

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Bolyai János Katonai Műszaki Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola

REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZEREK SZABÁLYOZÓINAK SZÁMÍTÓGÉPES ANALÍZISE ÉS SZINTÉZISE

PhD értekezés

Készítette:

Szegedi Péter okl. mk. őrnagy

Tudományos témavezető:

Dr. habil. Szabolcsi Róbert okl. mk. alezredes
egyetemi docens, a műszaki tudományok PhD doktora

2005

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kutatásaimat, melynek eredményeit a dolgozat tartalmazza, a PhD. fokozat elérése érdekében 2001-től a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Kar Repülőműszaki Intézet Fedélzeti Rendszerek Tanszékén végeztem.

Mindenekelőtt köszönetemet fejezem ki, és őszinte hálával tartozom témavezetőmnek, *Dr. habil. Szabolcsi Róbert okleveles mérnök alezredes úrnak*, aki tanulmányaim és kutatásaim során rengeteg segítséget, sok hasznos tanácsot adott, türelmesen, nagy hozzáértéssel irányította munkámat.

Köszönetet mondok a ZMNE BJKMK Repülőműszaki Intézet igazgatójának, *Prof. Dr. Óvári Gyula okleveles mérnök ezredes úrnak* segítőkészségéért és jó tanácsaiért.

Köszönettel tartozom, a Repülőműszaki Intézet volt és jelenlegi munkatársainak, akik értékes konzultációikkal segítettek dolgozatom elkészítését.

Végül, de nem utolsó sorban, hálás vagyok feleségemnek, kislányomnak, hogy az elmúlt években segítettek, támogattak és nyugodt légkört biztosítottak számomra.

TARTALOMJEGYZÉK

<i>Az értekezésben gyakrabban előforduló jelölések</i>	5
BEVEZETÉS	7
1. PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉPEK TÉRBELI MOZGÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI VIZSGÁLATA.	17
1.1. A repülőgép háromdimenziós mozgásának matematikai modellje	17
1.1.1. Koordinátarendszerek	17
1.1.2. A repülőgépek mozgásegyenletei	21
1.1.3. Hosszirányú linearizált mozgásegyenletek	24
1.1.4. Oldalirányú linearizált mozgásegyenletek	26
1.1.5. A repülőgép állapotegyenletei	27
1.2. A repülőgép átviteli függvényei	28
1.3. Repülőgépek stabilitásának, megfigyelhetőségének és irányíthatóságának vizsgálata	30
1.3.1. Lineáris zárt szabályozási rendszerek stabilitása	31
1.3.2. Megfigyelhetőség	32
1.3.3. Irányíthatóság	32
1.3.3. A Szojka–III irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálata	33
2. A SZABÁLYOZÓTERVEZÉS MÓDSZEREI ÉS ALGORITMUSAI	37
2.1. Szabályozótervezés klasszikus módszerei	37
2.1.1. Frekvencia tartománybeli módszerek	37
2.1.1.1. A Bode-diagram	37
2.1.2. Időtartománybeli módszerek	39
2.2. Modern szabályozótervezési eljárások	42
2.2.1. A pólus áthelyezés módszere	43
2.2.2. Az LQR módszer	45
2.3. A szabályozótervezéshez és a rendszeranalízishez kapcsolódó MATLAB® m- fájlok leírása	49
3. REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZER SZABÁLYOZÓJÁNAK ELŐZETES MÉRETEZÉSE	53
3.1. Robotpilóta rendszerek általános felépítése és működési elve	53
3.2. A robotpilóták irányítástechnikai minőségi követelményei	55

3.3. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép analízise időtartományban	58
3.4. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép analízise frekvenciatartományban.....	64
3.5. A szabályozó előzetes tervezése LQR módszerrel	68
3.5.1. Az előzetes szabályozótervezés és alkalmazása	68
3.5.2. Az LQR feladat megoldása	69
3.6. A szabályozó előzetes tervezése pólus áthelyezés módszerrel.....	79
3.7. A zárt szabályozási rendszer időtartománybeli vizsgálata	82
3.7.1. A zárt szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata	82
3.8. A felnyitott szabályozási rendszer analízise frekvenciatartományban	86
4. A SZOJKA–III REPÜLŐGÉP ZAVARELHÁRÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA	91
4.1. A külső zavarások determinisztikus matematikai modellezése	91
4.2. A külső zavarások sztochasztikus matematikai modellezése	92
4.3. A zárt repülésszabályozó rendszer zavarelhárításának vizsgálata.....	93
4.4. A PDT1 típusú soros jelformáló szerv tervezése.....	98
4.5. A sávszűrővel működő magasságstabilizáló rendszer analízise frekvenciatartományban.....	99
4.6. A PDT1-es sávszűrővel működő szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata	101
4.7. A repülőgép PDT1 szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata.....	105
ÖSSZEFOGLALÁS	109
FELHASZNÁLT IRODALOM	114

Az értekezésben gyakrabban előforduló jelölések

δ_v – a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép magassági kormány szögkitérése [fok];

δ_{KR} – a Szojka–III 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 irányyszög vagy iránytűszög [fok];

χ – tényleges irányyszög, 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;

\mathbf{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-visszacatolási mátrix;
K_{opt} – optimális állapot-visszacatolási 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;
δ_{cs}(t) – csűrő kitérés időfüggvénye;
δ_o(t) – oldalkormány kitérés időfüggvénye.

BEVEZETÉS

Sajnos nem múlik el úgy év, hogy ne történne valahol, valamilyen katonai konfliktus, vagy valamilyen (terror, vagy környezeti) katasztrófa, ami emberi életet követel.

A veszteségek megelőzése, csökkentése közös érdekünk. Az emberi élet védelmének lehetséges módja, hogy pilóta nélküli repülőgépeket (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) alkalmaznak olyan feladatokra, amelyek megelőzhetik, vagy segítenek elhárítani a katasztrófákat. A közvélemény a katonai és nem katonai akciókban az anyagi kárt sokkal jobban tolerálja, mint az emberveszteséget. Egyrészt, például, bevetés során katapultált pilóta kimentése költséges, és további emberéleteket is követelhet. Másrészt a repülésben az ember a korszerű technológiák alkalmazásának egyik akadálya, mert jelenléte kényes ergonómiai szabályok szerint berendezett, munkára alkalmas teret, és az életfeltételek biztosítását kívánja a repülőgépen. Emiatt a pilóta nélküli repülőgépek megépítése, üzemeltetése még olcsóbb is, mint a repülőgép vezetői által vezetett repülőgépeké [80, 102].

Tipikus légi tevékenységek, mint például megelőző csapások, vagy légi harcok megvívása folyamán a repülőgép vezetői által vezetett és a személyzet nélküli repülőgépek együttes alkalmazása (a pilóta által vezetett repülőgépek előtt repülő UAV-ken helyezik el a felderítő, és csapásmérő eszközöket, amelyeket a hajózó saját fedélzeti rendszere részeként üzemeltethet) biztosíthatja az alkalmazott eszközök hatékonyabb felhasználását, és a saját erői fokozottabb megóvását.

Az öbölháborúk, illetve más XX. szd. végi, XXI. szd. eleji háborúk tapasztalatai azt mutatják, hogy a „precíziós” fegyverek alkalmazásának gyakorisága nőtt. A jelenleg alkalmazott megsemmisítő eszközök ismeretében joggal juthatunk olyan megállapításra, hogy amit nem, vagy csak nehezen, illetve kis távolságról tudunk felfedezni, csak azt lehet hatékonyan védeni [78]. 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 alkalmazhatóságot egyaránt növelheti.

Ahhoz, hogy a repülőgépek hajózó személyzet nélkül képesek legyenek különböző katonai és nem katonai feladatok ellátására, szükséges biztosítanunk távvezérelhetőségük, illetve a repülési útvonaluk előre programozhatósága mellett a fedélzeten

elhelyezett felderítő, és egyéb mérő, illetve érzékelő eszközök üzemeltetésének megfelelő körülményeit.

Repülés közben a kormány kitérések, 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 növelése érdekében 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 repülésszabályzó rendszerrel rendelkeznek, amelyek együttműködnek más fedélzeti berendezésekkel, mint például a rádiólokátor, az inerciális navigációs, vagy rádió navigációs rendszer, a GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem), és a fedélzeti fegyverrendszer. A számítógépes folyamatirányítási rendszerek hardver eszközeit az ún. „Commercial off the Shelves (COTS)” technológia szerint válogatják össze. A szoftver eszközöket (operációs rendszer, alkalmazói szoftverek) az egyes repülőgépeken a rendszer kialakításának, valamint a megoldandó feladatoknak megfelelően készítik el. A szabályozási rendszer szoftvereinek elkészítése és telepítése a fedélzetre több lépcsőben történik. Az első lépcsőben, amelyet szokás előzetes tervezésnek is nevezni, a szabályozási rendszerek első verzióit, szoftvereit laboratóriumokban készítik el. A tipikusan alkalmazott tervező programok: MATLAB[®], MATRIX_x, Eigpack stb. Az előzetes tervezés után eredményesen tesztelt rendszer (hardver, szoftver) földi körülmények között statikus kabinú szimulátor számítógépére kerül, ahol „bepülnek”. A program végső tesztelése ezután FMS (**F**ull **M**ission **S**imulator) szimulátoron történik. Amennyiben sikeresek a próbák, akkor valós körülmények között, repülőgépek fedélzetére telepítve folytatják a tesztelést. A sikeres tesztsorozatok után az adott repülőgép típusra telepíthető a program, és megkezdődhet az „igazi tesztrepülés”.

A jelenkor biztonsági követelményeinek megfelelően a Magyar Honvédség átalakításával annak feladatrendszere is változik. A megváltozott biztonságpolitikai helyzetben, a régi kötelezettségek mellett, a Magyar Honvédség és légierje alapvető kötelessége és az ország nemzeti érdeke, a haza katonai védelme mellett, hogy eleget tegyen az új típusú, XXI. századi biztonságát fenyegető kihívásoknak is. A haderő

kialakítás folyamán meg kell találni azokat a lehetőségeket, amelyek az új elvárásoknak megfelelő, de mégis finanszírozható megoldásokat jelenthetnek ilyen méretű országoknak is, mint Magyarország. A mai kor csúcstechnikájának beszerzése, rendszerbe állítása természetesen nagyon jó megoldás, de nem biztos, hogy szükséges, illetve dotálható Magyarország számára.

A fejlesztési koncepció kialakítása után, a megfizethető megoldások keresése közben feladatként jelölhető meg — a prioritások felállítása mellett — a többcélú felhasználhatóság, a meglévő eszközök modernizálása, és a megfelelő kockázatelemzés után, saját fejlesztésű eszközök rendszerbe állítása.

A Magyar Honvédség légierijének feladatrendszerében szerepelnek olyan feladatok, mint például légi felderítés, megfigyelés, valós idejű információszerezés a harcmezőről, rendszerek elektromágneses kisugárzásának felderítésére, vegyi- és sugárfelderítési feladatok végrehajtása, földi és légi célok megsemmisítése vagy légi célok imitálása stb.

A feladatok sokrétősége multifunkcionális repülőgépek alkalmazását teszi szükségesé, amelyek bevetés után, rövid idejű átalakítással (megfelelő szoftver és/vagy konténer cseréje) az új harcfeladat sajátosságainak megfelelően, átfegyverezhető és gyorsan újra bevethető. A pilóta nélküli repülőgépek ilyen eszközök, (a rajtuk elhelyezhető fedélzeti hasznos terhelések függvényében) katonai, és nem katonai feladatok széles spektrumát képesek ellátni.

Jelenleg a Magyar Honvédségben nincs rendszeresítve pilóta nélküli repülőeszköz. Ez azt is jelentheti, hogy nálunk a felsorolt feladatok nem, vagy csak részlegesen oldhatók meg alacsony hatékonysággal.

Az 1988-ban kezdődött magyar–cseh fejlesztés eredményeként megépült a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép. A repülőgép a 90-es éveknek megfelelő fejlettségű, alacsony költségvetéssel (150 millió forint) fejlesztett robotrepülői közé tartozik. Felhasználási lehetőségeit és üzemeltetését tekintve viszonylag egyszerű és olcsó eszköz. Sokoldalú hasznos terhei révén jól alkalmazható lenne az előzőekben felsorolt feladatok részleges, vagy akár teljes ellátására [82].

Véleményem szerint a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép az egyik lehetséges megoldást jelenti a haderő átalakítás és modernizálás alatt álló Magyar Honvédség számára számos, a rendeltetéséből adódó feladat költségghatékony megoldására. A mintegy 20 kg hasznos teher szállítására képes repülőgép irányító rendszerének „fel-

használó barátta” alakítása lehetőséget teremt a repülőgépet üzemeltetők relatív olcsó és rövid idejű kiképzésére és az egyszerű repültetésére. A repülőgép robotpilóta rendszerének korszerűsítése után, a mai kor kis költségvetésű haderejében rendszerbe állítható, és mint egy többcélúan felhasználható repülőeszköz állhatna bevetésre készen a Magyar Honvédség, Katasztrófavédelem, vagy a Határőrség számára.

KUTATÓI HIPOTÉZISEK

A pilóta nélküli repülőgépek irányításához 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 teljesség igénye 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.

A felderítési feladat során a valósidejű képek továbbítása a harcjelzés 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. Ennek tervezésénél alapkövetelmény, hogy — a rendelkezésre álló dinamikus modellek állapotegyenleteit felhasznál-

va — 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.

Véleményem szerint a pilóta nélküli repülőgépek egyre szélesebb körű alkalmazása bizonyítja, hogy a probléma időszerű, a fejlesztés szükségszerűsége megalapozott. Azokra a kérdésekre azonban, hogy milyen formában, milyen követelményeknek megfelelően, milyen módszerek felhasználásával, csak a tudományos kutatás eszközeinek alkalmazásával lehet megalapozott választ adni.

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 repülőgép prototípus elkészítését, esetleges sorozatgyártását és üzemeltetését.

A repülőgép 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:

- Konceptcionális tervezési fázis (Conceptual design);
- Előzetes tervezési fázis (Preliminary design);
- a mindenre kiterjedő, Részletező tervezési fázis (Detail design);
- a legújabb fejlesztés a JSF (**J**oint **S**trike **F**ighter) fejlesztése során alkalmaznak egy Előzetes Tervezési Felülvizsgálat tervezési fázist (Preliminary design review).

A koncepcionális tervezési fázis a repülőgépre 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 pil-

lanata, amikor meghatározzák a követelményeket, és azokat a jellemzőket, amelyeket a repülőgépnél 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 repülőgép 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 repülőgép „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 repülőgép berendezéseit, és a repülési szimulátort kifejlesztették stb. [3, 35].

A részletestervezés és a tesztrepülő 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 [141].

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 robotpilóta rendszert.

KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK

A doktori értekezésem elkészítése során az előzetes tervezés egy szegmensének megoldására vállalkoztam. A dolgozatomban a következő kutatási célokat tűztem ki magam elé:

1. rendszerezni és összefoglalni a repülésszabályozó rendszerek elméletéhez kapcsolódó, és a repülésszabályozó rendszer szabályozójának előzetes tervezéséhez alkalmazott szabályozástechnikai ismereteket, a feladatok megoldásához szükséges mértékben, oly módon, hogy felhasználható legyen a repülőmérnök képzésben is, elvégezni az irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálatokat, hogy bizonyítsam, a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép repülésmechanikai matematikai modellje alkalmas kiindulás korszerű robotrepülőgépek előzetes szabályozótervezéséhez;

2. elvégezni a repülésszabályozó előzetes tervezését, elkészíteni a repülésszabályozó rendszer előzetes tervezéséhez az idő- és frekvenciatartománybeli analíziseihez szükséges új forrásprogramot MATLAB[®] környezetben, és a felhasznált repülésmechanikai matematikai modellen bemutatni az elkészített MATLAB[®] m-fájlok gyakorlati alkalmazhatóságát a repülőgépek szabályozóinak hangolásakor, és a repülőgépek előzetes tervezése során;

3. végrehajtani a számítógépes támogatással megtervezett repülésszabályozó rendszer determinisztikus és sztochasztikus analízisét, amely alkalmas arra, hogy következtetéseket vonhassak le a szimulációk eredményeként kapott repülésszabályozó rendszer működéséről és alkalmazhatóságáról.

KUTATÁSI MÓDSZEREK

Kutatási céljaim elérése, és a dolgozat elkészítése érdekében az alábbi módszereket alkalmaztam:

- Tanulmányoztam az értekezés témájához kapcsolódó szakirodalmakat, célirányos kutatásokat folytattam könyvtárakban, és az interneten;
- rendszereztem a megszerzett ismereteket;
- konzultáltam repüléstudománnyal foglalkozó és szabályozástechnikában jártas szakemberekkel;
- MATLAB[®] m-fájlokat készítettem a vizsgálatok elvégzéséhez;
- megfigyelhetőségi és irányíthatósági vizsgálatokat folytattam;

- analíziseket végeztem idő- és frekvenciatartományban;
- célkitűzéseimhez kapcsolódó tevékenységem és kutatásaim részeredményeit rendszeresen publikáltam szakmai kiadványokban és adtam elő konferenciákon;
- az elvégzett munkáról kollégáimtól kértem és kaptam reflektálásokat, észrevételeket, segítséget, amelyeket beépítettem az elkészített dolgozatba;
- számítógépes szabályozótervezést végeztem az analízisek eredményeit felhasználva;

VÁRHATÓ EREDMÉNYEK

Az előzetes kutatási feladatok elvégzése után eldönthető, hogy:

- a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép a rendelkezésre álló bemeneti paraméterekkel irányítható-e, megfigyelhető-e, illetve stabilis működésű-e;
- szükséges-e alkalmazni stabilitásnövelő rendszert a pilóta nélküli repülőgépen az előírt minőségi követelmények teljesítéséhez;
- milyen mértékben függnék a nemirányított repülőgép állapotváltozóinak minőségi jellemzői a repülési sebességtől.

A kapott eredmények alapján:

- elvégezhető a repülőgép szabályozójának előzetes tervezése;
- megvizsgálható a zárt szabályozási rendszer működése, minőségi jellemzői idő- és frekvenciatartományban;
- lefolytatható a zárt rendszer stabilitási, és alapjel-követési tulajdonságainak vizsgálata;
- sztochasztikus jelek előállítása után vizsgálható a rendszer zavarelhárító képessége.

A kutatásaim elvégzésére a Szojka–III pilóta nélküli repülőgépet választottam, mint egy olyan repülőeszközt, amelynek repülésmechanikai matematikai modellje ismert, és a jövőben a kutatás eredményeit lehetőségem nyílna a gyakorlatban is tesztelni.

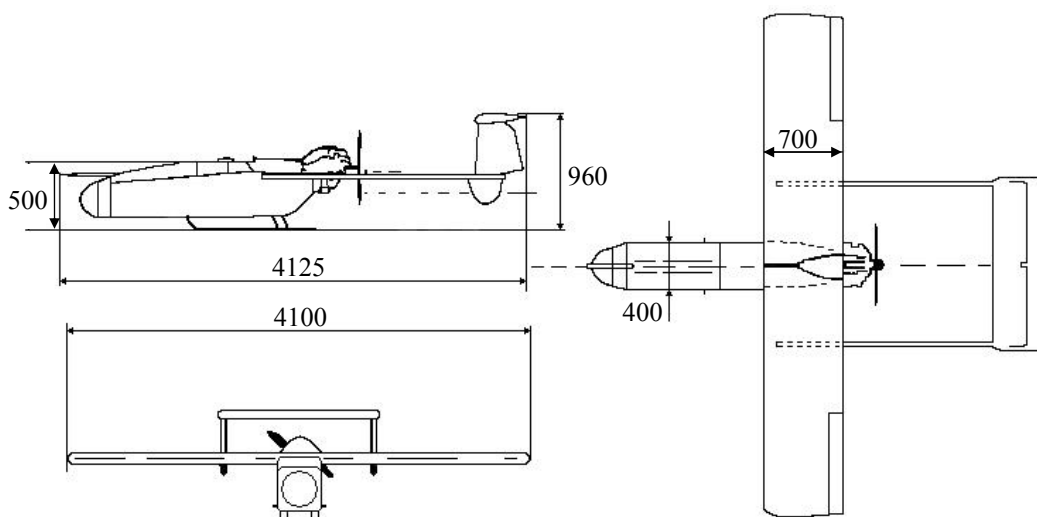
A magam elé kitűzött feladatok megoldása segítséget nyújthat más repülőgépek repülésszabályozó rendszereinek előzetes méretezésére, és felhasználható a repülő-villamosmérnökök képzésében is.

A SZOJKA–III PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP-KOMPLEXUM

A Szojka–III repülőgép-komplexum négy önálló szállítási egységből áll:

- Indító-gépjármű (a gépjárművön található a 12 m hosszú indítósín, egy kisméretű daru, egy 220V/50 Hz-es áramfejlesztő generátor, az indításhoz szükséges elektronikus vezérlő berendezések, illetve a szélesség és széliránymérő rendszer);
- földi irányítóállomás (tartalmazza a repülési feladat végrehajtásához, illetve a felderítési tevékenység irányításához és az információk kiértékeléséhez szükséges berendezéseket);
- műszaki mentő gépjármű;
- műszaki kiszolgáló gépjármű.

A Szojka–III pilóta nélküli merev szárnyú, kis méretű és súlyú, elsősorban harcászati szintű felderítési feladatok megoldására alkalmas repülőeszköz, az 1. ábrán látható, ami használható különböző katasztrófavédelmi helyzetekben felderítési feladatok ellátására is.



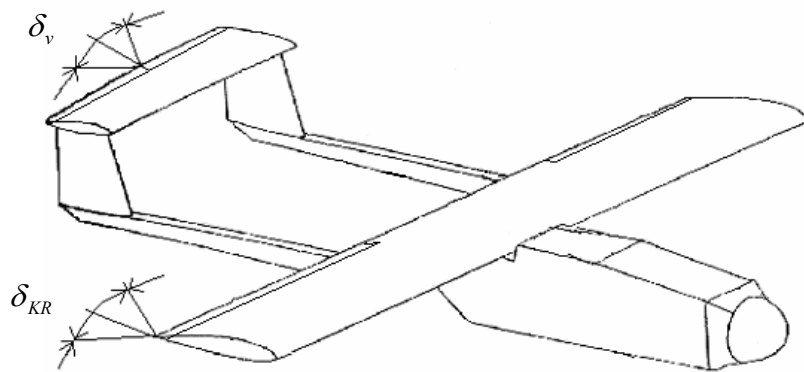
1. ábra. A Szojka–III háromnézeti rajza

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép lehetséges felhasználói a Magyar Honvédség mellett a Katasztrófavédelem, Határőrség, Rendőrség, illetve Tűzoltóság is.

A repülőgép alacsony magasságon (repülési tartománya 50–2000 m) kis repülési sebességgel (maximális sebessége 220 km/h) hajtja végre repülési feladatait. Teljes feltöltéssel maximum 3,5 órát képes a levegőben tartózkodni, hatósugara 150 km. Indítása indító-gépjárműről startkatapult berendezéssel, leszállítása ejtőernyővel történik, de a törzsre szerelt siklótalpra is képes leszállni. Irányítása mobil repülőtéren települt földi, vagy egy előretolt irányító állomásról, illetve a robotpilótába előzetesen betöltött útvonalprogram alapján megy végbe. A hasznos teher a feladatvégrehajtás függvényében cserélhető. A rakomány tömege az üzemanyag

mennyiségétől függően maximum 20 kg lehet [82]. Nappal, jó látási viszonyok között, és csak a látóhatár széléig lehet üzemeltetni biztonságosan.

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép a test koordináta-rendszer három tengelye körül kormányozható a magassági kormány δ_v szögkitérése által (a kereszt-tengely körüli bólintó mozgást eredményezi), és a csűrőlapok δ_{KR} szögkitérése által (hossz-tengely körüli forgó (orsózó) mozgást hozza létre) létesített nyomatékok hatására. Az oldalkormányt nem alakították ki, és repülés közben a hajtómű üzemállapota sem szabályozható, vagyis a 2. ábrán látható repülőgép alapvetően kis magasságon, alacsony repülési sebességgel végrehajtott távirányított repüléseket végez [140].



2. ábra. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép

Tekintettel arra, hogy a vizsgált pilóta nélküli repülőgép nagy értékű hasznos teher hordozására képes — ismert az a tény, hogy a repülőgépet ért zavarok hatásának kiküszöbölésére, vagy a repülőgép biztonságos levegőben tartására csak jól képzett repülőgép vezető képes, aki az adott típust hosszú ideje repüli — célszerű és szükséges a repülőgépet ellátni olyan automatikus repülésszabályozó rendszerrel, amely lehetővé teszi a repülőgép biztonságos, akár a látóhatáron túli repültetését is.

1. PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉPEK TÉRBELI MOZGÁSÁNAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI VIZSGÁLATA

Ebben a fejezetben szakirodalmi hivatkozások felhasználásával összefoglalom a repülőgépek térbeli mozgásának definiálásához használt koordinátarendszereket, a merev szárnyú repülőgép egyenes- és forgómozgását leíró egyenleteit, és állapotegyenleteit. Ismertetem a hosszirányú és oldalirányú mozgás átviteli függvényeit, melyek használhatók a zárt szabályozási rendszerek analízise során. Irodalmi hivatkozások felhasználásával bemutatom az irányíthatóság, megfigyelhetőség, stabilitás fogalmait. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép rendelkezésre álló repülésmechanikai matematikai modelljei felhasználásával, irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálatokat végzek. A fejezet témájával a [1, 3, 12, 13, 21, 22, 60, 66, 85] szakirodalmak részletesebben foglalkoznak.

1.1. A repülőgép háromdimenziós mozgásának matematikai modellje

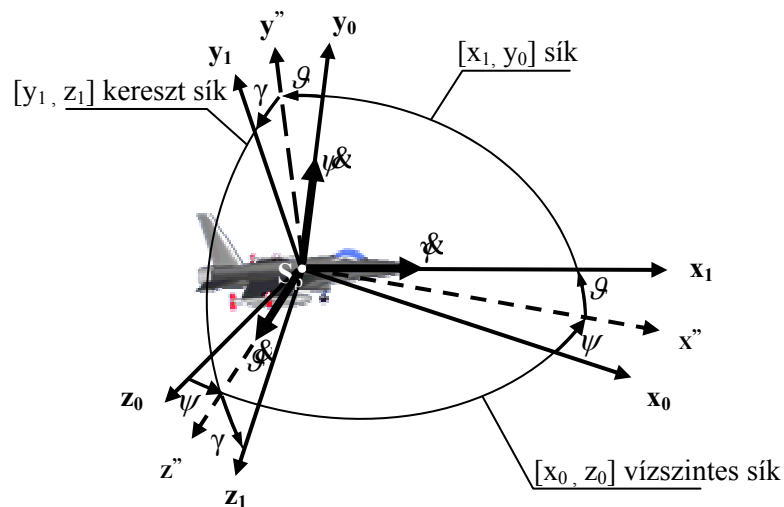
A pilóta által vezetett és a pilóta nélküli repülőgépek aerodinamikai erők és nyomatékok eredőjének hatására térbeli mozgást végeznek. A repülőgépre ható erők, nyomatékok és a repülőgép mozgási jellege közötti összefüggéseket, továbbá a repülési pálya, sebesség és gyorsulás kapcsolatát Newton I., II. törvényei határozzák meg. A repülőgép mozgásának egzakt meghatározásához, a mozgási- és nyomatéki egyenletek felírásához, szükséges definiálni egy vonatkoztatási rendszert.

1.1.1. 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 használatát javasolják [5, 10, 85]. 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 al-

kotnak, kezdőpontjuk a repülőgép súlypontja [85, 88, 89, 116]. A leggyakrabban használt koordinátarendszerek [6, 8, 12, 17, 31, 67, 87, 90] az alábbiak:

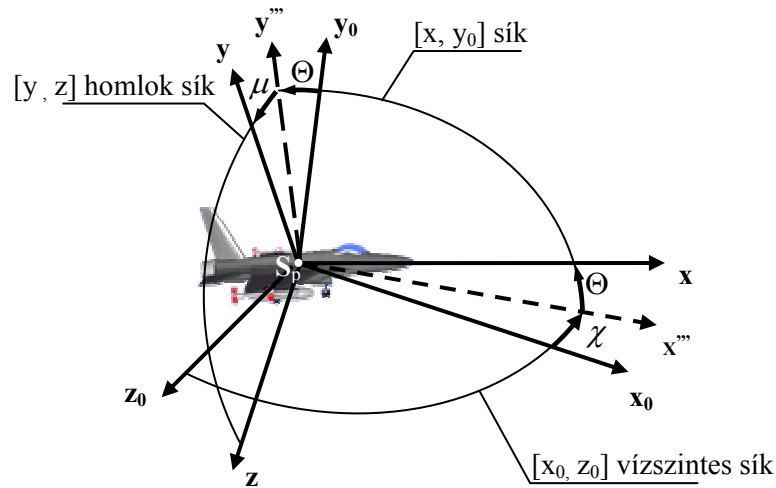
- *Földhöz rögzített koordinátarendszer* tengelyei „ x_0 ”, „ y_0 ” és „ z_0 ”, 1.1. ábra. Az y_0 függőleges tengely, a helyi függőleges irányát adja, iránya ellentétes a nehézségi gyorsulás vektorának irányával. Az x_0 és z_0 tengelyek vízszintes síkban fekszenek, irányuk tetszőleges (pl. az x_0 tengely az északi irányt jelzi).



1.1. ábra. A húr és a földhöz rögzített koordinátarendszerek kapcsolata

- *Repülőgéphez rögzített ún. „test”, vagy „húr” koordinátarendszer* tengelyei, x_1 , y_1 , z_1 , mereven rögzítve vannak a repülőgéphez, 1.1. ábra. 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 pozitív iránya normál repülési helyzetben felfelé irányul (az x_1y_1 sík a repülőgép szimmetriasíkja). 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* tengelyei, x , y , z , 1.2. ábra. Az x tengely párhuzamos a sebességgel, (így a légellenállás irányával is), pozitív iránya a repülés irányával egyezik meg, (a légellenállás ebben a koordinátarend-

szerben negatív). Általános esetben csúszással történő repülés esetén a sebesség vektora, illetve az x tengely nem fekszik a szimmetriasíkban. Az y tengely a szimmetriasíkban fekszik (a szimmetriasík és az x tengelyre a kezdőpontban emelt merőleges sík metszévonalára). Pozitív iránya pozitív állásszög esetén egybeesik a felhajtóerő irányával. A z (oldalero) tengely merőleges az xy síkra, pozitív iránya a repülés irányába nézve jobbra mutat.



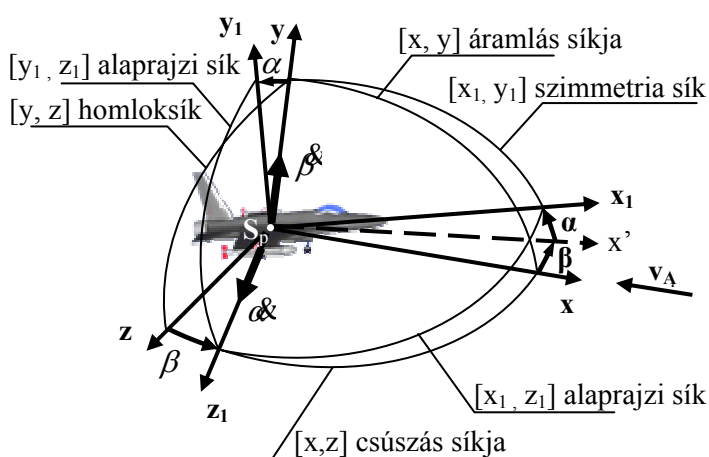
1.2. ábra. A szél és a földhöz rögzített koordináta rendszerek közötti kapcsolat

A repülőgép a földhöz viszonyított helyzetét, 1.1. ábrán látható, a *húr*, és a *Földhöz rögzített koordinátarendszer* közötti összefüggés adja. A két koordinátarendszer kapcsolatát a \mathcal{G} bólintási szög, a ψ repülőgép irányszög, és a γ dőlésszög segítségével adhatjuk meg. A gép hossz tengelyének hajlását az x_1 tengely és a z_0x_0 vízszintes sík közötti \mathcal{G} szög jellemzi. E szög meghatározásához az x_1 tengelyt az x_1y_0 függőleges síkkal vetítjük a z_0x_0 vízszintes síkra. A két sík metszévonalára (x'') és az x_1 tengely közti szög a \mathcal{G} szög. A z_0x_0 vízszintes síkban az x'' egyenes és a tetszőszerint 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. Meghatározásához az y_1 tengelyt vetítjük az x_1y_0 függőleges síkra. Vetítő sík az y_1z_1 sík lesz, mivel ez utóbbi merőleges az x_1 tengelyre illeszkedő va-

lamennyi síkra, s így az x_1y_1 síkra is. A dőlésszög a repülőgép súlyerő irányához viszonyított helyzetét adja meg [10, 96, 116].

A repülési pálya, illetve a repülőgépen keletkező légerők Földhöz viszonyított helyzetét a *szél*, és a *Földhöz rögzített koordinátarendszerek* közötti összefüggés adja, az 1.2. ábrán látható módon. Az inerciarendszerek kapcsolatát a pálya hajlásszög Θ , a tényleges irányszög (azimutuszög) χ , és a felhajtóerő dőlésszöge μ jellemzi. Az x tengely és a z_0x_0 vízszintes sík által bezárt szög a pálya hajlásszög, meghatározásához az x tengelyt az xy_0 függőleges síkkal vetítjük a z_0x_0 vízszintes síkra. A két sík metszésvonala (x''') és az x tengely által bezárt szög lesz. 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 1.3. ábrán látható módon, 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 [10, 39, 53, 69, 85].



1.3. ábra. A repülőgéphez kötött (húr) és a szél koordinátarendszer kapcsolata

1.1.2. 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 [6, 47, 50, 53, 66, 83, 85, 116].

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 irányszög, 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 ω szögsebességgel forgó koordinátarendszerekből tekintve, vagyis:

$$\frac{d}{dt}\{\mathbf{A}\}_{\text{álló}} = \frac{d}{dt}\mathbf{A}|_{\text{mozgó}} + \omega \times \mathbf{A} \quad (1.1)$$

Az (1.1) egyenletben a $\frac{d}{dt}\{\mathbf{A}\}_{\text{álló}}$ az álló, míg $\frac{d}{dt}\mathbf{A}|_{\text{mozgó}}$ a mozgó koordinátarendszere 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:

$$m \frac{d}{dt} \{\mathbf{v}\}_{\text{álló}} = m \left(\frac{d}{dt} \mathbf{v}|_{\text{mozgó}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \right) = \sum \mathbf{F} \quad (1.2)$$

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 [6, 67, 79, 83, 89, 92].

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

$$\frac{d}{dt} \{\boldsymbol{\pi}\}_{\text{álló}} = \frac{d}{dt} \boldsymbol{\pi}|_{\text{mozgó}} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\pi} = \sum \mathbf{M} \quad (1.3)$$

A repülőgép súlypont mozgásának komponens egyenletei a „húr” koordinátarendszer mentén, a [33, 66, 85, 99, 116] irodalmak alapján:

$$\begin{aligned} m (\dot{x}_x + \omega_y v_z - \omega_z v_y) &= X + F_p - G \sin \vartheta \\ m (\dot{x}_y + \omega_z v_x - \omega_x v_z) &= Y - G \cos \vartheta \cdot \cos \gamma \\ m (\dot{x}_z + \omega_x v_y - \omega_y v_x) &= Z + G \cos \vartheta \cdot \sin \gamma \end{aligned} \quad (1.4)$$

Az (1.4) egyenletben v_x (egyenes vonalú mozgás sebessége), v_y (függőleges irányú sebesség), v_z (kereszt irányú 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 oldalerő ($Z = C_z \frac{\rho v^2}{2} S$, ahol C_z oldalerő tényező) [6, 67, 83, 84, 96].

A repülőgép forgó mozgásának nyomatéki komponens egyenleteit az (1.3) egyenletből származtathatjuk. Merev repülőgép esetén a perdületvektor $\boldsymbol{\pi} = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}$ (\mathbf{J} tehetet-

lenségi 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, (1.2) egyenlet alapján, írhatók fel a következők szerint [66, 84, 85]:

$$\begin{aligned} I_{xx} \dot{\omega}_x - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z &= M_x \\ I_{yy} \dot{\omega}_y - (I_z - I_x) \omega_z \omega_x &= M_y \\ I_{zz} \dot{\omega}_z - (I_x - I_y) \omega_x \omega_y &= M_z \end{aligned} \quad (1.5)$$

Az (1.5) egyenletben az I_{xx} ; I_{yy} ; I_{zz} a repülőgép főtehetetlenségi nyomatékai,

$$M_x = m_x \frac{\rho v^2 S l}{2} \quad (\text{dőlési nyomaték}), \quad M_y = m_y \frac{\rho v^2 S l}{2} \quad (\text{legyező nyomaték}),$$

$$M_z = m_z \frac{\rho v^2 S b}{2} \quad (\text{bólintási nyomaték})$$

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 tömegközéppont mozgásegyenleteinek és a tömegközéppont körüli forgás egyenleteinek rendszerét az Euler-féle dinamikai egyenleteknek nevezzük [17, 50, 51, 67, 116].

A mozgásegyenletekben szereplő ω szögsebesség, a repülőgép helyzetét meghatározó ψ , ϑ , γ szögek és idő szerinti deriváltjaik között ismertek az Euler-féle kinematikai egyenletek [12, 85, 87]:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\psi} \sin \vartheta + \dot{\gamma} \\ \omega_y &= \dot{\psi} \cos \vartheta \cos \gamma + \dot{\vartheta} \sin \gamma \\ \omega_z &= -\dot{\psi} \cos \vartheta \sin \gamma + \dot{\vartheta} \cos \gamma \end{aligned} \quad (1.6)$$

Az (1.6) egyenleteket behelyettesítve az (1.5) és (1.4) 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 [8, 47, 50, 88, 111, 116].

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 [1, 17, 29, 66]. Így a mozgásegyenletek két részre

bonthatók. Hosszirányú (szimmetrikus) mozgásegyenletekre, az (1.4), (1.5) egyenletekből $v_z = 0$; $\omega_x = 0$; $\omega_y = 0$; $\gamma = 0$ feltételek figyelembevételével:

$$\begin{aligned} m(\dot{x} - \omega_z v_y) &= X + F_p - G \sin \vartheta \\ m(\dot{y} + \omega_z v_x) &= Y - G \cos \vartheta \\ I_{zz} \dot{\omega}_z &= M_z \end{aligned} \quad (1.7)$$

és oldalirányú (aszimmetrikus) mozgásegyenletekre, az (1.4) és (1.5) egyenletekből $\omega_z = 0$; $v_x = konst$; $v_y = konst$; $\vartheta = konst$ feltételek figyelembevételével:

$$\begin{aligned} m(\dot{z} + \omega_x \dot{y} - \omega_y \dot{x}) &= Z + G \cos \vartheta \sin \gamma \\ I_{xx} \dot{\omega}_x &= M_x \\ I_{yy} \dot{\omega}_y &= M_y \end{aligned} \quad (1.8)$$

Az (1.6) egyenletből az $\omega_x = v \sin \vartheta + \dot{\gamma}$, az $\omega_y = v \cos \vartheta$ és az $\omega_z = \dot{\vartheta}$ kinematikai összefüggéseket kaphatjuk. Az (1.7) és (1.8) egyenletek jobb oldalán álló erők, nyomatékok, összetevőinek összege meghatározható a repülőgép vezérlőszervei kitérése alapján [6, 12, 48, 56, 88].

A légijárművek stabilitás vizsgálatához, vagy automatikus vezérlőrendszerük minőségi jellemzőinek meghatározásához az (1.7), (1.8) nemlineáris mozgásegyenletek alkalmazása nehézkes [114]. Leggyakrabban a Taylor-sorfejtés módszerét alkalmazva az (1.7), (1.8) egyenletekből, a mérnöki gyakorlatban jól használható lineáris differenciálegyenletekhez jutunk, amelyek lineáris algebrai egyenletrendszerre redukálhatók [33, 39, 84, 85]. 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 [30, 66, 84, 85].

1.1.3. Hosszirányú linearizált mozgásegyenletek

A „szél” koordinátarendszerben a hosszirányú mozgás egyenleteiben (1.9) 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.

$$\begin{aligned}
m \dot{\alpha} &= -X + F_p \cos \alpha - G \sin \Theta \\
m v \dot{\Theta} &= Y - G \cos \Theta + F_p \sin \alpha \\
I_{zz} \dot{\omega}_z &= M_z
\end{aligned} \tag{1.9}$$

Kis zavarások esetén ($\alpha \rightarrow 0$, $\Theta \rightarrow 0$) a következő egyszerűsítéseket lehet elvégezni [6, 8, 47, 85]: $\sin \alpha \approx 0$; $\sin \Theta \approx 0$; $\cos \Theta \approx 1$; $\cos \alpha \approx 1$. Az (1.9) egyenletek egyszerűsítése után a szimmetrikus egyenletek:

$$\begin{aligned}
m \dot{\alpha} &\cong -X + F_p \\
m v \dot{\Theta} &\cong Y - G \\
I_{zz} \dot{\omega}_z &\cong M_z
\end{aligned} \tag{1.10}$$

Az (1.10) egyenletekben található, a repülőgépre repülés közben ható, erőket és nyomatékokat a következő paraméterek határozzák meg:

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

A linearizált dimenzió nélküli hosszirányú (1.11) mozgásegyenletek (az egyszerűbb fel-

írás érdekében a $a_X^v = \frac{\partial a_X}{\partial v}$, stb. jelöléseket használom) [9, 12, 47, 49, 111]:

$$\begin{aligned}
\dot{\alpha} + a_X^v \Delta v + a_X^\Theta \Delta \Theta + a_X^\alpha \Delta \alpha &= a_X^{\delta_{HVK}} \Delta \delta_{HVK} \\
\dot{\Theta} + a_y^v \Delta v + a_y^\Theta \Delta \Theta + a_y^\alpha \Delta \alpha &= 0 \\
\dot{\omega}_z + a_{m_z}^v \Delta v + a_{m_z}^\Theta \Delta \Theta + a_{m_z}^{\omega_z} \Delta \omega_z + a_{m_z}^\alpha \Delta \alpha &= a_{m_z}^{\delta_{mK}} \Delta \delta_m \\
\dot{\alpha} + a_y^v \Delta v + a_y^\Theta \Delta \Theta - \omega_z - a_y^\alpha \Delta \alpha &= 0
\end{aligned} \tag{1.11}$$

$$\begin{aligned}
a_x^v &= \frac{1}{\tau} \left(C_x + \frac{v C_x^v}{2} \right) - \frac{\cos \alpha F_p^v}{m}; & a_x^\Theta &= \frac{g \cos \Theta}{v}; & a_x^\alpha &= \frac{C_x^\alpha}{2\tau} + \frac{F_p \sin \alpha}{m v}; \\
a_x^{\delta_{HVK}} &= \frac{F_p^{\delta_{HVK}} \cos \alpha}{m v}; & a_y^v &= \frac{1}{\tau} \left(C_y + \frac{v C_y^v}{2} \right) - \frac{F_p^v \sin \alpha}{m}; \\
a_y^\Theta &= -\frac{g \sin \Theta}{v}; & a_y^\alpha &= -\frac{C_y^\alpha}{2\tau} - \frac{F_p \cos \alpha}{m v}; & a_{m_z}^v &= -\chi \left(v m_z^v + 2 m_z + \frac{b m_z^\alpha a_y^\alpha}{v} \right); \\
a_{m_z}^\Theta &= -\chi \frac{b m_z^\alpha a_y^\Theta}{v}; & a_{m_z}^{\omega_z} &= -\chi \frac{b}{v} \left(m_z^{\omega_z} + m_z^\alpha \right); & a_{m_z}^\alpha &= -\chi \left(m_z^\alpha + \frac{b m_z^\alpha a_y^\alpha}{v} \right); \\
a_{m_z}^{\delta_m} &= \chi m_z^{\delta_m}; & \chi &= \frac{\rho v^2 S b}{2 I_z}; & \tau &= \frac{m}{\rho v S}, \text{ aerodinamikai idő}
\end{aligned} \tag{1.12}$$

1.1.4. 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” koordinátarendszerben az oldalirányú mozgás egyenletei:

$$\begin{aligned}
m (\ddot{x}_z - \omega_y v_x) &= Z + G \cos \vartheta \\
I_{xx} \ddot{\alpha}_x &= M_x \\
I_{yy} \ddot{\alpha}_y &= M_y
\end{aligned} \tag{1.13}$$

Az (1.13) egyenletben szereplő, a repülőgépre repülés közben ható, erők, nyomatékok a következő paramétereiktől függenek:

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

- a *súlyerő összetevője* függvénye G állandó értéke mellett a pályahajlásszögnek és a felhajtóerő dőlésszögének.

A repülőgép linearizált dimenzió nélküli oldalirányú mozgásegyenletei a következő módon írhatók fel [48, 87, 116]:

$$\begin{aligned}
\dot{\omega}_x + a_{m_x}^{\omega_x} \Delta \omega_x + a_{m_x}^{\omega_y} \Delta \omega_y + a_{m_x}^{\beta} \Delta \beta &= a_{m_x}^{\delta_{cs}} \Delta \delta_{cs} + a_{m_x}^{\delta_o} \Delta \delta_o \\
\dot{\omega}_y + a_{m_y}^{\omega_x} \Delta \omega_x + a_{m_y}^{\omega_y} \Delta \omega_y + a_{m_y}^{\beta} \Delta \beta &= a_{m_y}^{\delta_{cs}} \Delta \delta_{cs} + a_{m_y}^{\delta_o} \Delta \delta_o \\
\dot{\beta} &= \omega_y - a_z^{\beta} \Delta \beta - a_z^{\gamma} \Delta \gamma \\
\dot{\alpha} &= \omega_x
\end{aligned} \tag{1.14}$$

$$\begin{aligned}
a_{m_x}^{\omega_x} &= -\frac{m l^2}{2 \tau I_x} m_x^{\omega_x}; & a_{m_x}^{\omega_y} &= -\frac{m l^2}{2 \tau I_x} m_x^{\omega_y}; & a_{m_x}^{\beta} &= -\frac{m l v}{2 \tau I_x} m_x^{\beta}; \\
a_{m_x}^{\delta_{cs}} &= -\frac{m l v}{2 \tau I_x} m_x^{\delta_{cs}}; & a_{m_x}^{\delta_o} &= -\frac{m l v}{2 \tau I_x} m_x^{\delta_o}; \\
a_{m_y}^{\omega_x} &= \frac{m l^2}{2 \tau I_y} m_y^{\omega_x}; & a_{m_y}^{\omega_y} &= \frac{m l^2}{2 \tau I_y} m_y^{\omega_y}; & a_{m_y}^{\beta} &= \frac{m l v}{2 \tau I_y} m_y^{\beta}; \\
a_{m_y}^{\delta_{cs}} &= \frac{m l v}{2 \tau I_y} m_y^{\delta_{cs}}; & a_{m_y}^{\delta_o} &= \frac{m l v}{2 \tau I_y} m_y^{\delta_o}; \\
a_z^{\beta} &= -\frac{C_z^{\beta}}{2 \tau}; & C_z^{\beta} &= \frac{\partial C_z}{\partial \beta}; & a_z^{\gamma} &= -\frac{g}{v}
\end{aligned} \tag{1.15}$$

1.1.5. A repülőgép állapotegyenletei

A lineáris repülésdinamikai rendszer állapot módszeres analizálásához szükséges a linearizált mozgásegyenletek mátrix segítségével történő meghatározása. Az (1.11) és (1.14) egyenletrendszerek a következő alakban írhatók fel [56, 66, 72, 77, 94]:

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \\
\mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{u}
\end{aligned} \tag{1.16}$$

Az (1.16) 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 [42].

A szimmetrikus mozgásegyenletet mátrixos alakban felírva:

$$\begin{bmatrix} \& \\ \& \\ \& \\ \& \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_x^v & -a_x^\ominus & 0 & -a_x^\alpha \\ -a_y^v & -a_y^\ominus & 0 & -a_y^\alpha \\ -a_{m_z}^v & -a_{m_z}^\ominus & -a_{m_z}^{\omega_z} & -a_{m_z}^\alpha \\ a_y^v & a_y^\ominus & 1 & a_y^\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \Theta \\ \omega_z \\ \alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x^{\delta_{HVK}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & a_{m_z}^{\delta_m} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{HVK} \\ \delta_m \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Az aszimmetrikus mozgásegyenlet mátrixos alakban a következő módon írhatjuk fel:

$$\begin{bmatrix} \& \\ \& \\ \& \\ \& \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{m_x}^{\omega_x} & -a_{m_x}^{\omega_y} & -a_{m_x}^\beta & 0 \\ -a_{m_y}^{\omega_x} & -a_{m_y}^{\omega_y} & -a_{m_y}^\beta & 0 \\ 0 & 1 & -a_z^\beta & -a_z^\gamma \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{m_x}^{\delta_{cs}} & a_{m_x}^{\delta_o} \\ a_{m_y}^{\delta_{cs}} & a_{m_y}^{\delta_o} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{cs} \\ \delta_o \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Képezzük zérus kezdeti feltételek esetén az (1.11) és (1.14) egyenletek Laplace transzformáltját [8, 9, 99, 116]:

- szimmetrikus mozgás esetén:

$$\begin{aligned} s v(s) + a_x^v v(s) + a_x^\ominus \Theta(s) + a_x^\alpha \alpha(s) &= a_x^{\delta_{HVK}} \delta_{HVK}(s) \\ s \Theta(s) + a_y^v v(s) + a_y^\ominus \Theta(s) + a_y^\alpha \alpha(s) &= 0 \\ s \omega_z(s) + a_{m_z}^v v(s) + a_{m_z}^\ominus \Theta(s) + a_{m_z}^{\omega_z} \omega_z(s) + a_{m_z}^\alpha \alpha(s) &= a_{m_z}^{\delta_m} \delta_m(s) \\ s \alpha(s) - a_y^v v(s) - a_y^\ominus \Theta(s) - \omega_z(s) - a_y^\alpha \alpha(s) &= 0 \end{aligned} \quad (1.19)$$

- aszimmetrikus mozgás esetén:

$$\begin{aligned} s \omega_x(s) + a_{m_x}^{\omega_x} \omega_x(s) + a_{m_x}^{\omega_y} \omega_y(s) + a_{m_x}^\beta \beta(s) &= a_{m_x}^{\delta_{cs}} \delta_{cs}(s) + a_{m_x}^{\delta_o} \delta_o(s) \\ s \omega_y(s) + a_{m_y}^{\omega_x} \omega_x(s) + a_{m_y}^{\omega_y} \omega_y(s) + a_{m_y}^\beta \beta(s) &= a_{m_y}^{\delta_{cs}} \delta_{cs}(s) + a_{m_y}^{\delta_o} \delta_o(s) \\ s \beta(s) &= \omega_y(s) - a_z^\beta \beta(s) - a_z^\gamma \gamma(s) \\ s \gamma(s) &= \omega_x(s) \end{aligned} \quad (1.20)$$

1.2. A repülőgép átviteli függvényei

A repülőgép átviteli függvényeit a (1.11) és (1.14) 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 paramétereit pozitív előjellel kapjuk meg.) Az (1.19) egyenletekből felírhatjuk

a hosszirányú mozgás (1.21) egyenleteit. Az (1.20) egyenletekből kiindulva az oldalirányú mozgás karakterisztikus (1.23) egyenleteit határozhatjuk meg. A hosszirányú mozgás átviteli függvényeit az (1.22) egyenletek, az oldalirányú mozgás átviteli függvényeit az (1.24) egyenletek definiálják.

$$\begin{aligned}
& s^4 + (a_{m_z}^{\omega_z} + a_x^v + a_y^\ominus - a_y^\alpha) s^3 + \\
& + [a_y^v (a_x^\alpha - a_x^\ominus) - a_x^v (a_y^\alpha - a_y^\ominus) + a_{m_z}^\alpha + a_{m_z}^{\omega_z} (a_x^v + a_y^\ominus - a_y^\alpha)] s^2 + \\
& + \{a_{m_z}^{\omega_z} [a_y^v (a_x^\alpha - a_x^\ominus) - a_x^v (a_y^\alpha - a_y^\ominus)] + (a_x^v a_{m_z}^\alpha - a_x^\alpha a_{m_z}^v) + (a_y^\ominus a_{m_z}^\alpha - a_y^\alpha a_{m_z}^\ominus)\} s + \\
& + [a_{m_z}^\alpha (a_x^v a_y^\ominus - a_x^\ominus a_y^v) + a_{m_z}^\ominus (a_x^\alpha a_y^v - a_x^v a_y^\alpha) + a_{m_z}^v (a_x^\ominus a_y^\alpha - a_x^\alpha a_y^\ominus)] = 0
\end{aligned} \tag{1.21}$$

$$\begin{aligned}
Y_1(s) &= \frac{\alpha(s)}{-\delta_m(s)}; Y_2(s) = \frac{\omega_z(s)}{-\delta_m(s)}; Y_3(s) = \frac{v_x(s)}{-\delta_m(s)}; Y_4(s) = \frac{\Theta(s)}{-\delta_m(s)} \\
Y_5(s) &= \frac{\alpha(s)}{-\delta_{HVK}(s)}; Y_6(s) = \frac{\omega_z(s)}{-\delta_{HVK}(s)}; Y_7(s) = \frac{v_x(s)}{-\delta_{HVK}(s)}; Y_8(s) = \frac{\Theta(s)}{-\delta_{HVK}(s)}.
\end{aligned} \tag{1.22}$$

Az átviteli függvények lehetőséget teremtenek — a repülőgép mozgásmódjainak tekintetében — a rövid és hosszú periódusú, illetve bedöntés, és elfordulás szerinti mozgás tanulmányozására. A hosszirányú mozgás tranzien্স folyamata két eltérő frekvenciájú lengő mozgásra osztható (kivétel a függőlegesen le, és felszálló repülőgép [49]). Az állásszög és a bólintási szög (α, ϑ) változásának periódus ideje kicsi, ezért rövid periodikusú 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 ($\Delta v \approx 0, \Delta \Theta \approx 0$) [1, 6, 12, 87, 94, 108].

$$\begin{aligned}
& s^4 + (a_{m_y}^{\omega_y} + a_{m_x}^{\omega_x} + a_z^\beta) s^3 + [a_{m_x}^{\omega_x} (a_{m_y}^{\omega_y} + a_z^\beta) + a_{m_y}^{\omega_y} a_z^\beta + a_{m_y}^\beta - a_{m_x}^{\omega_y} a_{m_y}^{\omega_x}] s^2 + \\
& + [a_{m_x}^{\omega_x} (a_{m_y}^{\omega_y} a_z^\beta + a_{m_y}^\beta) - a_{m_y}^{\omega_x} (a_{m_x}^{\omega_y} a_z^\beta + a_{m_x}^\beta) - a_{m_x}^\beta a_z^\gamma] s + \\
& + a_z^\gamma (a_{m_x}^{\omega_y} a_{m_y}^\beta - a_{m_y}^{\omega_y} a_{m_x}^\beta) = 0
\end{aligned} \tag{1.23}$$

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

- 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 függvényeit az alábbi egyenletek írják le:

$$\begin{aligned}
 Y_1(s) &= \frac{\omega_x(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; Y_2(s) = \frac{\omega_x(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}; Y_3(s) = \frac{\omega_y(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; \\
 Y_4(s) &= \frac{\omega_y(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}; Y_5(s) = \frac{\beta(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; Y_6(s) = \frac{\beta(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}; \\
 Y_7(s) &= \frac{Y_1(s)}{s} = \frac{\gamma(s)}{-\delta_{cs}(s)} \Big|_{\delta_o=0}; Y_8(s) = \frac{Y_2(s)}{s} = \frac{\gamma(s)}{-\delta_o(s)} \Big|_{\delta_{cs}=0}
 \end{aligned} \tag{1.24}$$

1.3. Repülőgépek stabilitásának, megfigyelhetőségének és irányíthatóságának vizsgálata

Egy állapotteres alakban adott szabályozási rendszermodell analízisének három alapvető dinamikus tulajdonság (irányíthatóság, megfigyelhetőség és stabilitás) vizsgálatával kezdjük bármilyen irányítási, szabályozási algoritmus tervezését. 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 állapotvisszacsatolással szabályozni a nyitott rendszert);
- stabilis-e a rendszer (a rendszert egyensúlyi állapotából kitérítve, magára hagyva egyensúlyi állapotba tér-e vissza).

Szabályozási rendszernek tekintve a pilóta nélküli repülőgépet az átviteli függvény és a súlyfüggvény csak akkor adja meg teljesen és helyesen a viselkedését, ha a rendszer irányítható és megfigyelhető. Vagyis fontos ismerni, hogy a repülőgép a rendelkezésre álló bemenőjelekkel (pl.: csűrőlap, magassági kormány) vezérelve előre megtervezetten, az elvártaknak megfelelően fogja-e megvalósítani a kitűzött célt [2, 24].

1.3.1. 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 alapvető követelmény, de nem egyértelmű rendszerjellemező, mert a bemenőjeltől és a kezdeti értéktől is függhet. Stabilisnak akkor nevezzünk egy lineáris szabályozási rendszert, ha egyensúlyi állapotából kitérítve, majd magára hagyva egyensúlyi állapotba tér vissza [36]:

$$\int_0^{\infty} |f(t)| dt < K \quad (1.25)$$

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = F \quad (1.26)$$

$F < \infty$ 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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0 \quad (1.27)$$

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 [21, 27, 45, 135]:

- 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 stabil¹;
- dinamikus 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 amplitudója állandó vagy növekvő lehet. Az utóbbi esetben a lengés a szerkezet adta szélső határok között folyik. Az instabilitásnak ezt a formáját periodikus instabilitásnak nevezzük. A dinamikus stabili-

¹ A repülésmechanikában a statikus stabilitás alapvetően az aerodinamikai jellemzők derivatív együtt-hatójának előjelétől függ [12, 66, 96].

tás a szerkezetből csupán fizikai megfontolásokkal rendszerint nem állapítható meg, és megléte alaposabb vizsgálatokat igényel. Természetes, hogy a szabályozások vizsgálatakor elsődleges célunk a stabilitás meglétének megállapítása, illetve feltételeinek megteremtése. A feltételeket stabilitási feltételeknek, stabilitási kritériumoknak nevezzük [22, 25, 57, 62, 93, 128].

1.3.2. 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 időpontra. Ha minden $x(t_0)$ állapot minden t_0 időpontra megfigyelhető, akkor a rendszert teljesen megfigyelhető [23, 24]. A megfigyelhetőség arra a kérdésre ad választ, hogy a repülőgép, mint egy ismeretlen állapotú rendszer, kimenő és bemenő-jelének valamekkora ideig 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 , vagyis [13, 41]:

$$\mathbf{C}_0^T = \mathbf{O}_{\text{obs}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{n-1} \end{bmatrix} = [\mathbf{C}^T \quad \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T \quad \dots \quad \mathbf{A}^T]^{n-1} \mathbf{C}^T \quad (1.28)$$

A megfigyelhetőség a rendszertől (\mathbf{A}) és a kimenő jelek (\mathbf{C}) kiválasztásától függ [73].

1.3.3. 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 kez-

deti időpontban irányíthatónak nevezzük [24]. 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 [21, 23, 25, 73]. A pilóta nélküli 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:

$$\mathbf{C}_{\text{contr}} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}] \quad (1.29)$$

Az irányíthatóság a rendszer pólusaitól és az azokhoz rendelhető állapotváltozók kapcsolatától (\mathbf{A}), és az irányító bemenetek kijelölésétől (\mathbf{B}) függ [2, 60, 119, 136].

1.3.3. A Szojka–III irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálata

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép repülési sebességben paraméterezett hosszirányú és oldalirányú mozgásának repülésmechanikai matematikai modelljei az 1. mellékletben található [131]. A pilóta nélküli repülőgép irányíthatósági-, és megfigyelhetőségi vizsgálatait állandó tömeg ($m = 135 \text{ kg}$), állandó magasság ($H = 400 \text{ m}$), és változó $v_x = 110; 130; 150; 170; 190 \text{ km/h}$ sebességek esetén végeztem el. A 2. számú mellékletben található MATLAB[®] m-file segítségével előállítottam a linearizált rendszer (1.28) szerinti irányíthatósági-, és (1.29) szerinti megfigyelhetőségi mátrixait. Az irányíthatósági mátrixok oldalirányú mozgás esetén:

$$\begin{aligned}
C_{o1} &= \begin{bmatrix} -25.919 & 89.1873 \\ 0 & -25.919 \end{bmatrix}; C_{o2} = \begin{bmatrix} -36.201 & 147.1933 \\ 0 & -36.201 \end{bmatrix} \\
C_{o3} &= \begin{bmatrix} -48.196 & 226.1356 \\ 0 & -48.196 \end{bmatrix}; C_{o4} = \begin{bmatrix} -61.905 & 329.2108 \\ 0 & -61.905 \end{bmatrix} \\
C_{o5} &= \begin{bmatrix} -77.328 & 459.5603 \\ 0 & -77.328 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1.30}$$

a mátrixok rangja=2, tehát a mátrixokkal definiált rendszerek irányíthatók;

hosszirányú mozgás esetén:

$$\begin{aligned}
C_{h1} &= \begin{bmatrix} 0 & -9.995 & 15.6622 \\ 0 & 0 & -305.4072 \\ -9.995 & 15.6622 & -24.5426 \end{bmatrix}; C_{h2} = \begin{bmatrix} 0 & -13.96 & 25.8539 \\ 0 & 0 & -504.1096 \\ -13.96 & 25.8539 & -47.8815 \end{bmatrix}; \\
C_{h3} &= \begin{bmatrix} 0 & -18.586 & 39.7183 \\ 0 & 0 & -774.4229 \\ -18.586 & 39.7183 & -84.878 \end{bmatrix}; C_{h4} = \begin{bmatrix} 0 & -23.9 & 57.8 \\ 0 & 0 & -1127.3 \\ -23.9 & 57.8 & -140 \end{bmatrix}; \\
C_{h5} &= \begin{bmatrix} 0 & -29.8 & 80.7 \\ 0 & 0 & -1573.8 \\ -29.8 & 80.7 & -218.5 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1.31}$$

a mátrixok rangja=3, tehát a mátrixokkal meghatározott rendszerek irányíthatók;

A megfigyelhetőségi mátrixok oldalirányú mozgás esetén:

$$\begin{aligned}
O_{o1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -3.441 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; O_{o2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -4.066 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; O_{o3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -4.692 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \\
O_{o4} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -5.318 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; O_{o5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -5.943 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1.32}$$

a mátrixok rangja=2, tehát a mátrixok által leírt rendszerek megfigyelhetők;

hosszirányú mozgás esetén:

$$\begin{aligned}
O_{h1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 30.556 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.567 \\ 0 & 0 & -1.567 \\ 0 & 0 & 30.556 \\ 0 & 0 & 2.4555 \end{bmatrix}; O_{h2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 36.111 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.852 \\ 0 & 0 & -1.852 \\ 0 & 0 & 36.111 \\ 0 & 0 & 3.4299 \end{bmatrix}; O_{h3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 41.667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.137 \\ 0 & 0 & -2.137 \\ 0 & 0 & 41.667 \\ 0 & 0 & 4.5668 \end{bmatrix}; \\
O_{h4} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 47.222 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.422 \\ 0 & 0 & -2.422 \\ 0 & 0 & 47.222 \\ 0 & 0 & 5.8661 \end{bmatrix}; O_{h5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 52.778 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.707 \\ 0 & 0 & -2.707 \\ 0 & 0 & 52.778 \\ 0 & 0 & 7.3278 \end{bmatrix} \tag{1.33}
\end{aligned}$$

a mátrixok rangja=3, a mátrixok segítségével definiált rendszerek megfigyelhetők.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A Kalman féle rang feltétel alapján és az elvégzett vizsgálatok eredményeként megállapítottam, hogy:

- a nemirányított repülőgép hosszirányú mozgásának állapotváltozói a magassági kormány segítségével irányíthatók;
- a nemirányított repülőgép oldalirányú mozgásának állapotváltozói a csűrőlapok segítségével irányíthatók;
- a nemirányított repülőgép hosszirányú mozgásának állapotváltozói megfigyelhetők;
- a nemirányított repülőgép oldalirányú mozgásának állapotváltozói megfigyelhetők.

Vizsgálataim alapján bebizonyosodott, hogy a nemirányított repülőgép összes állapotváltozója teljesen irányítható és teljesen megfigyelhető, így a nemirányított repülőgép matematikai modellje eleget tesz a szabályozótervezés szükséges és elégséges feltételeinek.

A Szojka–III repülőgép többváltozós repülésmechanikai matematikai modelljének irányíthatósági-, és megfigyelhetőségi vizsgálatához új MATLAB® m-fájlt készítettem, amely a 2. számú mellékletben található.

2. A SZABÁLYOZÓTERVEZÉS MÓDSZEREI ÉS ALGORITMUSAI

A második fejezetben szakirodalmi hivatkozások felhasználásával ismertetek néhány repülésszabályozó rendszer tervezéséhez felhasználható klasszikus és modern szabályozótervezési eljárást, valamint az értekezés témájához kapcsolódó, a szabályozó előzetes tervezésnél alkalmazható MATLAB[®] függvényt és segédprogramot. A fejezet témáját a [21, 22, 61, 66, 76, 136] szakirodalmak részletesebben ismertetik.

2.1. Szabályozótervezés klasszikus módszerei

A klasszikus tervezési módszerek a megtervezendő rendszer konfigurációjának rögzítésével (az alkalmas rendszerkonfiguráció választással) jellemezhetőek. A szabályozási rendszerek klasszikus tervezése próbálgatásos (fokozatos közelítésű) módszer, nem jelzi előre, hogy létezik-e megoldása az adott tervezési feladatnak [57].

2.1.1. 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 sávzélesség. 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 [24, 26, 57, 86, 128, 133].

2.1.1.1. 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:

$$Y(j\omega) = \frac{x_{ki}(j\omega)}{x_{be}(j\omega)} = |Y(j\omega)| e^{j \arctg \frac{\text{Im}[Y(j\omega)]}{\text{Re}[Y(j\omega)]}} = |Y(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}; \quad (2.1)$$

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

A (2.1) 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 bemenő-jelhez képest. A lineáris léptékből adódó nagyságrendi problémák a logaritmikus vagy Bode-diagram (aszimptotikus vagy logaritmikus frekvencia-jelleggörbe) használatával kerülhetők el. A frekvencia függvény (2.1) szerint:

$$\log Y(j\omega) = \log A(\omega) + j\varphi(\omega) \log e \quad (2.2)$$

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]) [13, 14, 21, 36, 62, 136]:

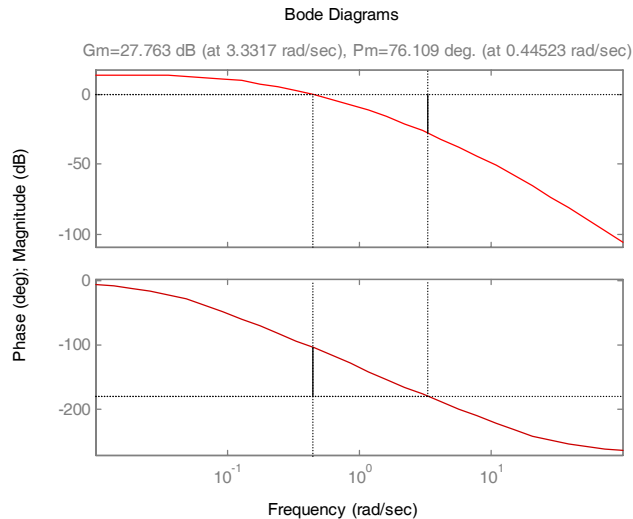
$$A(\omega) = 20 \log |Y(j\omega)| \quad (2.3)$$

A (2.2) kifejezésben szereplő $\varphi(j\omega)$ a fázis-körfrekvencia jelleggörbe, kifejezése:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im} Y(j\omega)}{\text{Re} Y(j\omega)} \quad (2.4)$$

Származtassuk az erősítési-, és fázistartalékot a Bode-diagramon.

Egy 0 típusú, proporcionális három tárolós (PT3) szabályozási rendszer Bode-diagramja a 2.1. ábrán látható.



2.1. 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.

2.1.2. 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 [57]. 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 rend-

szer 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 szabályozás-technikai irodalom [pl.: 21, 27, 57, 62, 81] ajánl olyan kritériumokat, amelyek a követelmények kompromisszumát figyelembe véve a gyakorlatban is eredményesen alkalmazhatók. Ezek a szabályozási kör optimális² 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 [27, 81, 134, 136]. Ha az integrál-funkcionált 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 előírt 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 haszonfüggvénynek (haszonfunkcionálnak) nevezzük [120, 136]. (Pl.: a tervezett rendszer hatásfoka, jósága vagy valamely képesség megvalósítása a lehető legjobb legyen) Az integrálkritérium általános alakja:

$$I = \int_0^{\infty} F[x(t), t] dt \quad (2.5)$$

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.

² *Statikus optimalizálás:* A célfüggvény optimumát csak a rendszer állandósult állapotában kell biztosítani. *Dinamikus optimalizálás:* A tranziens jelenségek figyelembevételével kell a célfüggvény optimumát elérni [123].

A felsoroltak egymásnak ellentmondó igények, így többféle integrálkritérium létezik. A leggyakrabban alkalmazott integrálkritériumok az alábbiak [21, 27, 57, 58, 81]:

1. Lineáris integrálok: (IE, **I**ntegral of the **E**rror)

$$I_{10} = \int_0^{\infty} x(t) dt \rightarrow \min$$

$$I_{11} = \int_0^{\infty} t x(t) dt \rightarrow \min \quad (2.6)$$

M

$$I_{1m} = \int_0^{\infty} t^m x(t) dt \rightarrow \min$$

2. Általános négyzetes integrálok: A négyzetes integrálkritérium (ISE, **I**ntegral of the **S**quared **E**rror)

$$I_{2(1)} = \int_0^{\infty} [x^2(t) + \tau_1^2 \mathcal{E}(t)] dt \rightarrow \min$$

M

$$I_{2(n)} = \int_0^{\infty} \left\{ x^2(t) + \tau_1^2 \mathcal{E}(t) + K + \tau_n^{2n} [x^{(n)}(t)]^2 \right\} dt \rightarrow \min \quad (2.7)$$

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

$$I_{20} = \int_0^{\infty} x^2(t) dt \rightarrow \min$$

$$I_{21} = \int_0^{\infty} t x^2(t) dt \rightarrow \min \quad (2.8)$$

M

$$I_{2m} = \int_0^{\infty} t^m x^2(t) dt \rightarrow \min$$

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 [81].

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)

$$\begin{aligned}
I_{a0} &= \int_0^{\infty} |x(t)| dt \rightarrow \min \\
I_{a1} &= \int_0^{\infty} t |x(t)| dt \rightarrow \min \\
\text{M} \\
I_{am} &= \int_0^{\infty} t^m |x(t)| dt \rightarrow \min
\end{aligned}
\tag{2.9}$$

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 irányítástechnikai és a műszaki-technikai követelmények egyidejű figyelembevétele a gyakorlatban sokszor „előrevetíti”, hogy a korábban ismertetett integrálkritériumok közül melyik alkalmazása célszerű [21, 22, 112, 113].

2.2. 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 irányításeleméleti módszerekkel. 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 [28, 43, 63].

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 [4, 13, 15, 32, 37, 38, 52, 54, 55, 57, 95, 109, 118, 125, 127, 132, 139].

2.2.1. A pólus áthelyezés módszere

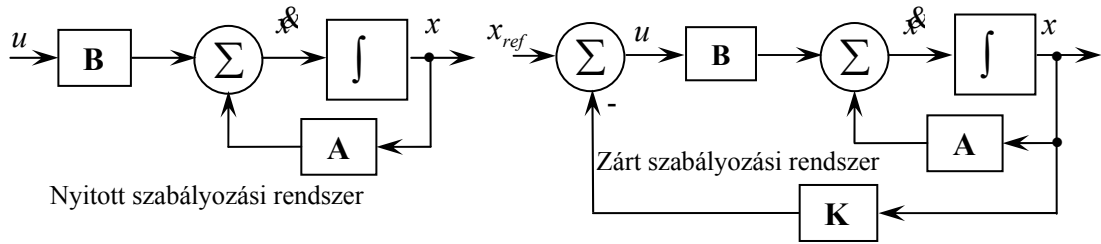
A modern szabályozáselmélet — a tervezési feladat megoldása során — a először a matematikai modell felállítását és gyakorlati formába öntését foglalja magába, majd alkalmazza az előkészített matematikai apparátust. Egy ilyen tervezési formula a pólus áthelyezés módszere. Ekkor a nyitott szabályozási rendszer $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$ 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 zérusérté-

kü referencía jel ($x_{ref}=0$) esetén $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ alakú, vagyis a pillanatnyi állapotot az irányítójel határozza meg. A \mathbf{K} állapot-visszacsatolási mátrix megválasztásával biztosíthatjuk, hogy a zárt rendszer pólusai a komplex sík (s tartomány) bal oldalán legyenek. A vezérlési törvényt behelyettesítve az (1.16) egyenletbe kapjuk a zárt rendszer állapotegyenletét:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x}(t) \quad (2.10)$$

A nyitott és a zárt szabályozási rendszer a 2.2. ábrán látható.



2.2. ábra. A nyitott és zárt szabályozási rendszer

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

$$\begin{aligned} \Phi_s &= |s\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{A}}| = (s - s_1) \cdot (s - s_2) \cdot (s - s_3) \cdot \mathbf{K} \cdot (s - s_n) = \\ &= s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \mathbf{K} + \alpha_{n-1}n + \alpha_n = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

és

$$\Phi(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + \alpha_1 \mathbf{A}^{n-1} + \mathbf{K} + \alpha_{n-1} \mathbf{A} + \alpha_n \mathbf{I} \quad (2.12)$$

A Cayley-Hamilton tétel alapján egy n -ed rendű kvadratikus mátrix $m \geq n$ hatványa kifejezhető a $k < n$ hatványok lineáris kombinációjaként, vagyis [34, 76]:

$$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = \tilde{\mathbf{A}}^n + \alpha_1 \tilde{\mathbf{A}}^{n-1} + \mathbf{K} + \alpha_{n-1} \tilde{\mathbf{A}} + \alpha_n \mathbf{I} = 0 \quad (2.13)$$

$n=3$ közelítést alkalmazva:

$$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = \Phi(\mathbf{A}) - \alpha_2 \mathbf{BK} - \alpha_1 \mathbf{BK}\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{BK}\tilde{\mathbf{A}}^2 - \alpha_1 \mathbf{ABK} - \mathbf{ABK}\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{A}^2 \mathbf{BK} \quad (2.14)$$

$\Phi(\tilde{\mathbf{A}}) = 0$, így:

$$\Phi(\mathbf{A}) = \mathbf{B}(\alpha_2 \mathbf{K} + \alpha_1 \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}}^2) + \mathbf{AB}(\alpha_1 \mathbf{K} + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{A}}) + \mathbf{A}^2 \mathbf{BK} \quad (2.15)$$

A (2.15) egyenletből kifejezhető a \mathbf{K} állapot-visszacsatolási mátrix:

$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ 1] \cdot [\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \mathbf{A}^2 \mathbf{B}]^{-1} \cdot \Phi(\mathbf{A}) \quad (2.16)$$

Tetszőlegesen választott n esetén a \mathbf{K} állapot-visszacsatolási mátrix [75,76]:

$$\mathbf{K} = [0 \ 0 \ \mathbf{K} \ 0 \ 1] \cdot [\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \mathbf{K} \ \mathbf{A}^{n-1} \mathbf{B}]^{-1} \cdot \Phi(\mathbf{A}) \quad (2.17)$$

2.2.2. 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 irányításától. 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 [57, 66, 76, 122].

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 [57, 58, 71, 118]:

$$\dot{x}(t) = f[x(t), u(t), t] \quad (2.18)$$

összefüggés írja le. Az $\mathbf{u}(t)$ vezérlő vektor (bemenőjel vagy vezérlőjel vektor) nem azonos a hagyományos tervezés során alkalmazott alapjel fogalmával. Mivel a (2.18) 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:

$$J = \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} F[x(t), u(t), t] dt \rightarrow \min \quad (2.19)$$

ahol F – skalár függvény.

Az optimális rendszerek tervezésében a J költségfüggvény (2.19) 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:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}] dt \rightarrow \min \quad (2.20)$$

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

$$\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n q_i x_i^2(t) \text{ és az } \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} = \sum_{j=1}^n r_j u_j^2(t). \text{ A (2.20) integrál kritériumban a } \mathbf{Q} \geq 0 \text{ és}$$

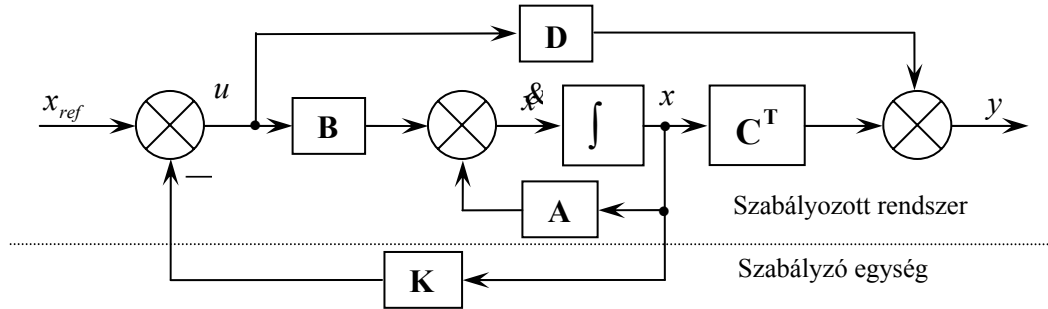
az $\mathbf{R} > 0$ súlyozó mátrixokat úgy változtatjuk, hogy a zárt szabályozási rendszer, 2.3. ábrán látható, feleljen meg az előírt minőségi követelményeknek.

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 [57, 66, 74, 97, 100, 115, 134].

A vizsgált rendszer állapotegyenlete (1.16) egyenlet szerint adott. Zérusértékű referencia jel esetén az optimális vezérlési törvény [2, 40, 66, 117, 120, 137, 138]:

$$\mathbf{u}_{opt}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) \quad (2.21)$$

A (2.21) vezérlési törvény biztosítja a (2.20) költségfüggvény minimális értékét, ahol \mathbf{K} az állapot-visszacsatolási mátrix. Az optimális szabályozási rendszer a 2.3. ábrán látható.



2.3. ábra. A teljes állapot-visszacsatolású szabályozási rendszer hatásvázlata

A (2.21) vezérlési törvény biztosítja a (2.20) költségfüggvény minimális értékét, ahol \mathbf{K} az állapot-visszacsatolási mátrix. Az optimális szabályozási rendszer a 2.3. ábrán látható.

Legyen $x_{ref} = 0$ és $\mathbf{D} = \mathbf{0}$. A (2.21) egyenletet az (1.14) egyenletbe helyettesítve kapjuk:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{x} = [\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]\mathbf{x} \quad (2.22)$$

A továbbiakban tételezzük fel, hogy $[\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]\mathbf{x}$ mátrix sajátértékei negatív valós részűek. A (2.20) költségfüggvénybe helyettesítve a (2.21) vezérlési törvényt:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} [\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K} \mathbf{x}] dt = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} \mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} dt \rightarrow \min \quad (2.23)$$

Az optimális vezérlési törvény (2.21) meghatározásához keressük a \mathbf{K}_{opt} optimális állapot-visszacsatolási mátrixot [91, 93, 98, 115].

Az integrál kritérium minimálásához használjuk fel Ljapunov második, közvetlen módszerét. A módszer levezetése a [23, 24, 25, 109] irodalmakban 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 [75, 109]:

$$\mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} = -\frac{d}{dt} [\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}] \quad (2.24)$$

Az $\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}$ kvadratikus alak deriválása és a (2.22) egyenlet felhasználása után:

$$\mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} = -\dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \dot{\mathbf{P}} \mathbf{x} = -\mathbf{x}^T [\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]^T \mathbf{P} + \mathbf{P} [\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}] \mathbf{x} \quad (2.25)$$

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 [25, 66, 70, 91, 93, 126]:

$$[\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}]^T \mathbf{P} + \mathbf{P} [\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}] = -[\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \quad (2.26)$$

Felhasználva a (2.26) Ljapunov-féle mátrixegyenletet a négyzetes integrálkritérium:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_{\text{vég}}} \mathbf{x}^T [\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}] \mathbf{x} dt = -[\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}]_{t_0}^{t_{\text{vég}}} = -\mathbf{x}^T(t_{\text{vég}}) \mathbf{P} \mathbf{x}(t_{\text{vég}}) + \mathbf{x}^T(t_0) \mathbf{P} \mathbf{x}(t_0) \quad (2.27)$$

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

A (2.27) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$J = \mathbf{x}^T(t_0) \mathbf{P} \mathbf{x}(t_0) \quad (2.28)$$

A (2.28) 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 (2.26) egyenletből, hogy:

$$[\mathbf{A}^T - \mathbf{K}^T \mathbf{B}^T] \mathbf{P} + \mathbf{P} [\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K}] + \mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{T}^T \mathbf{T} \mathbf{K} = \mathbf{0} \quad (2.29)$$

Felhasználva, hogy $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T$ és $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{T}^{-1} (\mathbf{T}^T)^{-1}$, a (2.29) egyenletet átírva kapjuk, hogy:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}]^T [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}] - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (2.30)$$

A négyzetes integrálkritérium minimálása, az optimális vezérlési törvény \mathbf{K}_{opt} mátrixának meghatározása, az $\mathbf{x}^T [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}]^T [\mathbf{T} \mathbf{K} - (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}] \mathbf{x}$ szorzat minimálását jelenti.

Mivel a szorzat mátrix nem negatív, ezért a (2.30) kifejezés minimális (zérus) értékét akkor veszi fel, amikor $\mathbf{T} \mathbf{K} = (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$ vagyis $\mathbf{K}_{\text{opt}} = \mathbf{T}^{-1} (\mathbf{T}^T)^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}$. Az előzőek ismeretében az optimális vezérlési törvény [16, 57, 120, 137]:

$$\mathbf{u}_{\text{opt}}(t) = -\mathbf{K}_{\text{opt}} \mathbf{x}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{x}(t) \quad (2.31)$$

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

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (2.32)$$

A (2.32) egyenlet megoldásához keressük a \mathbf{Q} és \mathbf{R} súlyozó mátrixokat [2, 98, 119].

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 (2.32) 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 (2.31) és kiszámíthatjuk az integrál kritérium (2.20) minimumát [92, 109, 121, 122].

2.3. A szabályozótervezéshez és a rendszeranalízishez kapcsolódó MATLAB® m-fájlok leírása

A MATLAB® (**MA**Trix **LAB**oratories) egy interaktív műszaki számításokat segítő számítógépes programrendszer. Felhasználóbarát környezetben egyesíti a numerikus analízist, a mátrixszámítást, a jelfeldolgozást és a grafikát. A program alapeleme a mátrix, és támogatja a matematikai modellek alapján történő vizsgálatokat. A szabályozási rendszerek tervezésekor felmerülő időigényes számításokhoz, a rendszerszemléletű és a fizikai valóságot is figyelembe vevő vizsgálatokhoz nyújt segítséget. Az alapprogramot sokféle segédprogrammal egészíthetjük ki. Ez lehetővé teszi, hogy saját programjaink megírásával problémamegoldó függvényeinket ugyanúgy használjuk, mint a MATLAB® sajátfüggvényeit, eszköztárait. Az eszköztárak (toolbox-ok) egy-egy tématerület kezeléséhez kialakított eljárások gyűjteménye. Ezek a beépített segédfüggvények a MATLAB® utasításokat tartalmazó „.m” kiterjesztésű fájlok (m-fájlok). Ezek a fájlok ASCII karakterekből állnak és bármilyen szövegszerkesztővel könnyen szerkeszthetők. Két típusuk van, scriptek (utasítások) és függvények. A program a szintaktikailag helyes utasítássorozatokat automatikusan hajtja végre, a kapott eredményeket azonban a hihetőség és a következmények szempontjaiból nem vizsgálja. A felhasználó feladata az eredmények elfogadhatóságának vizsgálata. A MATLAB® parancsok általános szintaktikai felépítése a $[kimenet1, kimenet2, \dots] = parancsnév(bemenet1, bemenet2, \dots)$ alakban adható meg [44].

A MATLAB® Control System Toolbox m-fájlokból álló függvénygyűjtemény, amelyek a lineáris szabályozási rendszerek idő- és frekvenciatartománybeli analízisét és szintézisét segítik. Az eszköztárakban található beágyazott segédfüggvények leírását a program „Help” főmenüje, valamint az [18, 64, 123] irodalmak tartalmazzák.

A rendelkezésre álló [131] irodalomban megtalálható matematikai modellek vizsgálatához az *obsv.m*, *ctrb.m*, *step.m*, *impulse.m*, *lsim.m*, *damp.m*, *pzmap.m*, *bode.m*, *margin.m*, *acker.m*, *lqr.m*, *ssselect.m*, *series.m*, *parallel.m*, *feedback.m* fontosabb beépített segédfüggvényeket, és segédprogramokat használom.

A megfigyelhetőségi vizsgálatok elvégzéséhez, a Kalman-féle megfigyelhetőségi hipermátrix létrehozásához, az *obsv.m* segédfüggvényt alkalmazom. Az $Ob = obsv(A, C)$ szintaktika az állapotteres modellel megadott dinamikus rendszer Ob megfigyelhetőségi mátrixát számítja ki. Az irányíthatósági vizsgálatok elvégzéséhez, a Kalman-féle irányíthatósági hipermátrix létrehozásához, a *ctrb.m* segédfüggvényt használom. A

$Co=ctrb(A,B)$ szintaktika az állapotterres modellel megadott dinamikus rendszer irányíthatósági mátrixának létrehozását támogatja.

Az időtartományban az *impulse.m*, *step.m*, *lsim.m* segédprogramok segítségével végzem vizsgálataim. Az *impulse.m* segédfüggvény segítségével a *sys* rendszer súlyfüggvényét, a *step.m* függvénnyel a rendszer átmeneti függvényét számítom ki. Az *impulse(sys,t)* és a *step(sys,t)* szintaktika alkalmazásához az analízis időtartományát meg kell határozni. Az analízis időtartomány vektora $t=[0:dt:Tfinal]$ szintaktika szerint definiált. Az *lsim.m* segédfüggvény a szabályozási rendszer időtartománybeli vizsgálatát támogatja külső vizsgálójel esetén. Az *lsim(sys,u,t)* szintaktika a *sys* dinamikával megadott Lineáris időinvariáns (LTI) szabályozási rendszer időtartománybeli válaszát számítja ki, ahol *u* a bemeneti vizsgálójel, és *t* az analízis időtartománya. A determinisztikus vizsgálatokhoz használt *u* bemeneti jel az egységsebesség ($u=t$), és a négyzögjel ($u=square(t)$). A sztochasztikus analízisekhez a bemenőjel előállítását a *rand.m* segédfüggvény támogatja, a *rand(m,n)* szintaktikával. A bemenet $m \times n$ méretű véletlenszerűen generált mátrix.

A modellek dinamikájának, minőségi jellemzőinek, sajátértékeinek, csillapítási tényezőinek és a természetes körfrekvenciáinak számításához a *damp.m*, a pólus-zérus kép meghatározásához a *pzmap.m* segédfüggvényeket használom. A $[Wn,Z]=damp(sys)$ szintaktika *Wn* és *Z* oszlopvektorba rendezve megadja az ω_n természetes körfrekvenciákat és a ξ csillapítási tényezőket, míg a $[p,z]=pzmap(sys)$ szintaktika a rendszer pólus-zérus képet ábrázolja. A frekvenciatartománybeli vizsgálatához a *bode.m* beépített segédprogramot használom, ami az LTI rendszer amplitúdó- és a fázis-körfrekvencia függvényeit számítja, *bode(sys,w)* szintaktikával. A parancssor alkalmazásához definiálni kell a *w* frekvenciatartományt. A Bode-diagramok sajátos ábrázolásmódja miatt célszerű a *logspace.m* segédfüggvény segítségével logaritmusos léptékezésű frekvenciatartományt létrehozni, ($w=logspace(wstart,wfinal,dw)$).

A $[mag,phase,w]=bode(sys)$ és a $[mag,phase]=bode(sys,w)$ parancssorok az erősítést, valamint a fokokban mért fázisszöveget számítják ki *w* frekvenciatartományon. Az erősítést a $mag=20*log10(mag)$ parancssorral számíthatjuk át decibelbe. A *margin.m* segédfüggvény a felnyitott szabályozási rendszer erősítés-, és fázistartalékának számítását, és a hozzájuk tartozó nevezetes körfrekvenciák meghatározását támogatja. A *margin(sys)* szintaktika kiszámítja és megrajzolja a felnyitott szabályozási rendszer

Bode-diagramját, és származtatja az erősítési, és a fázistartalékot. A szabályozási rendszer eredő átviteli függvényének számításához a *series.m*, *parallel.m*, *feedback.m*, segédfüggvényeket használom. A *series.m* a rendszerek, vagy tagok soros kapcsolásának matematikai modelljét adja meg. A $sys=series(sys1,sys2,outputs1,inputs2)$ szintaktika az egymással sorba kötött tagok eredő átviteli függvényét számítja. Az *outputs1* és az *inputs2* argumentumok definiálják, hogy a *sys1* rendszer mely *y1* kimenete, és a *sys2* rendszer mely *u2* bemenete kerül összekapcsolásra. A *parallel.m* két, egymással párhuzamosan kötött tag eredő átviteli függvényének számítását végzi, a $sys=parallel(sys1,sys2,inp1,inp2,out1,out2)$ szintaktika alapján. Az *inp1* és az *inp2* változók adják meg, hogy a *sys1* rendszer *u1* bemenet, illetve a *sys2* rendszer *u2* bemenet mely rendezőit kapcsoljuk össze. Az *out1* és az *out2* változók definiálják, hogy a *sys1* rendszer *y1* kimenet, és a *sys2* rendszer *y2* kimenet mely komponenseit összegezzük. A *feedback.m* segédfüggvény a tetszőlegesen visszacsatolt egyváltozós zárt szabályozási rendszerek eredő átviteli függvényét számítja. A $sys=feedback(sys1,sys2)$ szintaktika a negatívan visszacsatolt rendszer eredő *sys* rendszerét hozza létre.

A szabályozó tervezéséhez az *acker.m*, és az *lqr.m* segédfüggvényeket használom. Az *acker.m* segédfüggvény a többváltozós szabályozási rendszerek szabályozóinak tervezését segíti a pólus áthelyezés módszer alkalmazásával. Az egy bemenetű-több kimenetű (SIMO) rendszer állapot-visszacsatolási mátrixát határozza meg, (szintaktikája: $K=acker(A,b,p)$). Az *lqr.m* segédfüggvény a folytonos idejű teljes állapot-visszacsatolású szabályozási rendszerek optimális szabályozóinak tervezését segíti az LQR módszer alkalmazásával. A $[K]=lqr(A,B,Q,R)$ szintaktika biztosítja a teljes állapot-visszacsatolású rendszer **K** visszacsatolási mátrixának kiszámítását. Az eredmények grafikus megjelenítéséhez a *plot.m*, *subplot.m*, *semilogx.m*, *title.m*, *xlabel.m*, *ylabel.m*, *gtext.m*, *grid.m*, *logspace.m* segédprogramokat használom [18, 64, 123].

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A fejezet fontosabb következtetései az alábbiak:

1.
 - Az egyváltozós (egy bemenetű, egy kimenetű) zárt szabályozási rendszerek szabályozóinak tervezésére számos klasszikus eljárás áll rendelkezésünkre. A klasszikus szabályozótervezési módszerek alapvetően grafo-analitikus módszerek,

melyek alkalmazása a tervezők részéről nagyfokú tapasztalatot igényel, sokszor nem nélkülözve a mérnöki-tervezői intuíciót sem.

- A klasszikus szabályozótervezési eljárások csak determinisztikus rendszerre alkalmazhatók. Ez azt jelenti, hogy a szabályozási rendszerre ható külső és belső sztochasztikus zajokat elhanyagoljuk: vagyis feltételezzük, hogy a szabályozási rendszer ideális (idealizált) környezetben működik.

2.

- Egyváltozós, determinisztikus szabályozási rendszerek időtartománybeli tervezésére számos integrálkritérium áll rendelkezésünkre. Az integrál kritériumok megfelelő kiválasztása a gyakorlatban meglehetősen nehéz és sokrétű feladat. Egy-egy integrálkritérium alapján megtervezett zárt szabályozási rendszer az adott integrálkritérium tekintetében optimálisnak mondható, míg az összes többi integrálkritérium szempontjából nem feltétlenül optimális.
- A gyakorlatban a leginkább elterjedt integrálkritériumok az ITAE, és az ISE kritériumok.

3.

- Az első fejezetből ismert, hogy a pilóta nélküli és a repülőgép vezető által vezetett repülőgépek repülésmechanikai matematikai modelljei, még zavarásmentes esetben is többváltozósak: tehát több bemenettel, és több kimenettel rendelkeznek. Ebből következik, hogy a légi járművek robotpilótái csak az állapotterén tervezhetők.
- Modern szabályozástechnikában többváltozós szabályozási rendszerek tervezésére számos módszer ismert. Ezek a módszerek lehetővé teszik az optimális, vagy nem optimális szabályozási rendszerek tervezését determinisztikus és sztochasztikus rendszerek esetén is.

Dolgozatom további fejezeteiben a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép robotpilótája szabályozójának előzetes tervezésére a pólus áthelyezés-, és a négyzetes integrálkritériumon alapuló (LQR) módszereket alkalmazom.

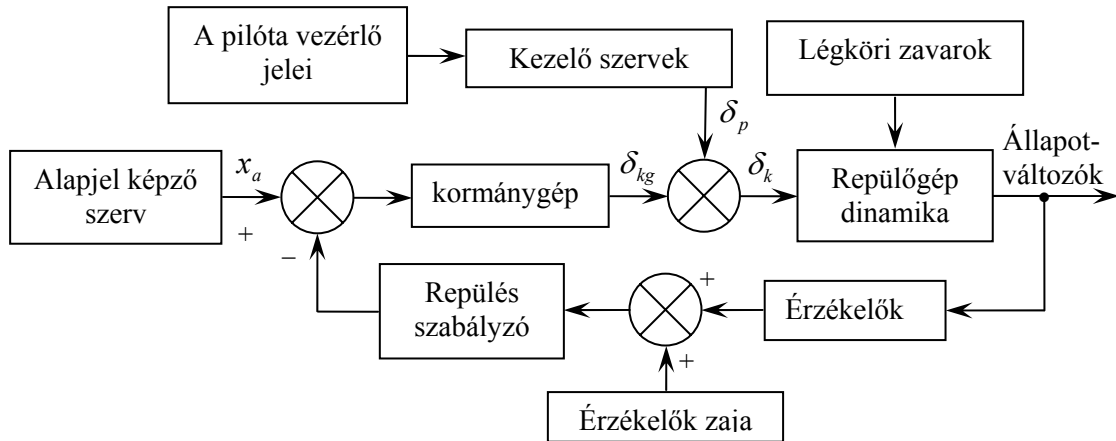
3. REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZER SZABÁLYOZÓJÁNAK ELŐZETES MÉRLETEZÉSE

A harmadik fejezetben bemutatom a repülőgépeken alkalmazott robotpilóták általános felépítését, és működési elvét, valamint szakirodalmi hivatkozások felhasználásával meghatározom a repülésszabályozó rendszer tervezéséhez szükséges irányítástechnikai minőségi követelményeket. Elvégzem a Szojka–III repülőgép rendszeranalízisét idő- és frekvenciatartományban. Az irányítástechnikai minőségi követelmények figyelembevételével megvalósítom a repülőgép szabályozójának előzetes tervezését. Megvizsgálom a szabályozási rendszer működését idő- és frekvenciatartományban.

3.1. Robotpilóta rendszerek általános felépítése és működési elve

A repülőgépek tervezésének korai szakaszában a kormányzás alapvető eszközei a pilóta és a kormányszervek 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 repülőgépvezetés 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 [50, 51, 56].



3.1. ábra. A robotpilóta rendszer általános felépítése

A repülőgép robotpilóta rendszerének működési vázlatát a 3.1. ábrán látható. A repülésszabályozó 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. A pilóta nélküli repülőgépek automatikus repülésének megtervezésekor a repülőgép repülési pályáját, repülési magasságát, sebességét, irányát, egyéb más repülési jellemzőjét az idő függvényében adjuk meg.

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 eltérés elve, majd egy másik repülési fázisban a kompenzáció elve alapján működik a repülésszabályozó rendszer). Az eltérés elve alapján működő, a 3.1. 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 [1, 7, 12, 66, 71, 94, 87, 110].

Robotpilótákkal szemben támasztott általános követelmények az alábbiak [68, 69, 70]:

- 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 méretekkkel rendelkezzen.

3.2. A robotpilóták irányítástechnikai minőségi követelményei

A pilóta nélküli 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.

Értekezésem elkészítése során olyan módszer kidolgozását tűztem ki célul, amely lehetővé teszi a légi jármű típusától és rendeltetésétől független szabályozótervezést és rendszeranalízist. A dolgozatban bemutatott módszert a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép robotpilótája előzetes tervezésére alkalmazom.

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép méreteit, tehetetlenségi nyomatékait, a statikus stabilitási tényezőket, valamint a dinamikus modellek állapotegyenleteit a [131] szakirodalom tartalmazza. Az analíziseket a [131] irodalomban, és az 1. sz. mellékletben megta-

lálható matematikai modellek segítségével, a 3.1. táblázat szerinti repülési üzemmódokon végeztem el.

3.1. táblázat. A Szojka–III repülőgép vizsgált repülési üzemmódjai

	Repülési üzemmódok									
	Hosszirányú mozgás					Oldalirányú mozgás				
	1.	2.	3.	4.	5.	1.	2.	3.	4.	5.
Repülési sebesség, $\left[\frac{km}{h}\right]$	110	130	150	170	190	110	130	150	170	190
Repülési magasság	$H = 400 \text{ m}$									
Felszálló tömeg	$m = 135 \text{ kg}$									

A szabályozási rendszerekkel szemben támasztott alapvető követelmény a szabályozott jellemző elvárt időkézés és hiba nélküli alapjel-követése 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 során fontos szempont az állandósult állapotbeli (maradó) szabályozási hiba minimalizálása.

Dolgozatom elkészítése során kiemelten kezeltem a pilóta nélküli repülőgépek kormányozhatósági-, irányíthatósági-, valamint irányítástechnikai minőségi követelményeit meghatározó szabványok felkutatását. Kutató munkám során tanulmányoztam a belföldi és a külföldi könyvtárak nyilvános adatbázisait, a hazai és a nemzetközi, katonai és polgári légügyi hatóságok weboldalain elérhető nyilvános adatbázisokat. A kutatásaim eredményeképpen megállapítottam, hogy a pilóta nélküli repülőgépekre vonatkozó minőségi követelményeket magába foglaló szabványok mind a mai napig nem készültek el, vagy tekintettel azok minősítésére, nem nyilvánosak, és nem hozzáférhetők.

A [142] irodalom a pilóta nélküli repülőgépek légi alkalmassági és biztonsági minőségi követelményeire a pilóta által vezetett repülőgépekre vonatkozó FAA 23 AC 23.13.09–1C (Equipment, Systems and Installations) szabvány alkalmazását javasolja.

Mivel a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép alapvetően katonai (felderítési, tüzérségi tűzhelyesbítési, harcmező kárfelmérési, digitális térképezési, célmegjelölési stb.) alkalmazásokat támogat, ezért a repülőgép robotpilótájának előzetes tervezése során, a Ma-

gyarországon is rendelkezésre álló, nem minősített katonai szabványgyűjteményeket alkalmaztam [68, 69, 70]. A [68, 69, 70] irodalmakban megfogalmazott irányítástechnikai minőségi követelményeket a 3.2.a., 3.2.b. táblázat tartalmazza.

3.2.a. táblázat. Minőségi követelmények, hosszirányú mozgás

Hosszirányú mozgás		
Csillapítási tényező	$0,5 \leq \xi < 1$	
Bólintási szögstabilizálás pontossága (statikus hiba)	Turbulencia mentes légkör esetén	$\pm 0,5^\circ$
	Turbulencia esetén	$\pm 5^\circ$
Erősítési tartalék	$> 8\text{dB}$	
Fázis tartalék	$> 60^\circ$	
holtidő	$t_h \leq 0,2 \text{ sec}$	
Bólintási szög tranziens idő	$t = 2-3 \text{ sec}$	

3.2.b. táblázat. Minőségi követelmények, oldalirányú mozgás

Oldalirányú mozgás		
Bedöntési szög stabilizálás csillapítási tényezője	$0,6 \leq \xi < 1,2$	
Bedöntési szögstabilizálás pontossága (statikus hiba)	Turbulencia mentes légkör esetén	$\pm 1^\circ$
	Turbulencia esetén	$\pm 10^\circ$
Írányszög-stabilizálás pontossága (statikus hiba)	Turbulencia mentes légkör esetén	$\pm 0,5^\circ$
	Turbulencia esetén	$\pm 5^\circ$
Csillapított repülőgép időállandója	$\tau_\gamma = 1,4-3 \text{ sec}$	
Dőlési csillapító automata túlszabályozása	$< 60^\circ$	
bedöntési szög 30° -ra beállítás	$\leq 3,9 \text{ sec}$	
Holtidő	$t_h \leq 0,2 \text{ sec}$	
Erősítési tartalék	$> 8\text{dB}$	
Fázis tartalék	$> 60^\circ$	

A szabályozótervezés célja, hogy adott irányítástechnikai minőségi követelményeknek megfelelő szabályozási rendszert hozzunk létre, amely magába foglalja a szabályozási struktúra, a szabadon választható jelek és paraméterek alkalmas megválasztását. A tényleges szabályzó kialakítását természetesen ezeken kívül még számos más tényező (eszközméretezés, energiafelhasználás, üzemi környezet, technológia, gazdasági és üzembiztonsági szempontok stb.) is befolyásolja [124, 135].

A szabályozó előzetes méretezéséhez megfogalmazott általános elvárások:

- maradó hiba nélkül, vagy megengedett értékű statikus hibával kövesse az egyes repülési paraméterek alapjeleit;

- legyen képes kiszűrni, vagy csillapítani a zárt szabályozási rendszerre ható sztochasztikus zajokat és zavarásokat;
- a repülőgép robotpilótája, mint zárt szabályozási rendszer feleljen meg a [68, 69, 70] irodalmakban meghatározott minőségi követelményeknek.

3.3. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép analízise időtartományban

A pilóta nélküli repülőgép, mint nemirányított szakasz minőségi jellemzőinek megismerése, és összevetése a zárt robotpilóta rendszerekkel szemben támasztott minőségi követelményekkel, lehetőséget teremt az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények biztosításához szükséges szabályozó megtervezésére.

A dolgozat korábbi fejezeteiből ismert, hogy a robotpilótákkal szemben támasztott alapvető követelmény a megfelelő pontosságú alapjel-követés. A gyakorlatban a robotpilóta alapjel-követését 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, vagyis [14, 22, 36, 94, 102, 130, 136]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0 \quad (3.1)$$

- $x_a(t) = 1(t)$, 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 időkézés 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 jellemzőit az átmeneti függvényből szokás származtatni. Ha a vizsgált jellemző az átmeneti folyamat lezajlása után egy új állandósult állapotnak megfelelő értéket vesz fel, vagyis:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = konst, \quad (3.2)$$

akkor a zárt szabályozási rendszer stabil. Más szóval, a zárt szabályozási rendszer korlátos bemeneti jelre korlátos válaszjellel reagál [36, 45].

- $x_a(t) = t$, egységsebesség jel.

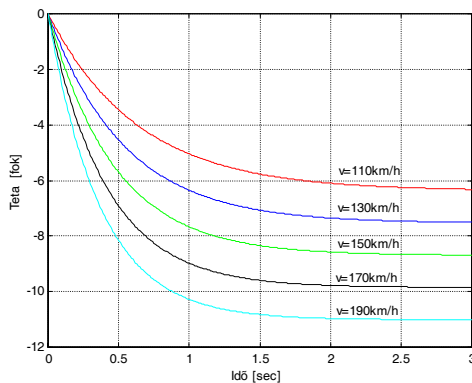
A robotpilóta magasságstabilizáló funkciójának vizsgálatára alkalmazom ezt a bemenőjelet. A repülési magasság egységsebesség jel szerinti változásának követése nem jelent mást, mint a repülőgép emelkedését adott meredekségű pályán.

- előjelváltó négyszögjel

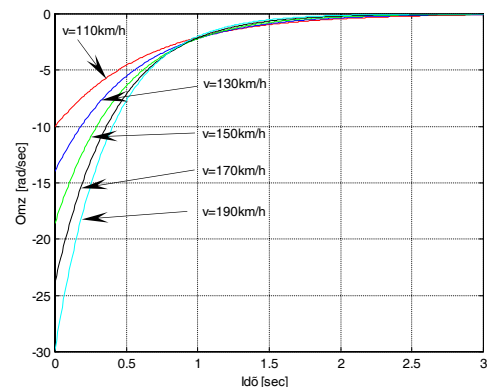
Ezt a bemeneti jelet a robotpilóta magasságstabilizáló rendszerének vizsgálatára használom. Pilóta nélküli repülőgépek kis magasságú repülésének automatizálása során, a legfontosabb megoldandó feladat a repülési magasság profiljának megfelelő megválasztása. A repülési pálya tervezésekor előfordul, hogy 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 sokszor nem csak a felsorolt elemi determinisztikus vizsgáló jelekkel, hanem több elemi jel lineáris kombinációjával létrehozott összetett jellel folytatjuk le.

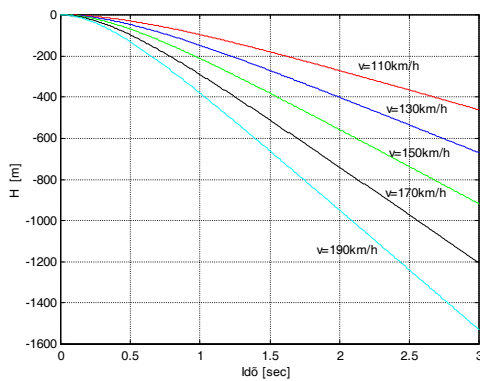
A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép hosszirányú nemirányított mozgása súlyfüggvényeinek meghatározásakor a repülőgép bemeneti jele legyen a magassági kormány Dirac-impulzus jellegű kitérítése. A repülőgép kimeneti válasz jelei, pedig a hosszirányú mozgás (ϑ , H , ω_z) állapotváltozói. Az állapotváltozók repülési sebességben paraméterezett súlyfüggvényei a 3.2., 3.3., 3.4. ábrákon láthatók.



3.2. ábra. A bólintási szög impulzusválasz függvénye



3.3. ábra. A bólintási szögsebesség impulzusválasz függvénye

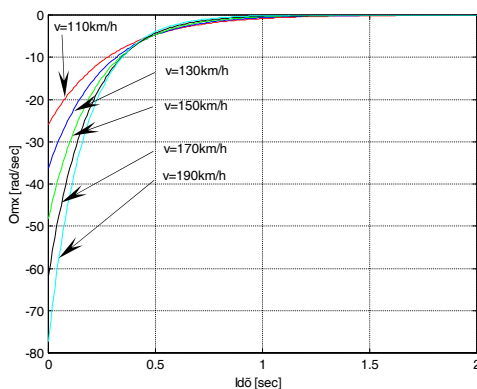


3.4. ábra. A magasság impulzusválasz függvénye

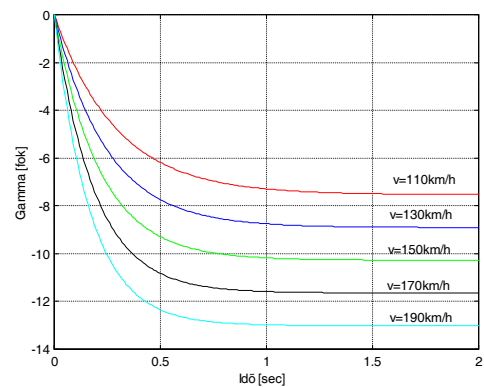
A 3.2. ábrán látható, hogy a vizsgált repülési üzemmódokon a nemirányított rendszer válasza a Dirac-impulzus gerjesztésre kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ esetén a repülési sebesség növekedésével a stacioner állapot abszolút értéke nő. A 3.3. ábrán az impulzus válasz függvény transziens folyamata exponenciális, majd $t \rightarrow \infty$

estén a repülési sebesség értékétől függetlenül zérushoz tart. A 3.4. ábrán a repülési magasság súlyfüggvényei $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan széttartóvá válnak, vagyis a repülőgép egyensúlyi helyzetéből kitér, és oda nem tér vissza.

A vizsgált repülőgép nem irányított oldalirányú mozgása (ω_x, γ) állapotváltozóinak transziens analízise során a repülőgép bemeneti jele legyen csűrőlapok Dirac-impulzus jellegű kitérítése. A mozgás állapotváltozóinak viselkedése a 3.5. és a 3.6. ábrákon látható.



3.5. ábra. Az orsózó szögsebesség impulzusválasz függvénye



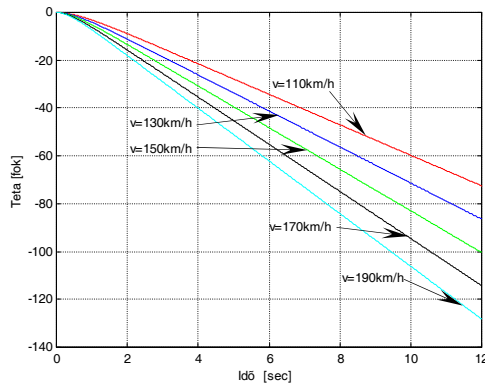
3.6. ábra. A bedöntési szög impulzusválasz függvénye

A 3.5. ábráról leolvasható, hogy az orsózó szögsebesség impulzusválasz függvénye kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ estén minden vizsgált üzemmódon zérushoz tart. A 3.6. ábrán a nemirányított rendszer válasza a Dirac-impulzus gerjesztésre kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ esetén a repülési sebesség függvényében konstans értékre áll be.

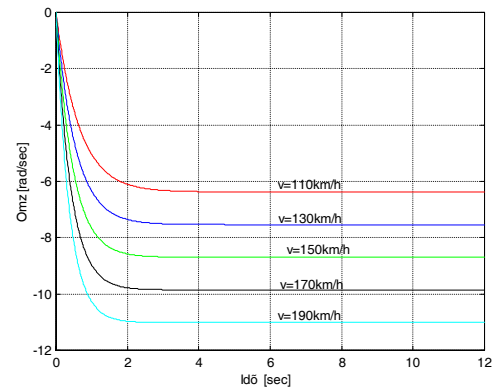
A továbbiakban a Szojka–III repülőgép átmeneti függvényeit vizsgálom. Az átmeneti függvények meghatározása során a repülőgép bemeneti jelének tekintem a

magassági kormány egységugrás jellegű kitérítését, kimeneti jelnek, pedig a hosszirányú nem irányított mozgás (ϑ , H , ω_z) állapotváltozóit.

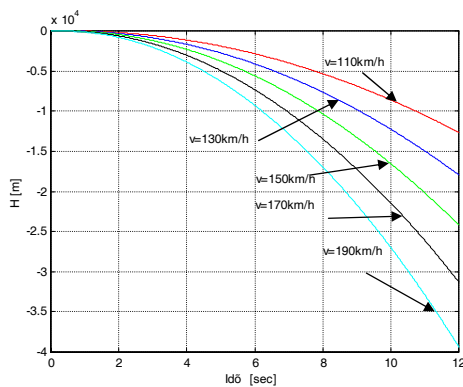
A hosszirányú mozgás állapotváltozóinak repülési sebességben paraméterezett átmeneti függvényei a 3.7., 3.8., 3.9. ábrákon láthatók.



3.7. ábra. A bólintási szög átmeneti függvénye



3.8. ábra. A bólintási szögsebesség átmeneti függvénye

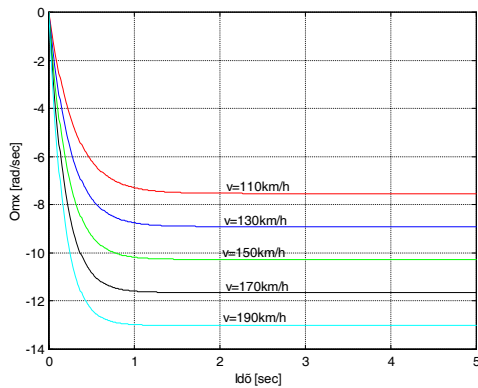


3.9. ábra. A magasság átmeneti függvénye

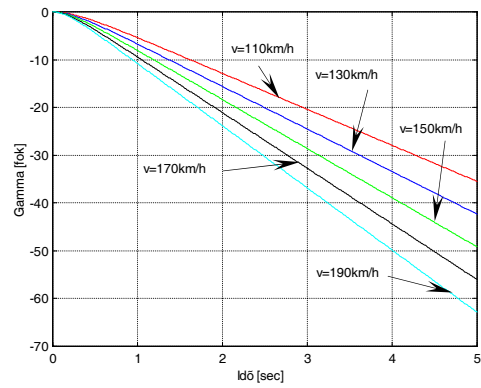
A repülési magasság átmeneti függvényei $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan széttartóvá válnak.

A 3.7. ábrán a bólintási szög értéke $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan széttartóvá válik. A 3.8. ábrán a bólintási szögsebesség időfüggvénye kezdetben exponenciálisan változik, és $t \rightarrow \infty$ esetén konstans értékűvé válik. A repülési sebesség növekedésével a stacioner állapot abszolút értéke nő. A 3.9. ábrán látható, hogy a

Határozzuk meg a Szojka–III repülőgép oldalirányú nem irányított mozgásának átmeneti függvényeit. Az átmeneti függvény meghatározása során legyen a repülőgép bemeneti jele a csűrőlapok egységugrás jellegű kitérítése. A repülőgép oldalirányú nemirányított mozgása állapotváltozóinak tranziens viselkedése a 3.10., 3.11. ábrákon látható. A 3.10. ábrán az orsózó szögsebesség időbeli lefolyása kezdetben exponenciálisan változó jellegű, majd $t \rightarrow \infty$ esetén a repülési sebesség növekedésével növekvő abszolút értéket vesz fel. A 3.11. ábra alapján megállapítható, hogy a bedöntési szög időfüggvényei $t \rightarrow \infty$ esetén aperiodikusan széttartóvá válnak.



3.10. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvénye



3.11. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvénye

A Szojka–III repülőgép robotpilótájának megtervezéséhez szükséges a nemirányított repülőgép hosszirányú- és oldalirányú mozgása minőségi jellemzőinek ismerete. Az értekezés 1. sz. mellékletében megadott identifikált repülésmechanikai matematikai modellek alapján meghatároztam a Szojka–III repülőgép nemirányított mozgásának irányítástechnikai minőségi jellemzőit. Az oldalirányú mozgás irányítástechnikai minőségi jellemzőit a 3.3. táblázat, míg a hosszirányú mozgás irányítástechnikai minőségi jellemzőit a 3.4. táblázat foglalja össze.

3.3. táblázat. Az oldalirányú mozgás minőségi jellemzői

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-3,44	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	3,44
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-4,07	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	4,07
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-4,69	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	4,69
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-5,32	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	5,32
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0
-5,94	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	5,94

A 3.3. táblázatból kiolvasható, hogy az oldalirányú mozgás karakterisztikus egyenletei az origóban, és a negatív tengelyen elhelyezkedő pólusokkal rendelkeznek. A csillapítási tényező értéke -1 és 1.

3.4. táblázat. A hosszirányú mozgás minőségi jellemzői

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlendések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-1,57	1	$0,5 \leq \xi < 1$	1,57
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-1,85	1	$0,5 \leq \xi < 1$	1,85
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-2,14	1	$0,5 \leq \xi < 1$	2,14
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-2,42	1	$0,5 \leq \xi < 1$	2,42
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
0	-1	$0,5 \leq \xi < 1$	0
-2,71	1	$0,5 \leq \xi < 1$	2,71

A 3.4 táblázatban látható, hogy a repülőgép hosszirányú mozgását leíró egyenletek a vizsgált üzemmódokon az origóban és a negatív valóstengelyen elhelyezkedő pólusokkal rendelkeznek. A ξ csillapítási tényező értéke -1 és 1.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A 3.2.a. és 3.2.b. táblázatban összefoglalt előírt irányítástechnikai minőségi követelmények, és a Szojka-III pilótánélküli repülőgép nemirányított oldal- és hosszirányú

mozgásának 3.3. és 3.4. táblázatokban felsorolt irányítástechnikai minőségi jellemzőinek összevetéséből az alábbi megállapításokat tettem:

- A Szojka–III repülőgép hosszirányú mozgásának két állapotváltozója negatív csillapítási tényezővel rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy a nemirányított repülőgép instabil. Az instabil viselkedés a 3.2. és 3.4. ábrákon is jól megfigyelhető.
- A Szojka–III repülőgép nemirányított hosszirányú mozgásának harmadik ω_z összetevőjének (állapotváltozójának) csillapítási tényezője 1, amely nagyobb, mint az előírt. Ezt a csillapítási tényezőt csökkenteni kell.
- A Szojka–III repülőgép nemirányított oldalirányú mozgásának egyik összetevője (dőlési szög) negatív csillapítási tényezővel rendelkezik, vagyis a repülőgép instabil.

Következtetések:

A fenti megállapítások alapján az alábbi következtetésekre jutottam:

- A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép nemirányított hosszirányú-, és oldalirányú mozgása instabil. A nemirányított repülőgép a komplex síkon az origóban elhelyezkedő pólusokkal, valamint negatív értékű csillapítási tényezővel rendelkezik.
- A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép kézi távvezérelt kormányzása, valamint az automatizált irányítása egyaránt megköveteli a stabilis működést.
- A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép stabilitási problémáinak megoldására, valamint az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények biztosítására pólus áthelyezést megvalósító, teljes állapotvisszacsatolású zárt szabályozási rendszer megtervezését javasoltam.

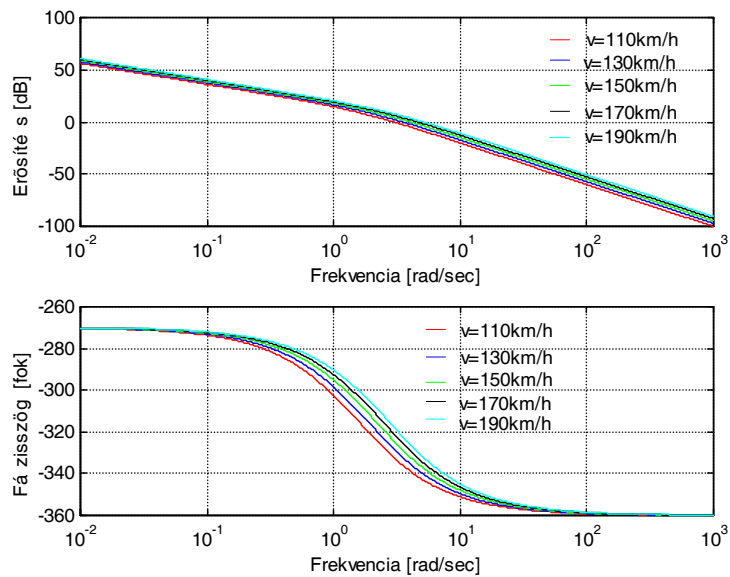
3.4. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép analízise frekvenciatartományban

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, és szemléletes.

A repülőgépet térbeli mozgása során a frekvenciatartományban jól leírható külső és nagyfrekvenciás belső zavaró jelek gerjesztik. A fellépő külső és belső zajok repülő-

gépre gyakorolt hatásának ismerete szükséges, hogy a megfelelő minőségi jellemzőket biztosító szabályozási rendszert megtervezhessük [45, 46, 93, 102, 136].

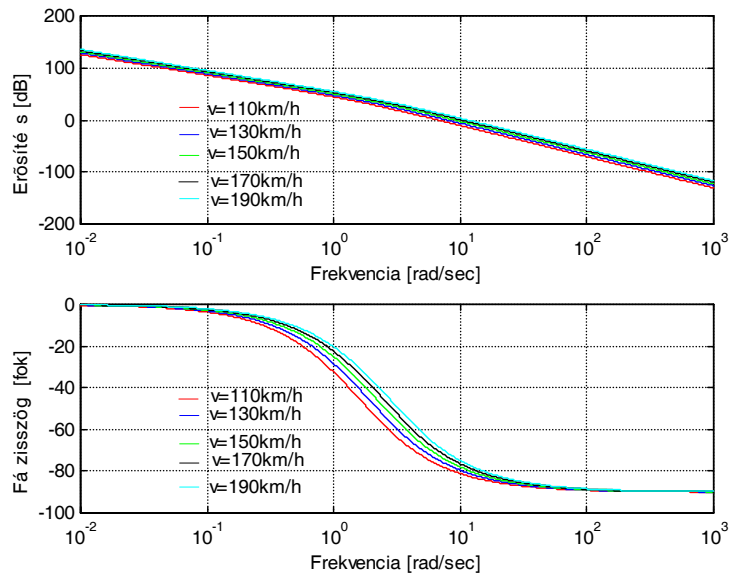
A 3.12., 3.13., 3.14. ábrákon a nemirányított repülőgép hosszirányú mozgásjellemzőinek Bode-diagramjai láthatók. A 3.12. ábráról leolvasható, hogy a bólintási szög Bode-diagramja (amplitúdó karakterisztikája) a repülési sebesség növekedésével kismértékben nő. Az erősítés — a frekvencia növekedésével — monoton csökkenő jellegű. A 3.12 ábrán jól látható, hogy az $f \cong 1,567 \text{ sec}^{-1}$ törésponti frekvencián az erősítés körfrekvencia jelleggörbe meredeksége $-20\text{dB} \cdot \text{D}^{-1}$ -al növekszik, és a vágási körfrekvencián a meredeksége nagyobb, mint $-40\text{dB} \cdot \text{D}^{-1}$.



3.12. ábra. A bólintási szög Bode-diagramja

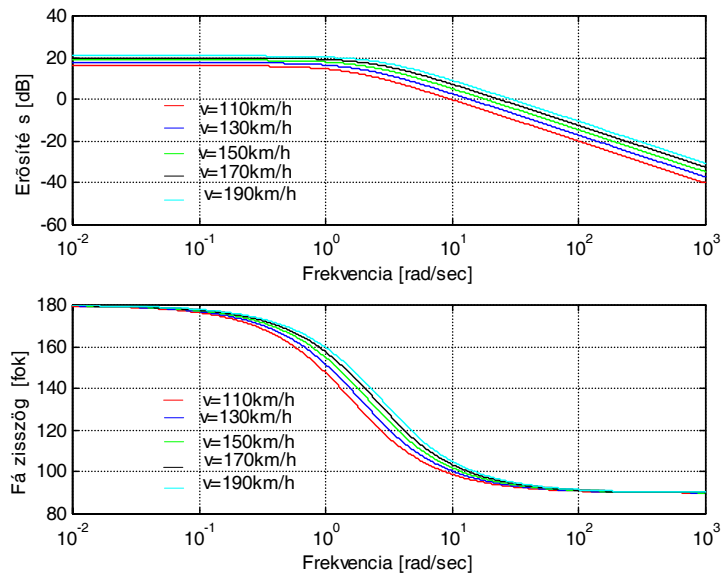
A stabilitás eldöntéséhez meghatároztam a nemirányított repülőgép erősítési-, és fázistartalékát, amelyekre zérus értékeket kaptam. A Bode stabilitási kritérium felhasználásával megállapítottam, hogy a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép a „bólintási szög – magassági kormány” csatorna tekintetében instabil viselkedésű.

A 3.13. ábrán látható, hogy a magasságváltozás amplitúdó karakterisztikája a frekvencia növekedésével, a vizsgált tartományon monoton csökkenő. A repülési sebesség növekedésével az erősítés értéke kismértékben nő.



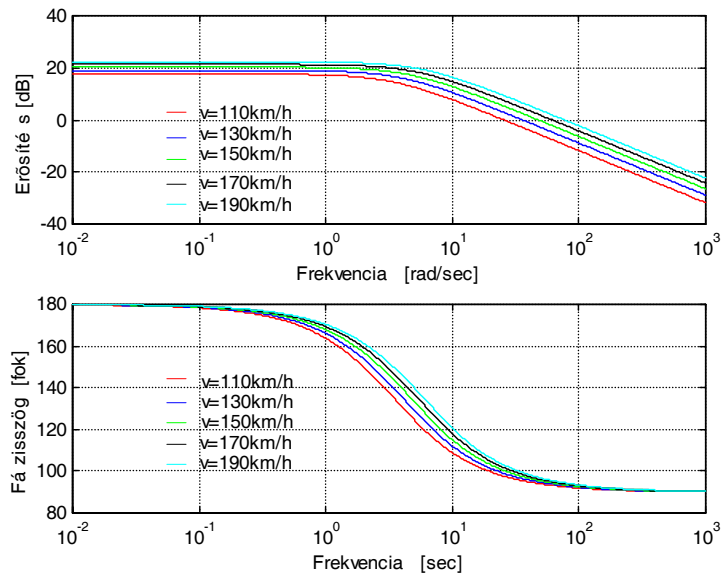
3.13. ábra. A repülési magasság Bode-diagramja

A 3.14. ábrán a bólintási szögsebesség Bode-diagramja látható. Az erősítés a kis frekvenciás tartományon konstans, a törésponti frekvenciától nagyobb frekvenciákon monoton csökkenő jellegű. Az erősítés- és a fáziskarakterisztika egytárolós jellegű.



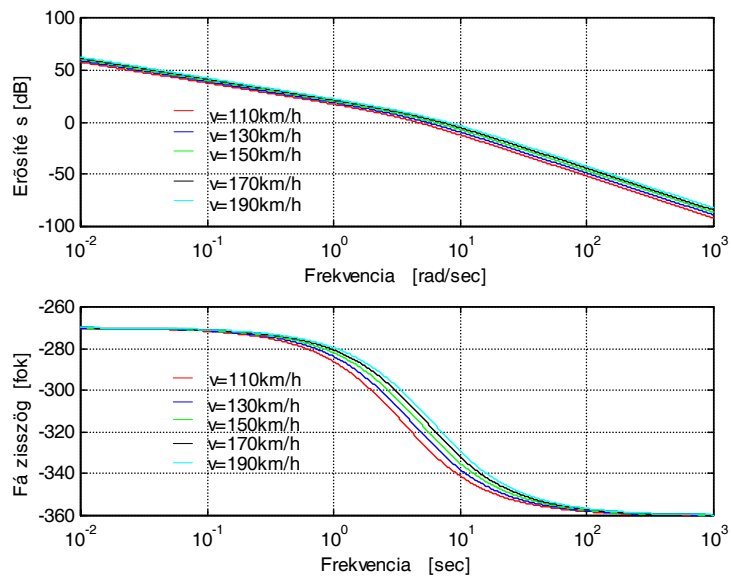
3.14. ábra. A bólintási szögsebesség Bode-diagramja

A 3.15. és a 3.16. ábrákon az oldalirányú mozgás állapotváltozóinak Bode-diagramjait látjuk. A 3.15. ábra alapján könnyen belátható, hogy az amplitúdó karakterisztika kis- és közepes frekvencia tartományon frekvencia független. A törésponti frekvenciától nagyobb frekvenciákon monoton csökkenő értékeket vesz fel. A repülési sebesség növekedésével az erősítés abszolút értéke nő. Az erősítés-, és fáziskarakterisztika a bólintási szög karakterisztikáihoz hasonlóan egytárolós jellegűt mutat.



3.15. ábra. Az orsózó szögsebesség Bode-diagramja

A 3.16. ábrán a bedöntési szög amplitúdó- és fázis karakterisztikái láthatók.



3.16. ábra. A bedöntési szög Bode-diagramja

A karakterisztikák kisfrekvenciás tartományban a repülési sebességtől függetlenül gyakorlatilag együtt futnak. A térbeli mozgás állapotváltozóinak minőségi jellemzői lényegében nem függenek a repülési sebességtől. Az amplitúdó-, és a fázistartalék az összes vizsgált repülési üzemmódon nulla [11, 18, 19, 20, 64, 65, 104, 105, 107, 123].

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett vizsgálatok és a számítógépes szimulációk eredményei alapján megállapítottam,

- hogy a repülési sebesség növekedésével az erősítés, és a fázisszög értéke — állandó frekvencián — növekszik;
- hogy a frekvencia növekedésével — állandó sebesség mellett — az erősítés, és a fázisszög értéke csökken;
- hogy a Szojka–III repülőgép hosszirányú nemirányított mozgása instabil;
- hogy a Szojka–III repülőgép oldalirányú nemirányított mozgása instabil;

Az összes vizsgált repülési üzemmódra (az oldal-, és a hosszirányú mozgásra) meghatároztam az erősítési-, és a fázistartalékokat, amelyek kivétel nélkül zérusértékűek voltak, amelyek nyilvánvalóan nem felelnek meg az előírt irányítástechnikai minőségi követelményeknek.

Következtetések:

A fenti megállapítások alapján az alábbi következtetésekre jutottam:

- a repülőgép biztonságos légi üzemeltetéséhez szükséges egy repülésszabályozó rendszer, ami biztosítja a repülőgép stabilitását;
- A stabilitást biztosító robotpilótát úgy kell megtervezni, hogy az eleget tegyen a tervezés során előírt irányítástechnikai minőségi követelményeknek is.

3.5. A szabályozó előzetes tervezése LQR módszerrel

3.5.1. Az előzetes szabályozótervezés és alkalmazása

Az LQR feladat megoldása során alkalmazott súlyozó mátrixok előzetes beállítására az egységnyi, azonos súlyozás elvét, vagy a reciprok négyzetes szabályt alkalmazhatjuk. Ha nem ismertek az \mathbf{x} , és az \mathbf{u} vektorok korlátozásai, akkor alkalmazhatjuk az egységnyi, vagy azonos súlyozás elvét. Ennek a módszernek a lényege, hogy az \mathbf{x} állapotvektor rendezőit súlyozó \mathbf{Q} és az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} mátrix összes főátlón álló elemét egységnyi értékűnek választjuk [71, 75, 91, 124].

Másik lehetőség a reciprok négyzetes módszer alkalmazása, melynek lényege, hogy az egyes állapotváltozókra a tervezők biztonsági, vagy egyéb más okok, mint pl. a repülőgép manőverező képessége stb. miatt korlátozásokat vezetnek be. Így a szabályozási rendszer \mathbf{x} állapot-, és az \mathbf{u} bemeneti vektorának rendezői ismertté válnak. Ezeknek a korlátozott állapotváltozóknak az abszolút értékét négyzetre emeljük és vesszük a reciprok értékét. Az \mathbf{x} állapotvektor rendezőit súlyozó \mathbf{Q} diagonális mátrix elemeinek számítását a $q_{ii} = \frac{1}{|x_{i\max}(t)|^2}$ (q_{ii} az állapotvektor rendezőit súlyozó pozitív skalár, $x_{i\max}(t)$ az egyes állapotváltozók maximális értéke), az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} diagonális mátrix elemeit a $r_{ii} = \frac{1}{|u_{i\max}(t)|^2}$ (r_{ii} az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} diagonális mátrix főátlón álló elemei, míg az $u_{i\max}(t)$ az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőinek maximális értéke) képletek segítségével számíthatjuk ki [2, 91, 93, 98, 109, 115, 119, 120].

Az előzőekben ismertetett módszerek segítségével elvégezzük az előzetes szabályozótervezést, majd összekapcsoljuk a szabályozott szakasszal. A felnyitott szabályozási kör frekvenciatartománybeli analízise után a \mathbf{K} optimális, teljes állapot visszacsatolási mátrixon keresztül zárjuk a szabályozási rendszert, és végrehajtjuk a zárt szabályozási rendszer időtartománybeli vizsgálatát. Ha a felnyitott-, és a zárt szabályozási rendszer minőségi jellemzői nem felelnek meg az előírt követelményeknek, akkor a \mathbf{Q} és az \mathbf{R} mátrixok elemeit heurisztikus módon addig hangoljuk, míg a rendszer teljesíti az előírt minőségi követelményeket. Ha heurisztikus hangolással sem teljesíthetők az előírt minőségi követelmények, javasolt más szabályozótervezési módszer választása [66, 68, 69, 70].

3.5.2. Az LQR feladat megoldása

A tervezés folyamán keressük az optimális vezérlési törvényt, amely a költségfüggvény minimalizálásával a lineáris rendszert egyik egyensúlyi állapotából a másikba viszi át [71, 76, 124]. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép dinamikáját az (1.16) egyenlet 1. mellékletben található adatokkal feltöltött mátrixokkal adja meg. A repülőgép mozgásának vizsgált állapotvektorai hosszirányú mozgás esetén:

$$\mathbf{x}_h^T = [\mathcal{G} \quad H \quad \omega_z], \quad (3.3)$$

oldalirányú mozgás esetén:

$$\mathbf{x}_o^T = [\omega_x \quad \gamma] \quad (3.4)$$

A repülőgép a magassági kormány és a csűrőlapok segítségével kormányozható, a szögkitérésekkel arányos jelek, mint bemeneti paraméterek értelmezhetők:

$$\mathbf{u}_h = u_h = \delta_m \quad (3.5)$$

$$\mathbf{u}_o = u_o = \delta_{cs} \quad (3.6)$$

A (2.20) integrálkritérium lokális minimalizálásához szükséges definiálni a \mathbf{Q} és az \mathbf{R} mátrixokat, melyek segítségével meghatározható a (2.21) optimális vezérlési törvény.

A [131] szakirodalom a Szojka–III repülőgépnek sem a hosszirányú, sem az oldalirányú állapotváltozóinak maximális értékéről nem ad információt, így a súlyozó mátrixok előzetes beállítására az egységnyi súlyozás elvét alkalmazom. Első lépésként az \mathbf{u} bemeneti vektor rendezőit súlyozó \mathbf{R} diagonális mátrix, valamint az \mathbf{x} állapotvektor rendezőit súlyozó \mathbf{Q} diagonális mátrix főátlóin álló elemeit egységnyinek választom.

A (2.20) integrálkritérium minimalása során, tehát az alábbi súlyozó mátrixokat

alkalmazom: $\mathbf{Q}_{h1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}_{h1} = 1$. A választott súlyok alkalmazásával a repülő-

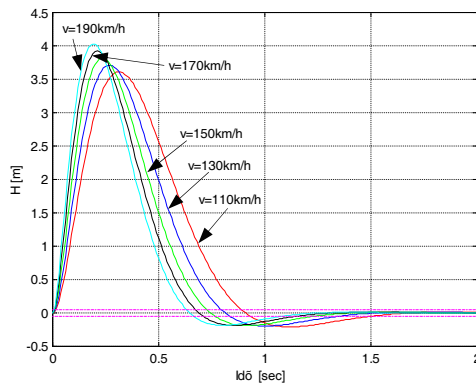
gép hosszirányú irányítási csatornáinak optimális teljes állapot-visszacsatolási mátrixai az alábbiak:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{h1} &= [-10,4309 \quad -1 \quad -1,6073], & \mathbf{K}_{h2} &= [-10,8014 \quad -1 \quad -1,4689] \\ \mathbf{K}_{h3} &= [-11,1835 \quad -1 \quad -1,3739], & \mathbf{K}_{h4} &= [-11,5708 \quad -1 \quad -1,3056] \\ \mathbf{K}_{h5} &= [-11,9593 \quad -1 \quad -1,2547] \end{aligned} \quad (3.7)$$

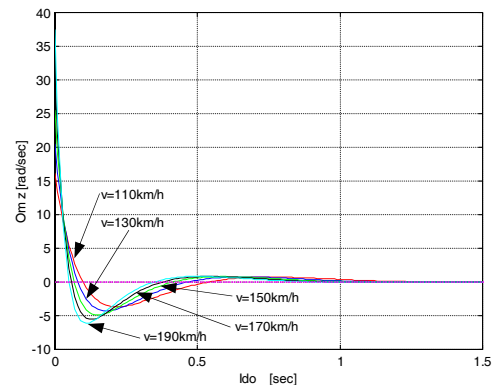
Az előzőekhez hasonlóan a Szojka–III repülőgép oldalirányú irányítási csatornájának tervezése során is az egységnyi súlyozást biztosító $\mathbf{Q}_{o1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}_{o1} = 1$ mátrixokat használom. Az egységnyi súlyok alkalmazásával meghatároztam a Szojka–III repülőgép oldalirányú irányítási csatornájának optimális teljes állapot-visszacsatolási mátrixait, melyek a következők:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{o1} &= [-0,9136 \quad -1], & \mathbf{K}_{o2} &= [-0,9211 \quad -1] \\ \mathbf{K}_{o3} &= [-0,9278 \quad -1], & \mathbf{K}_{o4} &= [-0,9337 \quad -1] \\ \mathbf{K}_{o5} &= [-0,9389 \quad -1] \end{aligned} \quad (3.8)$$

A hosszirányú mozgás állapotváltozói közül a továbbiakban csak a magasságstabilizáló rendszer tervezéséhez szükséges magasság, és bólintási szögsebesség függvényeket vizsgálom. A 3.17. – 3.20. ábrákon az egységimpulzus bemenőjelre kapott kimeneti jeleket láthatjuk. A 3.17. ábrán látható, hogy a függvények tranziensideje $1 < t_{tr} \leq 1,55 \text{ sec}$, a repülési sebességtől függően. Így a magasság súlyfüggvényei eleget tesznek a stabilitás feltételének, kezdeti — a repülési sebességtől függően — 3,5–4 méteres túllendülés után a tranziens idő leteltével visszatérnek kezdeti állapotukba.

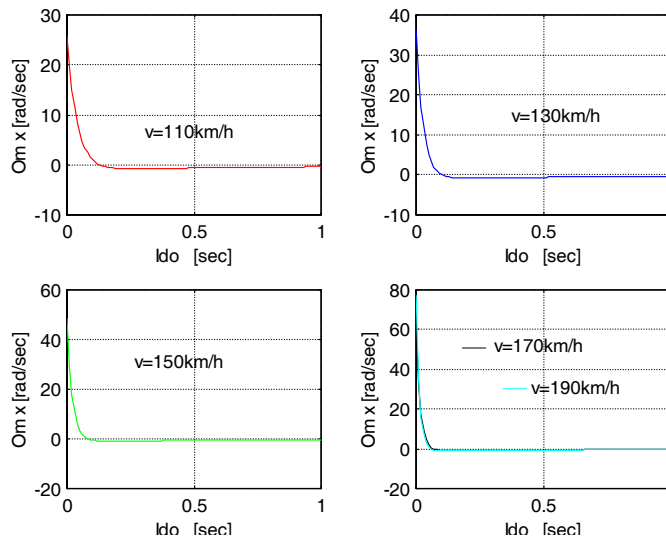


3.17. ábra. A magasság súlyfüggvényei, $\mathbf{Q}_{h1}; \mathbf{R}_{h1}$ súlyozás



3.18. ábra. A bólintási szögsebesség súlyfüggvényei, $\mathbf{Q}_{h1}; \mathbf{R}_{h1}$ súlyozás

A 3.18. ábráról láthatjuk, hogy a rendszer válasz jele minden vizsgált üzemmódon nagy intenzitású és gyors lefolyású ($t_{tr} < 1,1 \text{ sec}$). A bólintási szögsebesség súlyfüggvénye teljesíti a stabilitás feltételét, a tranziens idő elteltével felveszi kezdeti értékét.

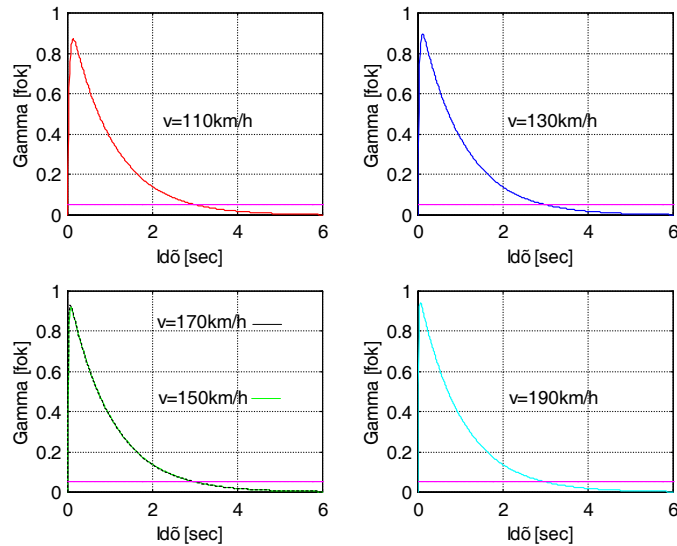


3.19. ábra. Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényei, $\mathbf{Q}_{o1}; \mathbf{R}_{o1}$ súlyozás

Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényeinek időbeli lefolyását látjuk a 3.19. ábrán. Az impulzusválasz függvények gyakorlatilag függetlenek a repülési sebességtől, időbeli lefolyásuk gyors ($t_{tr} < 0,5 \text{ sec}$) és nagy intenzitású. Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényei a

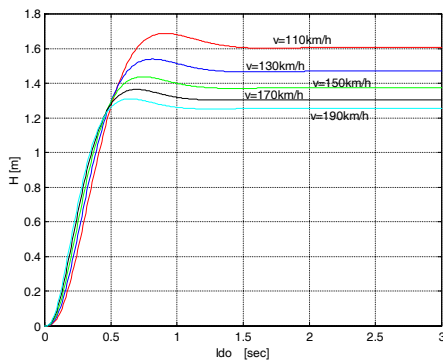
repülési sebességtől függetlenül teljesítik a stabilitás feltételét, a tranziens idő elteltével beállnak a kezdeti értékükre.

A 3.20. ábrán lévő bedöntési szög súlyfüggvényeit megvizsgálva, láthatjuk, hogy a függvényértékek jó közelítéssel egybeesők, és a tranziensidejük $t_{tr} \cong 3 \text{ sec}$. A tranziens folyamatok lezajlása után a bedöntési szög súlyfüggvényei felveszik kezdeti értéküket, vagyis teljesítik a stabilitás feltételét.

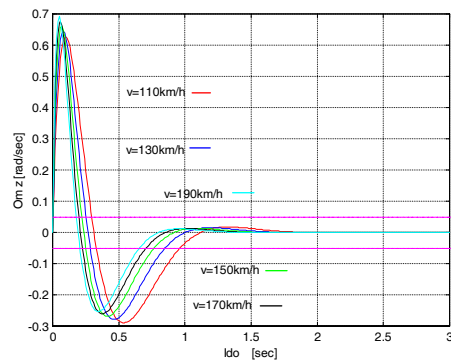


3.20. ábra. A bedöntési szög súlyfüggvényei, $\mathbf{Q}_{o1}; \mathbf{R}_{o1}$ súlyozás

A 3.21. ábrán látható, hogy a magasság átmeneti függvényei — a repülési sebességtől függetlenül — $t_{tr} \cong 1 - 1,5 \text{ sec}$ közötti tranziens idő alatt érik el állandósult állapotbeli értéküket.



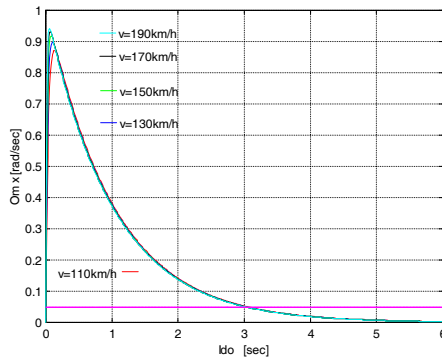
3.21. ábra. A magasság átmeneti függvénye, $\mathbf{Q}_{h1}; \mathbf{R}_{h1}$ súlyozás



3.22. ábra. A bólintási szögsebesség átmeneti függvénye, $\mathbf{Q}_{h1}; \mathbf{R}_{h1}$ súlyozás

A statikus hiba 0,3 – 0,6 m között változik a repülési sebesség függvényében. A zárt rendszer a bemenetére érkező egységgrás jelet, kisebb, mint 5%-os túlszabályozással követi. A 3.22. ábrán látható bólintási szögsebesség egységgrás válaszai egy előjelváltó

lengés után rövid idő alatt, $0,6 < t_{tr} < 1 \text{ sec}$ — a repülési sebesség függvényében — válnak konstans értékűvé. A statikus hiba értéke zérus, a 3.2.a. táblázatban előírt értéket teljesíti.

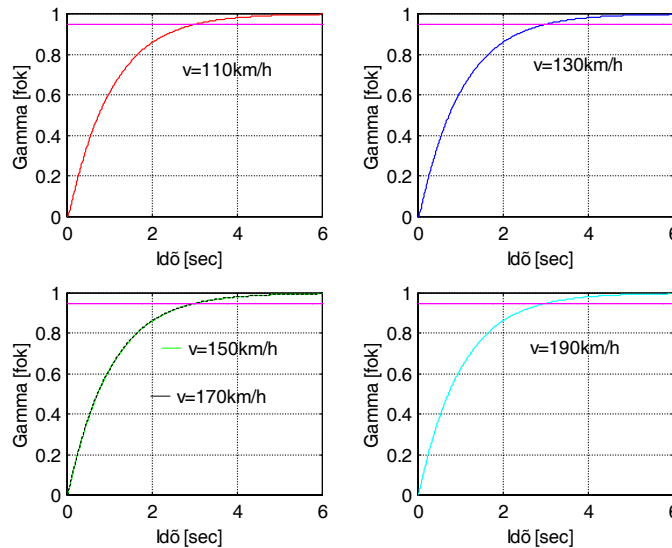


3.23. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvénye, \mathbf{Q}_{o1} ; \mathbf{R}_{o1} súlyozás

A 3.23. ábrán az orsózó szögsebesség $1(t)$ bemeneti jelre adott válaszfüggvényét láthatjuk. Az átmeneti függvény rövid idő alatt ($t_{tr} \cong 3 \text{ sec}$) válik nullává a vizsgált repülési üzemmódokon.

Az orsózó szögsebesség kisebb, mint 1 rad/sec elfordulással válaszol az egységugrás bemenőjelre.

A 3.24. ábrán láthatók a bedöntési szög átmeneti függvényei. A függvények maximális értéküket ($\gamma_{\max} = 1$) a repülési sebességtől függetlenül túlszabályozás nélkül érik el.



3.24. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvénye, \mathbf{Q}_{o1} ; \mathbf{R}_{o1} súlyozás

A tranziens idők $t_{tr} \cong 3 \text{ sec}$ és a függvényértékek jó közelítéssel egybeesők. A statikus hiba értéke 0° , ami megfelel a 3.2.b. táblázatban szereplő elvárt értéknek.

A repülőgép hosszirányú mozgásának minőségi jellemzői a 3.5. táblázatban láthatók. A vizsgált hosszirányú mozgásegyenletek egy negatív valós résszel rendelkező komplex konjugált gyökpárral és a negatív valóstengelyen elhelyezkedő pólussal rendelkeznek. A ξ csillapítási tényező értéke 0,64 és 1 között változik. A nemirányított repülőgép 3.2.a. táblázatban olvasható sajátértékeivel összehasonlítva a zárt szabályozási kör 3.5. táblázatban lévő sajátértékeit, láthatjuk hogy a (3.7) egyen-

lettel adott állapot-visszacsatolási mátrixok segítségével minden vizsgált üzemmódon sikerült áthelyezni az origóban elhelyezkedő pólusokat, és megváltoztatni a csillapítási tényezők értékét az elvártaknak megfelelően.

3.5. táblázat. A hosszirányú mozgás minőségi jellemzői

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-3,59±4,04i	0,64	$0,5 \leq \xi < 1$	5,41
-10,5	1	$0,5 \leq \xi < 1$	10,5
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-4,05±4,35i	0,681	$0,5 \leq \xi < 1$	5,94
-14,3	1	$0,5 \leq \xi < 1$	14,3
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-4,43±4,64i	0,691	$0,5 \leq \xi < 1$	6,42
-18,8	1	$0,5 \leq \xi < 1$	18,8
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-4,77±4,91i	0,696	$0,5 \leq \xi < 1$	6,85
-24,1	1	$0,5 \leq \xi < 1$	24,1
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-5,07±5,17i	0,7	$0,5 \leq \xi < 1$	7,25
-30	1	$0,5 \leq \xi < 1$	30

A \mathbf{Q}_{h1} ; \mathbf{R}_{h1} súlyozó mátrixok további hangolása a vizsgálat ezen fázisában szükséges. A 3.6. táblázatból kiolvasható, hogy a rendszer minden vizsgált üzemmódon negatív valós sajátértékekkel rendelkezik, és a csillapítási tényező értéke 1. A táblázatban látható, hogy az oldalirányú mozgás állapotváltozói $-0,992$ és $-0,997$ között, és $-26,1$ és $-77,5$ között változnak a repülési sebesség függvényében. Az origóhoz közeli, a valós tengelyen elhelyezkedő $-0,992$ és $-0,997$ értékű pólusok miatt az oldalirányú állapotváltozók átmeneti függvényei exponenciális felfutásúak és kritikus csillapításúak. A műszaki gyakorlatban a szabályozók tervezése során arra törekszünk, hogy a zárt szabályozási rendszer dinamikáját az úgynevezett domináns póluspár határozza meg.

A tervezés folytatásaként a súlyozó mátrixok elemeit heurisztikusan mindaddig hangolom, amíg a zárt szabályozási rendszer két negatív előjelű valós gyöke komplex kon-

jugált domináns póluspárt nem alkot. A szabályozótervezést követően vizsgálom a minőségi jellemzők változását.

3.6. táblázat. Az oldalirányú mozgás minőségi jellemzői

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,992	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,992
-26,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	26,1
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,994	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,994
-36,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	36,4
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,996	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,996
-48,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	48,4
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,996	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,996
-62,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	62,1
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-0,997	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,997
-77,5	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	77,5

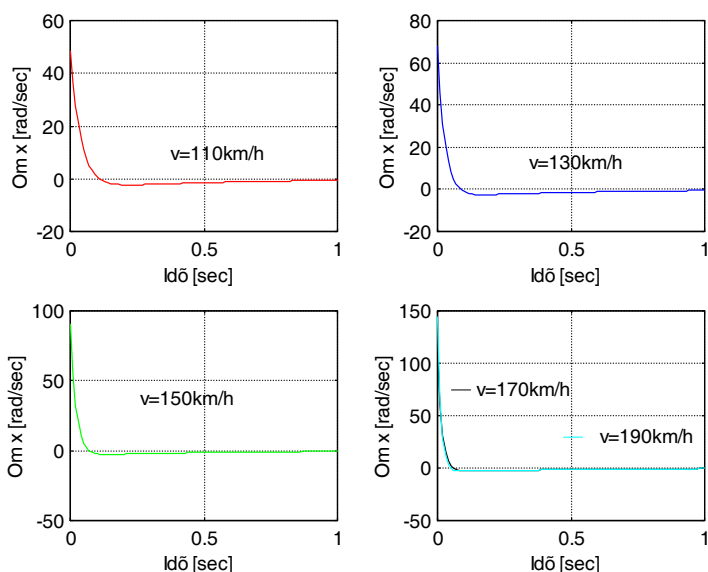
A heurisztikusan hangolt rendszer állapot-visszacsatolási mátrixai, oldalirányú mozgás, $\mathbf{Q}_{o2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3.5 \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}_{o2} = 1$ súlyozások esetén, a következők lesznek:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{o11} &= [-0,9452 \quad -1,8708]; \quad \mathbf{K}_{o21} = [-0,9441 \quad -1,8708] \\ \mathbf{K}_{o31} &= [-0,9453 \quad -1,8708]; \quad \mathbf{K}_{o41} = [-0,9474 \quad -1,8708] \\ \mathbf{K}_{o51} &= [-0,9499 \quad -1,8708] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Az \mathbf{x} állapotvektorokat rendező \mathbf{Q}_{o2} súlyozó mátrix q_{22} elemének növelése az állapot-visszacsatolási mátrixok értékeinek csökkentését eredményezte, ami a későbbi megvalósítás esetén kisebb energia felhasználással járhat. A zárt rendszer időtartományú analizésének eredményei a 3.25. – 3.28. ábrákon láthatók.

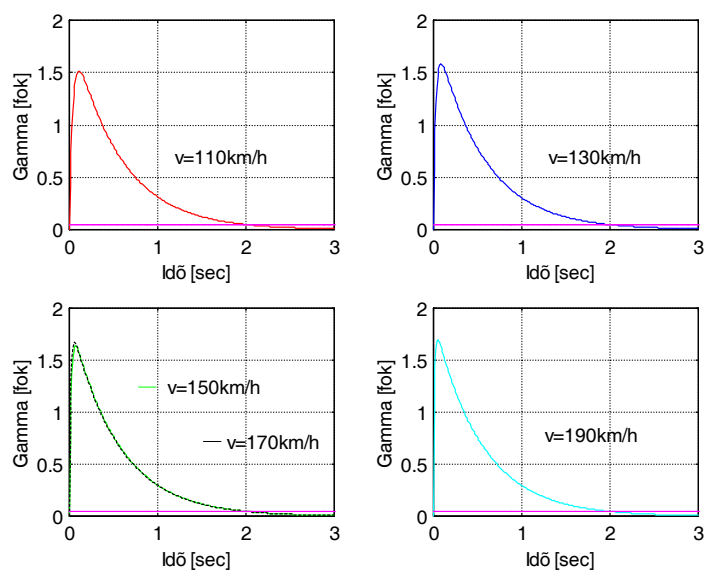
Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényeinek időbeli lefolyása a vizsgált üzemmódokon a repülési sebességtől függően a 3.25. ábrán láthatók. A 3.19. ábrán látható $\mathbf{Q}_{o1}; \mathbf{R}_{o1}$ súlyozáshoz tartozó súlyfüggvényekhez képest a tranziens idő kismértékben

($0,4 < t_{tr} < 1 \text{ sec}$), míg a zárt szabályozási rendszer lengési hajlama lényegesen növekedett, de a függvények jellege nem változott.



3.25. ábra. Az orsózó szögsebesség súlyfüggvényei, \mathbf{Q}_{o2} ; \mathbf{R}_{o2} súlyozás

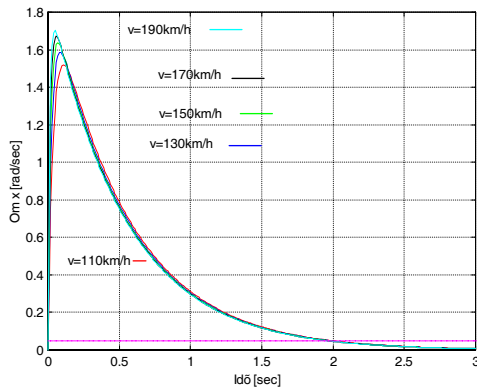
A 3.26. ábrán látható bedöntési szög súlyfüggvényei tranziensideje, $t_{tr} \cong 2 \text{ sec}$.



3.26. ábra. A bedöntési szög súlyfüggvényei, \mathbf{Q}_{o2} ; \mathbf{R}_{o2} súlyozás

A 3.20. ábrán látható súlyfüggvényekhez képest a \mathbf{Q}_{o2} ; \mathbf{R}_{o2} súlyozás esetén a 3.26. ábrán látható súlyfüggvények tranziensideje csökkent, de a függvények időbeli lefolyása nem változott.

A vizsgált súlyfüggvények alapján elmondható, hogy az oldalirányú mozgás állapotváltozói továbbra is stabil működésűek.

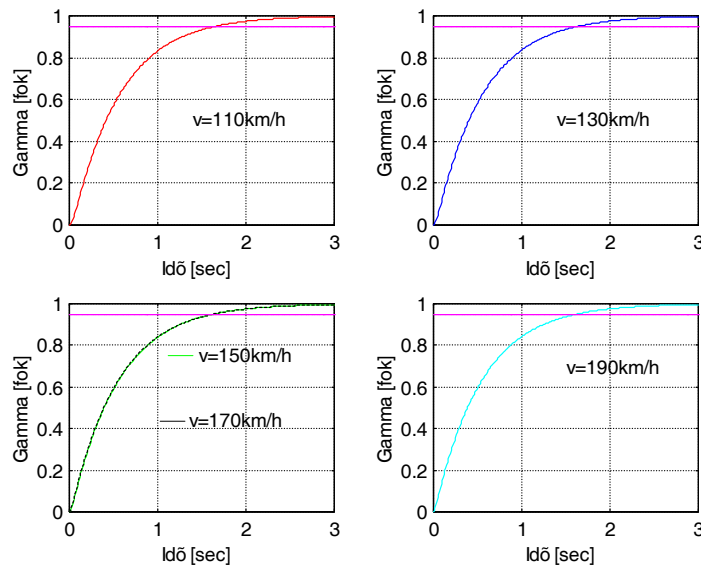


3.27. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvényei $\mathbf{Q}_{o2}; \mathbf{R}_{o2}$ esetén

Az orsózó szögsebesség átmeneti függvényeit a 3.27. ábrán látjuk, összehasonlítva a 3.23. ábrán láthatóakkal elmondható, hogy a szabályozási folyamatok gyorsabbak lettek ($t_{tr} \cong 2 \text{ sec}$), és lengési hajlama nőtt. A statikus hiba továbbra is 0° .

A 3.24. ábrán látható bedöntési szög átmeneti függvényeit összevetve a 3.28.

ábrán láthatóakkal, elmondható, hogy a maximális értékét ($\gamma_{\max} = 1^\circ$) a repülési sebességtől függetlenül mindkét vizsgált esetben túlszabályozás nélkül éri el. A $\mathbf{Q}_{o2}; \mathbf{R}_{o2}$ súlyozás estén a tranziens idő csökkent, melynek értéke $t_{tr} \cong 1,6 \text{ sec}$. A 3.28. ábra alapján megállapítható, hogy a repülési sebesség változása érdemben nem változtatja meg a dőlési szög átmeneti függvényét. A statikus hiba 0° .



3.28. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvényei, $\mathbf{Q}_{o2}; \mathbf{R}_{o2}$ súlyozás

A 3.7. táblázatban olvasható, hogy a repülőgép oldalirányú mozgását leíró egyenletek a vizsgált üzemmódokon negatív valóstengelyen elhelyezkedő pólussal rendelkeznek. A ξ csillapítási tényező értéke a repülési sebességtől függetlenül egységnyi. Összehasonlítva a 3.6. táblázatban szereplő minőségi jellemzőkkel elmondható, hogy a csillapítási tényező értéke nem változott, a sajátértékek abszolút értéke nőtt. Az

eredményeket összevetve a 3.2.b. táblázatban megfogalmazott irányítástechnikai minőségi paraméterekkel, elmondható, hogy a 3.7. táblázatban szerelő értékek megfelelnek a követelményeknek.

3.7. táblázat. Oldalirányú mozgás minőségi jellemzői, Q_{o2} , R_{o2} súlyozások

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-26,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	26,1
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-36,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	36,4
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-48,4	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	48,4
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,86	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,86
-62,1	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	62,1
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1,87	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,87
-77,5	1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	77,5

A heurisztikus hangolás után a $-0,992$, $-0,997$ pólusokat sikerült áthelyezni $-1,86$, $-1,87$ pontokba, de a bedöntési szög változása továbbra is lassú. Számos hangolási kísérlet után, amelyeket az LQR szabályozó optimális megtervezésére fordítottam, megállapítottam, hogy a tervezett pólus áthelyezést nehéz elérni. Ezért a zárt szabályozási kör tervezett pólusainak elérésére más módszert kell választanom.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatok eredményeként megállapítottam, hogy:

- A Szojka–III repülőgép hosszirányú mozgása állapotváltozóinak stabilizálását biztosító, és az egységnyi súlyozásos LQR módszerrel tervezett zárt szabályozási rendszer eleget tesz az előírt minőségi követelményrendszernek.

- Az egységnyi súlyozásos tervezéshez és a rendszer analíziséhez új forráskódot készítettem MATLAB[®] környezetben.
- Elvégeztem a Szojka–III repülőgép oldalirányú mozgása állapotváltozóit stabilizáló zárt szabályozási rendszer szabályozójának előzetes tervezését. Megállapítottam, hogy az egységnyi súlyozásos LQR tervezési módszer alkalmazása a minőségi jellemzők tekintetében megfelelő rendszer tervezését lehetővé teszi.
- A szabályozó megtervezésére, és a zárt szabályozási rendszer analizálásához új forrásprogramot készítettem MATLAB[®] környezetben.

Következtetések

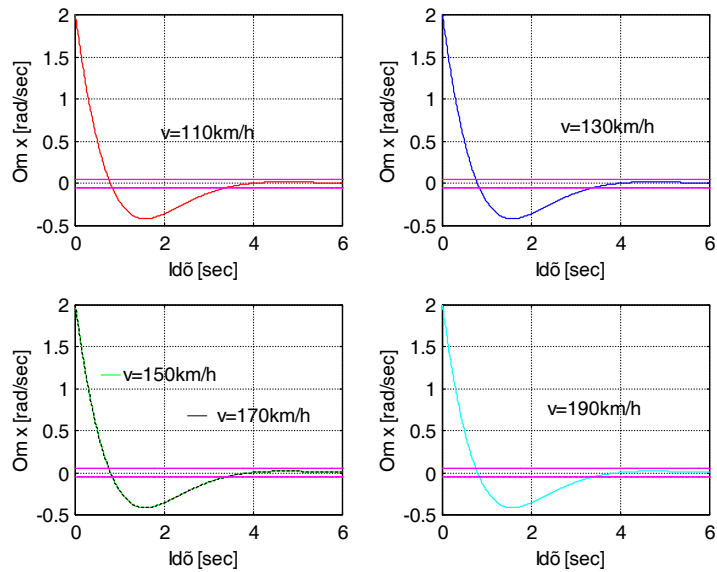
- A gyakorlatban a zárt szabályozási rendszerek számára olyan szabályozót igyekeznek tervezni, amely biztosítja a domináns póluspár hatásának érvényesülését. Ennek megfelelően célszerű olyan szabályozó tervezési módszert választani, vagy a korábban alkalmazottat olyanra módosítani, amely lehetővé teszi a szabályozó minimális lépésben történő megtervezését.
- A pólus áthelyezés módszere segítségével megtervezett szabályozó ugyan nem lesz optimális, de egyszerűsége folytán — a gyakorlatban — könnyen és gyorsan alkalmazható.

3.6. A szabályozó előzetes tervezése pólus áthelyezés módszerrel

Az oldalirányú mozgás szabályzóinak előzetes tervezéséhez a pólus áthelyezés módszerét alkalmazom, az új pólusok helyét a komplex síkon a $p = (-1 \pm j)$ pontokban határozom meg. A választott pólus biztosítja, hogy a rendszer átmeneti függvényei előjelváltó lengéssel ériék el állandósult állapotukat. A választott pólushoz tartozó minőségi jellemzők (csillapítási tényező, tranziens idő, stb.) a [21] irodalomban található módon előre kiszámíthatók. A választott pólushoz tartozó minőségi jellemzők teljesítik a 3.2.b. táblázatban található minőségi követelményeket és biztosítják az átviteli függvények elvárt jellegű (előjelváltó lengéses) időbeli lefolyását. A hangolt rendszer állapot-visszacsatolási mátrixai a következők lettek:

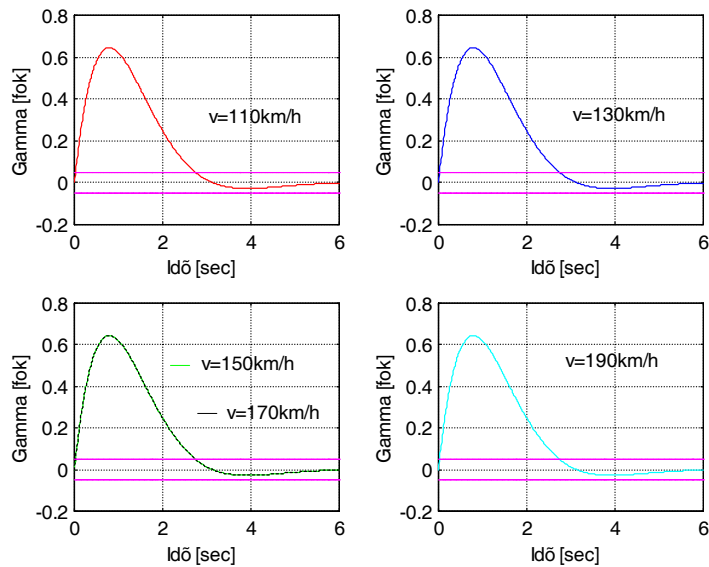
$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_{o1p} &= [0,0556 \quad -0,0772]; & \mathbf{K}_{o2p} &= [0,0571 \quad -0,0552] \\
 \mathbf{K}_{o3p} &= [0,0559 \quad -0,0415]; & \mathbf{K}_{o4p} &= [0,0536 \quad -0,0323] \\
 \mathbf{K}_{o5p} &= [0,051 \quad -0,0259]
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

A 3.28. ábrán látható, hogy a súlyfüggvények a sebességtől függetlenül együtt futnak. Egy előjelváltó lengés után nulla értéket vesznek fel, a tranziens idő $t_{tr} \cong 3 \text{ sec}$.



3.28. ábra. Az orszózó szögsebesség súlyfüggvényei

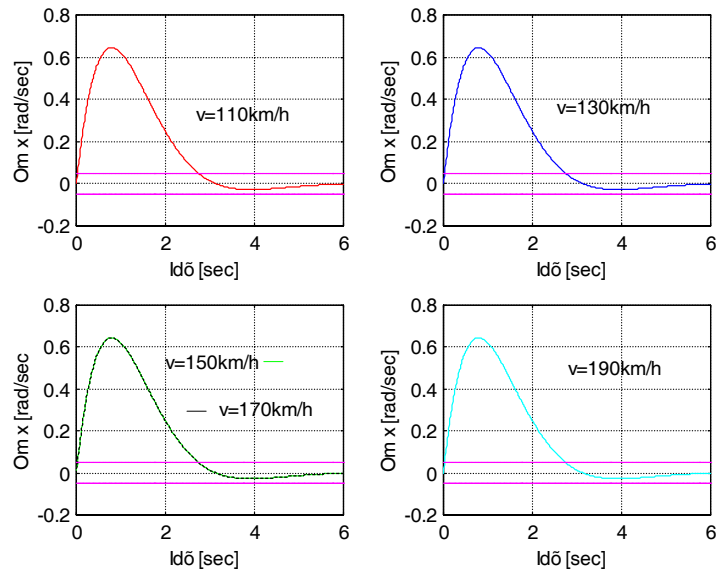
A 3.29. ábra alapján elmondható, hogy a bedöntési szög súlyfüggvény értékei a vizsgált üzemmódokon sebességtől függetlenül egybeesnek, a tranziens idő $t_{tr} \cong 2,8 \text{ sec}$.



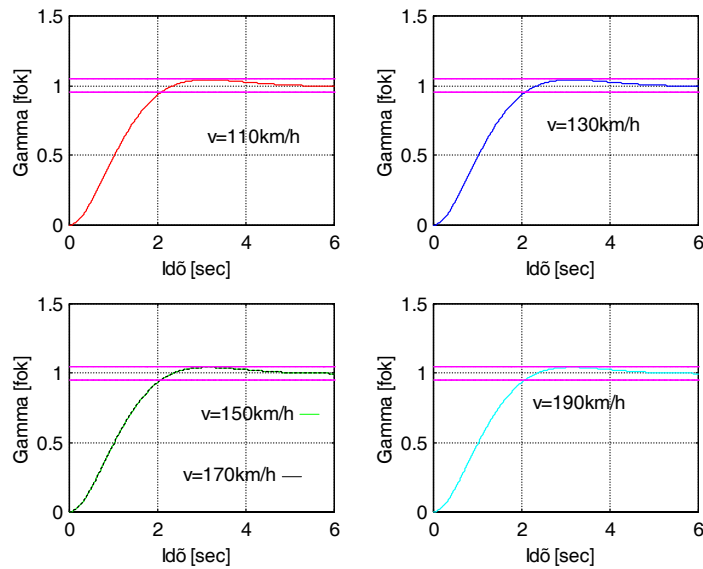
3.29. ábra. A bedöntési szög súlyfüggvényei

A 3.28. és a 3.29. ábrákról egyértelműen megállapítható, hogy a vizsgált oldalirányú állapotváltozók stabil működésűek. A súlyfüggvények egy előjelváltó lengés után érik el állandósult értéküket.

Az orsózó szögsebesség átmeneti függvényeinek időbeli lefolyása a 3.30. ábrán látható.



3.30. ábra. Az orsózó szögsebesség átmeneti függvényei



3.31. ábra. A bedöntési szög átmeneti függvényei

A 3.31. ábrán látható, hogy a bedöntési szög átmeneti függvényei $t_r < 2,1$ sec idő elteltével (sebességtől függetlenül) érik el állandósult értéküket ($\gamma(\infty) = 1$).

A 3.8. táblázatból látható, hogy a függvények sajátértékei az előre meghatározott értéket vették fel minden üzemmódon. A 3.28. – 3.31. ábrák alapján elmondható, hogy a komplex konjugált gyökpárok dinamikája határozta meg a válaszfüggvények tranziens folyamatainak időbeli lefolyását.

3.8. táblázat. Oldalirányú mozgás minőségi jellemzői, pólus áthelyezés módszer

Sajátérték (λ)	Csillapítási tényező (ξ)		Sajátlengések körfrekvenciája (ω) [rad/sec]
	Valós érték	Előírt érték	
1. üzemmód: v=110 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1±i	0,707	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,41
2. üzemmód: v=130 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1±i	0,707	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,41
3. üzemmód: v=150 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1±i	0,707	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,41
4. üzemmód: v=170 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1±i	0,707	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,41
5. üzemmód: v=190 km/h, H=400 m, m=135 kg			
-1±i	0,707	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	1,41

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatok eredményeként megállapítottam, hogy:

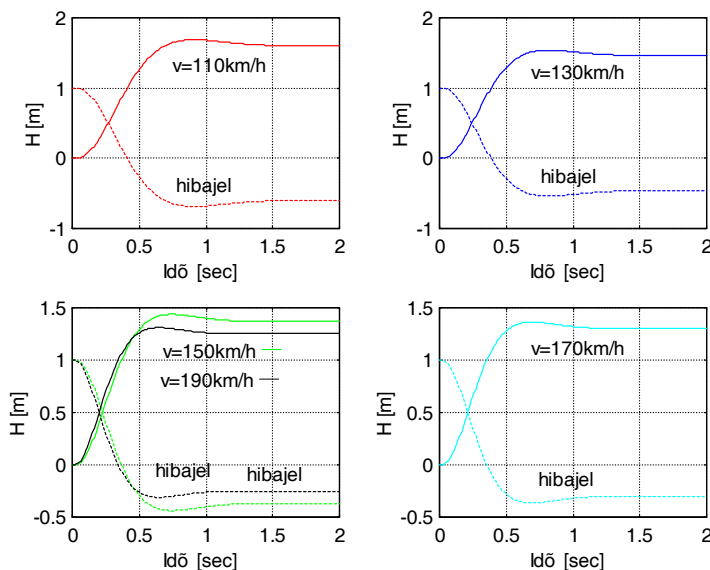
- a pólus áthelyezés módszer alkalmazásának eredményeképpen meghatározott $\mathbf{K}_{o1p} - \mathbf{K}_{o5p}$ állapot-visszacsatolási mátrixok biztosítják az előírt irányítástechnikai követelményrendszernek való megfelelést.
- A Szojka–III repülőgép oldalirányú robotpilótájának megtervezésére és a zárt rendszer vizsgálatára új forráskódot készítettem MATLAB[®] környezetben.

3.7. A zárt szabályozási rendszer időtartománybeli vizsgálata

3.7.1. A zárt szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata

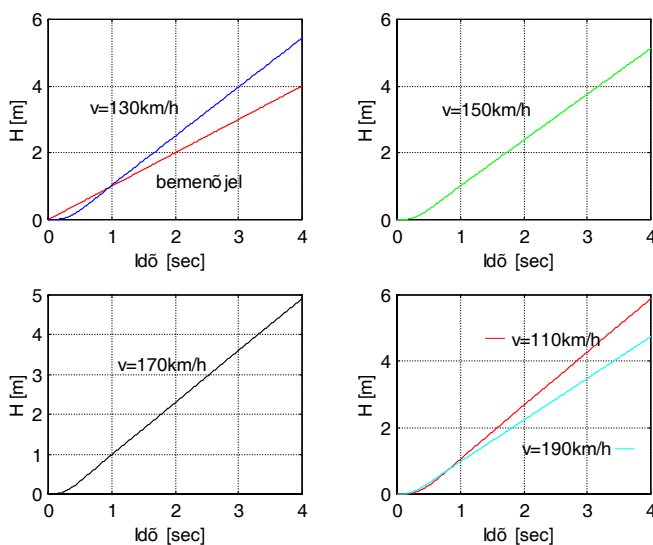
Az időtartománybeli analízis során megvizsgálom az egységugrás jellel, az egységsebesség jellel és a négyszögjellel gerjesztett zárt szabályozási rendszerek alapjel-követését. A vizsgálatokat csak az előzőekben elvégzett szabályzó tervezés folyamán elfogadott $\mathbf{Q}_{h1}; \mathbf{R}_{h1}$ súlyozó mátrixok alkalmazásával, illetve a pólus áthelyezés módszer alkalmazásával, $p = (-1 \pm j)$ pólusokhoz tartozó állapot-visszacsatolási mátrixok alkalmazásával kapott magasságstabilizáló, és bedöntési szögstabilizáló rendszerre terjesztem ki. A magasság ($H_{(\infty)}$) és a bedöntési szög ($\gamma_{(\infty)}$) stacioner értékét a Laplace-transzformáció végérték tételének segítségével számíthatjuk ki [96].

A magasságstabilizáló rendszer egységugrás bemenőjelre adott válasz és a hibajel függvényei — a repülési sebesség függvényében — a 3.32. ábrán láthatók. A 3.32. ábra alapján elmondhatjuk, hogy a zárt szabályozási rendszer az $1(t)$ vizsgáló jelet maradó hibával (statikus hibával) követi, amelynek értéke 0,3 m és 0,6 m között változik. A repülési sebesség növekedésével a statikus hiba csökken. A 3.32. ábrán látható átmeneti függvény tranziens ideje — a repülési sebesség függvényében — $0,7 < t_{tr} < 1 \text{ sec}$ között változik.



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

A 3.33. ábrán látható a magassági irányítási csatorna $h_{ref}(t) = t$ referencia jelle adott válaszjele. A lineárisan növekvő bemenőjelre a rendszer kezdetben exponenciálisan változik, majd $t \cong 0,6 \text{ sec}$ idő elteltével a repülési sebesség függvényében a változás lineárisává válik.

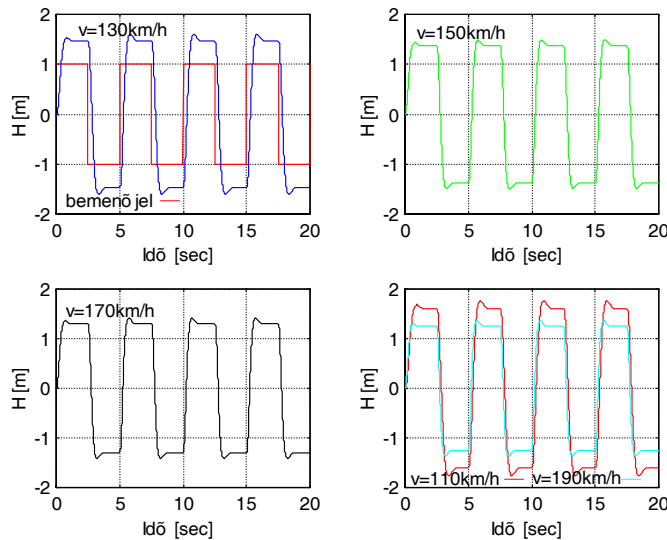


3.33. ábra. A magasság $h_{ref}(t) = t$ bemenőjelre adott válaszai

Az alapjel-követési vizsgálatokat $T = 5 \text{ sec}$ periódus idejű, és

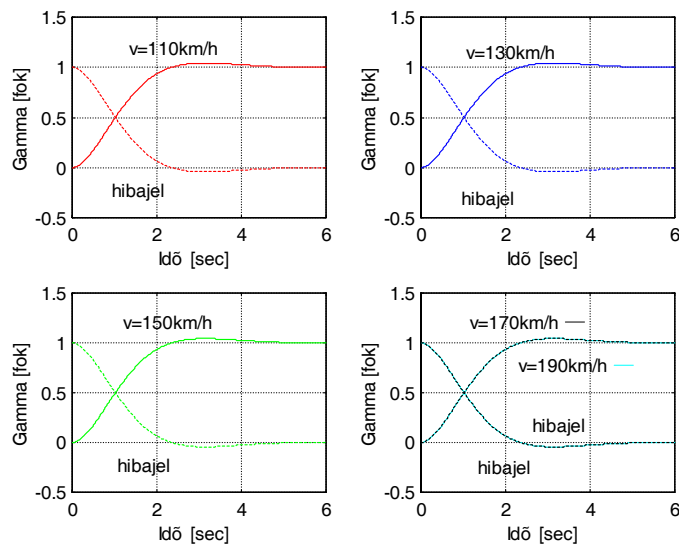
$$h_{ref}(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } 0 \leq t \leq 2,5 \text{ sec} \\ -1, & \text{ha } 2,5 < t \leq 5 \text{ sec} \end{cases} \text{ amplitudójú négyszögjelekkel folytatom. A négyszög-}$$

jelre adott repülési magasság válaszfüggvények a 3.34. ábrán láthatók. A bemenőjel változásának megfelelően a szabályozó $t_{tr} < 1,8 \text{ sec}$ idő elteltével korlátos állandósult állapotbeli értéket vesz fel. A repülési magasság változása — a repülési sebesség függvényében — 1,5–1,6 m. A 3.34. ábra alapján az is megállapítható, hogy a zárt szabályozási rendszer a bemeneti jelet gyorsan követi.



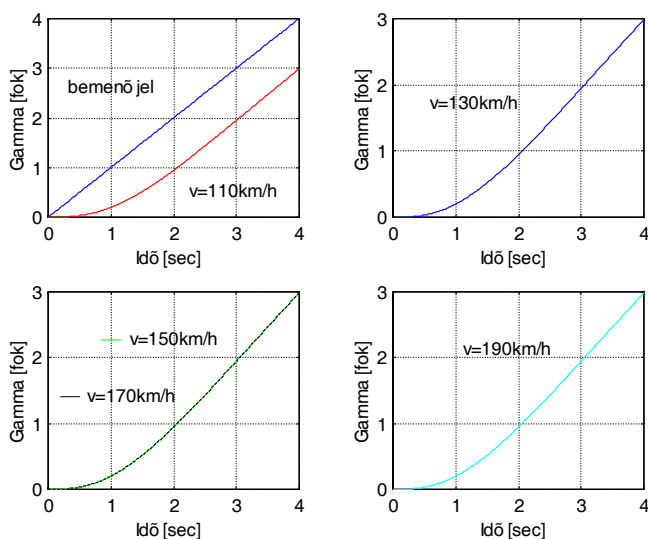
3.34. ábra. A magasság válasz függvénye

Az alapjel-követési vizsgálatokat a bedöntési szögstabilizáló rendszer vizsgálatával folytatom. A 3.35. ábrán a bedöntési szög átmeneti függvényei láthatók. A bedöntési szög időfüggvény transziens ideje — a repülési sebességtől függetlenül — $t_{tr} \cong 1,7 \text{ sec}$.



3.35. ábra. A bedöntési szög, $\gamma_{ref}(t) = 1(t)$ bemenőjelre adott válasz, és hibajel függvényei

A tranziens idő eltelte után a dőlési szög $\gamma(\infty) = 1^\circ$ értéket vesz fel, vagyis — a repülési sebességtől függetlenül — statikus hiba nélkül követi az alapjelet. A bedöntési szög csatorna $\gamma_{ref}(t) = t$ bemenőjelre adott válasza a 3.36. ábrán látható. Lineárisan növekvő bemenőjelre a rendszer kezdetben exponenciálisan változik. A 3.36. ábrán látható, hogy $t < 1,9$ sec idő elteltével (a repülési sebesség függvényében) a változás lineárisává válik és különböző meredekséggel követi a bemenőjelet.

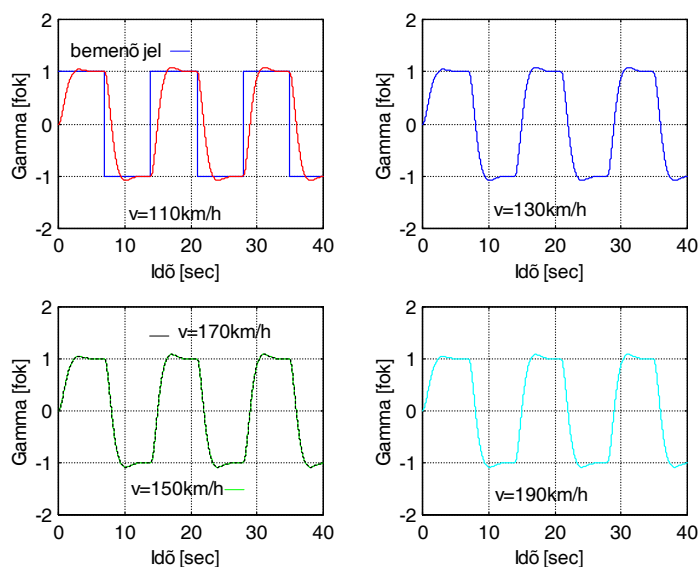


3.36. ábra. A bedöntési szög $\gamma_{ref}(t) = t$ bemenőjelre adott válasza

Az alapjel követési vizsgálatokat $T = 14$ sec periódus idejű, és

$$f(t) = \begin{cases} 1, & \text{ha } 0 \leq t \leq 7 \text{ sec} \\ -1, & \text{ha } 7 < t \leq 14 \text{ sec} \end{cases} \text{ amplitudójú négyszögjelekkel folytatom. A 3.37. ábrán a}$$

dőlési szögstabilizáló rendszer négyszögjel vizsgálójelre adott válaszait látjuk.



3.37. ábra. A bedöntési szög válasz függvénye

A bemenőjel változásainak megfelelően a válaszfüggvény $t_r < 3 \text{ sec}$ idő elteltével — a repülési sebességtől gyakorlatilag függetlenül — korlátos állandósult állapotbeli értéket vesz fel. A 3.37. ábra alapján elmondható, hogy a $\gamma(t)$ válaszfüggvény több periódusidő alatt is képes követni a bemenőjel változását.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálat eredményei alapján megállapítottam, hogy:

- a repülési magasságstabilizáló rendszer képes követni a bemeneti jelet;
- a magasságstabilizáló rendszer eleget tesz a zárt szabályozási rendszerekkel szemben támasztott általános irányítástechnikai minőségi követelményeknek.
- a magasságstabilizáló rendszer előzetes tervezésére és a zárt szabályozási rendszer vizsgálatára forráskódot készítettem MATLAB[®] környezetben;
- a dőlési szögstabilizáló rendszer eleget tesz a zárt szabályozási rendszerekkel szemben támasztott alapjel-követési előírásoknak;
- a számítógépes analízis eredményei alapján megállapítottam, hogy a szabályozási rendszer P típusú szabályozója biztosítja az előírt irányítástechnikai minőségi követelmények teljesülését;
- a dőlési szög szabályozójának előzetes tervezésére és a zárt szabályozási rendszer előzetes tervezésére új forráskódot készítettem MATLAB[®] környezetben.

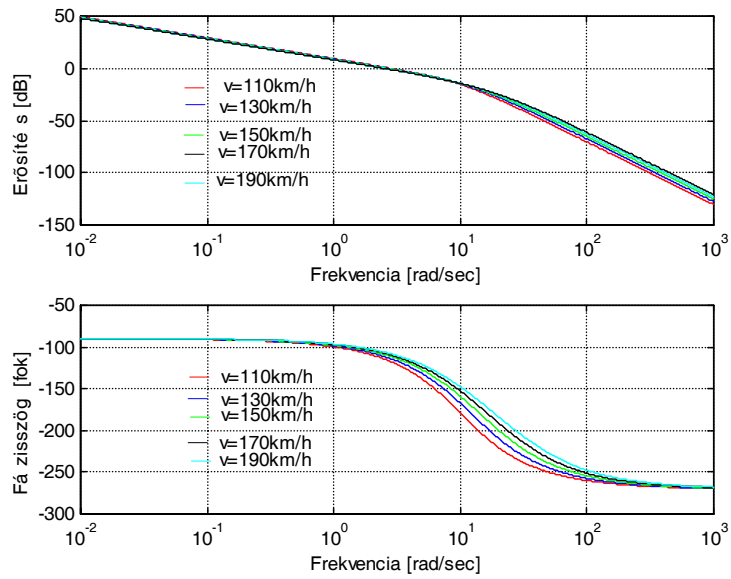
Következtetések:

- a magasságstabilizáló rendszer optimális P típusú szabályozója eleget tesz az alapjel követéssel szemben támasztott követelményeknek;
- a dőlési szögstabilizáló rendszer pólus áthelyezés módszerével megtervezett P típusú szabályozója eleget tesz az alapjel követéssel szemben támasztott minőségi követelményeknek.

3.8. A felnyitott szabályozási rendszer analízise frekvenciatartományban

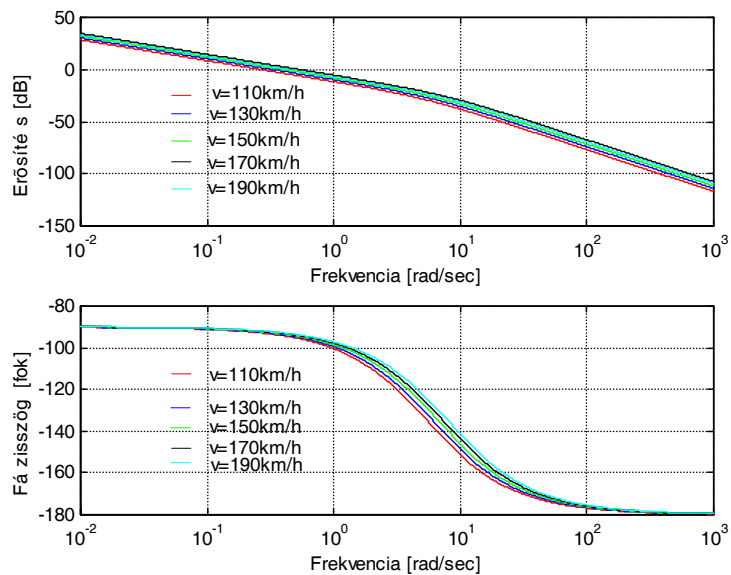
A repülési magasság irányítási csatorna Bode-diagramja a 3.42. ábrán látható. Az ábra alapján elmondható, hogy a kisfrekvenciás vizsgálójelek tartományában, $\sim 20 \text{ rad} \cdot \text{sec}^{-1}$ -ig az erősítés-körfrekvencia jelleggörbe meredeksége $-20 \text{ dB} \cdot \text{D}^{-1}$.

Mindezek alapján elmondható, hogy a zárt szabályozási rendszer stabilis és eleget tesz az előirt irányítástechnikai minőségi követelményeknek.



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

A 3.42 ábrán jó látható, hogy nagyfrekvenciás tartományban, az erősítéskörfrekvencia jelleggörbe nagy negatív meredekséggel rendelkezik, ami megfelel a felnyitott szabályozási rendszerek Bode-diagramjaival szemben támasztott általános követelményeknek.



3.43. ábra. A felnyitott rendszer Bode-diagramja, bedöntési szög csatorna

A dőlési szögstabilizáló rendszer Bode-diagramja a 3.43. ábrán látható. Az ábráról leolvasható, hogy nagyfrekvenciás tartományban, az erősítés-körfrekvencia jelleg-görbe nagy negatív meredekséggel rendelkezik.

A 3.9. táblázatból kiolvashatjuk, hogy minden vizsgált üzemmódon a rendszer amplitudó-, és fázistartaléka az előírt értékeknek megfelelnek.

3.9. táblázat. A felnyitott rendszer amplitudó-, és fázistartaléka

A felnyitott rendszer amplitudó-, (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

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

- A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép repülési magasságstabilizáló rendszere Bode-diagramjának menete megfelel a felnyitott szabályozási rendszerekkel szemben támasztott általános követelményeknek. Kisfrekvenciás tartományban a rendszer erősítve viszi át az alapjelet, a vágási körfrekvencián és annak környezetében az erősítés körfrekvencia görbe meredeksége $-20dB \cdot D^{-1}$ vagyis a rendszer stabil működésű, és a rendszer egyéb minőségi jellemzői is megfelelőek. Nagyfrekvenciás tartományban az erősítés körfrekvencia jelleg-görbék nagy negatív meredekséggel rendelkeznek, vagyis a zárt szabályozási rendszer jól csillapítja a nagyfrekvenciás zajokat.
- a 3.9 táblázat alapján megállapítottam, hogy a repülési magasság szabályozó rendszerének úgy az erősítési, mint a fázistartaléka — a repülési sebesség növekedésével — lényegesen nő;
- a repülési magasságstabilizáló rendszer felnyitott szabályozási körének erősítése kis és közepes frekvencián gyakorlatilag független a repülési sebességtől, míg nagyfrekvenciás tartományban a sebesség növekedésével állandó frekvencián az erősítés is növekszik;

- a repülési magasságstabilizáló rendszer felnyitott szabályozási körének fáziszöge kis-, és nagyfrekvenciás tartományon gyakorlatilag független a repülési sebességtől, míg közepes frekvenciákon a repülési sebesség növekedésével a fázisszög értéke is nő;
- a repülési magasságstabilizáló rendszer frekvenciatartománybeli analizisére és a minőségi jellemzők meghatározására új forráskódot készítettem MATLAB[®] környezetben;
- a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép dőlési szögstabilizáló rendszer felnyitott kör Bode-diagramjának menete megfelel a felnyitott szabályozási rendszerekkel szemben támasztott általános követelményeknek;
- a dőlési szögstabilizáló rendszer felnyitott körének erősítési tényezője — a repülési sebesség növekedésével — az analizis teljes frekvenciatartományán folyamatosan nő;
- a dőlési szögstabilizáló rendszer felnyitott szabályozási körének fáziszöge kis-, és nagyfrekvenciás tartományon gyakorlatilag független a repülési sebességtől, míg közepes frekvenciákon a repülési sebesség növekedésével a fázisszög értéke folyamatosan nő;
- a dőlési szögstabilizáló rendszer frekvenciatartománybeli jellemzői, úgy az amplitúdó-, mint a fázistartalék — a repülési sebességtől függetlenül — jó közelítéssel állandók;
- a dőlési szögstabilizáló rendszer frekvenciatartománybeli analizisére és minőségi jellemzői meghatározására új forráskódot készítettem MATLAB[®] környezetben.

Következtetések:

- A Szojka–III repülőgép repülési magasságstabilizáló rendszere számára az általam tervezett és javasolt szabályozó biztosította a zárt szabályozási rendszer stabilitását a megfelelő alapjel követést, és eleget tett az irányítástechnikai minőségi követelményeknek is.
- A Szojka–III repülőgép repülési dőlési szögstabilizáló rendszere számára általam tervezett és javasolt szabályozó biztosította a zárt szabályozási rendszer stabilitását a megfelelő alapjel követést, és eleget tett az irányítástechnikai minőségi követelményeknek is.

A fejezetben megvizsgáltam a nemirányított repülőgép viselkedését idő- és frekvenciatartományban. A vizsgálatok eredményei alapján a négyzetes integrálkritérium (LQR) és a pólus áthelyezés módszere segítségével elvégeztem a magasságstabilizáló, és bedöntési szögstabilizáló rendszerek szabályozóinak előzetes tervezését. Végrehajtottam a megtervezett rendszerek idő- és frekvenciatartománybeli analízisét. A 3.10. táblázatban összefoglaltam a repülési magasságstabilizáló és a dőlési szögstabilizáló rendszerek irányítástechnikai minőségi követelményeit.

3.10. táblázat. Összefoglaló táblázat

	Repülési magasságstabilizáló rendszer		Dőlési szögstabilizáló rendszer	
	Elvárt érték	Valós érték	Elvárt érték	Valós érték
Csillapítási tényező	$0,5 \leq \xi \leq 1$	0,711 – 1	$0,6 \leq \xi \leq 1,2$	0,707
Erősítési tartalék	> 8dB	15,59 – 23,92	> 8dB	∞
Fázistartalék	> 60°	62,712 – 74,024	> 60°	86,111 – 87,217
Holtidő	$t_h \leq 0,2 \text{ sec}$	-	$t_h \leq 0,2 \text{ sec}$	-
Tranziens idő	$t = 2-3 \text{ sec}$	$\leq 2,7 \text{ sec}$		$\cong 2,8 \text{ sec}$

A fenti táblázat alapján megállapítottam, hogy az általam javasolt szabályozókkal rendelkező zárt szabályozási rendszerek irányítástechnikai minőségi jellemzői megfelelnek a szabványokban megadott, elvárt értékeknek.

4. A SZOJKA–III REPÜLŐGÉP ZAVARELHÁRÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A repülésszabályozó rendszerekkel szemben támasztott alapvető követelmény, hogy minimalíssa a külső és belső zajok repülőre gyakorolt hatását. A repülőgépre ható külső zavarásokat általában a légköri turbulenciára korlátozzák, amelynek matematikai modellezésével a [66, 68, 85, 101, 131] irodalmak foglalkoznak. A légköri turbulencia determinisztikus matematikai modelljét a [85] irodalom adja meg, míg a sztochasztikus modellezést a [66, 68, 101, 131] irodalmak adják meg.

A repülésszabályozó rendszerek belső zajai általános lefolyású sztochasztikus folyamatok, így matematikai modellezésük a gyakorlatban meglehetősen nehézkes.

4.1. 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 szellőkések. Ezek a repülőgépekre ható külső zavarások egyrésze dinamikus jellegű (gyorsan változó, sokszor ütésszerű). A légkörben a szellőkések megoszlása rendezetlen és véletlenszerű, így pontosan nem ismert az időbeli lefolyásuk. Ezért a szellőkések hatását a függőleges sebesség változásától függően lehetnek [85]:

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

A gyors lefolyású szellőkések általánosan elfogadott matematikai modellje az $1 - \cos$ diszkrét szellőkés függvény. A függvény $v(t) = \frac{k}{T} (1 - \cos(2\pi/T)t)$ alakban adott, ahol k – szellőkéstényező, a szellőkés intenzitását jellemzi, T a szellőkés lefolyásának időtartama [66, 69].

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép zavarelhárításának analízisére a determinisztikus jelek közül az egységugrás, és az egységsebesség vizsgáló jeleket alkalmazom. Az élesszélű szellőkés hatásának modellezésére az egységugrás vizsgáló jelet, a fokozatos szellőkés hatásának vizsgálatára az egységsebesség jellel gerjesztem a repülési magasságstabilizáló zárt rendszert.

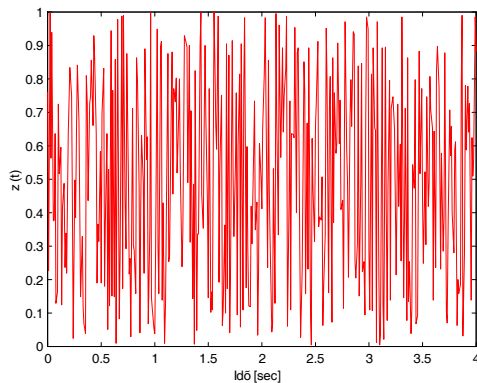
4.2. A külső zavarások sztochasztikus matematikai modellezése

Valós fizikai környezetben végrehajtott repülés során a repülőgépet ért zavaró hatásokat két alapvető csoportra oszthatjuk: külső zavarások, és belső zajok. A külső zavarások közé tartozik az időjárás viszonyok megváltozása, a légköri turbulencia, elektromágneses zajok, külső függesztmények változása következtében fellépő áramlási változások, stb.. A belső zajokat a rendszer, illetve az érzékelők sajátzajai alkotják. A fejezetben a külső sztochasztikus zavarások modellezésére egy fehérzaj generátor jeléből szűrők segítségével sztochasztikus jeleket állítok elő. A külső zavarások modellezése a [131] szakirodalomban található zaj modellek alapján:

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_x + b_x v_x &= \sigma_x \sqrt{2b_x} \xi \\
 (\dot{v}_y)' + b_y (v_y)' &= \sigma_y (\sqrt{3} - 1) \sqrt{b_y} \xi \\
 \dot{v}_y + b_y (v_y)' + b v_y &= \sigma_y \sqrt{3b_y} \xi \\
 \dot{v}_z + b_z v_z &= \sigma_z \sqrt{2b_z} \xi
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

ahol, $b_{x;z;y} = \frac{L_{x;z;y}}{v}$; $L_{x;z;y}$ integrál léptéktényező, v repülési sebesség; $\sigma_{x;y;z}$ turbulencia statisztikai jellemzője (szórás).

A választott modell előállításához a MATLAB[®] program beépített segédfüggvényeivel sztochasztikus jelet állítottam elő, amely a 4.1. ábrán látható. A repülésszabályozó rendszer zavarelhárítási analiziséhez a vizsgáló jeleket a zajgenerátor kimenőjelét szűrve állítottam elő [69, 101, 131]. Az előállított zaj összetevők segítségével megvizsgáltam a zárt rendszer zavarelhárítását. A rendszeranalízist a 4.2., 4.3. ábrákon látható hatásvázlatokon végeztem el.

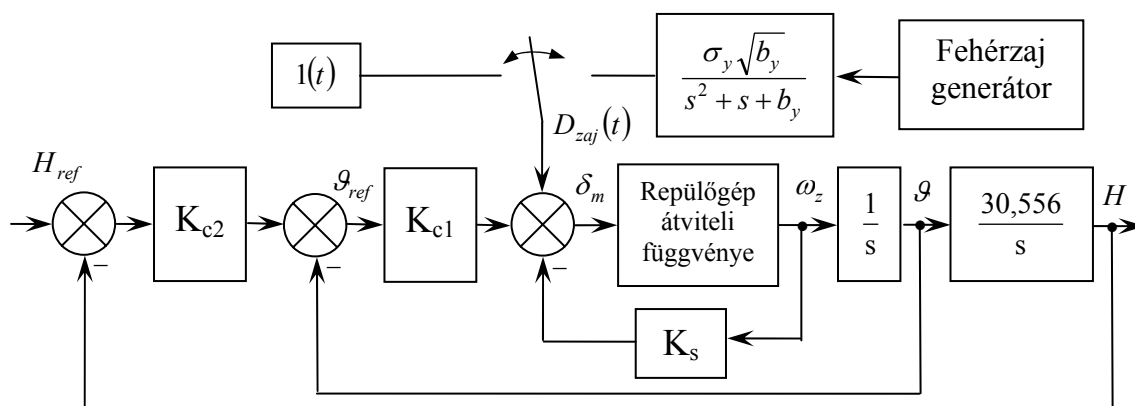


4.1. ábra. A szűrők bemenőjele

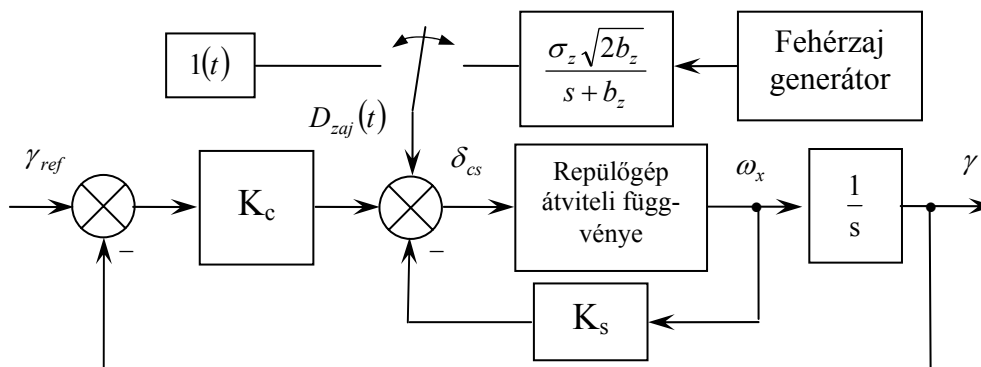
A sávhatárolt Gauss eloszlású, 0 és 1 közötti amplitudóval rendelkező fehérzajból szűrte $D_{zaj}(t)$ vezérlőjeleket a [66, 68, 131] szakirodalomnak alapján állítottam elő. A légköri turbulencia statisztikai jellemzőit, valamint a (4.1) egyenletrendszer együtthatóit a 4.1. táblázat tartalmazza.

4.1. táblázat. Adatok alévköri 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



4.2. ábra. A zavarelhárítás vizsgálata függőleges szél esetén

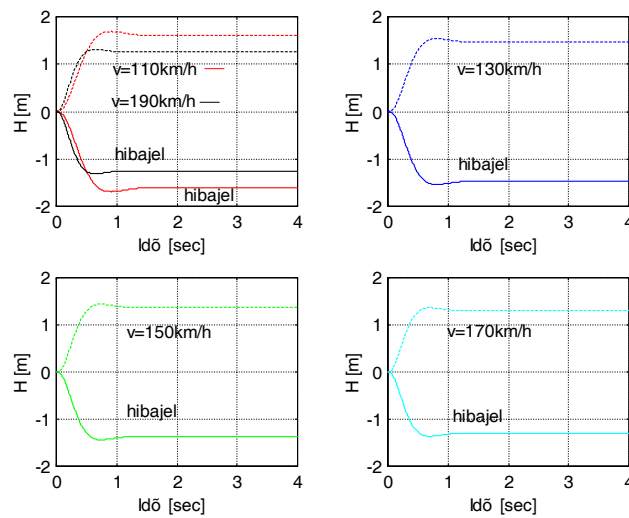


4.3. ábra. A zavarelhárítás vizsgálata oldalszél esetén

4.3. A zárt repülésszabályozó rendszer zavarelhárításának vizsgálata

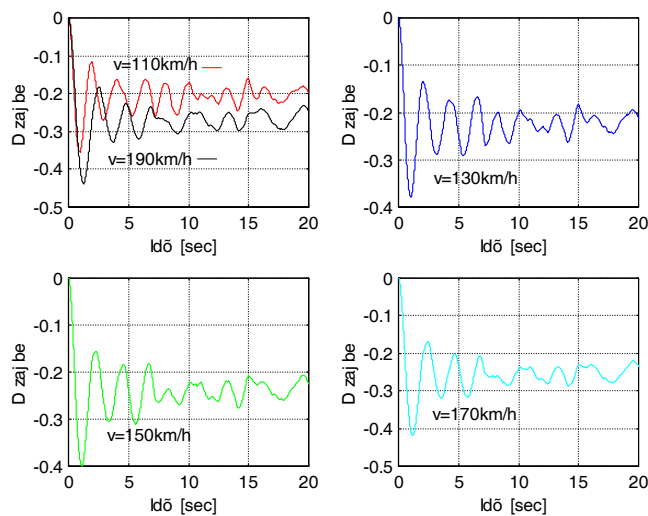
A magasságstabilizáló zárt szabályozási rendszer zavarelhárításának vizsgálata során első vizsgálati jel legyen a $D_{zaj}(t)=1(t)$ jel. A számítógépes szimuláció eredménye a 4.4. ábrán látható (válaszjel a szaggatott vonal, hibajel a folyamatos vonal). A 4.4. ábrán látható, hogy a statikus hiba érték 1,3 és 1,67 m között változik a sebesség

függvényében, valamint a repülési sebesség növekedésével a statikus hiba értéke csökken. A magasság szabályozási rendszer tranziens ideje $t_{tr} < 1,3 \text{ sec}$. A 4.4. ábra alapján elmondható, hogy az általam korábban megtervezett és javasolt P-típusú szabályozó nem képes a külső zavarás hatását kiszűrni, az ideális zavarelhárítás nem valósul meg. Tekintettel arra, hogy a [131] irodalomból átvett identifikált repülésmechanikai matematikai modell $H = 400 \text{ m}$ -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 az általam megtervezett és javasolt P-típusú szabályozó a repülési magasságot nagyon jó pontossággal stabilizálja.



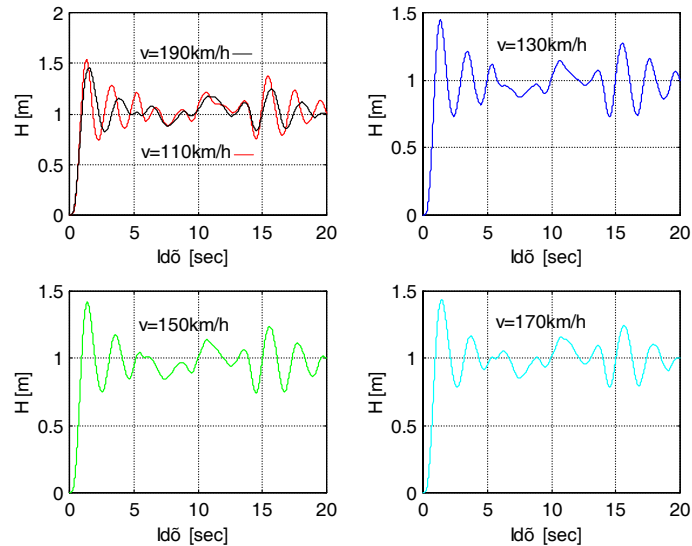
4.4. ábra. A magasság szabályozási rendszer tranziens viselkedése, és statikus hibája

A magasságstabilizáló rendszer további vizsgálata során alkalmazom a fehérzajból előállított sztochasztikus $D_{zaj}(t)$ jeleket, amelyek a repülési sebesség értékében paraméterezve a 4.5. ábrán láthatók.



4.5. ábra. A sztochasztikus vizsgáló jel időfüggvényei

A 4.5. ábra alapján könnyen belátható, hogy a sztochasztikus vizsgáló jel amplitudója a repülési sebesség függvényében kis mértékben csökken. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép $D_{zaj}(t)$ sztochasztikus vizsgáló jelre adott magasság válasz függvényei a 4.6. ábrán láthatók.

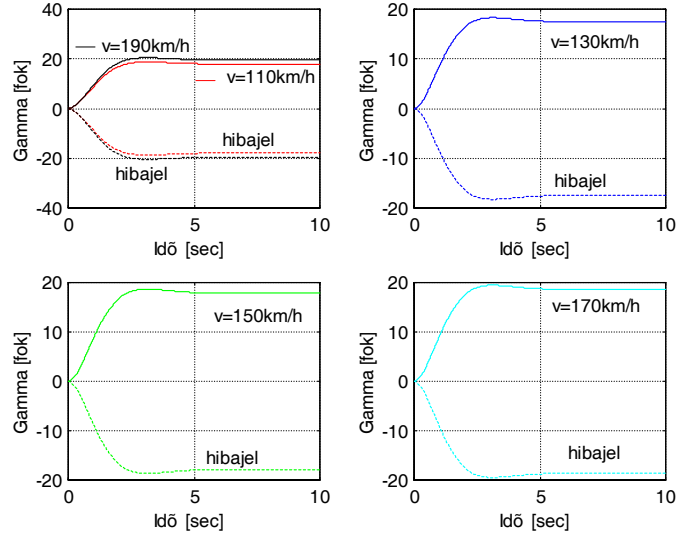


4.6. ábra. A magasságstabilizáló rendszer válaszfüggvénye függőleges szél esetén

A 4.6. ábrán jól látható, hogy a sztochasztikus külső zavarás 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, ezért a magasságstabilizáló rendszer P-típusú szabályozója helyett (a 4.2. ábrán K_{c2} erősítés) javaslom olyan sávszűrő alkalmazását, amely lehetővé teszi a statikus hiba csökkentését, valamint a zárt szabályozási rendszer lengési hajlamának minimalizálását. 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. Ezért javaslom olyan sávszűrő megtervezését és alkalmazását, amely bizonyos frekvenciatartományon integráló jelformáló hatással bír, más tartományban nem változtatja a jelátviteli tulajdonságokat. Javaslom, hogy a szabályozó struktúrája legyen megfelelő töréspontokkal rendelkező PDT1-es tag. A sávszűrő tervezésével a 4.4. alfejezetben foglalkozom.

A bedöntési szög szabályozási rendszer zavarvizsgálatának első vizsgáló jele legyen $D_{zaj}(t)=1(t)$. A 4.7. ábrán látható, hogy a statikus hiba — a repülési sebesség függvé-

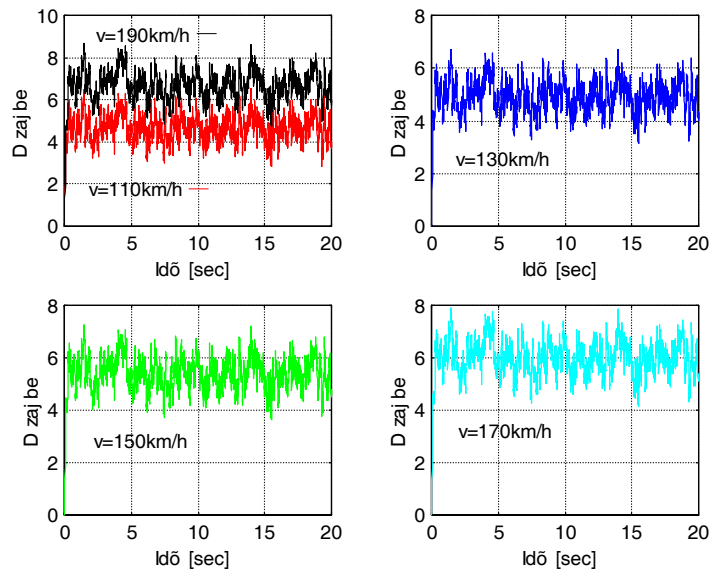
nyében — $17,5^\circ - 20^\circ$ között változik (válaszjel, a folyamatos vonal hibajel a szaggatott vonal). A bedöntési szög szabályozási rendszer tranziens ideje a — repülési sebességtől függően — $1,9 < t_{tr} < 2,4 \text{ sec}$.



4.7. ábra. A bedöntési szögstabilizáló rendszer válasz jele és hiba jele

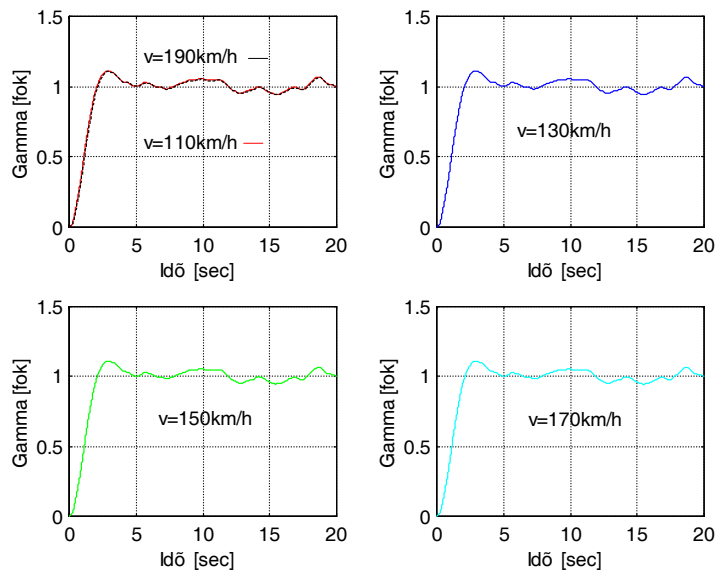
A 4.7. ábra alapján könnyen belátható, hogy a korábban tervezett és javasolt P-típusú szabályozó nem biztosítja az ideális zavarelhárítást. A zérusértékű alapjel megtartása statikus hibával történik. A statikus hiba minimalása úgy lehetséges, hogy a P-típusú szabályozó erősítését növeljük, vagy integráló jelformálást alkalmazunk.

A bedöntési szögstabilizáló rendszer további vizsgálatához legyenek a $D_{zaj}(t)$ vizsgáló jelek a fehérzajból elő állított sztochasztikus jelek, amelyek időfüggvényei — a repülési sebesség értékében paraméterezve — a 4.8. ábrán láthatók.



4.8. ábra. A sztochasztikus vizsgáló jel oldalszél esetén

A vizsgáló jelek állandó összetevői a repülési sebesség növekedésével szintén nőnek. A dőlési robotpilóta $D_{zaj}(t)$ vizsgáló jelre adott válaszfüggvényei a 4.9. ábrán láthatók. A légköri turbulencia hatására oldalirányban $1,12^\circ$ -os csúcsértékű tranziens folyamatok játszódnak le. A válasz jelek alapján megállapítható, hogy az előzőekben tervezett és javasolt P-típusú szabályozó ugyan nem biztosítja az ideális zavarelhárítást, de a zérusértékű dőlési szög tartása elfogadható kis értékű statikus hibával történik.



4.9. ábra. A bedöntési szög tartása z irányú zavar hatására

A zérusértékű dőlési szög tartása során a statikus hiba csökkenthető, vagy az erősítési tényező növelésével, vagy integráló jelformálás alkalmazásával. A gyakorlatban sokszor olyan sávszűrőt alkalmaznak a statikus hiba minimálására, amely bizonyos frekvenciatartományon integráló jelleget mutat, más frekvenciatartományon nem változtatja a jelátviteli tulajdonságokat [143].

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

Megvizsgáltam a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép általam javasolt magasságstabilizáló rendszerének zavarelhárító képességét. Megállapítottam, hogy:

- A repülőgépre ható determinisztikus külső zavarás esetén a magasság stabilizálás statikus hibája 1,3 és 1,67 méter között változik. Ilyen nagyságú statikus hiba a $H=400$ méteres referencia repülési magassághoz képest elhanyagolhatóan kicsi.

- A repülőgépre ható sztochasztikus függőleges szél esetén a magasságstabilizáló rendszer válaszfüggvényében $\sim 1,9 - 2,2$ sec periódusidejű lengések figyelhetők meg, míg a magasságváltozás $0,9 - 1,5$ méter között ingadozik.

Megvizsgáltam a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép dőlési szögstabilizáló rendszerének zavarelhárító képességét. Megállapítottam, hogy:

- a repülőgépre ható oldalirányú determinisztikus külső zavarás esetén a dőlési szögstabilizáló rendszer a zérusértékű bedöntési szöget nagy statikus hibával tartja állandó értéken;
- a repülőgépre ható oldalirányú sztochasztikus külső zavarások esetén a dőlési szög csúcserőke $1,12^\circ$, a tranziens folyamatok jellege lengő.

Következtetés:

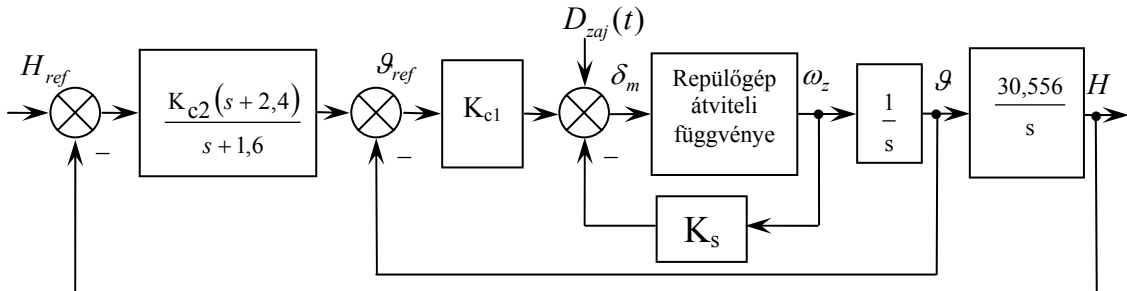
A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép általam tervezett és javasolt magasságstabilizáló rendszere nem biztosítja az ideális zavarelhárítást, így a statikus hiba minimalása érdekében javaslom a szabályozó erősítési tényezőjének növelését, vagy jelformálás alkalmazását. Ismert, hogy a pilóta nélküli repülőgépeken a villamosenergia csak korlátozott mennyiségben áll rendelkezésre, ezért a jelformálás alkalmazását javaslom. A magasság stabilizálás során kialakuló statikus hiba minimalására PDT1 (arányos-differenciáló-egytároló) típusú sávszűrő alkalmazását tartom célszerűnek.

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép általam tervezett és javasolt bedöntési szögstabilizáló rendszere nem biztosítja az ideális zavarelhárítást. A dőlési szögstabilizáló rendszer 1-típusú külső zavarójel, valamint a sztochasztikus külső zavarójel esetén a zérusértékű bedöntési szöget csak statikus hibával tartja állandó értéken. A statikus hiba minimalható a szabályozó erősítési tényezőjének növelésével, vagy megfelelő jelformáló szerv megtervezésével.

4.4. A PDT1 típusú soros jelformáló szerv tervezése

A 4.3. alfejezetből ismert, hogy a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép magasságstabilizáló rendszere egyszerű, P-típusú szabályozóval a külső zavarást statikus hibával szűri ki. A külső zavarás hatására létrejött $0,9 - 1,5$ méter amplitúdójú magasság lengéseket figyelhetünk meg. A függőleges szél a repülési magasság stabilizálása során

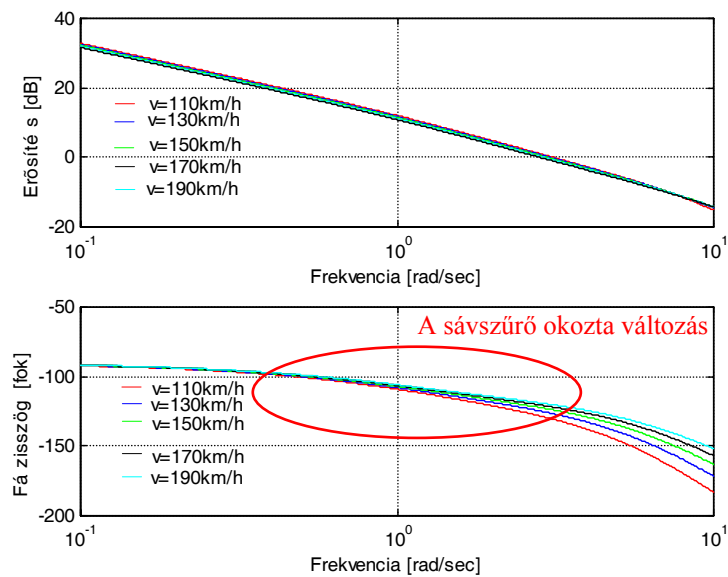
~1,9–2,2 sec periódusidejű lengéseket okoz. A statikus hiba csökkentésére a 4.10. ábrán látható PDT1-es szabályozóval ellátott magasságstabilizáló rendszer alkalmazását javaslom. A PDT1 sávszűrőt $\omega_{alsó} = 2,62 \text{ rad/sec}$; $\omega_{felső} = 3,93 \text{ rad/sec}$ határfrekvenciákra hangoltam, majd a továbbiakban vizsgáltam a szűrő hatását.



4.10. ábra. Zavaraszűrés a magasság szabályozó rendszerben

4.5. A sávszűrővel működő magasságstabilizáló rendszer analízise frekvenciatartományban

A PDT1-es szabályozóval ellátott magasságstabilizáló rendszer Bode-diagramja a 4.11. ábrán látható. Az ábra alapján könnyen belátható, hogy a sávszűrő okozta változás főleg a fázisdiagramon figyelhető meg, míg az erősítés-körfrekvencia jellegzőgörbék változása nem számottevő.



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

Összehasonlítva az előzőekben megtervezett P-típusú szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer 3.42. ábrán látható Bode-diagramját a 4.11. ábrán látható Bode-diagrammal megállapíthatjuk, hogy az erősítés körfrekvencia görbéken a változás kisértékű, míg a fáziskarakterisztikákon a változás megfigyelhető.

A PDT1-es szabályozóval ellátott magasságstabilizáló rendszer frekvenciatartománybeli minőségi jellemzőit a 4.2. táblázat tartalmazza.

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

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

A 3.9. táblázatot összevetve a 4.2. táblázattal, elmondható, hogy a sávszűrő alkalmazása a rendszer amplitúdótartalékait, és a fázistartalékait is csökkentette.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép magasságstabilizáló rendszere tranziens analízise során megállapítottam, hogy a válaszjelek $\sim 1,9 - 2,2$ sec periódusidejű lengő összetevőt tartalmaznak. A periódusidő alsó és felső értékeinek felhasználásával meghatároztam annak a frekvenciatartománynak minimum és maximum értékét, amelyen minimálni szükséges a függőleges szél repülési magasságtartására gyakorolt hatását. Az $\omega_{alsó} = 2,62$ rad/sec és az $\omega_{felső} = 3,93$ rad/sec frekvencia értékek alapján meghatároztam a PDT1-es sávszűrő törésponti frekvenciáit.

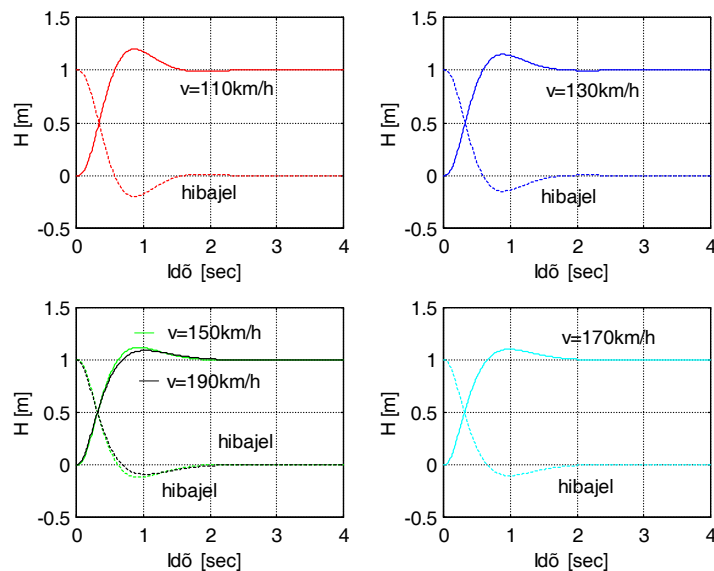
Következtetés:

Összehasonlítottam az előzőekben megtervezett P-szabályozóval működő, és az általam javasolt PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszerek Bode-

diagramjait és a frekvencia tartománybeli minőségi jellemzőit. Az összehasonlítás eredményeként megállapítottam, hogy az új PDT1-es szabályozó megengedhető mértékben lerontja a frekvenciatartománybeli minőségi követelményeket.

4.6. A PDT1-es sávszűrővel működő szabályozási rendszer alapjel-követésének vizsgálata

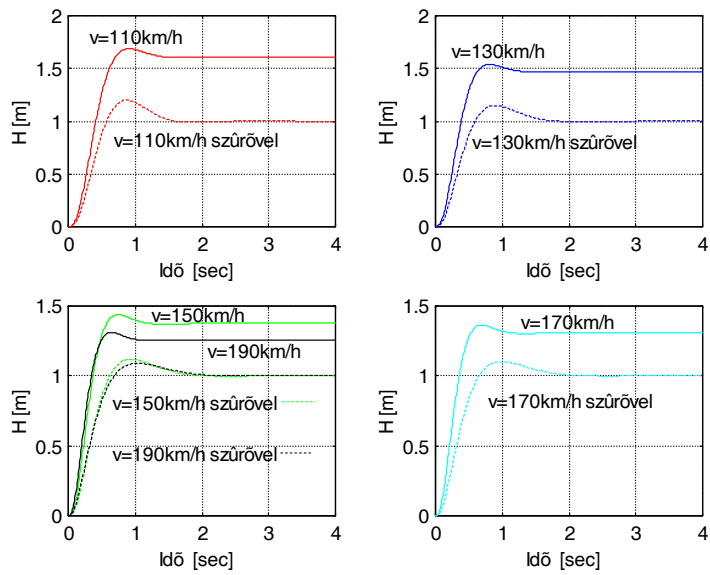
A PDT1-sávszűrővel működő szabályozási rendszer alapjel-követési tulajdonságait a 3.6.1. alfejezetben elvégzett alapjel-követési vizsgálatokhoz hasonlóan egységugrás, egységsebesség, és négyszögjel gerjesztésekre vizsgálom. Az egységugrás bemenőjelre a válaszfüggvények és a hibajel, a 4.12. ábrán láthatók (válaszjel, a folyamatos vonal hibajel a szaggatott vonal).



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

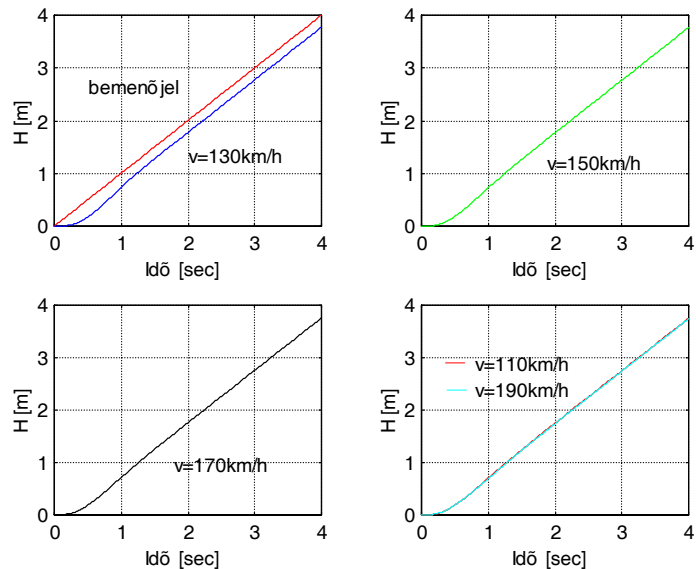
A 3.32. ábrán látható hibajeleket összehasonlítva a 4.12. ábrán láthatókkal elmondható, hogy a sávszűrővel bővített rendszer az $1(t)$ jelet maradé hiba nélkül követi. A transziens idő $0,7 < t_{tr} < 1$ sec -ről, $1 < t_{tr} < 1,9$ sec -ra nőtt.

A 4.13. 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.



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

A 4.14. ábrán a magasságstabilizáló rendszer $h_{ref}(t) = t$ egységsebesség vizsgáló jelre adott válaszfüggvényeit láthatjuk. A kimenő jel $t \cong 0,7$ sec -ig exponenciálisan, majd $t > 0,7$ sec -től lineárisan nő, követve a bemenőjel változását, a repülési sebességtől függetlenül.



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

A 3.33. ábrán látható P-típusú szabályozóval működő zárt magasságstabilizáló rendszer válaszelei meredekségének és a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer válaszelei meredekségének összehasonlítását a 4.3. táblázat tartalmazza.

4.3. táblázat. A válasz függvények meredekségének összehasonlítása

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

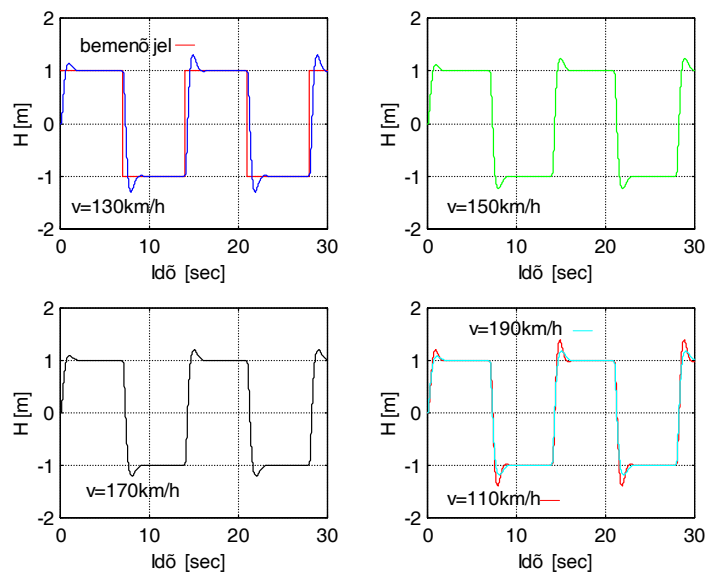
A táblázatból látható, hogy P-szabályzóval működő repülési magasságstabilizáló rendszer válaszejének meredeksége minden vizsgált üzemmódon nagyobb, mint a PDT1-szabályzóval működő zárt rendszer.

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 is lefolytatom. A PDT1-

szabályzóval működő magasságstabilizáló rendszer négyszögjel vizsgálójelre adott válaszfüggvényei a 4.13. ábrán láthatók.



4.15. ábra. A magasság válaszfüggvénye

A bemenőjel változásait követve a PDT1-szabályzóval működő magasságstabilizáló rendszer válaszeje, 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 3.34. ábrán látható magassági válaszfüggvényeit a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer 4.15 ábrán látható válaszfüggvényeivel, meghatározhatjuk a tranziens folyamatok minőségi jellemzőinek változását. A négyszögjel vizsgálójelre adott magassági tranziens válaszfüggvények minőségi jellemzőit a 4.4. táblázat mutatja be.

4.4. táblázat. A válaszfüggvények összehasonlítása

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

A P-szabályozóval működő szabályozási rendszer kisebb csúcsértékkel követi a bemenőjelet, mint a PDT1-szabályozóval működő rendszer. A 110–150 km/h repülési sebességekkel paraméterezett üzemmódokon csökkent a tranziens idő, a 170 km/h, 190 km/h repülési sebességek esetén érvényesült a PDT1 sávszűrő integráló hatása és növekedett a tranziens idő.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

- A repülőgép PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszere statikus hiba nélkül leköveti az egységugrás bemeneti jelet.
- Megállapítottam, hogy a $h_{ref}(t)=1(t)$ bemenőjel esetén PDT1-szabályozó adott sávszélességen ható integráló jellege miatt nő a tranziens idő. Az átmeneti folyamat megnövekedett tranziens ideje kisebb, mint az előírt, tehát az általam javasolt PDT1-szabályozó struktúra eleget tesz az előírt irányítás-technikai minőségi követelményeknek.

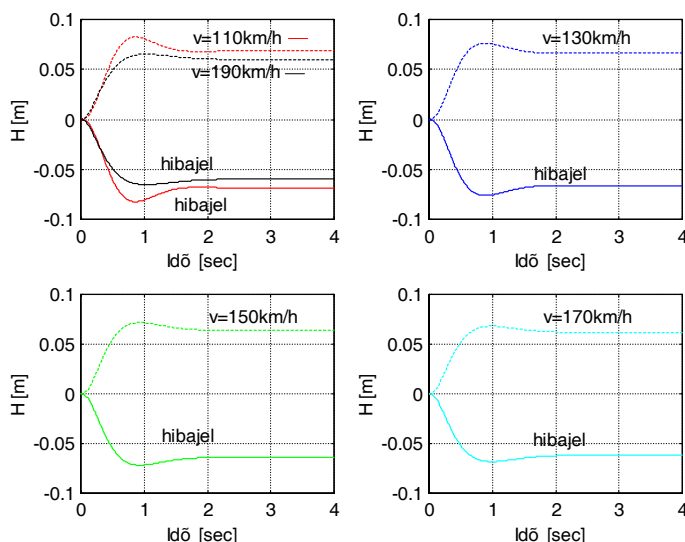
- A négyszögjel bemenőjel estén csak a 170 km/h, 190 km/h repülési sebességek esetén érvényesült a PDT1 sávszűrő integráló hatása és növelte a tranziens időt, de a magasságstabilizáló zárt rendszer továbbra is megfelel az általános irányítástechnikai minőségi követelményeknek.
- A magasságstabilizáló rendszer általam javasolt PDT1-szabályozója az egységsebesség bemeneti jel lekövetése során csökkenti a válaszfüggvények meredekségét.

Következtetések:

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép magasságstabilizáló rendszere számára az általam javasolt PDT1-szabályozó alkalmazása előnyös, mert javítja az alapjel-követési tulajdonságokat és megfelel az előírt minőségi követelményeknek.

4.7. A repülőgép PDT1 szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata

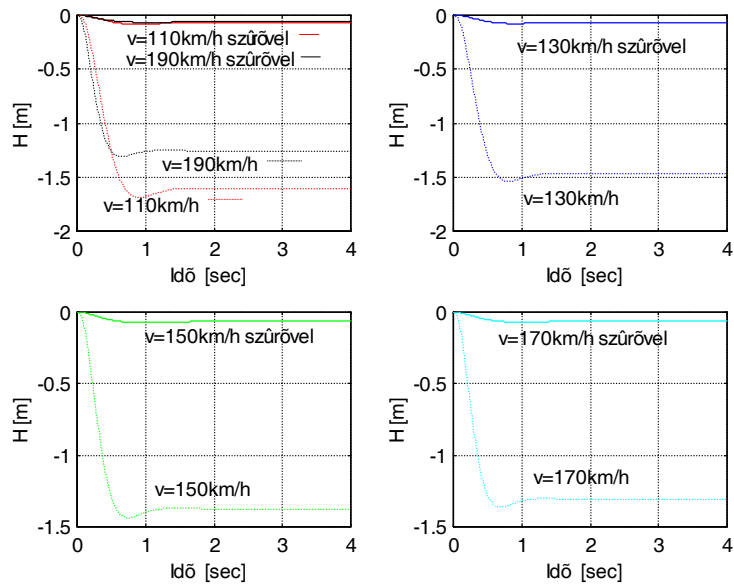
A PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer zavarelhárításának vizsgálata során legyen a zárt szabályozási rendszer vizsgálati jel $D_{zaj}(t) = 1(t)$ alakú. A magasságstabilizáló rendszer válaszjelei és hibajelei a 4.16. ábrán láthatók.



4.16. ábra. A sávszűrővel működő magasság szabályozási rendszer tranziens függvényei

Összehasonlítva a P-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszer 4.4. ábrán látható válasz- és hibajelei a PDT1-szabályozóval működő rendszer 4.16 ábrán látható válasz- és hibajeleivel elmondható, hogy a tranziens idő $t_{tr} < 1,3 \text{ sec}$ -ről $1,2 \leq t_{tr} \leq 1,4 \text{ sec}$ -ra változik. A magasságtartás során statikus hiba viszont 1,3–1,6 méterről 0,062 méterre csökkent.

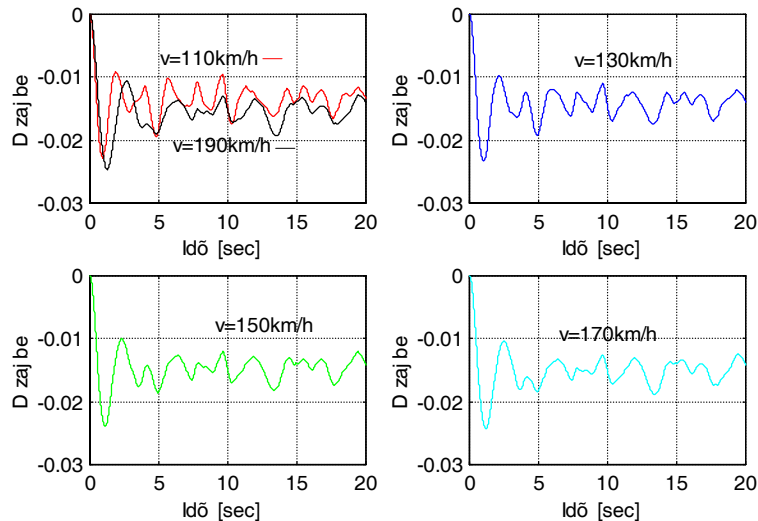
A 4.17. ábrán a P- illetve a PDT1-szabályozóval működő magasságstabilizáló rendszerek válaszjeleit hasonlíthatjuk össze.



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

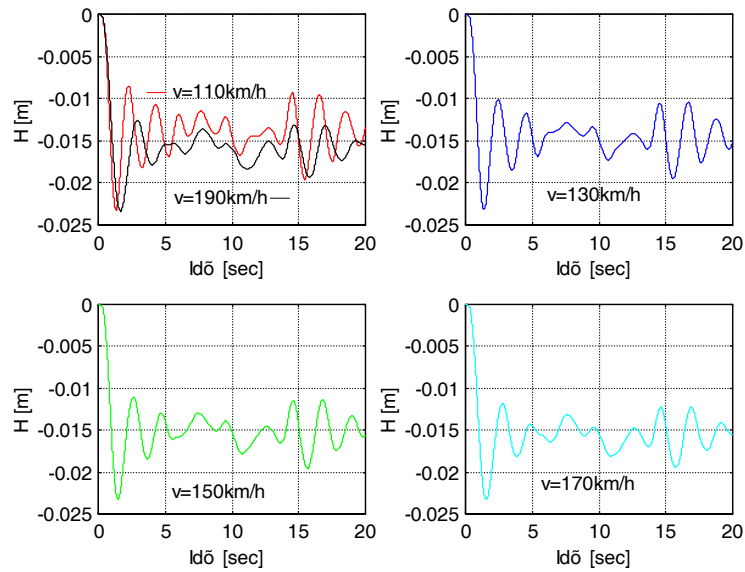
Az ábrán látható, hogy a PDT1-szabályozóval működő rendszer zavar védettsége jobb, mint a P-szabályozóval működő rendszeré. A zavaró jelek hatására bekövetkező 1,2–1,7 méteres magasságváltozást a PDT1 szabályozó kevesebb, mint 0,08 méterre csökkentette.

A 4.18 ábrán a magasságstabilizáló rendszere ható függőleges szél a repülési sebesség értékében paraméterezett időfüggvényei láthatók.



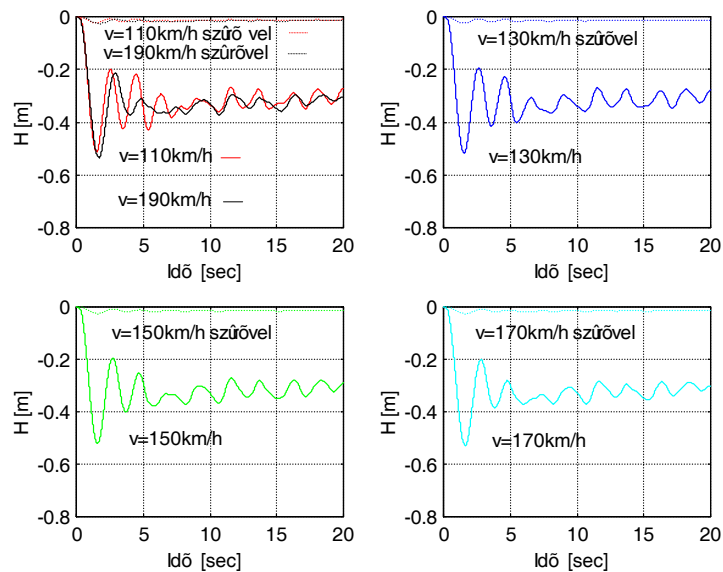
4.18. ábra. A sztochasztikus függőleges szél vizsgáló jelei

A repülőgép magasságstabilizáló rendszerének sztochasztikus külső zavarásra adott válaszfüggvényei a 4.19. ábrán láthatók.



4.19. ábra. A repülési magasság válaszjelei

A 4.19. ábrán jól látható, hogy az általam javasolt 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 ~1,9–2,2 sec periódusidejű lengések amplitudója számottevően csökken. A P-szabályozóval és a PDT1-szabályozóval ellátott repülési magasságstabilizáló rendszer sztochasztikus analizisének eredménye a 4.20. ábrán látható.



4.20. ábra. A sztochasztikus analizis válaszfüggvényei sávszűrővel, és sávszűrő nélkül

A 4.20 ábra alapján könnyen belátható, hogy az általam javasolt PDT1-szabályozó alkalmazása lényegesen csökkenti a statikus hiba nagyságát és a zárt szabályozási rendszer lengési hajlamát.

EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy:

- a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép magasságstabilizáló rendszere számára az általam tervezett és javasolt 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.

Következtetések:

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép magasságstabilizáló rendszere számára az általam javasolt PDT1-szabályozó alkalmazása előnyös, mert nagymértékben javítja a zavarelhárítási tulajdonságokat, és megfelel az előírt irányítástechnikai minőségi követelményeknek.

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatban szakirodalmi hivatkozások felhasználásával összefoglaltam — a dolgozat elkészítéséhez felhasznált — repülésszabályozó rendszerek előzetes tervezésére vonatkozó repüléstudományi és szabályozástechnikai ismereteket. Bemutattam az értekezés témájához kapcsolódó, a kitűzött kutatási célok eléréséhez felhasznált MATLAB[®] segédfüggvényeket.

Elvégeztem a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép, [131] irodalomban és az 1. sz. mellékletben rendelkezésre álló repülésmechanikai matematikai modelljei felhasználásával, irányíthatósági és megfigyelhetőségi vizsgálatait, és a nemirányított repülőgép irányítástechnikai minőségi jellemzőinek idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálatait. A vizsgálatok alapján, és a minőségi követelmények figyelembevételével LQR és pólus áthelyezés szabályozó tervezési eljárások segítségével elvégeztem a hossz- és oldalirányú robotpilóták előzetes tervezését. Megvizsgáltam a szabályozási rendszer működését és minőségi jellemzőit idő- és frekvenciatartományban.

Külső zavarások modellezésére egységugrás jelet és fehérzaj generátor kimenő jeleiből szűrők segítségével előállított sztochasztikus jeleket alkalmaztam. A determinisztikus és sztochasztikus jelekkel gerjesztettem a szabályozó rendszert és megvizsgáltam a zavarelhárító képességét.

A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép analíziseit új MATLAB[®] környezetben írt forrásprogram segítségével végeztem.

A kitűzött kutatási célokat teljesítettem, a dolgozatban leírt számítógépes előzetes tervezési módszerrel megterveztem és analizáltam a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép robotpilótáját. A tervezési módszer nemcsak a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszerének tervezésére alkalmas, hanem bármely más repülőtechnika repülésszabályozó rendszerének tervezése során is általánosan felhasználható.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az értekezésben bemutatott kutató munkám új tudományos eredményeit a következő tézisekbe foglalom össze:

1. Tézis Kidolgoztam egy — a repülésmechanika és a modern szabályozástechnika együttes alkalmazását bemutató — számítógépes előzetes tervezési eljárást [S.3., S.4., S.5., S.6., S.7., S.10., S.11., S.13., S14.].

- 1.1. A szabályozástechnikai feladat megoldása érdekében kivonatoltam, célirányosan rendszereztem és összefoglaltam a repülőgépek térbeli mozgásának matematikai modellezésére vonatkozó elméleti ismereteket, valamint a repülésszabályozó rendszerek elméletéhez kapcsolódó és a szabályozótervezésnél alkalmazott modern szabályozástechnikai ismereteket.
- 1.2. Számítógépes vizsgálatok eredményeképpen megállapítottam, hogy a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép többváltozós repülésmechanikai matematikai modellje eleget tesz a szabályozótervezés szükséges és elégséges feltételeinek.
- 1.3. Számítógépes idő- és frekvenciatartománybeli analízisekkel bizonyítottam, hogy a többváltozós repülésmechanikai matematikai modellel meghatározott nemirányított repülőgép instabilan viselkedik. Ebből következik, hogy a repülőgép biztonságos légi üzemeltetéséhez olyan — az előírt irányítástechnikai minőségi követelményeket teljesítő — zárt repülésszabályozó rendszer tervezése szükséges, ami biztosítja a repülőgép stabilitását.

2. Tézis A többváltozós repülésmechanikai matematikai modell felhasználásával lefolytatott rendszeranalízis alapján a négyzetes integrál kritériumra (LQR) épülő tervezési módszer és a pólus áthelyezés tervezési módszer felhasználásával egy, a továbbiakban mintaszerűen alkalmazható, számítógépes szabályozó tervezést végeztem [S.3., S.4., S.6., S.8.].

- 2.1. Az LQR szabályozótervezési módszer alkalmazásával megterveztem a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép hosszirányú mozgása állapotváltozóinak stabilizálását biztosító optimális, teljes állapot–visszacsatolású zárt szabályozási rendszert. Az elvégzett idő- és frekvenciatartománybeli számítógépes rendszeranalízis eredmények alapján megállapítottam, hogy a zárt szabályozási rendszer eleget tesz az előírt irányítástechnikai minőségi követelményrendszernek.

- 2.2. A Szojka–III pilóta nélküli repülőgép oldalirányú mozgása állapotváltozóit stabilizáló zárt szabályozási rendszer számítógépes idő- és frekvenciatartománybeli vizsgálatainak eredményeit kiértékelve arra a következtetésre jutottam, hogy az LQR tervezési módszer alkalmazása az előírt minőségi jellemzők tekintetében megfelelő rendszer tervezését tette lehetővé. Az LQR módszer súlyozó mátrixainak beállítása azonban nehézséget okozott, ezért a — gyakorlatban általánosan elfogadott — domináns póluspár hatásának érvényesülése érdekében új szabályozó tervezése szükséges.
- 2.3. A pólus áthelyezés módszere felhasználásával megterveztem az oldalirányú mozgás állapotváltozóit stabilizáló zárt szabályozási rendszer szabályozóját. Idő- és frekvenciatartománybeli analízisekkel bizonyítottam, hogy a zárt szabályozási rendszer eleget tesz az előírt irányítástechnikai minőségi követelményrendszernek.
- 2.4. Megvizsgálva a repülési magasságstabilizáló, és a dőlési szögstabilizáló zárt szabályozási rendszerek alapjel-követési tulajdonságait, megállapítottam, hogy a stabilizáló rendszerek alapjel-követése eleget tesz a zárt szabályozási rendszerekkel szemben támasztott általános irányítástechnikai minőségi követelményeknek.

3. Tézis A repülési magasságstabilizáló rendszer zavarelhárító képességének javítása érdekében új struktúrájú szabályozót terveztem [S.1., S.2., S.9., S.12., S.15.].

- 3.1. Külső zavarások hatásának modellezésére egységugrásjelet és fehérzaj generátor kimenő jeléből szűrők segítségével előállított sztochasztikus jeleket alkalmaztam. A légköri turbulencia függőleges összetevője sztochasztikus idősorát közepes erősségű szélre határoztam meg. A légköri turbulencia számítógépes modellezésére új MATLAB[®] forráskódot készítettem.
- 3.2. Az elvégzett determinisztikus és sztochasztikus zavarelhárítási analízisek eredményeinek kiértékelése alapján megállapítottam, hogy a Szojka–III pilóta nélküli repülőgép P-szabályozóval működő repülési magasságstabilizáló rendszere zavarelhárító képességének javítása szükséges.
- 3.3. A számítógépes rendszeranalízis eredményei alapján a repülési magasságstabilizáló rendszer zavarelhárító képességének javítására új struktúrájú,

PDT1-szabályozóval (arányos-differenciáló-egytárolós sávszűrő) működő zárt szabályozási rendszer alkalmazását javasoltam.

3.4. Számítógépes analízisekkel bizonyítottam, hogy az általam tervezett PDT1-szűrővel működő zárt szabályozási rendszer alapjel-követési és zavarelhárítási tulajdonságai megfelelnek az előírt irányítástechnikai minőségi követelményeknek.

TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK, IRÁNYOK

Az értekezésben bemutatott eredmények és megfogalmazott tézisek a repülésszabályozó rendszertervezés egy fázisának tekinthető, így a kutatómunka is folytatható. A jövőbeli kutatásokat több főirányban lehet folytatni:

- tervezni új szabályzókat más szabályozótervezési módszerek alkalmazásával, összehasonlítani a kapott eredményeket;
- kiterjeszteni a vizsgálatokat más üzemmódokra, vizsgálni a bemenetek egymásra hatását, más típusokra is kiterjeszteni a vizsgálatokat, (megnő a bonyolultság, egyenletszám, bemenetszám, stb.);
- vizsgálni az elkészített szabályozó egyszerűsítésének, és megépíthetőségének lehetőségeit. A dolgozatban elkészített szabályozások, és azok hangolása, tulajdonságainak összevetése számítógépes szimulációval történt. A jövőre vonatkozó fontos feladat lehet az eredményeknek megfelelő kísérleti berendezés megépítése, tesztelése, analízise stb.;
- a vizsgálatok kiterjesztése, egy nemlineáris dinamikus analízis elvégzése, és modellalkotás;
- a dolgozaton lényegesen túlmutató tovább kutatási lehetőség, hogy egy kísérleti berendezés berepülése által kapott idősorokból identifikálni a repülőgép új repülésmechanikai matematikai modelljét, szabályozóját, újabb tesztek folytatni.

AZ ÉRTEKEZÉS FELHASZNÁLHATÓSÁGA

Az értekezés egésze és egyes fejezetei külön-külön is felhasználhatók a repülőműszaki mérnökök képzéséhez. A dolgozatban elkészített szabályozások, és azok hangolása, tulajdonságainak vizsgálata számítógépes szimulációval történt. Az eredmények felhasználásával kísérleti berendezés készíthető, amely tesztelése, analízise valós körülmények között folytatódhat. Új szabályozók tervezésekor összehasonlítási alapot képezhetnek az általam használt tervezési módszerek, és elért eredmények más szabályozótervezési módszerekkel szemben.

Az eredmények alapján a vizsgálatok kiterjeszthetők egy nemlineáris dinamikus analízis elvégzéséhez, és modellalkotáshoz. Az elkészített MATLAB[®] m-fájlok felhasználhatók repülőgépek szabályozóinak tervezéséhez, hangolásához.

Az elvégzett vizsgálatok kiindulópontot képezhetnek más típusú repülőgépek robotpilóta rendszereinek előzetes tervezéséhez.

Szolnok, 2005. 10. 21.

Szegedi Péter doktorandusz

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. **Асланян, А. Э.** Системы Автоматического Управления Полётом Летательных Аппаратов, Часть I, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, Киев, 1984.
2. **Ailer, P.** Kisteljesítményű gázturbina modellezése és nemlineáris irányítása, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki Kar Repülőgépek és Hajók Tanszék, Ph.D. Disszertáció, Budapest, 2002.
3. **Anderson Jr., J. D.**, Aircraft performance and design, McGraw-Hill International editions, 1999.
4. **Athans, M.** The Role and Use of the Stochastic Linear-Quadratic-Gaussian Problem in Control System Design, IEEE Trans. Automat. Contr., AC-16, 1971. (529–552).
5. A repülési elmélet alapjai, tankönyv, Honvédelmi Minisztérium, 1962.
6. A repülő szerkezetek repülésének és harci manőverezésének dinamikája, módszertani segédlet, A Magyar Néphadsereg Repülőfőnökség Kiadványa, 1989.
7. **Békési, B.** A repülőgép irányításának automatizálása leszálláskor, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, 1996/2, Szolnok, 1996. (13–24).
8. **Békési, B.** Automatikus repülőgép vezérlőrendszerek szabályozási köreinek analízise, Budapesti Műszaki Egyetem, Diplomaterv, Budapest, 1995.
9. **Békési, B.** A repülőgép hosszirányú mozgásának matematikai modellje, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, (Tudományos kiképzési Közlemények), 1996/1, Szolnok, 1996. (75–88).
10. **Békési, L.** A multimédia és a működő modellek alkalmazási lehetőségei a repülőtisztképzés javítása érdekében, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Doktori Iskola, Ph.D. Értekezés, Budapest, 2001.
11. **Biran, A. – Breiner, M.** MATLAB® for Engineers, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1995.
12. **Blakelock, J. H.** Automatic Control of Aircrafts and Missiles, John Wiley & Sons, New York, 1965.
13. **Bokor, J. – Gáspár, P. – Kohut, M. – Kurutz, K.** Szabályozástechnika I., Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1998.

14. **Bokor, J. – Kurutz, K. – Kohut, M. – Gáspár, P.** Irányítástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1995.
15. **Bokor, J.** Bevezetés az állapotter elméletbe, kézirat, Budapest, 1994.
16. **Brogan, W. L.** Modern control theory, Prentice-Hall International Inc., 1991.
17. **Бюшгенс, Г. С. – Студнев, Р. В.** Динамика Самолёта Пространственное Движение, Машиностроение, Москва, 1983.
18. **Chiang, R. Y. – Safonov, M. G.** MATLAB[®] Robust Control Toolbox, User's Guide (version 2), The MathWorks, Inc., 1996.
19. **Chipperfield, A. J. – Fleming, P. J.** MATLAB[®] Toolboxes and Applications for Control, Peter Peregrinus Ltd., 1993.
20. Control System Toolbox 5.1 for Use With MATLAB[®] (Release 12.1), User's Guide, The MathWorks, Inc., 2001.
21. **Csáki, F. – Bars, R.** Automatika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1972.
22. **Csáki, F.** Automatika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
23. **Csáki, F.** Fejezetek a szabályozástechnikából. Állapotegyenletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973.
24. **Csáki, F.** Irányítástechnikai kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
25. **Csáki, F.** Korszerű szabályozáselmélet, Akadémia Kiadó, Budapest, 1970.
26. **Csáki, F.** Lineáris szabályozási rendszerek analízise, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
27. **Csáki, F.** Szabályozások dinamikája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
28. **Csáki, F.** Szabályozástechnika, kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
29. **Чернобровкина, Л. С.** Беспилотные летательные аппараты, Издательство Машиностроение, Москва, 1967.
30. **Dickinson, B.** Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers, Sir Isaac Pitman & Sons LTD, London, 1968.
31. **Dóka, I.** Rakéta-irányítástechnika, jegyzet, Kilián Gy. Re. Mű. Főiskola, Szolnok, 1972.
32. **Doyle, J. C. – Glover, K. – Khargonekar, P. P. – Francis, B.** State-space solutions to the standard H_2 and H_∞ control problems, IEEE Trans. Aut. Control vol., 34, 1989. (831–846).

33. **Duncan, W. J.** The principles of the Control and Stability of Aircraft, Cambridge, University press, 1952.
34. **Fenyő, I.–Frey, T.** Matematika villamosmérnököknek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
35. **Fielding, J. P.** Introduction to aircraft design, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
36. **Fodor, Gy.** Lineáris rendszerek analízise, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
37. **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. (483–488).
38. **Grimble, M. J.** Robust Industrial Control – Optimal Design Approach for Polynomial Systems, Prentice-Hall, 1994.
39. **Hacker, T.** Flight Stability and Control, American Elsevier Publishing Co., 1970.
40. **Hangos, K. – Bokor, J. – Szederkényi, G.** Computer controlled systems, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2002.
41. **Halász, B. – Helybéli, Z. – Juhász, F–né. – Szilágyi, B. – Villányi, I.** Állapottranszformáció Irányíthatóság és megfigyelhetőség állapotirányítás, Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998.
42. **Halász, B. – Helybéli, Z. – Juhász, F–né. – Szilágyi, B. – Villányi, I.** Folytonos dinamikus rendszer lineáris állapotegyenletének megoldása, Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998.
43. **Halász, B. – Helybéli, Z. – Juhász, F–né. – Szilágyi, B. – Villányi, I.** Jelátvivő tagok frekvenciafüggvényei, szabályozás stabilitásvizsgálata a frekvenciamódszer alapján, Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998.
44. **Halász, B. – Helybéli, Z. – Juhász, F–né. – Szilágyi, B. – Villányi, I.** MATLAB control system toolbox simulink, Műegyetemi kiadó, Budapest, 1998.
45. **Helm, L. – Marton, J.** A szabályozástechnika elméleti alapjai (lineáris rendszerek) II. rész, kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1965.
46. **Helm, L.** A szabályozástechnika elméleti alapjai (lineáris rendszerek), kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, 1964.

47. **Horváth, D.** A repülőgép dinamikai tulajdonságának vizsgálata hosszirányú mozgás esetén, Tudományos Kiképzési Közlemények, 1994/2–3. Szolnok, 1994. (55–89).
48. **Horváth, D.** A repülőgép dinamikai tulajdonságának vizsgálata oldalirányú mozgás esetén, Tudományos Kiképzési Közlemények, 1995/1. Szolnok, 1995. (25–37).
49. **Horváth, D.** A repülőgép hosszirányú mozgásának felosztása, mozgásegyenletek, átviteli függvények, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, 1996/1. Szolnok, 1996. (13–30).
50. **Horváth, D.** A Vadászrepülőgépeken alkalmazott robotpilóták, Magyar Néphadsereg Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, Repülő Szakág Szaktanszék, Szolnok, 1986.
51. **Horváth, D.** Önműködő szabályozások vizsgálata analóg számítógép segítségével: a robotpilóta iránystabilitását leíró linearizált differenciálegyenlet-rendszer programozása, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, 1996/2. Szolnok, 1996. (103–129).
52. **Hunt, K. J. – Sebek, M. – Kucera, V.** Polynomial solution of the standard multivariable H_2 – optimal control problem, IEEE Trans. Aut. Control vol. 39, 1994. (1502–1507).
53. **Jereb, G.** Aerodinamika és repüléselmélet II., Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
54. **Kulcsár, B.** LQG/LTR controller design for an aircraft model, Periodica polytechnica, Ser. Transp. Eng. Vol. 28, No. 1–2, 2000. (131–142).
www.pp.bme.hu/tr/2000_1/pdf/tr2000_1_12.pdf
55. **Kulcsár, B.** LQ Servo and LQG/LTR Controller Design for an Aircraft Model, Repüléstudományi Közlemények Különszám I., Szolnok, 2001. (67–76).
56. **Kulcsár, B.** Repülőgép Mozgásának Szabályozástechnikai Vizsgálata és Tervezési Lehetőségei, Repüléstudományi Közlemények XII. évfolyam 29. szám, Szolnok, 2000. (91–100).
57. **Kuo, B. C.** Önműködő szabályozó rendszerek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
58. **Kurutz, K. – Tarnai, G.** Automatika elemei, Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
59. **Kurutz, K.** Szabályozástechnika I., Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1993.
60. **Lantos, B.** Irányítási rendszerek elmélete és tervezése I. Egy változós szabályozások, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.

61. **Lantos, B.** Irányítási rendszerek elmélete és tervezése II. Korszerű szabályozási rendszerek, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2003.
62. **Lehoczky, J. – Márkus, M. – Mucsi, S.** Szervorendszerek, követő szabályozások, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
63. **Maciejowski, J. M.** Multivariable Feedback Design, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
64. MATLAB® Control System Toolbox 4.0, User's Guide, The MathWorks. Inc., 1996.
65. MATLAB®-The Language of Technical Computing. User's Guide, The MathWorks, Inc., 1997.
66. **McLean, D.** Automatic Flight Control Systems, Prentice Hall, New York, 1990.
67. **Под ред. Мхитаряна, А. М.** Динамика Полёта, Машиностроение, Москва, 1971.
68. MIL–C–18244A (AS) Control and stabilization system: automatic, piloted aircraft general specification for, 1992.
69. MIL–F–8785C Flying Qualities of Piloted Airplanes, 1996.
70. MIL–F–9490D Flight Control Systems – Design, Installation and test of piloted aircraft general specification for, 1993.
71. **Nelson, R. C.** Flight Stability and Automatic Control, WCB McGraw-Hill, 1998.
72. **Németh, G.** Automatika I., kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1983.
73. **Németh, G.** Automatika II., kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1983.
74. **Németh, G.** Automatika III., kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1983.
75. **Ogata, K.** Designing Linear Control Systems with MATLAB®, Prentice-Hall, International Inc., 1994.
76. **Ogata, K.** Modern Control Engineering, Prentice-Hall International Ltd., 1990.
77. **Ogata, K.** Solving Control Engineering Problems with MATLAB®, Prentice-Hall, International Inc., 1994.
78. **Óvári, Gy.** 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).

79. **Óvári, Gy.** A manőverezőképeség minőségi javításának néhány lehetősége az ezredforduló harci repülőgépein, Tudományos kiképzési Közlemények, 1989/2. Szolnok, 1989. (6–21).
80. **Peták, Gy.** Forradalmian új fejlesztési irány a légi háborúk megvívására, Repülés-tudományi Közlemények XIII évfolyam 32. szám, Szolnok, 2001. (39–42).
81. **Petz, E.** Önműködő szabályozók optimális behangolása, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
82. **Prokk, P. – Gönczi, S. – Gyulaffy, B. – Mátyás, A. – Ráth, T. – Simon, A. – Vajda, R.–né** Haditechnikai füzetek 1. szám, Pilóta nélküli felderítő repülőeszközök HM. HTI. 1999.
83. **Pokorádi, L.** Aerodinamika III., Ideális közeg két- és háromméretű áramlása, Magyar Honvédség Szolnoki Repülőtisztai Főiskola, Szolnok, 1993.
84. **Rácz, E.** A repülés mechanikája, Tankönyvkiadó, Budapest, 1953.
85. **Rácz, E.** Repülőgépek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
86. **Raven, F. H.** Az önműködő szabályozás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
87. **Re/914** szabályzat, Vadászrepülőgépek Automatikus Vezérlő Rendszerei, Honvédelmi Minisztérium, 1981.
88. **Rohács, J. – Simon, I.** Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1989.
89. **Sályi, B.** Mechanika III. (Kinetika – kinematika), kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.
90. **Seckel, E.** Stability and Control of Airplanes and Helicopters, Académie Press, 1964.
91. **Shahian, B. – Hassul, M.** Control System Design Using MATLAB[®], Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
92. **Silbersdorff, L.** Mechanika III. (Reform jegyzet), kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1969.
93. **Somló, J. – Pham Thuong Cat** Lineáris és nemlineáris szabályozási rendszerek számítógépes tervezése, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
94. **Somodi, J.** Irányítástechnika I. (Lineáris szabályozástechnika), kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1967.

95. **Stein, G. – Athans, M.** The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design, IEEE Transaction on Automatic Control, AC-32, 1987. (105–114).
96. **Szabolcsi, R.** Automatikus repülésszabályozó rendszerek, Egyetemi Jegyzet, Budapest, 2004.
97. **Szabolcsi, R. – Eszes, J. – Németh, M.** Design of the robust controller for the fighter aircraft pitch attitude control system, 11th Congress „Aerospace’97”, pp. (D19–D25), Belgrade, Yugoslavia, 1997.
98. **Szabolcsi, R. – Gáspár, P. – Pokorádi, L.** Robust controller synthesis for the high maneuverable fighter aircraft, 21th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Melbourne, Australia, Presented in the Poster Session of the Conference, 1998.
99. **Szabolcsi, R. – Pokorádi, L.** Matematical models applied to investigate aircraft systems, manuscript, Pannonian Applied Matematical Meetings, Monographic Booklets in Applied & Computer Mathematics, 1999.
100. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Computer Aided Control Law Synthesis For The Unmanned Aerial Vehicle, Pannonian Applied Matematical Meetings PC-141, 22–25 May, pp. (in print), Balatonalmádi, Hungary, 2003.
101. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Modeling Atmospheric Disturbances Affecting Motion of the UAV, Pannonian Applied Matematical Meetings PC-141, 22–25 May, pp. (in print), Balatonalmádi, Hungary, 2003.
102. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Pilóta nélküli repülőgépek számítógépes analízise, Szolnoki Tudományos Közlemények, (CD ROM-on), Szolnok, 2002.
103. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness Analysis of Control Systems, Pannonian Applied Matematical Meetings PC-136, 24–26 January, pp. (in print), Göd, Hungary, 2002.
104. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness Analysis of the Flight Control Systems, 8th Mini Conference on Vehicles System Dynamics, Identification and Anomalies, November 11–13, pp. (in print), Budapest, 2002.
105. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness Analysis of the Flight Stability Augmentation Systems, Pannonian Applied Matematical Meetings PC-136, 24–26 January, pp. (in print), Göd, Hungary, 2002.

106. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness stability and robust performance of the automatic flight control systems, AARMS, MZNDU, vol. 1., issue 2., pp. (253–269), Budapest, 2002.
107. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszerének előzetes méretezése, Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben, Tudományos konferencia, Repüléstudományi Közlemények Elektronikus különszáma (CD mellékleten), Szolnok, 2005 04. 15.
108. **Szabolcsi, R.** Automatikus sebességstabilizáló rendszer analízise és szintézise, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, 1996/1, (31–50), Szolnok, 1996.
109. **Szabolcsi, R. – Eszes, J. – Németh, M.** Instabil szabályozási rendszerek stabilizálása állapot-visszacsatolással, Repüléstudományi Közlemények IX. évfolyam 23. szám, 1997/1, (109–120), Szolnok, 1997.
110. **Szabolcsi, R.** Kismagasságú repülések automatizálása, Tudományos Kiképzési Közlemények, 1991/2, (40–63), Szolnok, 1991.
111. **Szabolcsi, R.** A légi járművek nemlineáris mozgásegyenleteinek linearizálása, Repüléstudományi Közlemények, 1992/2–3, (64–75), Szolnok, 1992.
112. **Szabolcsi, R. – Ludányi, L. – Eszes, J. – Tóth, T.** Értéktartó szabályozási rendszerek számítógépes tervezése, Repüléstudományi Közlemények X. évfolyam 25. szám, 1998/2. (67–80), Szolnok, 1998.
113. **Szabolcsi, R. – Ludányi, L. – Eszes, J. – Tóth, T. – Kovács, J.** Értékkövető szabályozási rendszerek számítógépes tervezése, Repüléstudományi Közlemények X. évfolyam 25. szám, 1998/2. (103–111), Szolnok, 1998.
114. **Szabolcsi, R.** Repülőgép csűrőlapok egyenértékű kitérésének megállapítása, Repüléstudományi és Kiképzési Közlemények, 1995/1, (13–18), Szolnok, 1995.
115. **Szabolcsi, R.** Repülőgép leszállásának automatizálása, Szolnoki Tudományos Közlemények IV., (182–207), Szolnok, 2000.
116. **Szabolcsi, R.** Repülőgépek oldalstabilitásának vizsgálata analóg és digitális számítógépeken, Budapesti Műszaki Egyetem, Egyetemi doktori értekezés, Budapest, 1994.
117. **Szabolcsi, R.** Robust Controller Synthesis for the Aircraft Pitch Attitude Control System, Repüléstudományi Közlemények XII. évfolyam 29. szám, (79–88), Szolnok, 2000.

118. **Szabolcsi, R.** Robusztus szabályzó tervezése – elméleti alapok, Szolnoki Tudományos Közlemények III., (13–18), Szolnok, 1999.
119. **Szabolcsi, R.** Solution of Control Problems Using MATLAB®, Repüléstudományi Közlemények XI. évfolyam 26. szám, 1999/1. (187–224), Szolnok, 1999.
120. **Szabolcsi, R.** Szabályozási rendszerek optimális méretezése négyzetes integrálkritériummal, Haditechnika, 1996/3, (2–4), 1996.
121. **Szabolcsi, R.** The aircraft flight control systems' optimization using LQR and LQG design methods, Proc. of the 5th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, TU of Budapest, pp. (425–434), 1996.
122. **Szabolcsi, R.** Modern Szabályozástechnika, Egyetemi Jegyzet, Budapest, 2004.
123. **Szabolcsi, R.** A MATLAB® programozása, Egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.
124. **Szabolcsi, R.** Szabályozástechnikai feladatok megoldása a MATLAB® alkalmazásával, Egyetemi jegyzet, Budapest, 2004.
125. **Szászi, I. – Gáspár, P.** Robust servo control design using the H_∞/μ method, Periodica polytechnica, Ser. Transp. Eng. Vol. 27, No. 1–2, pp. (3–16), 1999. www.pp.bme.hu/tr/1999_1/pdf/tr1999_1_01.pdf
126. **Szászi, I. – Kulcsár, B.** Az F–16 repülőgép hosszirányú mozgásának irányítása H_∞/μ szabályzóval, Repüléstudományi Közlemények XIV. évfolyam 34. szám, (113–125), Szolnok, 2002.
127. **Szászi, I. – Kulcsár, B.** Robust control and fault detection filter design for aircraft pitch axis, Periodica Polytechnica, Ser. Transp. Eng. Vol. 29, No. 1-2, pp. (83–100), 2001. www.pp.bme.hu/tr/2001_1/pdf/tr2001_1_07.pdf
128. **Szádai, R.** A szabályozáselmélet elemei, 3., javított kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
129. **Szegedi, P.** A pilóta nélküli repülőgépek irányíthatóságának és megfigyelhetőségének vizsgálata, Repüléstudományi Közlemények XIV. évfolyam 34. szám, (129–150), Szolnok, 2003.
130. **Szilágyi, B.** Az automatika alapjai, (kézirat), Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
131. SZOJKA-III/TV kooperációs fejlesztés tudományos technikai adatai, IV. fejezet, Zelong Instr., Brno, 1993.

132. **Takaba, K.–Katayama, T.** H_2 output feedback control for descriptor systems, Automatica vol. 34, pp. (841–850), 1998.
133. **Tucker, G. K.–Willis, D. M.** Az önműködő szabályozás egyszerűsített technikája, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
134. **Tuschák, R.** Szabályozástechnika 5. Füzet. Optimális irányítási rendszerek, kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.
135. **Tuschák, R.** Szabályozástechnika I. Füzet, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1993.
136. **Tuschák, R.** Szabályozástechnika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994.
137. **Vegte, J. V.** Feedback control systems, Prentice-Hall, International Inc., New Jersey, 1990.
138. **Zhou, K.–Doyle, J. C.–Glover, K.** Robust and optimal control, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
139. **Yeh, H. H.–Banda, S. S.–Chang, B. C.** Necessary and sufficient conditions for mixed H_2 and H_∞ optimal control, IEEE Trans. On Automatic Control, 37, 1992. (355–358).
140. **Amaczi, V.** Többcélú, kisméretű, pilóta nélküli repülőgép-komplexum <http://www.haditechnika.hu/Archivum/199201/920110.htm>
141. Tájékoztató a külföldi repülési szakfolyóiratokban megjelent fontosabb cikkekről és információkról, Repülőműszaki szolgálatfőnökség kiadványa 2005/2. (9–16)
142. **Peled, A.** Advanced technologies and Approaches for next generation UAVs, ROBOT WARFARE 2, Conference, NDU, Budapest, 27.–28. 11. 2002.
143. **Szabolcsi, R.—Szegedi, P.** Design of the Chebyshev BR filter for the Elastic Aircraft Longitudinal Stability Augmentation System, Proceedings of The 1ST International Symposium on „Future Aviation Technologies”, Budapest-Szolnok, Hungary, 12-14 April, 2002. (43-52)

A JELÖLT ÉRTEKEZÉSSEL KAPCSOLATOS PUBLIKÁCIÓI

- S.1. **Szegedi, P.** A Szojka-III pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszer zavarelhárításának vizsgálata II., Nemzetvédelmi Egyetemi Közlemények, Budapest, 2005. (megjelenés alatt).

- S.2. **Szegedi, P.** A Szojka-III pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszer zavarelhárításának vizsgálata I., Nemzetvédelmi Egyetemi Közlemények, Budapest, 2005. (megjelenés alatt).
- S.3. **Szegedi, P.** Szojka-III pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozójának tervezése LQR módszerrel, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2005. (megjelenés alatt).
- S.4. **Szegedi, P.** Szojka-III oldalirányú mozgás szabályzóinak előzetes tervezése pólus áthelyezés módszerével, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2005. (megjelenés alatt).
- S.5. **Szegedi, P.** A Szojka-III nemirányított repülőgép analízise, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2005. (megjelenés alatt).
- S.6. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Pilóta nélküli repülőgép repülésszabályozó rendszerének előzetes méretezése, Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben, Tudományos konferencia, Repüléstudományi Közlemények Elektronikus különszáma, Szolnok, 2005 04. 15. (CD mellékleten).
- S.7. **Szegedi, P.** A pilóta nélküli repülőgépek irányíthatóságának és megfigyelhetőségének vizsgálata, Repüléstudományi Közlemények XIV. évfolyam 34. szám, Szolnok, 2003. (129–150).
- S.8. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Computer Aided Control Law Synthesis For The Unmanned Aerial Vehicle, Pannonian Applied Mathematical Meetings PC-141, 22–25 May, Balatonalmádi, Hungary, 2003. (in print).
- S.9. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Modeling Atmospheric Disturbances Affecting Motion of the UAV, Pannonian Applied Mathematical Meetings PC-141, 22–25 May, Balatonalmádi, Hungary, 2003. (in print).
- S.10. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Pilóta nélküli repülőgépek számítógépes analízise, Szolnoki Tudományos Közlemények, Szolnok, 2002. (CD ROM-on).
- S.11. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness Analysis of Control Systems, Pannonian Applied Mathematical Meetings PC-136, 24–26 January, Göd, Hungary, 2002. (in print).
- S.12. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness Analysis of the Flight Control Systems, 8th Mini Conference on Vehicles System Dynamics, Identification and Anomalies, November 11–13, Budapest, 2002. (in print).

- S.13. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness Analysis of the Flight Stability Augmentation Systems, Pannonian Applied Mathematical Meetings PC–136, 24–26 January, Göd, Hungary, 2002. (in print).
- S.14. **Szabolcsi, R. – Szegedi, P.** Robustness stability and robust performance of the automatic flight control systems, AARMS, MZNDU, vol. 1., issue 2., Budapest, 2002. (253–269).
- S.15. **Szabolcsi, R.—Szegedi, P.** Design of the Chebyshev BR filter for the Elastic Aircraft Longitudinal Stability Augmentation System, Proceedings of The 1ST International Symposium on „Future Aviation Technologies”, Budapest-Szolnok, Hungary, 12-14 April, 2002. (43-52)

A JELÖLT EGYÉB PUBLIKÁCIÓI

- S.16. **Szegedi, P.** Pilóta nélküli repülő eszközök, Repüléstudományi Közlemények, 2004/1. (63–77).
- S.17. **Szegedi, P.** Automatizálás a térképezésben, Repüléstudományi Közlemények, 2003/1. (163–183).
- S.18. **Békési, B. – Szilvássy, L. – Szegedi, P.** Új repülőgépek kiválasztásának néhány szempontja, Doktoranduszok I. Jász-Nagykun-Szolnok Megyei Tudományos Konferenciája, ZMNE BJKMFK Repülőműszaki Intézet, Szolnok, 2002. 11. 08. (CD-ROM).
- S.19. **Békési, B. – Szilvássy, L. – Szegedi, P.** Harcászati repülőeszközök modernizációjának kritériumai, Bolyai Szemle különszám, ZMNE BJKMFK Budapest, 2002, 11. 04. (megjelenés alatt).
- S.20. **Szegedi, P. – Békési, B.** Az új generációs vadászrepülőgép nemzetközi fejlesztése, Bolyai Szemle különszám, ZMNE BJKMFK Budapest, 2001, 11. 07. (151–162).
- S.21. **Szegedi, P. – Békési, B.** Az ötödik generációs vadászrepülőgép tender, Szolnoki Tudományos Közlemények V. A tudomány napja, Szolnok, 2001. 11. 06. (194–198).
- S.22. **Szegedi, P. – Békési, B.** Az egységesített csapásmérő vadászrepülőgép (JSF) fejlesztésének jelenlegi helyzete, Bolyai Szemle, ZMNE BJKMFK Budapest, 2001/1. (9–18).
- S.23. **Szegedi, P. – Békési, B.** A JSF (Joint Strike Fighter) program, XIII. Repüléstudományi Napok, Budapest, 2001. szeptember 07. (Megjelenés alatt)

- S.24. **Békési, B. – Szegedi, P.** Changed by Joint Strike Fighter possibilities in the military forces, Modern Technologies in the XXI Century, Military Technical Academy, Bucharest, November 15–16., 2001 (Available on CD-ROM).
- S.25. **Békési, B. – Szegedi, P. – Szilvássy, L.** Changed by the Aircraft of New Generation Possibilities in Airforces, Third International Conference On Unconventional Flight, Budapest, September 12–14, 2001 (in print).
- S.26. **Békési, B. – Szegedi, P.** A légijárművek műszaki karbantartása, Bolyai Szemle, ZMNE BJKMK Budapest, 2000/4. (41–56).
- S.27. **Szegedi, P. – Békési, B.** A Hiper X program, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2000/3, (127–133).
- S.28. **Szegedi, P. – Békési, B.** A XXI. század egységes csapásmérő vadászrepülőgépeinek (JSF) várható megvalósításai, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2000/2, (117–124).
- S.29. **Békési, B. – Szegedi, P.** History of Active X-Flyers programme, 7th Mini Conference on Vehicles Systems Dynamics, Identification and Anomalies, Budapest, 6.–8. 11. 2000. (481–489).
- S.30. **Békési, B. – Szegedi, P.** A vadászrepülőgépek harcászati technikai paramétereinek függése az üzemeltetés gazdaságosságától, Szolnoki Tudományos Közlemények IV. A tudomány napja, Szolnok, 2000. 11. 03. (172–176).
- S.31. **Szegedi, P. – Békési, B.** Kísérleti repülő- és űrrepülőgépek történeti áttekintése, Szolnoki Tudományos Közlemények IV. A tudomány napja, Szolnok, 2000. 11. 03. (164–171).
- S.32. **Szilvássy, L. – Szegedi, P.** A repülőfedélzeti megsemmisítő eszközök hatékonyságvizsgálata, Bolyai Szemle, ZMNE BJKMK Budapest, 2000. 11. 02. (49–68).
- S.33. **Szegedi, P. – Békési, B.** A XXI. századi vadász és űrrepülőgépek fejlesztésének jelenlegi helyzete, Bolyai Szemle, ZMNE BJKMK Budapest, 2000. 11. 02. (69–88).
- S.34. **Békési, B. – Szegedi, P. – Szilvássy, L. – Békési, L.** History of NASA's X-planes, Second International Conference on Unconventional Flight, Budapest, June 14.–16., 2000 (In Print).
- S.35. **Szegedi, P.** A javított hatásfokú polaritásváltóval megépített analóg MPPT áramkör analízise, Repüléstudományi Közlemények, 1998/2. (113–126).

- S.36. **Szegedi, P.** A javított hatásfokú polaritásváltóval megépített analóg MPPT, Repüléstudományi Közlemények, 1998/2. (81–101).
- S.37. **Szegedi, P.** A maximális teljesítményű pont követésének lehetőségei napelemes rendszerekben 2, Repüléstudományi Közlemények, 1997/1. (121–138).
- S.38. **Szegedi, P.** A maximális teljesítményű pont követésének lehetőségei napelemes rendszerekben 1, Repüléstudományi Közlemények, 1997/1. (91–108).