellett az automatikus repülésvezérlő

rendszer megnevezés is teret nyert. A repülőgép-vezetés automatizálása során fontos a repülőgép mozgását meghatározó paraméterek pontos meghatározása és időbeli változásának megismerése. Elsődleges feladat a repülőgép stabilizálását biztosító vezérlési törvények definiálása (a robotpilóta által létrehozott kormánylap-kitérítés és a repülőgép elmozdulása közti kapcsolat), valamint a kormányszervek megadott pontosságú és sebességű kitérítésének létrehozása a vezérlési törvények szerint. A korszerű robotpilóták már nem csak a stabilitás növelését végzik, hanem képesek előre programozott útvonalrepülésre, önálló manőverezésre és navigálásra, automatikus fel- és leszállásra, a meghatározott nagyságú külső zavarok hatásainak csökkentésére, vagyis aktív repülésszabályozásra. A robotpilóta vagy inkább integrált repülésirányító rendszer működését különböző mérőadók teszik lehetővé (bedöntési, bólintási szög és szögsebesség adók, irányadó, túlterhelésadó, magasság-, állásszög adók), amelyek a repülőgép helyzete és a kormányszervek helyzete alapján keletkezett, a mért (érezkelt) jellemzőkkel arányos elektromos jeleket a robotpilóta kidolgozó és végrehajtó berendezéseibe továbbítják. A kapott utasítások végrehajtása a repülőgépvezetőtől függetlenül előre megadott program szerint, vagy a pilóta által létrehozott δ_p és a kormánygépről érkező δ_{kg} jelnek megfelelő δ_k kormánykitéréseknek megfelelően megy végbe.



7. ábra. A robotpilóta rendszer általános felépítése

A repülőgép robotpilóta rendszerének működési vázlatát a 7. ábrán látható. A repülés-szabályozó bemeneti jele az x_a alapjel, amely lehet időben állandó, vagy előre megadott módon időben változó. Ha a robotpilóta rendszer bemeneti jele állandó, *értéktartó*, ha időben előre definiáltan változik, akkor *értékkövető szabályozásról* beszélünk.

Az robotpilóta rendszerek általában az eltérés elve, vagy a kompenzáció elve alapján működnek, de az összetett működési elvet is használják (a repülés bizonyos ideje alatt az elté-

rés elve, majd egy másik repülési fázisban a kompenzáció elve alapján működik a repülés-szabályozó rendszer). Az eltérés elve alapján működő, a 7. ábra szerinti értéktartó robotpilóta rendszerben az alapjel képző létrehozza a stabilizálni kívánt alapjellel arányos x_a jelet. A robotpilóta érzékelői mérik a repülőgép pillanatnyi helyzetének megfelelő repülési paramétereket. Ha a repülőgép pillanatnyi és a kívánt repülési helyzete nem egyezik meg, akkor a különbségképző szerv előállítja a hibajelet. A hibajel jelformálás, illetve erősítés után kormánygépre kerül, amely ledolgozza a hibajellel arányos jelet, és δ_{kg} jelet ad az összegzőre. Az összegző kimenő jele δ_k , olyan módon téríti ki a megfelelő kormányfelületet, hogy az azon ébredő légerő és nyomaték a repülőgépet a kívánt repülési helyzetbe hozza. A szabályozási folyamat mindaddig tart, amíg a hibajel zérussal lesz egyenlő.

Robotpilótákkal szemben támasztott általános követelmények:

- a repülőgép kormányozhatóságának és előre megadott stabilitásának biztosítása az x , y , és a z tengely körül;
- a zavaró hatásokkal szembeni érzéketlenség;
- speciális feladatok biztosítása:
 - az automatikus le-, és felszállás;
 - repülési sebesség stabilizálása;
 - repülési magasság stabilizálása;
 - süllyedés, emelkedés végrehajtása;
 - műszer szerinti sebesség és „M” szám automatikus stabilizálása;
 - a repülőgép bármely helyzetből vízszintes repülési helyzetbe történő visszaállítása;
- üzembiztos, pontos működés az előre megadott hőmérsékleti, magassági és relatív nedvesség tartományon belül;
- minimális energia felhasználással működjön;
- minél kisebb súllyal és méretekkel rendelkezzen.

Az automatikus repülés szabályozó rendszer tervezésénél alapkövetelmény, hogy — a rendelkezésre álló dinamikus modellek állapotegyenleteit felhasználva — megismerjük a szabályozott berendezés működési tulajdonságait, amelyek meghatározásához idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálatok elvégzése és elemzése szükséges. Az analízisek eredményeit figyelembe véve megtervezhető olyan repülésszabályozó, ami biztosítja, hogy a pilóta nélküli repülőgépet ért külső zajok, illetve távirányítás esetén a felhasználó által okozott szándékos, vagy véletlen térbeli helyzet és/vagy mozgásállapot változások olyan mértékűek

legyenek, amelyek nem károsítják a fedélzeti berendezéseket, illetve folyamatosan biztosítják az üzemeltetési korlátozásokat meg nem haladó repülési jellemzőket [8][15][17][72].

A robotpilóták irányítástechnikai minőségi követelményei

A repülőgépek szabályozójának előzetes tervezése a repülőgép identifikált repülésmechanikai matematikai modelljére épül. A teljes állapotvisszacsatolású robotpilóták szabályozója tervezésének fontos feltétele, hogy a szabályozott szakasz állapotváltozói érzékelőkkel mérhetőek legyenek. A szabályozótervezés további szükséges és elégséges feltétele, hogy a repülőgép repülésmechanikai matematikai modellje teljesen megfigyelhető, és teljesen irányítható legyen, illetve a szabályozott jellemző elvárt időkéésés és hiba nélküli alapjelkövetése a rendszerre ható külső és belső zavaró jellemzőktől függetlenül. Ez a követelmény valós rendszerekben nem, vagy csak bizonyos hibával valósul meg. A szabályozás minőségét e hiba alkalmasan megválasztott mutatóival lehet jellemezni. A hiba két részre bontható. A statikus hibára (az ideális állapottól való eltérést mutatja állandósult állapotban), és a dinamikus hibára (az ideális kimeneti jeltől való eltérés a tranziens alatt). A szabályozási rendszer tervezése és működése során fontos szempont az állandósult állapotbeli szabályozási hiba minimalizálása [8].

A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZERÉNEK ANALÍZISE

Az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények, és a repülőgép nemirányított oldal- és hosszirányú mozgásának irányítástechnikai minőségi jellemzőinek vizsgálatából a repülőgép stabilitási problémáira, valamint az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények teljesülésére következtethetünk.

A pilóta nélküli repülőgép idő-, és frekvenciatartománybeli analízise

A robotpilótákkal szemben támasztott követelmény a megfelelő pontosságú alapjelkövetés. A gyakorlatban a robotpilóta alapjelkövetését az alábbi bemenőjelekre szokás vizsgálni:

- $x_a(t) = \delta(t)$, Dirac-delta impulzus – segítségével a rendszer súlyfüggvényét határozhatjuk meg, melyen keresztül a zárt szabályozási rendszer (repülőgép) stabilitását vizsgálhatjuk. A közvetlen stabilitási kritérium alapján a szabályozási rendszer akkor és csak akkor stabilis, ha (megfelelően hosszú idő elteltével) a súlyfüggvény értéke zérus:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0 \quad (30)$$

- $x_a(t) = 1(t)$, egységugrás jel – általa a rendszer átmeneti függvényét ismerhetjük meg.

Gyors működésű kormányrendszerek esetén az egyes kormányfelületek meghibásodás miatt bekövetkező szögkitérés, valamint a pilóta által vezetett kiképző repülőgépek robotpilótája légi meghibásodásának imitálása során, az egyes kormányfelületeken létrehozott szögkitérések jó közelítéssel egységugrás jellegűeknek tekinthetők. A valós kormányrendszerekben az időkéésés 0,02–0,05 másodperc, amely elhanyagolhatóan kis értékű a zárt szabályozási rendszerek több másodperces tranziens idejéhez képest.

A robotpilóta zárt szabályozási rendszerének irányítástechnikai minőségi jellemzői az átmeneti függvényből származtathatók. Ha a vizsgált jellemző az átmeneti folyamat lezajlása után egy új állandósult állapotnak megfelelő értéket vesz fel, vagyis:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = konst, \quad (31)$$

akkor a zárt szabályozási rendszer stabil.

- $x_a(t) = t$, egységsebesség jel.

A robotpilóta magasságstabilizáló funkciójának vizsgálatára alkalmazható ez a bemenőjel. A repülési magasság egységsebesség jel szerinti változásának követése nem jelent mást, mint a repülőgép emelkedését adott meredekségű pályán.

- előjelváltó négyszögjel

Ezt a bemeneti jelet a robotpilóta magasságstabilizáló rendszerének vizsgálatára használható. Kis magasságú repülésének automatizálása során, a legfontosabb megoldandó feladat a repülési magasság profiljának megfelelő megválasztása. A repülési pálya tervezésekor előfordul, hogy a repülési magasságot hirtelen, nagy értékkel kell megváltoztatni. A magasságváltoztatás okai az alábbiak lehetnek: a földfelszín követése, emelkedés veszélyes magasságról, természetes és mesterséges tereptárgyak átrepülése.

A műszaki gyakorlatban a zárt szabályozási rendszerek analízisét (a repülőgép robotpilótájának vizsgálatához szükséges, a nemirányított repülőgép hosszirányú- és oldalirányú mozgása minőségi jellemzőinek megismerése érdekében végzett vizsgálatokat) sokszor nem csak a felsorolt elemi determinisztikus vizsgálójelekkel, hanem több elemi jel lineáris kombinációjával létrehozott összetett jellel folytatjuk le.

A repülőgépet térbeli mozgása során a frekvenciatartományban jól leírható külső és nagyfrekvenciás belső zavaró jelek gerjesztik. A fellépő külső és belső zajok repülőgépre gyakorolt hatásának ismeretében megfelelő minőségi jellemzőket biztosító szabályozási rendszert működtethetünk. A stabilis működés feltételei — az időtartomány helyett — sok esetben előnyösebben tisztázhatók frekvenciatartományban. A komplex frekvenciafüggvények ábrázolására több módszer ismert. A frekvencia diagram legkönnyebben kezelhető formája a Bode-diagram. A számítógépes vizsgálati módszerek alkalmazásával sem csökkent a Bode-diagram szerepe, könnyen meghatározható, szemléletes.

Az idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálatok és számítógépes szimulációk eredményei alapján megállapítható, hogy a repülőgép hosszirányú és oldalirányú nemirányított mozgása stabil, vagy instabil, vagyis a repülőgép biztonságos légi üzemeltetéséhez repülésszabályozó rendszer szükséges-e, illetve biztosítja-e a repülőgép stabilitását és eleget tesz-e az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények. A vizsgálatok alapján meghatározható, hogy a repülőgép repülési jellemzőit stabilizáló rendszerei megfelelnek-e a felnyitott szabályozási rendszerekkel szemben támasztott általános követelményeknek.

A zárt szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata

Az időtartománybeli analízis során célszerű megvizsgálni az egységugrás jellel, az egységsebesség jellel és a négyszögjellel gerjesztett zárt szabályozási rendszerek alapjel-követését. A vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a repülési tulajdonságokat stabilizáló rendszerek képesek-e követni a bemeneti jel(ek)et, a stabilizáló rendszerek eleget tesznek-e a zárt szabályozási rendszerekkel szemben támasztott általános irányítás-technikai minőségi követelményeknek.

A minőségi követelmények nem teljesülésekor repülésszabályozó rendszerre van szükség, amely segítségével biztosítható a repülőgép biztonságos légi üzemeltetése. A szabályozótervezés eredményeként kapott „matematikai modellel” zárt a szabályozási rendszeren végrehajtott vizsgálatok eredményeként megállapítható, hogy a repülőgép állapotváltozóinak stabilizálását biztosító, zárt szabályozási rendszer eleget tesz-e az előírt minőségi követelményrendszernek. A gyakorlatban a zárt szabályozási rendszerek számára olyan szabályozót igyekeznek tervezni, amely biztosítja a domináns póluspár hatásának érvényesülését. Ennek megfelelően célszerű olyan szabályozó tervezési módszert választani, vagy a korábban alkalmazottat olyanra módosítani, amely lehetővé teszi a szabályozó minimális lépésben történő megtervezését [8].

A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZER ZAVARELHÁRÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A repülésszabályozó rendszerekkel szemben támasztott követelmény a külső és belső zajok repülőre gyakorolt hatásának minimálása. A repülőgépre ható külső zavarásokat általában a légköri turbulenciára korlátozzák. A repülésszabályozó rendszerek belső zajai általános lefolyású sztochasztikus folyamatok, így matematikai modellezésük a gyakorlatban meglehetősen nehézkes.

A külső zavarások determinisztikus matematikai modellezése

Repülés során a repülőgépek mozgását kiszámíthatatlan, előre nem látható körülmények befolyásolhatják, mint például a pilóta váratlan kormánymozdulata, a kormány meghibásodása, és/vagy a légkör egyenlőtlenégei a szélleökések. Ezek a repülőgépekre ható külső zavarások egyrésze dinamikus jellegű (gyorsan változó, sokszor ütészzerű). A légkörben a szélleökések megoszlása rendezetlen és véletlenszerű, így pontosan nem ismert az időbeli lefolyásuk. Ezért a szélleökések hatását a függőleges sebesség változásától függően lehetnek:

- élesszélű szélleökés – a szélleökés ugrászzerűen jelentkezik, hatása jól modellezhető egységugrás vizsgáló jellel;
- fokozatos szélleökés – a függőleges sebesség kb. 30 méteren fokozatosan (lineárisan) növekszik, hatása jól modellezhető egységsebesség vizsgáló jellel.

A gyors lefolyású szélleökések általánosan elfogadott matematikai modellje az $1 - \cos$ diszkrét szélleökés függvény. A függvény $v(t) = \frac{k}{T} (1 - \cos(2\pi/T)t)$ alakban adott, ahol k – szélleökéstényező, a szélleökés intenzitását jellemzi, T a szélleökés lefolyásának időtartama.

A repülőgép zavarelhárításának analízisére a determinisztikus jelek közül az egységugrás (az élesszélű szélleökés hatásának modellezésére), és az egységsebesség (a fokozatos szélleökés hatásának vizsgálatára) vizsgáló jelek alkalmazhatók.

A külső zavarások sztochasztikus matematikai modellezése

Valós fizikai környezetben végrehajtott repülés során a repülőgépet ért zavaró hatásokat két csoportra oszthatjuk: külső zavarások, és belső zajok. A külső zavarások közé tartozik az időjárási viszonyok megváltozása, a légköri turbulencia, elektromágneses zajok, külső

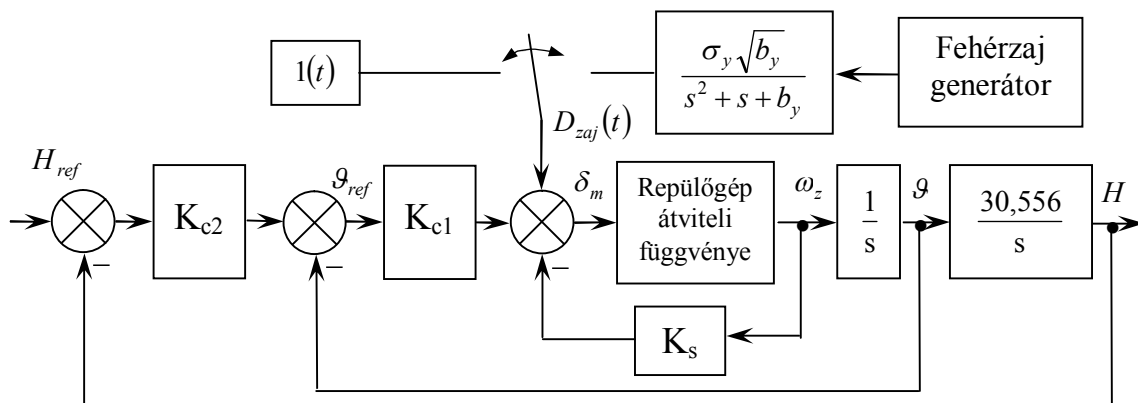
függesztmények változása következtében fellépő áramlástani változások stb. A belső zajokat a rendszer, illetve az érzékelők sajátzajai alkotják. A külső sztochasztikus zavarások modellezésére egy fehérzaj generátor jeléből szűrők segítségével sztochasztikus jelek állíthatók elő. Az előállított zaj összetevők segítségével vizsgálható a zárt rendszer zavarelhárítása.

A zárt repülésszabályozó rendszer zavarelhárításának vizsgálata

Pl.: Magasságstabilizáló zárt szabályozási rendszer zavarelhárításának vizsgálata során első vizsgálati jel legyen a $D_{zaj}(t) = 1(t)$ jel. Adatok a légköri turbulencia modellezéséhez:

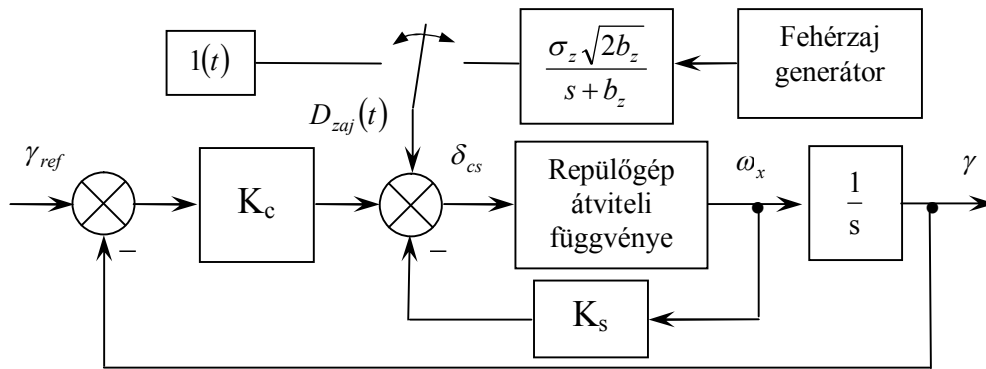
Repülési sebesség [m/s]	σ_y [m/s]	σ_z [m/s]	L_y [m]	L_z [m]	b_y	b_z
30,6	1,32	1,32	335,6	403,3	10,98	13,20
36,1	1,32	1,32	335,6	403,3	9,29	11,17
41,7	1,32	1,32	335,6	403,3	8,06	9,68
47,2	1,32	1,32	335,6	403,3	7,1	8,54
52,8	1,32	1,32	335,6	403,3	6,36	7,64

1. táblázat Adatok a légköri turbulencia modellezéséhez



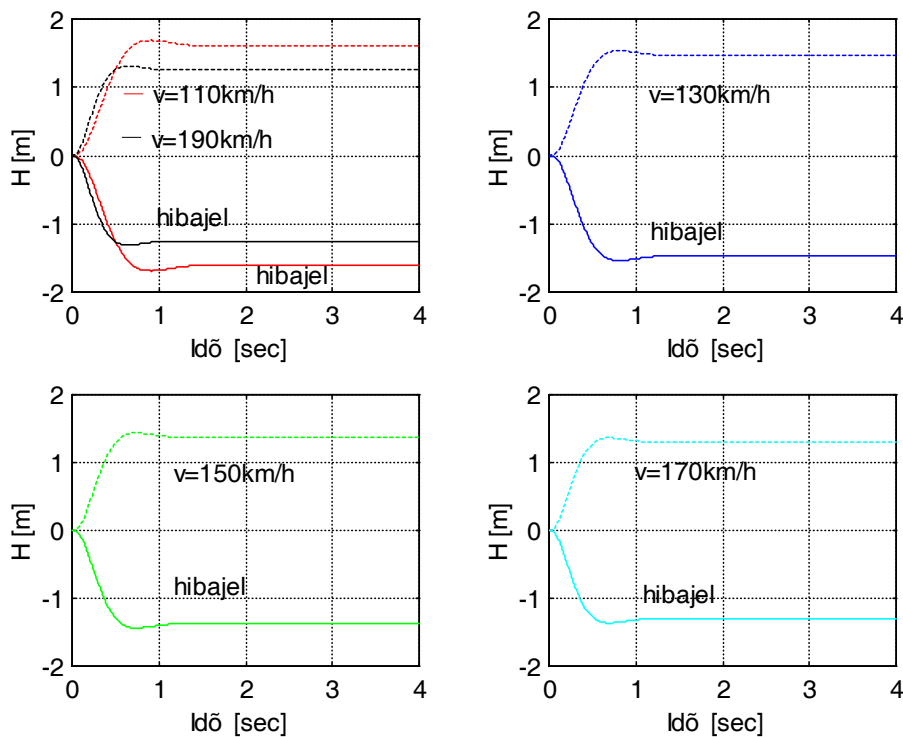
8. ábra A zavarelhárítás vizsgálata függőleges szél esetén

A számítógépes szimuláció eredményeként a 10. ábrán látható (válaszjel a szaggatott vonal, hibajel a folyamatos vonal), hogy a statikus hiba érték 1,3 és 1,67 m között változik a sebesség függvényében, valamint a repülési sebesség növekedésével a statikus hiba értéke csökken.



9. ábra A zavarelhárítás vizsgálata oldalszél esetén

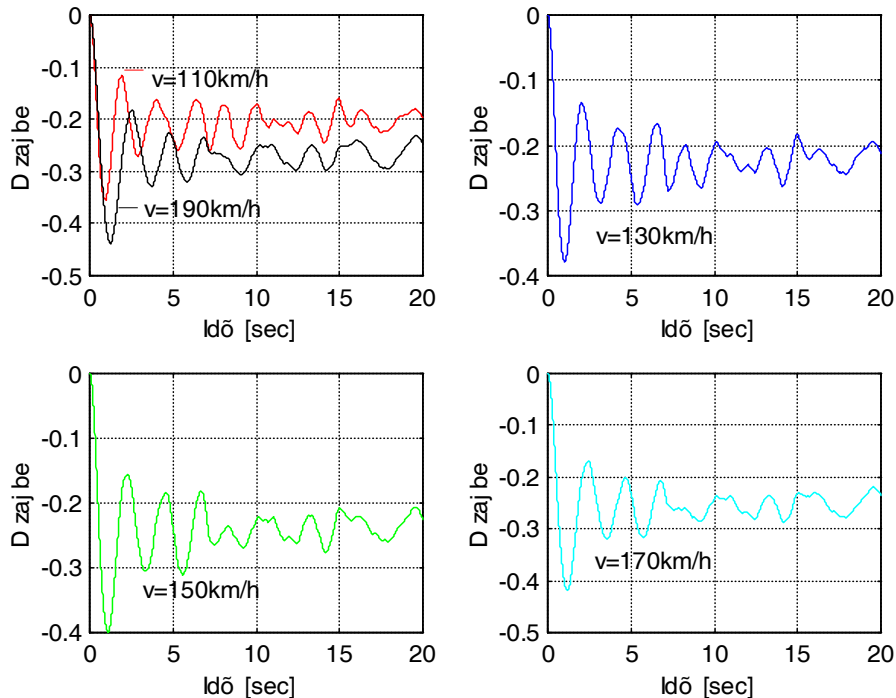
A magasság szabályozási rendszer tranziens ideje $t_{tr} < 1,3 \text{ sec}$.



10. ábra A magasság szabályozási rendszer tranziens viselkedése, és statikus hibája

A 10. ábra alapján elmondható, hogy a szabályozó nem képes a külső zavarás hatását szűrni, az ideális zavarelhárítás nem valósul meg. A $H = 400 \text{ m}$ -re adott, a statikus hiba értéke a 400 m -es munkaponti repülési magasságnak csak elhanyagolhatóan kis hányadát képezi (0,33–0,6%), így elmondható, hogy a szabályozó a repülési magasságot stabilizálja.

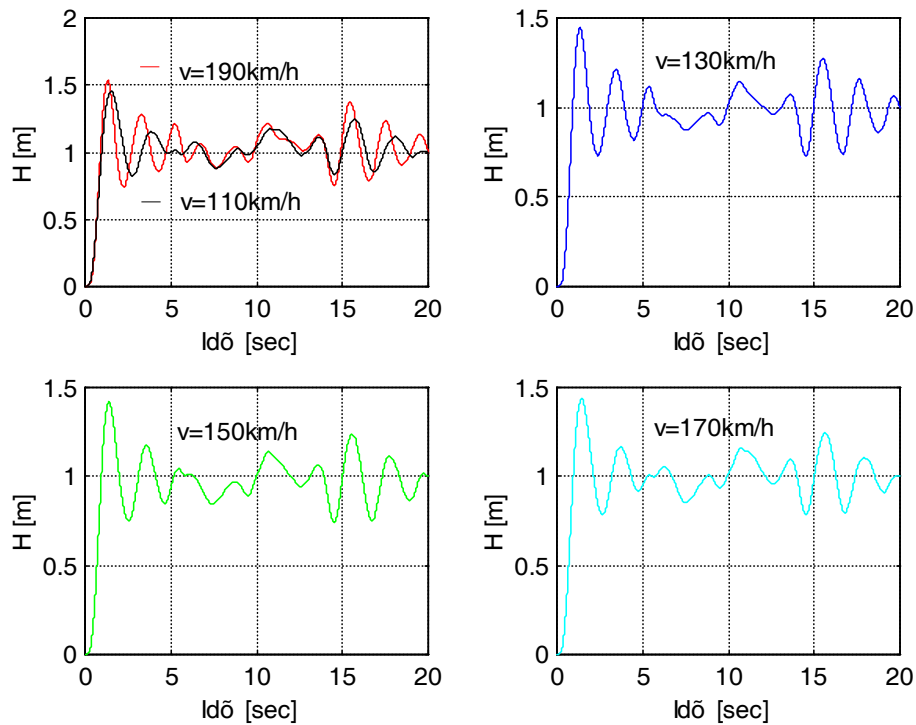
A magasságstabilizáló rendszer további vizsgálata során alkalmazom a fehérzajból elő állított sztochasztikus $D_{zaj}(t)$ jeleket. A 8. ábrán látható, hogy a sztochasztikus vizsgáló jel amplitudója a repülési sebesség függvényében kis mértékben csökken.



11. ábra A sztochasztikus vizsgáló jel időfüggvényei

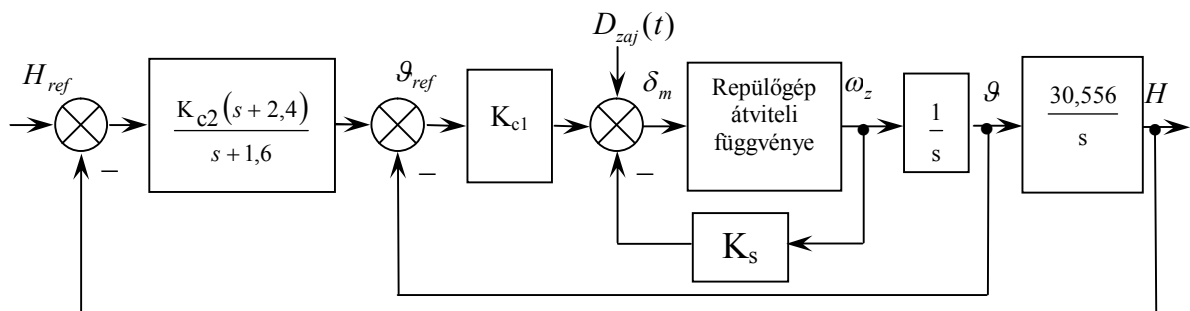
A repülőgép $D_{zaj}(t)$ sztochasztikus vizsgáló jelre adott magasság válasz függvényei a 11. ábrán láthatók. A 11. ábrán látható, hogy a sztochasztikus külső zavarás (függőleges szél) hatására ($\sim 1,9 - 2,2$ sec) periódusidejű lengések következnek be a magasságtartásban, ami kezdetben $\sim 1,5$, majd $0,9 - 1,4$ m körüli magasságváltozásokat okoz.

A repülési magasság stabilizálása statikus hibával történik, nem biztosítja az ideális zavarelhárítást. A repülőgép magasságstabilizáló rendszere, így a statikus hiba minimálása érdekében a szabályozó erősítési tényezőjének növelése, vagy jelformálás alkalmazása megoldást jelenthet. A repülőgépeken a villamos energia csak korlátozott mennyiségben áll rendelkezésre, ezért a jelformálás alkalmazását javasolt. Ezért a magasságstabilizáló rendszer szabályozójában (a 8. ábrán K_{c2} erősítés) javasolt olyan sávszűrő alkalmazása, amely lehetővé teszi a statikus hiba csökkentését, valamint a zárt szabályozási rendszer lengési hajlamának minimálását.



12. ábra A magasságstabilizáló rendszer válaszfüggvénye függőleges szél esetén

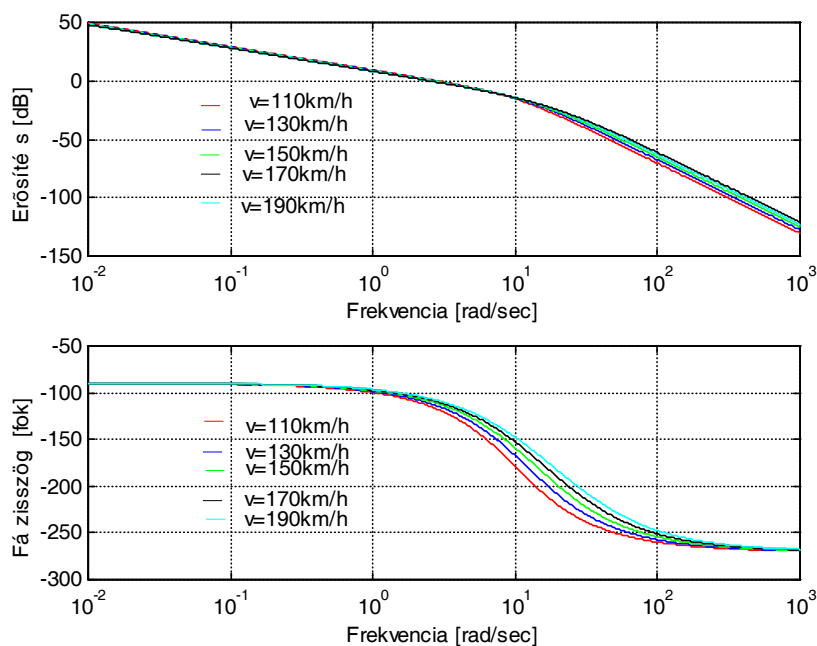
Szabályozástechnikából ismert, hogy a zavarelhárítási képesség integráló jelformálás segítségével javítható. Az integráló jelformálás alkalmazásának hátránya viszont, hogy az alapjel követés során növeli a tranziens időt, vagyis lassítja a zárt szabályozási rendszer működését, így olyan sávszűrő alkalmazása javasolt, amely bizonyos frekvenciatartományon integráló jelformáló hatással bír, más tartományban nem változtatja a jelátviteli tulajdonságokat. A szabályozó struktúrája legyen megfelelő töréspontokkal rendelkező PDT1-es tag. A statikus hiba csökkentésére javasolt $\omega_{alsó} = 2,62 \text{ rad/sec}$; $\omega_{felső} = 3,93 \text{ rad/sec}$ határfrekvenciákra hangolt sávszűrővel ellátott magasságstabilizáló rendszer alkalmazása a 10. ábrán látható.



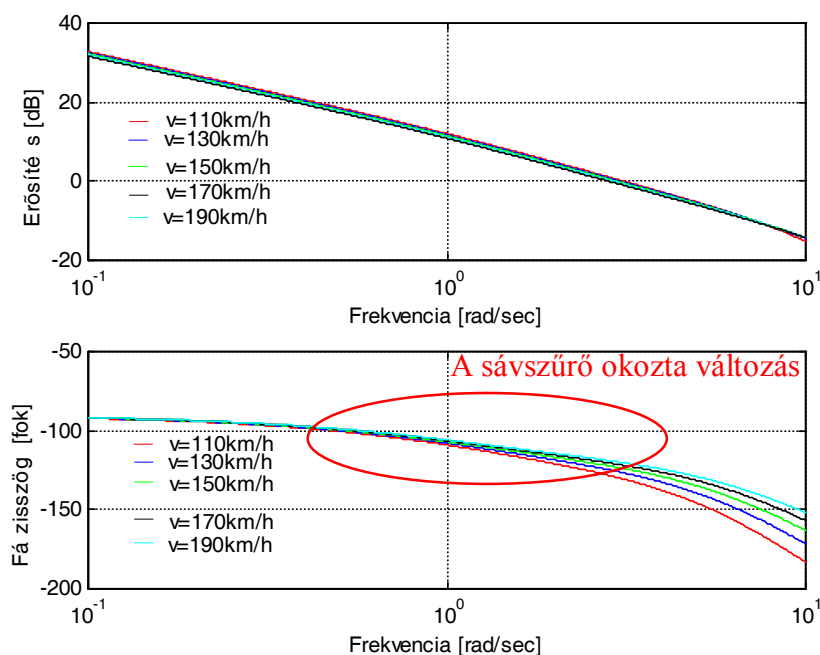
13. ábra Zavarszűrés a magasság szabályozó rendszerben

A sávszűrővel működő magasságstabilizáló rendszer analízise

Az eredeti magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja a 14. ábrán, a PDT1-es szabályozóval ellátott magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja a 15. ábrán látható. Az ábra alapján könnyen belátható, hogy a sávszűrő okozta változás főleg a fázisdiagramon figyelhető meg, míg az erősítés-körfrekvencia jelleggörbék változása nem számottevő. Összehasonlítva a 14. és a 15. ábrán látható Bode-diagramokat megállapítható, hogy az erősítés körfrekvencia görbéken a változás kis értékű, míg a fázis karakterisztikákon a változás megfigyelhető.



14. ábra A felnyitott rendszer Bode-diagramja, magasság irányítási csatorna



15. ábra A PDT1-es szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja

A PDT1-es szabályozós magasságstabilizáló rendszer frekvenciatartománybeli minőségi jellemzői:

A felnyitott rendszer amplitúdó- (G_m) és fázistartaléka (φ_m)		
Repülési sebesség [km/h]	Hosszirányú mozgás	
	G_m [dB]	φ_m [fok]
110	14,264	49,285
130	16,811	53,692
150	19,094	56,861
170	21,17	59,249
190	23,077	61,116

2. táblázat A PDT1-es felnyitott rendszer amplitúdó-, és fázistartalékai

A P-szabályozós magasságstabilizáló rendszer frekvenciatartománybeli minőségi jellemzői:

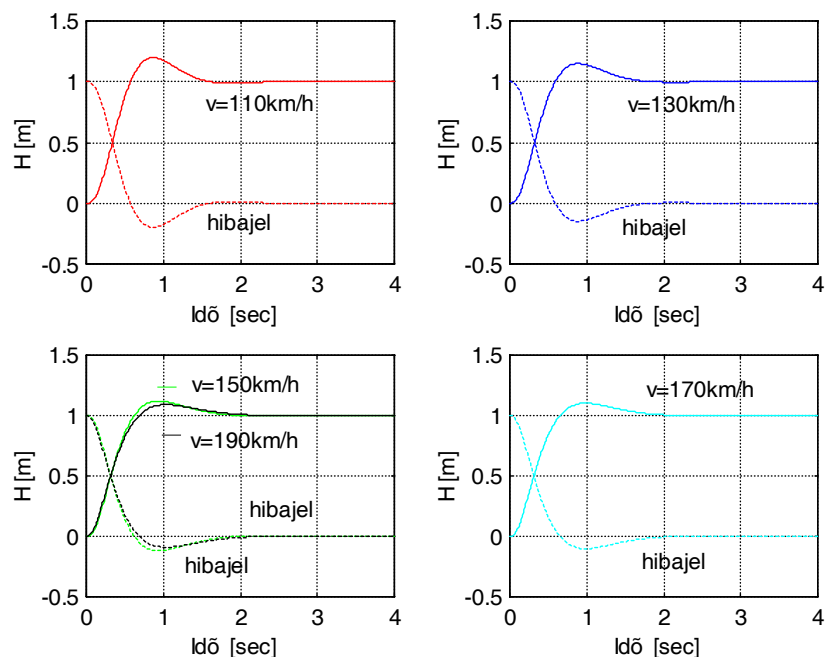
A felnyitott rendszer amplitúdó-, (G_m) és fázistartaléka (φ_m)				
Repülési sebesség [km/h]	Hosszirányú mozgás		Oldalirányú mozgás	
	G_m [dB]	φ_m [fok]	G_m [dB]	φ_m [fok]
110	15,59	62,712	∞	87,217
130	17,956	66,87	∞	86,874
150	20,11	69,897	∞	86,582
170	22,089	72,204	∞	86,33
190	23,92	74,024	∞	86,111

3. táblázat A P-szabályozós felnyitott rendszer amplitúdó-, és fázistartalékai

A táblázatokat összevetve elmondható, hogy a sávszűrő alkalmazása megengedhető mértékben csökkenti a rendszer amplitúdó-, és fázistartalékait.

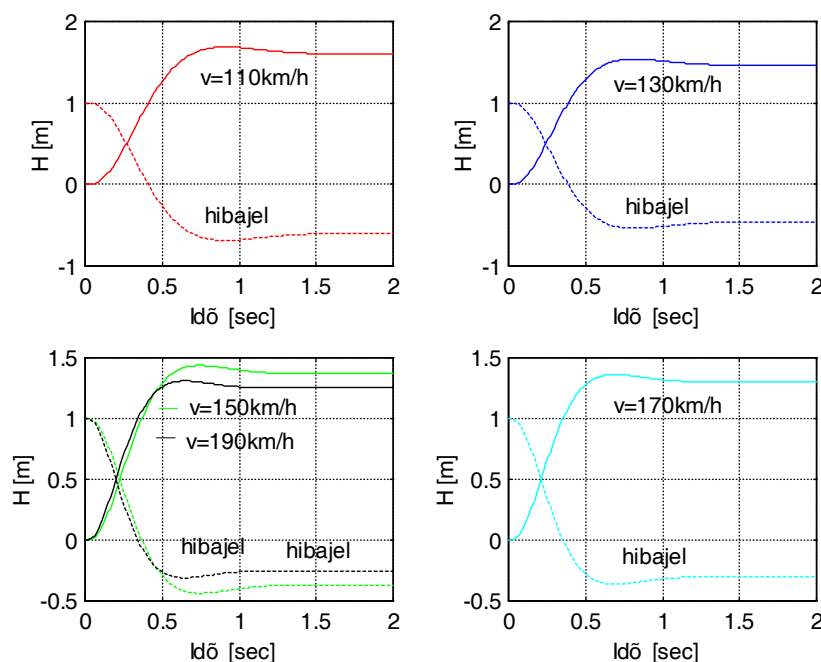
A PDT1-es sávszűrős szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata

Az egységugrás bemenőjelre a válasz- és a hibajel függvények a 16. ábrán láthatók (válaszjel, a folyamatos, hibajel a szaggatott vonal).



16. ábra A magasság, $h_{ref}(t) = 1(t)$ bemenőjelre adott válasz- és hibajel függvényei

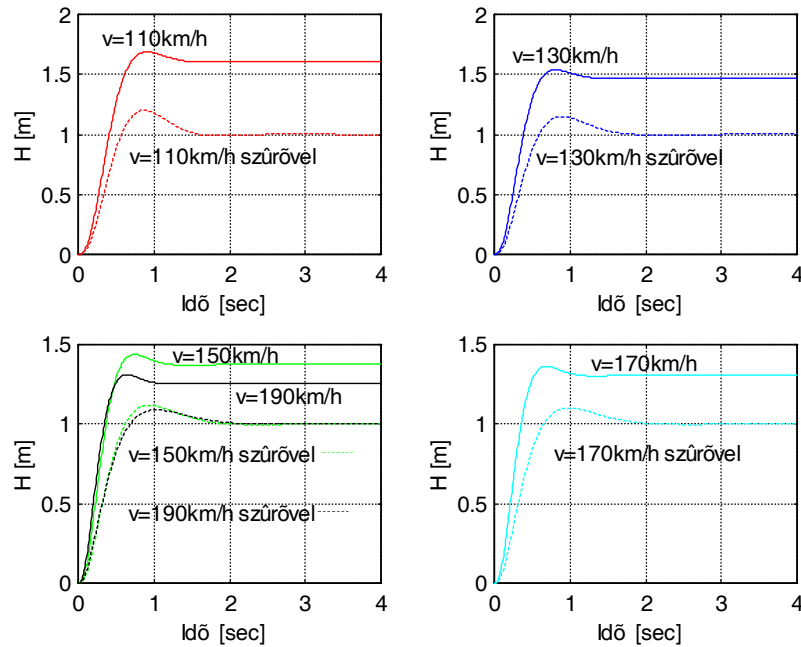
Összehasonlítva a 16. és 17. ábrákon látható hiba jeleket elmondható, hogy a sávszűrővel bővített rendszer az $1(t)$ jelet maradó hiba nélkül követi.



17. ábra P-szabályozó esetén a magasság, $h_{ref}(t) = 1(t)$ bemenőjelre adott válasz és hibajel függvényei

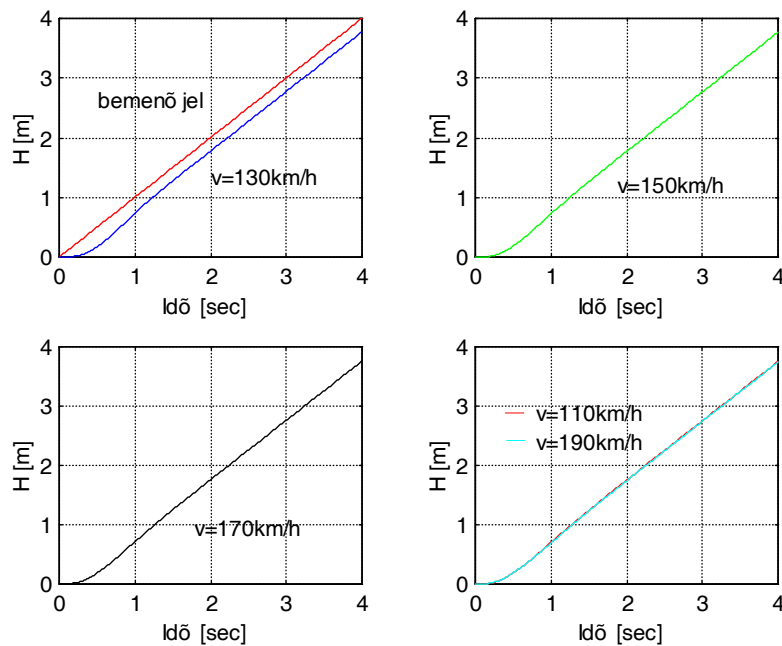
A transziens idő $0,7 < t_{tr} < 1$ sec -ről, $1 < t_{tr} < 1,9$ sec -ra nőtt a PDT1-szabályozó adott sávszűrésen ható integráló jellege miatt. Az átmeneti folyamat megnövekedett transziens ideje kisebb, mint az előírt, tehát a PDT1-szabályozó struktúra eleget tesz az előírt irá-

nyítástechnikai minőségi követelményeknek. A 18. ábrán a P-szabályozóval és a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszerek működését hasonlíthatjuk össze. Az ábra alapján megállapítható, hogy a válaszjelek nagysága 1,3–1,67 m-ről 1 m-re csökkent.



18. ábra A magasság, $h_{ref}(t) = 1(t)$ bemenőjelre adott válasz összehasonlítása szűrővel ellátott és a szűrő nélküli szabályozás esetén

A 19. ábrán a magasságstabilizáló rendszer $h_{ref}(t) = t$ egységsebesség vizsgáló jelre adott válaszfüggvényeit láthatjuk. A kimenő jel $t \approx 0,7$ sec -ig exponenciálisan, majd $t > 0,7$ sec -től lineárisan nő, követve a bemenőjel változását, a repülési sebességtől függetlenül.



19. ábra A magasság transziens függvényei $h_{ref}(t) = t$ bemenőjelre

A P-típusú szabályozóval működő zárt magasságstabilizáló rendszer válaszjelei meredekségének és a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer válaszjelei meredekségének összehasonlítása:

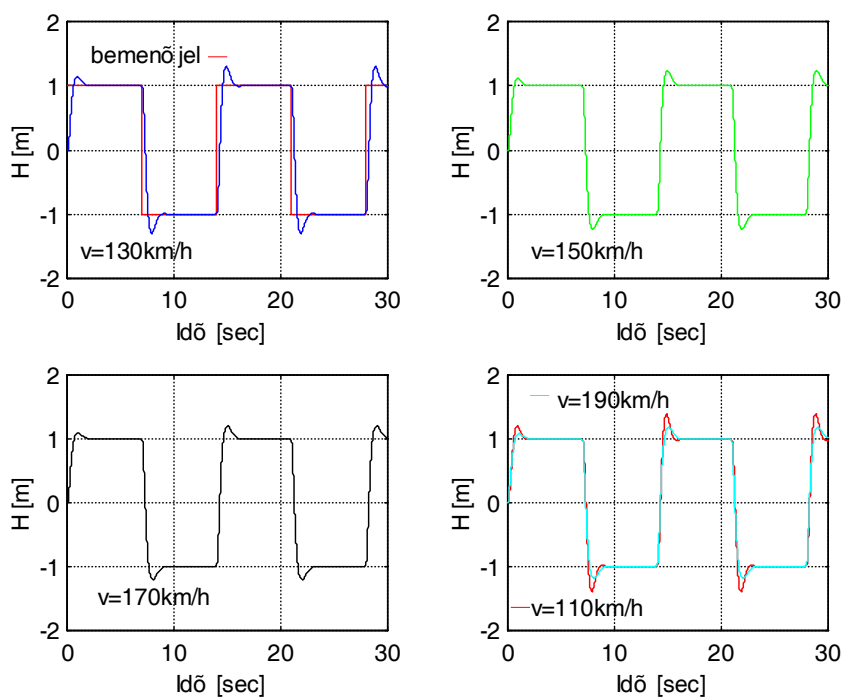
Repülési sebesség [km/h]	A bemenőjel: $h_{ref}(t) = t$	
	P-szabályzó rendszer meredeksége [m/s]	PDT1-szabályzó rendszer meredeksége [m/s]
110	~1,7	~1
130	~1,4	~0,76
150	~1,44	~0,8
170	~1,4	~1
190	~1,37	~1

4. táblázat A válaszfüggvények meredekségének összehasonlítása

A 4. táblázatból látható, hogy P-szabályozóval működő repülési magasságstabilizáló rendszer válaszjének meredeksége minden vizsgált üzemmódon nagyobb, mint a PDT1-szabályozóval működő zárt rendszer.

Az alapjel-követési vizsgálatokat $T = 14 \text{ sec}$ periódusidejű, és $h_{ref}(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } 0 \leq t \leq 7 \text{ sec} \\ -1, & \text{ha } 7 < t \leq 14 \text{ sec} \end{cases}$

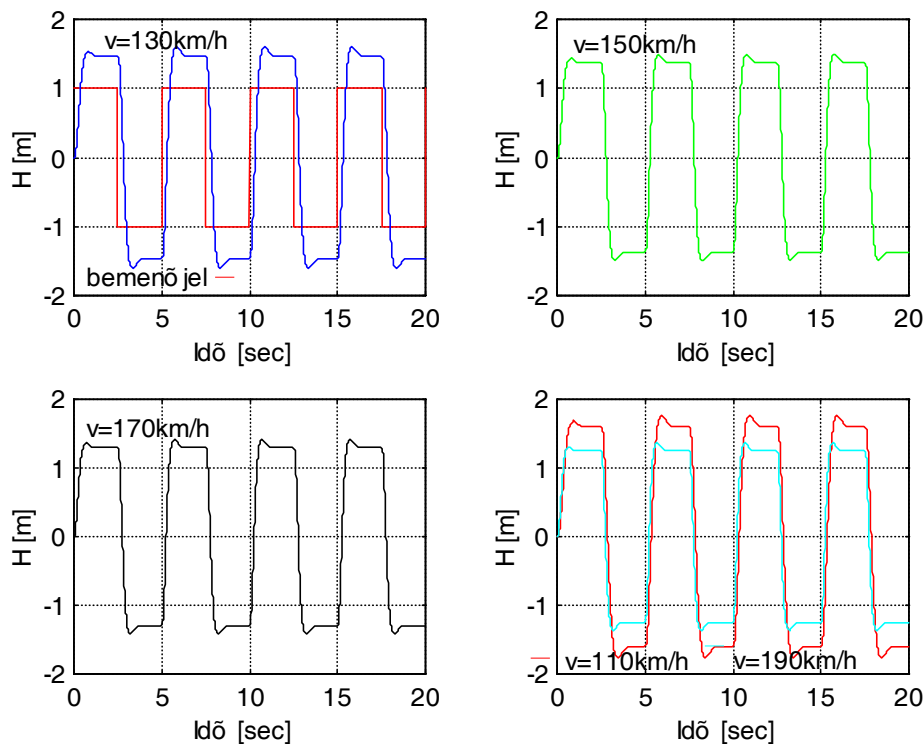
amplitudójú négyszögjelekkel folytatva, a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer négyszögjel vizsgálójelre adott válaszfüggvényei a 20. ábrán láthatók.



20. ábra A magasság válaszfüggvénye

A bemenőjel változásait követve a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer válaszejele, a repülési sebességtől függetlenül, egy előjelváltó lengés után korlátos, 1 méter értékű állandósult állapotbeli értéket vesz fel. A repülőgép magasságstabilizáló rendszere több előjelváltó négyszögjel esetén is követi a bemenőjel változását.

Összehasonlítva a P-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer 21. ábrán látható magassági válaszfüggvényeit a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer 20. ábrán látható válaszfüggvényeivel, meghatározhatjuk a transziens folyamatok minőségi jellemzőinek változását.



21. ábra A magasság válasz függvénye, P-szabályozó esetén

A P-szabályozóval működő szabályozási rendszer kisebb csúcsértékekkel követi a bemenőjelet, mint a PDT1-szabályozóval működő rendszer. A 110–150 km/h repülési sebességekkel paraméterezett üzemmódokon csökkent a transziens idő, a 170 km/h, 190 km/h repülési sebességek esetén érvényesült a PDT1 sávszűrő integráló hatása és növekedett a transziens idő, de a magasságstabilizáló zárt rendszer továbbra is megfelel az általános irányítástechnikai minőségi követelményeknek. A négyszögjel vizsgálójelre adott magassági transziens válaszfüggvények minőségi jellemzői:

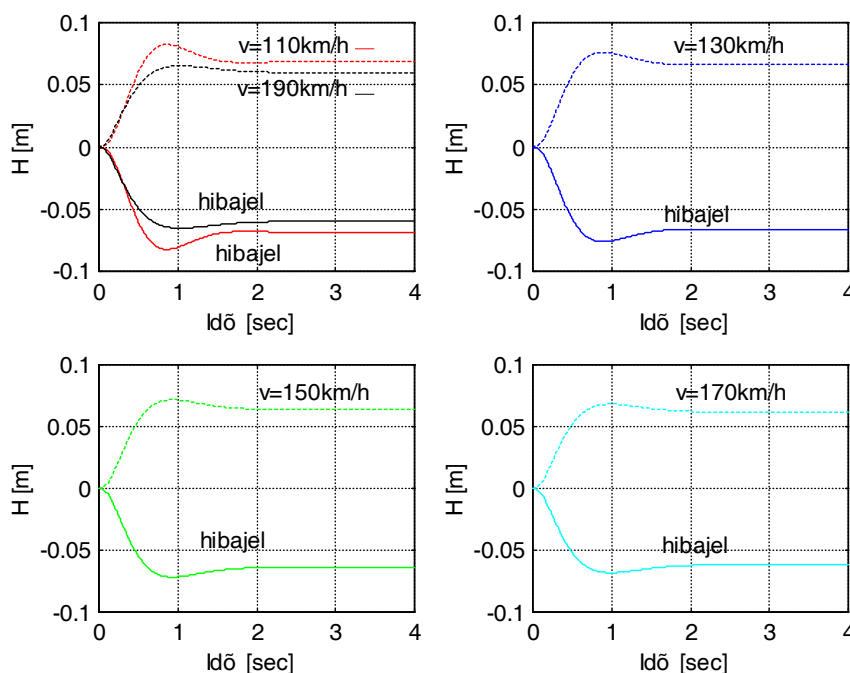
Repülési sebesség [km/h]	A bemenőjel: $h_{ref}(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } 0 \leq t \leq 2,5 \text{ sec} \\ -1, & \text{ha } 2,5 < t \leq 5 \text{ sec} \end{cases}$		A bemenőjel: $h_{ref}(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } 0 \leq t \leq 7 \text{ sec} \\ -1, & \text{ha } 7 < t \leq 14 \text{ sec} \end{cases}$	
	sávszűrő nélküli szabályzó rendszer		sávszűrős szabályzó rendszer	
	tranziens idő [sec]	Csúcsérték [m]	tranziens idő [sec]	csúcsérték [m]
110	~1,75	~1,58	~1,43	~1,38
130	~1,5	~1,46	~1,43	~1,3
150	~1,5	~1,38	~1,43	~1,23
170	~1,25	~1,3	~1,43	~1,23
190	~1	~1,25	~1,43	~1,23

5. táblázat A válaszfüggvények összehasonlítása

A magasságstabilizáló rendszerben alkalmazott PDT1-szabályozó alkalmazása előnyös, mert javítja az alapjel-követési tulajdonságokat és megfelel az előírt minőségi követelményeknek.

A PDT1-es magasságstabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata

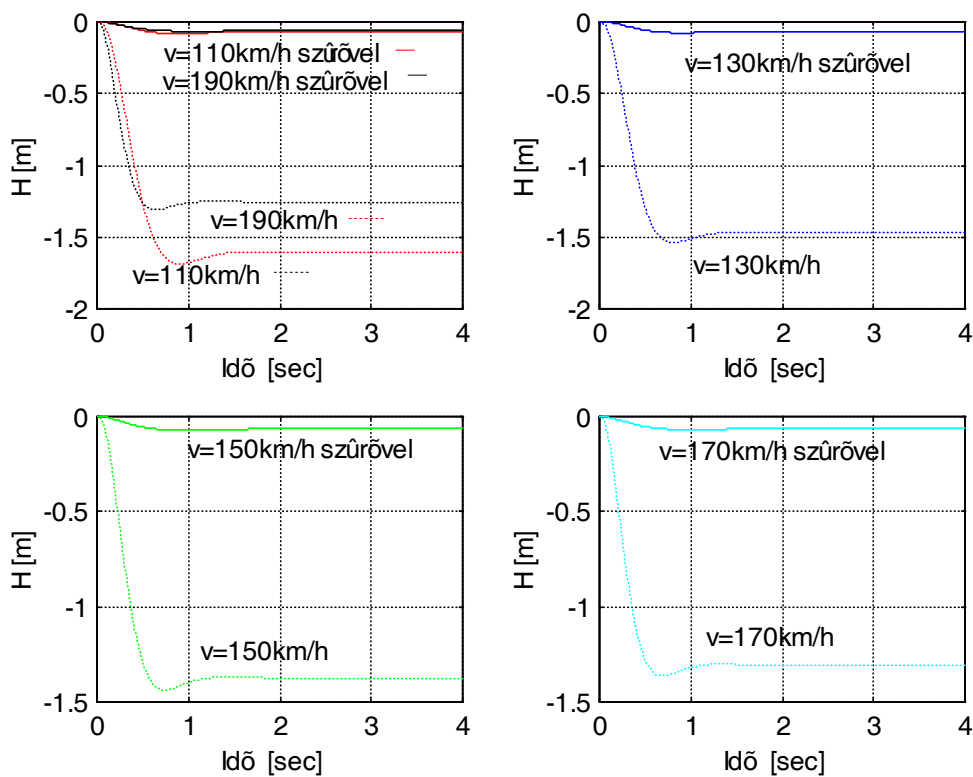
A PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata során a zárt szabályozási rendszer vizsgálati jele $D_{zaj}(t) = 1(t)$ alakú. A magasságstabilizáló rendszer válaszjelei és hibajelei a 22. ábrán láthatók.



22. ábra A sávszűrővel működő magasság szabályozási rendszer tranziens függvényei

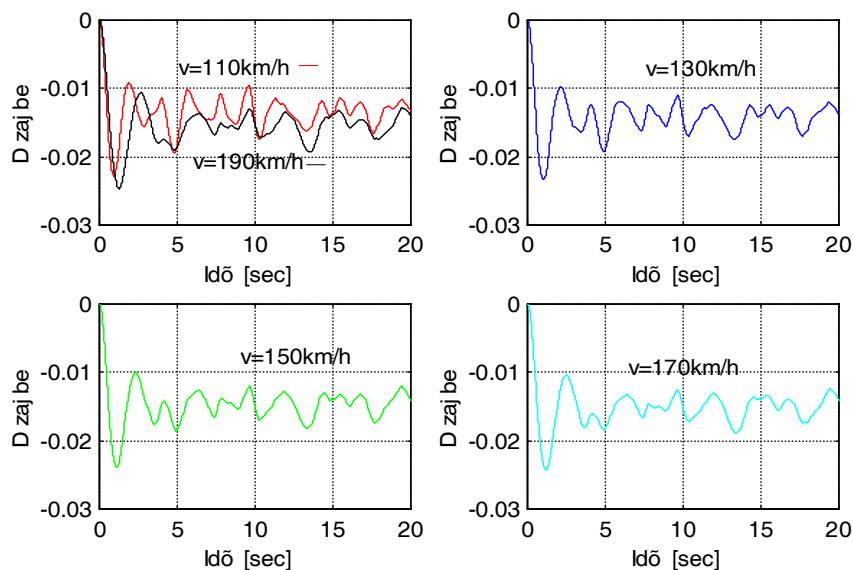
Összehasonlítva a P-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer 10. ábrán látható válasz- és hibajelei a PDT1-szabályozóval működő rendszer 22. ábrán látható válasz- és hibajeleivel elmondható, hogy a tranziens idő $t_{tr} < 1,3 \text{ sec}$ -ról $1,2 \leq t_{tr} \leq 1,4 \text{ sec}$ -ra változik. A magasságtartás során statikus hiba viszont 1,3–1,6 méterről 0,062 méterre csökken.

A 23. ábrán a P- illetve a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszerek válaszjeleit hasonlíthatjuk össze. Az ábrán látható, hogy a PDT1-szabályozóval működő rendszer zavar védettsége jobb, mint a P-szabályozóval működő rendszeré. A zavaró jelek hatására bekövetkező 1,2–1,7 méteres magasságváltozást a PDT1 szabályozó kevesebb, mint 0,08 méterre csökkentette.



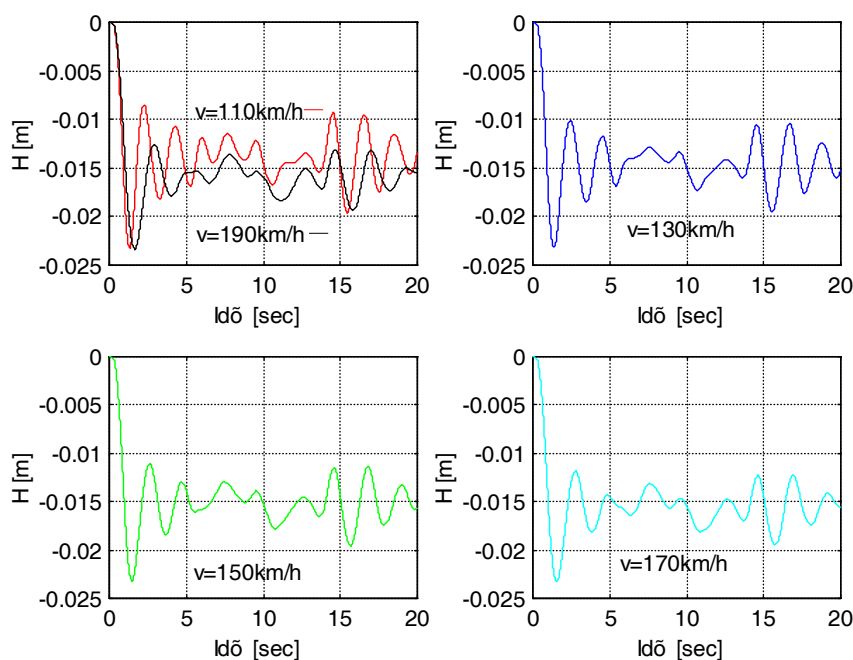
23. ábra $D_{zaj}(t) = 1(t)$ függvényre adott válaszok összehasonlítása

A 24. ábrán a magasságstabilizáló rendszere ható függőleges szél a repülési sebesség értékében paraméterezett időfüggvényei láthatók.



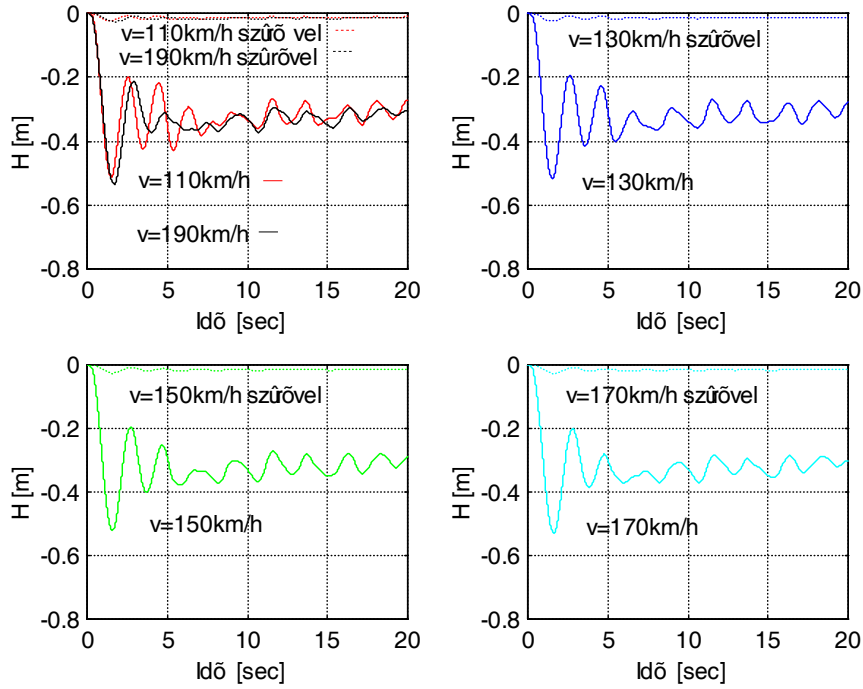
24. ábra. A sztochasztikus függőleges szél vizsgáló jelei

A repülőgép magasságstabilizáló rendszerének sztochasztikus külső zavarásra adott válaszfüggvényei a 25. ábrán láthatók.



25. ábra A repülési magasság válaszjelei

A 25. ábrán látható, hogy a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer 0,023–0,008 méter nagyságú lengéseket hajt végre. A külső zavarás hatására a P-típusú szabályozóval működő rendszerben ébredő $\sim 1,9–2,2$ sec periódusidejű lengések amplitudója számottevően csökken. A P-szabályozóval és a PDT1-szabályozóval ellátott repülési magasságstabilizáló rendszer sztochasztikus analizésének eredménye a 26. ábrán látható.



26. ábra A sztochasztikus analízis válaszfüggvényei sávszűrővel, és sávszűrő nélkül

A 26. ábra alapján belátható, hogy a PDT1-szabályozó alkalmazása csökkenti a statikus hiba nagyságát és a zárt szabályozási rendszer lengési hajlamát.

A vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a repülőgép magasságstabilizáló rendszere számára a PDT1 struktúrájú szabályozó determinisztikus külső zavarás esetén ideális — gyakorlatilag statikus hiba nélküli — zavarelhárítást valósít meg, a repülési magasságstabilizáló zárt rendszer a PDT1-szabályozó alkalmazásával a sztochasztikus külső zavarásra csak kis mértékben érzékeny, javultak a zavarelhárítási tulajdonságok és megfelel az előírt irányítástechnikai minőségi követelményeknek [8][9][10][11][14][15][16][17][26].

A tanulmányban gyakran előforduló jelölések

δ_v	a pilóta nélküli repülőgép magassági kormány szögkitérése [fok]
δ_{KR}	a pilóta nélküli repülőgép csűrőlapok szögkitérése [fok]
x_0, y_0, z_0	a Földhöz rögzített koordinátarendszer tengelyei
x_1, y_1, z_1	repülőgéphez rögzített „test”, vagy „húr” koordinátarendszer tengelyei
$x, y, z,$	aerodinamikai vagy „szél” koordinátarendszer tengelyei
ϑ	bólintási szög, hajlásszög vagy bólintási szög [fok]
ψ	repülőgép irányszög vagy iránytűszög [fok];
χ	tényleges irányszög, azimutuszög [fok]
γ	dőlésszög, bedöntési vagy bedőlési szög [fok]
Θ	pálya hajlásszög [fok]
μ	felhajtóerő dőlésszög [fok]
α	állásszög [fok]
β	csúszási szög [fok]
ω	repülő szögsebesség vektora
ω_x	dőlési vagy orsózó szögsebesség [$rad \cdot sec^{-1}$]
ω_y	legyezőmozgás szögsebessége [$rad \cdot sec^{-1}$]
ω_z	bólintási szögsebesség [$rad \cdot sec^{-1}$]
\mathbf{v}	repülőgép sebesség vektora
v_x	egyenes vonalú mozgás sebessége
v_y	függőleges irányú sebesség
v_z	keresztirányú sebesség
m	repülőgép tömege [kg]
\mathbf{F}_p	propulziós toló-, vagy vonóerő vektor
$\boldsymbol{\pi}$	a perdület vektor

J	a repülőgép tehetetlenségi tenzora
$I_{xx}; I_{yy}; I_{zz}$	a repülőgép főtehetetlenségi nyomatékai
$I_x; I_y; I_z$	a repülőgép tehetetlenségi nyomatékai
I	identitás mátrix
M	külső erők eredő nyomatéka
x	$(n \times 1)$ dimenziójú állapotvektor
A	$(n \times n)$ méretű rendszer, vagy állapot mátrix
B	$(n \times r)$ méretű bemeneti mátrix
u	$(r \times 1)$ dimenziójú bemeneti, vagy irányítási oszlopvektor
y	$(q \times 1)$ dimenziójú kimeneti oszlopvektor
C	$(q \times n)$ méretű kimeneti vagy segéd mátrix
D	$(q \times r)$ méretű előrevezetési mátrix
$v(t)$	átmeneti függvény
$w(t)$	súlyfüggvény
K	állapot-visszacsatolási mátrix
K_{opt}	optimális állapot-visszacsatolási mátrix
$u(t)$	vezérlő vektor, bemenőjel vagy vezérlőjel vektor
J	költségfüggvény
Q	az állapotváltozók súlyozó mátrixa
R	a bemeneti vektor rendezőinek súlyozó mátrixa
$u_{opt}(t)$	az optimális vezérlési törvény
P-szabályozó	proporcionális szabályozó
PDT1	arányos-differenciáló-egytároló típusú sávszűrő
$\delta_{cs}(t)$	csűrő kitérés időfüggvénye
$\delta_o(t)$	oldalkormány kitérés időfüggvénye

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ACKROYD J. A. D.: Sir George Cayley: The Invention of the Aeroplane near Scarborough at the Time of Trafalgar. *Journal of Aeronautical History*, 2011/6. (online), url: <http://aerosociety.com/Assets/Docs/Publications/The%20Journal%20of%20Aeronautical%20History/2011-06Cayley-Ackroyd2.pdf> (2016.03.03)
- [2] FAMOUS MATHEMATICIANS: Daniel Bernoulli, (online), url: <http://famous-mathematicians.org/daniel-bernoulli/> (2016.03.03)
- [3] CAM TETRAULT: A Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). (online), url: <http://www.draganfly.com/news/2009/03/04/a-short-history-of-unmanned-aerial-vehicles-uavs/> (2016.03.03.)
- [4] The History of Ballooning (online), url: http://www.oreivystescentras.lt/eng/hot_air_balloons/the_history_of_ballooning/ (2016.03.03)
- [5] Ballonrepülés 1783–84 – a kezdetek. (online), url: http://www.holegballon.com/a_holegballon_tortene (2016.03.03)
- [6] DENG YINKE: Ancient Chinese Inventions – Culture China Series, fordította: Wang Pingxing, China Intercontinental Press, 2005, ISBN: 978750850837, (online), url: http://books.google.com/books?id=ssO_19TRQ9AC&pg=PA112&dq=Kongming+balloon#v=onepage&q=Kongming%20balloon&f=false (2016.03.03)
- [7] Early History of Flight (online), url: <http://inventors.about.com/library/inventors/blearlyflight.htm> (2016.03.03)
- [8] SZEGEDI PÉTER: Repülésszabályozó rendszerek szabályozóinak számítógépes analízise és szintézise, (PhD értekezés), Zrínyi Miklós nemzetvédelmi Egyetem, Katonai Műszaki Doktori Iskola, Budapest, 2005.
- [9] DUNCAN, W. J.: The principles of the Control and Stability of Aircraft, Cambridge, University Press, 1952.
- [10] MCLEAN, D.: Automatic Flight Control Systems, Prentice Hall, New York, 1990.
- [11] RÁCZ Elemér: Repülőgépek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
- [12] PETÁK GYÖRGY: Forradalmian új fejlesztési irány a légi háborúk megvívására, Repüléstudományi Közlemények XIII évfolyam 32. szám, Szolnok, 2001. pp. 39–42.
- [13] ÓVÁRI GYULA: Biztonság- és repüléstechnikai megoldások katonai helikopterek harci túlélőképességének javítására, Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben, Tudományos konferencia, Repüléstudományi Közlemények Elektronikus különszáma, Szolnok, 2005 04. 15. (CD mellékleten).
- [14] BLAKELOCK, J. H.: Automatic Control of Aircrafts and Missiles, John Wiley & Sons, New York, 1965.
- [15] MIL-C-18244A (AS) Control and stabilization system: automatic, piloted aircraft general specification for, 1992.
- [16] SZOJKA-III/TV kooperációs fejlesztés tudományos technikai adatai, IV. fejezet, Zelong Instr., Brno, 1993.
- [17] MIL-F-8785C: Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1996.
- [18] ANDERSON Jr., J. D., Aircraft performance and design, Mcgraw-Hill International editions, 1999.
- [19] FIELDING J. P.: Introduction to aircraft design, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [20] Tájékoztató a külföldi repülési szakfolyóiratokban megjelent fontosabb cikkekről és információkról, Repülőműszaki szolgálatfőnökség kiadványa 2005/2. pp. 9–16.
- [21] Mechatronika alapjai, Munkapéldány, utolsó változtatás: 2014. augusztus 24. (online), url: [http://www.mogi.bme.hu/letoltes/MECHATRONIKAI%20&%20IR%3%81NY%3%8DT%3%81S%20TECHNIKAI%20T%3%81RGYAK/MECHATRONIKA%20ALAPJAI%20\(MECHATRONIKA%20BSC\)/Mechatronika_alapjai_bevezeto_k.pdf](http://www.mogi.bme.hu/letoltes/MECHATRONIKAI%20&%20IR%3%81NY%3%8DT%3%81S%20TECHNIKAI%20T%3%81RGYAK/MECHATRONIKA%20ALAPJAI%20(MECHATRONIKA%20BSC)/Mechatronika_alapjai_bevezeto_k.pdf) (2016.03.03)
- [22] DR. NAGY VINCE: Gépészeti Rendszertechnika, kézirat Győr, 2001. (online), url: <http://rs1.szif.hu/~szauter/rendszertechnika.pdf> (2016.03.03)
- [23] BÁNLAKI PÁL, LOVAS ANTAL: Szenzorika és anyagai, Typotex kiadó, Budapest, 2012. (online), url: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/0018_Szenzorika/Banlaki_Lovas_Szenzorika_es_anyagai_1_1.html (2016.03.03)
- [24] BÉKÉSI BERTOLD: Forgószárnyas légijárművek története 1907-ig. Repüléstudományi Közlemények (1997-től), Szolnok, 2014/2. pp. 443–466. (eISSN: 1789-770X) (online), url:

- http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-35-0168_Bekesi_Bertold.pdf
(2016.03.03)
- [25] REVICZKY LÁSZLÓ, BARS RUTH, HETTHÉSSY JENŐ, BARTA ANDRÁS, BÁNYÁSZ CSILLA: Szabályozás-technika, Széchenyi István Egyetem, Universitas-Győr Kht., Győr, 2006.
- [26] DR. CSÁKI FRIGYES, BARS RUTH: Automatika, Tankönyvkiadó, Budapest, második bővített kiadás, 1972.
- [27] FORGÓ ZOLTÁN: Bevezetés a mechatronikába, Műszaki Tudományos Füzetek 6., ERDÉLYI MŰZEUM-EGYESÜLET, Kolozsvár, 2009, ISBN 978-973-8231-80-1; (online), url: <http://mek.oszk.hu/07300/07377/07377.pdf> (2016.03.03)
- [28] SZEGEDI PÉTER, BÉKÉSI BERTOLD: Az UAV-on alkalmazható szenzorok, XIV. Természet-, Műszaki-és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia, Nyugat-magyarországi Egyetem, Szombathely, 2015. pp. 175–182. (ISBN: 978-963-359-053-9)
- [29] MARTON CSABA: Légi felderítés robotokkal. (online), url: <http://www.zmne.hu/tanszekek/ehc/konferencia/april2001/marton.html> (2016.03.03)
- [30] TÓTH JÓZSEF: A repülő műszaki tisztai kompetenciák kvalitatív vizsgálata. In: Békési Bertold, Szilvássy László (szerk.), Repüléstudományi Szemelvények, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katona Repülő Intézet, Szolnok, 2016. pp. 177–196. (ISBN: 978-61-5057-70-0) (online), url: <http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2016.pdf> (2016.03.29)
- [31] SZEGED PÉTER: Pilóta nélküli repülő eszközök, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2004/1. pp. 63–77.
- [32] OGATA, K.: Designing Linear Control Systems with MATLAB®, Prentice-Hall, International Inc., 1994.
- [33] DR. VÁRHEGYI ISTVÁN: Robotok és az információs hadviselés. (online), url: <http://www.zmne.hu/tanszekek/ehc/konferencia/april2001/varhegyi.html> (2016.03.03)
- [34] Tájékoztató a külföldi repülési szakfolyóiratokban megjelent fontosabb cikkekről és információkról, Magyar Honvédség Repülőműszaki Szolgálatfőnökség, Budapest, 2002/3.
- [35] SZABOLCSI RÓBERT, SZEGEDI PÉTER: Pilóta nélküli repülőgép számítógépes analízise, Szolnoki Tudományos Közlemények VI. CD. (2002)
- [36] SZEGEDI PÉTER: A maximális teljesítményű pont követésének lehetőségei napelemes rendszerekben 2. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 1997/1. pp. 121–138.
- [37] BÉKÉSI BERTOLD, SZEGEDI PÉTER: Napjainkban fejlesztett fegyverrendszerek megjelenése a jövő hadszínterein, a tudásalkalmazás és fejlesztés szempontjából, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2015/3, pp 105–116.
- [38] NORMAN FRIEDMAN: Unmanned combat air systems. A new kind of carrier aviation, Naval Institute Press, Annapolis, Maryland, 2010. (ISBN 978-1-59114-285-0)
- [39] DR. KORONVÁRY PÉTER, DR. SZEGEDI PÉTER, TÓTH JÓZSEF: Kutatás és képzés – módszertani felvételek az elvárások és a képzési portfólió összehangolására a repülőműszaki képzésben, Hadmérnök X. Évfolyam 4. szám, 2015. (online), url: http://www.hadmernok.hu/154_22_koronvaryp_szp_tj.pdf (2016.03.03)
- [40] BÉKÉSI BERTOLD, PAPP ISTVÁN, SZEGEDI PÉTER: UAV-k légi és földi üzemeltetése, Economica (Szolnok), Szolnok, 2013/2. pp. 99–117.
- [41] DR. KORONVÁRY PÉTER, DR. SZEGEDI PÉTER: Tudásalkalmazás és tudásgondozás, Hadmérnök X. Évfolyam 4. szám, 2015. (online), url: http://www.hadmernok.hu/154_20_koronvaryp_szp.pdf (2016.03.03)
- [42] KAVAS LÁSZLÓ, ÓVÁRI GYULA: A katonai repülőgépek korszerű üzemeltetési eljárásainak elvi alapjai és gyakorlati hozadéka, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2013/1. pp. 198-209.
- [43] BÉKÉSI BERTOLD, PAPP ISTVÁN: Pilóta nélküli légi járművek megbízhatósága, Műszaki tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2014. Debreceni Akadémia Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 2014. pp. 223–230. (ISBN 978-963-508-752-5)
- [44] BELÉNYESI EMESE: Hatékony önkormányzati kommunikáció – a tudás megszerzésének lehetőségei, (online), url: www.propublicobono.hu/pdf/Belenyesi%20E.pdf (2016.03.03)
- [45] BENCSIK ANDREA: A tudásmenedzsment elméletben és gyakorlatban, Akadémiai Kiadó, 2015.

- [46] BUDAI BALÁZS BENJÁMIN: Az e-közigazgatás elmélete axiomatikus megközelítésben, (online), url: www.infonia.hu/digitalis_folyoirat/2009_2/2009_2_budai_balazs.pdf (2016.03.03)
- [47] BUDAI BALÁZS BENJÁMIN, TÓZSA ISTVÁN: E-közigazgatás. 2007. (online), url: http://miau.gau.hu/avir/intranet/debrecen_hallgatoi/tananyagok/jegyzet/27-E-kozigazgas.pdf (2016.03.03)
- [48] CSEPELI GYÖRGY: A szervezkedő ember, Osiris, 2001.
- [49] HANDY, CHARLES: Gods of Management, Business Books Limited, 1991.
- [50] TOMKA JÁNOS: A megsztott tudás hatalom, Harmat Kiadó, Budapest, 2009.
- [51] Tudásmenedzsment a tanuló társadalomban, oktatás és készségek, OECD, 2001, (online), url: www.oecdbookshop.org/get-it.php?REF=5LMQCR2JCGG1&TYPE=browse (2016.03.03)
- [52] SÁNDORI ZSUZSANNA: Mi a tudásmenedzsment? Tacit és explicit tudás, (online), url: <http://mek.oszk.hu/03100/03145/html/km5.htm> (2016.03.03)
- [53] KORONVÁRY PÉTER: TQM a közszférában? veszélyek és lehetőségek, Hadmérnök IX. Évfolyam 3. szám, 2014. (online), url: http://hadmernok.hu/143_23_koronvary_1.pdf (2016.03.03)
- [54] KLEIN BALÁZS, KLEIN SÁNDOR: A szervezet lelke, Edge 2000 Kiadó, Budapest, 2012.
- [55] SZEGEDI PÉTER: „ÖTLET! ... ROHAM!” egy „Csináld és Tanítsd” folyamat elindításához, a katonai felsővezető képzés lehetséges fejlesztési iránya, Hadmérnök IX. Évfolyam 2. szám, 2014. (online), url: http://www.hadmernok.hu/142_35_szegedip.pdf (2016.03.03)
- [56] KOVÁCS ZOLTÁN: Kultúrák versengése a globalizáció korszakában A nemzeti kultúra jellemzőinek és összefüggéseinek vizsgálata a Trompenaars-modell alapján, doktori (PhD) értekezés, Pannon Egyetem Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola, Veszprém, 2006. (online), url: http://konyvtar.uni-pannon.hu/doktori/2006/Kovacs_Zoltan_dissertation.pdf (2016.03.03)
- [57] LANGER KATALIN: Karriertervezés-Személyiségmarketing, Szent István Egyetem Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar, Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő, 2008, ISBN 978-963-269-043-8
- [58] АСЛАНЯН, А. Э.: Системы Автоматического Управления Полётом Летательных Аппаратов, Часть I, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, Киев, 1984.
- [59] ANDERSON Jr., J. D.: Aircraft performance and design, Mcgraw-Hill International editions, 1999.
- [60] BÉKÉSI BERTOLD: A katonai repülőgépek üzemeltetésének, a kiszolgálás korszerűsítésének kérdései, Doktori (PhD) értekezés, Budapest, 2006. (online), url: http://uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2006/bekesi_bertold.pdf (2016.03.03)
- [61] BOKOR J., GÁSPÁR P., KOHUT M., KURUTZ K.: Szabályozástechnika I., Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1998.
- [62] BOKOR J., KURUTZ K., KOHUT M., GÁSPÁR P.: Irányítástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1995.
- [63] BOKOR JÓZSEF.: Bevezetés az állapotter elméletbe, kézirat, Budapest, 1994.
- [64] BROGAN, W. L.: Modern control theory, Prentice-Hall International Inc., 1991.
- [65] BÉKÉSI BERTOLD: A repülőgép hosszirányú mozgásának matematikai modellje. Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények (1994–1996), 1996/1. pp. 75–88. (ISSN: 1416-6801) (eISSN:2064-7123)
- [66] CSÁKI FRIGYES: Korszerű szabályozásemélet, Akadémia Kiadó, Budapest, 1970.
- [67] DUNCAN, W. J. The principles of the Control and Stability of Aircraft, Cambridge, University press, 1952.
- [68] FIELDING, J. P.: Introduction to aircraft design, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [69] HACKER, T.: Flight Stability and Control, American Elsevier Publishing Co., 1970.
- [70] DR. HALÁSZ PÉTER, DR. HELYBÉLI ZOLTÁN, DR. JUHÁSZ FERENCNÉ, DR. SZILÁGYI BÉLA, DR. VIL-LÁNYI IMRE: Állapottranszformáció irányíthatóság és megfigyelhetőség állapotirányítás, Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998.
- [71] SZEGEDI PÉTER: A pilóta nélküli repülőgépek irányíthatóságának és megfigyelhetőségének vizsgálata, Repüléstudományi Közlemények XIV. évfolyam 34. szám Szolnok, 2003. pp. 129–150.
- [72] MIL-F-9490D Flight Control Systems – Design, Installation and test of piloted aircraft general specification for, 1993.
- [73] LANTOS BÉLA: Irányítási rendszerek elmélete és tervezése II. Korszerű szabályozási rendszerek, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2003.
- [74] OGATA K.: Modern Control Engineering, Prentice-Hall International Ltd., 1990.
- [75] TUSCHÁK RÓBERT: Szabályozástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994.
- [76] KUO, B. C.: Önműködő szabályozó rendszerek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.

- [77] CSÁKI FRIGYES: Irányítástechnikai kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- [78] CSÁKI FRIGYES: Lineáris szabályozási rendszerek analízise, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
- [79] RAVEN F. H.: Az önműködő szabályozás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
- [80] SZÁDAY REZSŐ: A szabályozáselemélet elemei, 3., javított kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
- [81] TUCKER G. K., WILLIS D. M.: Az önműködő szabályozás egyszerűsített technikája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
- [82] FODOR GYÖRGY: Lineáris rendszerek analízise, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
- [83] PETZ ERNŐ: Önműködő szabályozók optimális behangolása, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
- [84] MACIEJOWSKI J. M.: Multivariable Feedback Design, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [85] ATHANS M.: The Role and Use of the Stochastic Linear-Quadratic-Gaussian Problem in Control System Design, IEEE Trans. Automat. Contr., AC-16, 1971. pp. 529–552.
- [86] DOYLE J. C., GLOVER K., KHARGONEKAR P. P., Francis, B.: State-space solutions to the standard H₂ and H_∞ control problems, IEEE Trans. Aut. Control vol., 34, 1989. pp. 831–846.
- [87] GÁSPÁR P., MICHELBERGER P., BOKOR J., PALKOVICS L., NÁNDORI E.: Iterative LQG controller design in uncertain parameter system, Proc. of the 2nd IFAC Symp. on Robust Control Design, ROCOND 97, Budapest, 1997. pp. 483–488.
- [88] ZHOU, K., DOYLE, J. C., GLOVER, K.: Robust and optimal control, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [89] SOMLÓ JÁNOS, PHAM THUONG CAT: Lineáris és nemlineáris szabályozási rendszerek számítógépes tervezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
- [90] SILBERSDORFF L.: Mechanika III. (Reform jegyzet), kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1969.
- [91] Maj Jack Sine: Defining the “Precision Weapon” in Effects-Based Terms, Air & Space Power Journal - Spring 2006 (online), url:
<http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/apj/apj06/spr06/sine.html> (2016.04.07)