

ZRÍNYI MIKLÓS
NEMZETVÉDELMI EGYETEM

Turóczy Antal

**NÉGYROTOROS PILÓTA NÉLKÜLI
HELIKOPTER FEDÉLZETI AUTOMATIKUS
REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ BERENDEZÉSEI**

Doktori (PhD) értekezés

Tudományos vezető:

Dr. Haig Zsolt mérnök alezredes, PhD
egyetemi docens

Budapest, 2008.

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	2
BEVEZETÉS	5
1. FEJEZET NÉGYROTOROS PILÓTA NÉLKÜLI HELIKOPTER.....	11
1.1. Szakirodalmi áttekintés	11
1.2. Pilóta nélküli légi járművek	12
1.2.1 Forgószárnyas és egyéb VTOL UAV alkalmazások	14
1.2.2 Hazai UAV fejlesztések	16
1.3. Négyrotoros helikopter	18
1.3.1 A négyrotoros helikopter mint UAV	19
1.3.2 Működési elv	21
1.3.2.1 Elektromos meghajtás.....	22
1.3.2.2 A négyrotoros helikopter irányítása	23
1.4. A helikopter fizikai modellje	24
1.4.1 Koordinátarendszerek	25
1.4.2 Mozgásegyenletek.....	27
1.5. A kísérleti rendszer matematikai modelljének meghatározása.....	31
1.5.1 Tömeg, tehetetlenségi tenzor meghatározása.....	31
1.5.1.1 Tehetetlenségi tenzor számítása	33
1.5.1.2 Tehetetlenségi tenzor kísérleti meghatározása	34
1.5.2 Az elektromotor dinamikus viselkedése	36
1.5.3 Rotorok által keltett erők és nyomatékok meghatározása.....	38
1.5.3.1 Felhajtóerő mérése.....	38
1.5.3.2 Reaktív nyomaték mérése.....	40
1.5.4 Pörgettyű (giroszkóp) hatás	43
1.6. A teljes rendszer matematikai modellje.....	44
KÖVETKEZTETÉSEK.....	45
2. FEJEZET FEDÉLZETI ELEKTRONIKA	46
2.1. Szakirodalmi áttekintés	46
2.2. Létező UAV robotpilóta rendszerek	47
2.2.1 Micropilot MP2028 ^g	47
2.2.2 Cloud Cap Piccolo	48

2.3. Saját tervezésű robotpilóta rendszer	49
2.3.1 Szenzorok.....	49
2.3.1.1 Inerciális mérőegység (IMU)	49
2.3.1.2 Ultrahangos magasságmérő.....	51
2.3.2 Távirányítás, földi lépcső	52
2.3.2.1 Távirányítás	52
2.3.2.2 Vezeték-nélküli kommunikációs csatorna.....	53
2.3.2.3 Földi irányító rendszer.....	54
2.3.3 Energiaellátás	55
2.3.4 Központi egység.....	56
2.3.4.1 TMS320F28335 DSP	57
2.3.4.2 Motorvezérlés	59
2.3.4.3 RC jelek fogadása.....	61
2.3.4.4 DSP program	61
KÖVETKEZTETÉSEK.....	64
3. FEJEZET REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZER TERVEZÉSE.....	65
3.1. Szakirodalmi áttekintés	65
3.2. Szabályozástechnikai alapelvek.....	66
3.2.1 Klasszikus szabályozástechnika.....	69
3.2.1.1 Rendszeranalízis	69
3.2.1.2 Soros kompenzáció.....	71
3.2.2 Modern szabályozástechnika	73
3.2.2.1 Irányíthatóság és megfigyelhetőség	74
3.2.2.2 LQR szabályozótervezési módszer.....	75
3.2.2.3 LQG szabályozótervezési módszer	77
3.2.3 Minőségi követelmények	81
3.3. Motorszabályzó tervezése.....	82
3.4. A négyrotoros helikopter lineáris matematikai modelljének meghatározása kis bedöntési és bólintási szögek esetén.....	85
3.5. Fedélzeti LQG repülésszabályzó tervezése	89
3.5.1 Optimális állapotbecslő tervezése.....	89
3.5.2 LQR szabályzó tervezése	96
3.5.3 Szimuláció.....	98

3.5.4 Paraméter-érzékenységi vizsgálat.....	102
3.6. Tesztrepülések.....	105
KÖVETKEZTETÉSEK.....	108
ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEIM.....	110
TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEIM.....	111
AJÁNLÁSAIM.....	112
PUBLIKÁCIÓS JEGYZÉK.....	113
FELHASZNÁLT IRODALOM.....	115
1. MELLÉKLET A MOZGÁSEGYENLETEK SZÁRMAZTATÁSA A TEST KOORDINÁTA-RENDSZERBEN.....	123
2. MELLÉKLET A TEHETETLENSÉGI TENZOR MEGHATÁROZÁSA.....	126
3. MELLÉKLET AZ EGYENÁRAMÚ MOTOR MÉRÉSE.....	130
4. MELLÉKLET JELÖLÉSEK.....	134
5. MELLÉKLET RÖVIDÍTÉSEK ÉS IDEGEN KIFEJEZÉSEK GYŰJTEMÉNYE	136
6. MELLÉKLET ÁBRÁK JEGYZÉKE.....	138
7. MELLÉKLET TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE.....	142

BEVEZETÉS

A XX. század végén bekövetkezett geopolitikai változások, valamint a számítástechnika és az informatika robbanásszerű fejlődése a haditechnikában is új korszakot indított el. A **tömeghadseregek helyét** egyre inkább **átveszik a** kisebb létszámú, de hatékonyabb, **precíziós** fegyverekkel, robottechnikai berendezésekkel és speciális informatikai eszközökkel felszerelt **haderők, melyek egyik legfőbb célja az információs fölény megszerzése és megtartása**. Az utóbbi évek katonai konfliktusai bebizonyították, hogy az információs műveletekre épülő hadviselés felbecsülhetetlen katonai fölényt biztosít a hagyományos felépítésű hadseregekkel szemben. A hidegháború végével egy globális háború kitörésének veszélye gyakorlatilag megszűnt, a kisebb helyi háborúk és fegyveres konfliktusok, a proliferáció jelentette fenyegetés, a terrorizmus, új hadviselési formák megjelenését hozta magával. A mind pontosabb és aktuálisabb információ megszerzése, valamint annak gyors feldolgozása a válságkezelés eredményességének kulcsfontosságú tényezőjévé vált [1][2].

A hatékony információszerzés eszközeként a **pilóta nélküli légi járművek (UAV¹-k) egyre hangsúlyosabb szerepet kapnak** a mai modern hadseregekben. Ennek **legfőbb oka az emberi élet védelme**. Az emberáldozattal ellentétben egy pilóta nélküli eszköz elvesztése csak anyagi kárként jelentkezik. Ez a közvélemény számára is sokkal elfogadhatóbb. Másrészt a jármű képességeit – mivel nincsen ember a fedélzeten – csak a gép fizikai konstrukciójából adódó tulajdonságok miatt kell szándékosan korlátozni (mechanikai szilárdság, instabil működést eredményező manőverek, stb.). Ebből következik, hogy az UAV-k olyan környezeti feltételek mellett is képesek ellátni feladatukat, amelyekben az ember egyébként közvetlen életveszélynek lenne kitéve [3][4][5].

A **pilóta nélküli légi járművek** fejlesztésének másik mozgatórugója az, hogy ezen eszközök gyártási, üzemeltetési és karbantartási **költsége**, a hasonló feladatokra szánt pilóta által vezetett repülőgépekkel összehasonlítva jóval **alacsonyabb**. Emellett az irányító személyzet kiképzése is sokkal kisebb anyagi ráfordítást igényel. A technika fejlődésével ugyanis egyre több az automatizált funkció, ezért az UAV-t irányító személyzetének nem kell folyton a jármű irányításával foglalkoznia, figyelmét teljes egészében a küldetés valódi céljára összpontosíthatja.

¹ UAV: Unmanned Aerial Vehicle

Ahogy az igaz a pilóta vezette repülőgépek esetében is, **a lebegés, a helyből fel- és leszállás képessége (VTOL²) a pilóta nélküli eszközöknél is különleges képességnek számít.** Mivel a forgószárnyas járműnek nincsen szüksége kifutópályára, katonai szempontjából **könnyen bevethető, kevés logisztikai háttértámogatást igényel.** Egy kisméretű VTOL UAV, megfelelő fedélzeti szenzorokkal kiegészítve, olyan **hatékony támogató eszköze** lehet a harctéren tevékenykedő kisebb katonai alakulatoknak, amellyel kis hatótávolságon belül a kezelőszemélyzet veszélyeztetése nélkül végezhető felderítő, megfigyelő vagy adatgyűjtő feladat [7]. A forgószárnyas UAV-k, a merevszárnyas gépekkel ellentétben képesek egy pont felett lebegve az adott célobjektumról stabil képet közvetíteni, és **akár városi terepviszonyok között, vagy zárt épületekben is bevethetők.** Ezek a képességek fontos szerepet játszanak a **városi békefenntartó, rendészeti és szállító feladatok** támogatásában, lásd Irak és Afganisztán, ahol a katonák gyakran ellenséges környezetben, velük nem szimpatizáló csoportok jelenlétében végzik munkájukat. Ilyen esetekben a lehetséges veszélyforrások – aknák, fegyveres csoportok, orvlövészek, stb. – mihamarabbi felderítése, emberéleteket menthet meg [4][5][15].

A harctéri alkalmazásokon kívül, a **rendvédelmi szervek, a tűzoltóság vagy a katasztrófavédelem** számára is hasznos lehet forgószárnyas pilóta nélküli repülő eszközök rendszerbe állítása. Kedvezőtlen terepviszonyok esetén a „madártávlatból” közvetített élő képek több és pontosabb információt szolgáltatnak, megkönnyítve ezzel a döntéshozók feladatát.

Az utóbbi időben a négyrotoros elrendezésű helikopter – a szabályozástechnika és a mikroelektronika fejlődésének köszönhetően – újból a kutatások és fejlesztések tárgyává vált. A kisméretű, elektromotoros meghajtású, fix beállítási-szögű rotorokkal rendelkező géptípusokkal, **egyszerű mechanikai felépítésű, robusztus, ezáltal megbízható** pilóta nélküli repülő eszköz valósítható meg. A megbízhatóságnak pedig a katonai alkalmazásoknál kiemelten fontos szerepe van. A robusztusság mellett azonban szükség van olyan fedélzeti elektronikai berendezésre, robotpilótára is, amely lehetővé teszi az egyébként manuálisan nehezen irányítható helikopter egyszerű működtetését. A probléma újszerűsége miatt egy ilyen automatikus repülésszabályzó rendszer megtervezéséhez és megépítéséhez ma még nem áll rendelkezésre olyan mennyiségű szakirodalom, mint a hagyományos felépítésű merev és forgó-

² VTOL: Vertical Take-Off and Landing

szárnyas repülő eszközök vonatkozásában. Ezért az adott minőségi követelményeknek megfelelő, négyrotoros pilóta nélküli helikopter irányítására alkalmas szabályzási rendszer kialakításához viszonylag nagy mennyiségű szakirodalom kutatása szükséges.

A kereskedelmi forgalomban már egy ideje hozzáférhetőek, a gyártók által rugalmasnak és többféle repülő eszközbe könnyen beépíthetőnek nevezett, viszonylag olcsó robotpilóta eszközök. A gyakorlati tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy az előre meghatározott szabályzó struktúra és a beállítandó paraméterek nagy száma miatt egy ilyen berendezés adott géptípushoz hangolása időigényes feladat, és sokszor nem is lehetséges a minőségi követelményeknek megfelelő tulajdonságok kialakítása. **Egy egyedi fejlesztésű repülésszabályzó** berendezésnek megvan az az előnye, hogy a tervező – a meghatározott kritériumoknak megfelelően – **a feladathoz optimális felépítésű** rendszert alakíthat ki. Egy ilyen eszköz megtervezése azonban magas szintű szakértelmet igényel [3][4][5][15][16][20][21].

A tudományos probléma megfogalmazása:

Egy pilóta nélküli repülő eszköz biztonságos irányításához megfelelő tapasztalattal rendelkező, szakképzett kezelő személyzetre van szükség, akinek a repülés stabilizálásán túl egyéb, nagy figyelmet igénylő feladatot is el kell látnia. A hatékonyság növelése, **a nagyobb repülési biztonság és a személyzet tehermentesítése érdekében egyes funkciókat érdemes automatizálni**. Amennyiben a repülés stabilizálását automatikus repülésszabályzóra bízunk, a kezelő minden figyelmét a küldetés valódi céljára összpontosíthatja. Ez egy négyrotoros helikopter esetén igen fontos, mivel a gép kézi stabilizálása nagy koncentrációt igényel, emellett, megfelelő kommunikációs csatornát és fedélzeti szenzorokat feltételezve **lehetőség nyílik a látótávolságon kívüli bevetések végrehajtására is**. A fentiek alapján, egy négyrotoros pilóta nélküli helikopternek automatikus repülési funkciók megvalósítására alkalmas fedélzeti **automatikus repülésszabályzó berendezéssel kell rendelkeznie**.

A modern haderőkben rendszeresített kisméretű UAV-k legfőbb feladata a **kis létszámú katonai alakulatok tevékenységének közvetlen támogatása**. Ebből adódóan felhasználói oldalról – az egyszerű irányíthatóság mellett – gyakori elvárás, a **könnyű és gyors összeszerelhetőség**, valamint az **egyszerű szállíthatóság**.

Munkám kezdetén a következő munkahipotéziseket állítottam fel:

A kisméretű, elektromos meghajtású négyrotoros pilóta nélküli helikopter, a fedélzetére telepített szenzorok, kamera és ezek információit lesugárzó kommunikációs csatorna segítségével **alkalmas, kis hatótávolságon belül (<1 km), katonai és egyéb védelmi célú, illetve polgári felderítő, megfigyelő vagy adatgyűjtő feladatok ellátására.** A felépítéséből adódóan robosztus és megbízható konstrukció **kis létszámú katonai alakulatok tevékenységét közvetlenül támogathatja.**

Ezek alapján a további műszaki jellegű hipotéziseket állítottam fel:

1. A fizika törvényszerűségeiből kiindulva számításokkal és mérésekkel igazolva a négyrotoros helikopter, repülésszabályzó tervezéshez megfelelő matematikai modellje meghatározható.
2. A kereskedelmi forgalomban beszerezhető és egyéb robotpilóta rendszerek tanulmányozásával költséghatékony kísérleti rendszer építhető.
3. A nemlineáris matematikai modell alapján meghatározható a helikopter kis bedöntési és bólintási szögkitéréssel járó repülési üzemmódjaira érvényes lineáris matematikai modellje.
4. A lineáris modell ismeretében repülésszabályzó tervezhető, amely képes a helikoptert stabilizálni a modell érvényességi körébe tartozó üzemmódokban.

Mindezek alapján munkám során a következő kutatási célokat tűztem ki:

1. A fizika törvényszerűségeiből kiindulva, **meghatározni a** négyrotoros helikopter nemlineáris matematikai modelljét, benne a sárkányszerkezet tehetlenségi tenzorát és a helikopter meghajtását szolgáló elektromotorok dinamikus egyenleteit.
2. Tanulmányozva a kereskedelmi forgalomban beszerezhető robotpilóta rendszereket, a leszűrt tapasztalatok alapján **megtervezni** saját négyrotoros helikopterem fedélzeti automatikus repülésirányító rendszerét. A szenzorok és a számítási teljesítménnyel szemben támasztott követelmények valamint a rendelkezésemre álló anyagi források figyelembe vételével megépíteni egy – a saját kísérleti rendszerem irányítására alkalmas – robotpilóta rendszert.

3. A nemlineáris rendszermodellből kiindulva **meghatározni a** kísérleti helikopter kis bedöntési és bólintási szögkitéréssel járó repülési üzemmódjaira érvényes lineáris matematikai modelljét.
4. Az elektromotorok és a helikopter lineáris dinamikus egyenleteinek ismeretében motorszabályzót illetve repülésszabályzót **tervezni**, amivel fedélzeti robotpilóta rendszerem képes a gép repülését kis szögkitérésű manőverek esetén stabilizálni.

Munkám során a következő kutatási módszereket alkalmaztam:

Széleskörű kutatómunkát folytattam az értekezés témájával kapcsolatos információk összegyűjtése és rendszerezése érdekében. A szakirodalmak és az interneten hozzáférhető **publikációk tanulmányozásával, elemzésével** bővíttem a kutatási céljaim eléréséhez szükséges elméleti ismereteimet. **Konzultáltam** a repüléstudományban, a szabályozástechnikában és az elektronikában jártas **szakemberekkel**. Hallgatóként és előadóként **részt vettem több** – az értekezésem témájához kapcsolódó – hazai és nemzetközi **tudományos konferencián**. Kutatási eredményeimet rendszeresen **publikáltam** szakmai kiadványokban valamint tudományos előadások formájában is. Kísérleti rendszerem matematikai modelljének meghatározásához **méréseket és kísérleteket**, a szabályzóköri tervezéséhez pedig számítógépes **szimulációkat végeztem**, melyek eredményeit **elemeztem** és a megfelelő **következtetéseket levonva**, elvégeztem a szükséges változtatásokat.

A kitűzött célok elérése érdekében értekezésemet az alábbi fejezetek szerint építettem fel:

1. fejezet: Megvizsgálom a négyrotoros pilóta nélküli helikopter alkalmazhatóságát, majd felírom a gép fizikai egyenleteit. Megoldást adok a tehetetlenségi tenzor közelítő számítására. Számításokkal és mérésekkel meghatározom a meghajtásért felelős elektromotorok dinamikus egyenleteit, majd felírom a teljes rendszer nemlineáris matematikai modelljét.

2. fejezet: Megvizsgálom két, a kereskedelmi forgalomban beszerezhető robotpilóta rendszert, majd a levont következtetések alapján kidolgozom saját kísérleti rendszerem felépítését. Bemutatom a fedélzeti elektronikai rendszerem számára kiválasztott szenzorokat, kommunikációs eszközöket és a központi egységét. Bemutatom a

központi egységben, és a PC³-s földi irányító rendszerben futó, általam elkészített szoftvereket.

3. fejezet: Összefoglalom a klasszikus és modern szabályzó-tervezési eljárásokat, és megvizsgálom alkalmazhatóságukat saját rendszerem szemszögéből. Megtervezem az elektromotorok fordulatszám-szabályóját. Meghatározom kísérleti rendszerem lebegéshez közeli és kis ($< 30^\circ$) bedöntési és bólintási szögkitéréssel járó repülési üzemmódjaiban érvényes lineáris matematikai modelljét és ehhez lineáris repülés-szabályzót tervezek. Bemutatom a szabályzó-paraméterek hangolása érdekében elvégzett MATLAB Simulink szimulációk eredményeit. A valós fedélzeti elektronikai rendszerrel elvégzett tesztrepülések eredményei alapján meghatározom a szabályozó algoritmusok helyes működése érdekében szükséges változtatásokat.

A fejezetek elején röviden összegzem az adott témával kapcsolatos szakirodalmak lényegi mondanivalóját, a fejezetek végén következtetéseket vonok le, majd az értekezés végén összegzem kutatási eredményeimet és végső következtetéseket vonok le.

³ PC: Personal Computer

1. FEJEZET

NÉGYROTOROS PILÓTA NÉLKÜLI HELIKOPTER

„A jármű ötlete, amely képes függőlegesen felemelkedni a földről és mozdulatlanul lebegni a levegőben, valószínűleg akkor született, amikor az ember először álmodott a repülésről.”

Igor Ivanovitch Sikorsky

1.1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

[1][2] irodalmakban megismerkedhetünk a pilóta nélküli légi járművek mai modern és a jövő hadseregeiben betöltött szerepével. [8][18][19]-ben a szerzők áttekintik a helyből felszállás képességével rendelkező pilóta nélküli járművek polgári és katonai alkalmazásának lehetőségeit és gyakorlati kérdéseit. [23][24] irodalmakban a négyrotoros helikopterek történelmi hátterével, [25][26]-ban pedig gyakorlati alkalmazású kisméretű eszközökkel ismerkedhetünk meg.

[27][28][29][30] irodalmakban a szerzők a fizika törvényszerűségeinek ismertetésével átfogó képet adnak a merev testek általános mozgásának matematikai modellezéséről, [31]-ben a forgó mozgásra vonatkozó tehetetlenségi jellemzők számításának elméletével ismerkedhetünk meg. [32][33]-ban a szerzők villamos hajtások modellezési és szabályozástechnikai kérdésével foglalkoznak.

[34]-ben a szerző megállapítja, hogy a négyrotoros elrendezésű, kisméretű helikopter kis sebességű és beltéri alkalmazásokban számos előnyös tulajdonsággal rendelkezik a merevszárnyú repülőgépekkel és a hagyományos felépítésű helikopterekkel szemben. Összefoglalja működési elvét, meghatározza nemlineáris, parametrikus matematikai modelljét, benne a gépre ható erőket és nyomatékokat.

[35][36][37][38][39]-ben a szerzők bemutatják saját négyrotoros rendszerük matematikai modelljét. [35]-ben a sárkányszerkezet mellett a rotorlapátok optimális kialakítására is törekszenek azok elasztikus mozgásának figyelembevételével.

1.2. PILÓTA NÉLKÜLI LÉGI JÁRMŰVEK

Az ember ösztönösen törekszik arra, hogy intelligenciáját felhasználva olyan eszközöket, tárgyakat alkosson, amelyek segítségével életét kényelmesebbé, biztonságosabbá teheti, fizikai korlátait leküzdheti, és a természet megismerése iránti vágyát kielégítheti. Érzékszerveink tökéletlensége valamint testi és szellemi képességeink behatárolják, hogy milyen feladatokat vagyunk képesek önerőnkől hatékonyan megoldani. A hatékonyságon és precizitáson túl egyre több területen – mint például a haditechnika és űrkutatás – merül fel az emberi élet védelme, mint legfontosabb tényező. A mai modern haderőkre egyre inkább jellemző, a precíziós fegyverek, pilóta nélküli járművek, robotok és egyéb intelligens eszközök alkalmazása, amelyekkel gyorsabban, nagyobb hatékonysággal lehet katonai sikereket elérni, emellett a lehető legalacsonyabbra lehet szorítani a saját emberáldozat valószínűségét. Ez a megközelítés nem csak az emberi élet védelme szempontjából előnyös, hanem gazdaságilag is. Nincs szükség hatalmas összegeket felemésztő tömeghadseregekre, ha helyettük robotok és intelligens eszközök segítségével kisebb létszámú csapatok is elvégezhetik ugyanazokat a – hagyományos módszerekkel egyébként sokszor szellemileg és fizikailag is fárasztó, veszélyes – feladatokat.

Az említett okok miatt az utóbbi idők katonai konfliktusaiban egyre növekvő szerepet kaptak a pilóta nélküli légi járművek. Míg az első Öböl-háborúban az amerikai csapatok még csak egyfajta UAV-t vetettek be, napjaink iraki és afganisztáni hadműveleteiben a szövetséges erők már tíz különböző típusú pilóta nélküli repülőgépet használnak. Bár a technika fejlődésével az alkalmazási területek száma egyre nő, érdemes megemlíteni azokat a legfontosabb feladatköröket, amelyekben ma az UAV-eket sikerrel alkalmazzák:

- **felderítés:**
 - optikai- és rádiófelderítés;
 - rádiólokációs felderítés;
 - vegyi és biológiai szennyeződések felderítése;
- **támogatás:**
 - kommunikációs átjátszó állomás;
 - elektronikai megtévesztés;

- célok lézeres megjelölése;
- **harc feladatok:**
 - csapásmérés;
 - rádió és rádiólokációs zavarás;
 - egyszeri felhasználású érzékelők, zavaróadók kijuttatása.

Az UAV-eket repülési tulajdonságaik és fizikai jellemzőik alapján különböző kategóriákba lehet csoportosítani. Egy világszerte elfogadott osztályozást mutat be a következő táblázat [5]:

Kategória	Rövidítés	Hatósugár km	Magasság m	Időtartam óra
Micro	μ	<10	250	1
Mini	MINI	<10	350	<2
Close Range	CR	10-30	3000	2-4
Short Range	SR	30-70	3000	3-6
Medium Range	MR	70-200	3/5000	6-10
Medium Range Endurance	MRE	>500	5-8000	10-18
Low Altitude Deep Penetration	LADP	>250	50-9000	0,5-1
Low Altitude Endurance	LAE	>500	3000	>24
Medium Altitude Long Endurance	MALE	>500	5-8000	24-48

1. táblázat. Az UAV-k osztályozása

A különféle bevetések változatos körülményei, eltérő méretű, hatótávolságú és konstrukciójú eszközöket igényelnek⁴. A változatosság szemléltetésére a 2. táblázatban összefoglaltam néhány ismertebb merevszárnyas géptípus legfontosabb jellemzőit.

	<i>Global Hawk</i> (1/a. ábra)	<i>Predator</i> (1/b. ábra)	<i>Dragon Eye</i> (2/a. ábra)	<i>Black Widow</i> (2/b. ábra)
Teljes súly	11622 kg	1012 kg	2,2 kg	50 g
Hossz	13,5 m	8,74 m	0,9 m	15 cm
Szárnyfesztáv	35,4 m	14,8 m	1,1 m	15 cm
Hasznos teher súlya	908 kg	204 kg	0,45 kg	2,2 g
Repülési idő	42 óra	24 óra	1óra	30 perc
Repülési magasság	19800 m	7620 m	150 m	250 m
Akciórádus	25900 km	740 km	5 km	1 km
Maximális sebesség	640 km/h	216 km/h	70 km/h	50 km/h
Irányítási mód	Autonóm	Autonóm, távirányítás	Autonóm, távirányítás	Félautonóm, távirányítás

2. táblázat. Ismertebb pilóta nélküli repülőgéptípusok paraméterei [4][6]

⁴ Az értekezésben gyakran használt „kisméretű UAV” kifejezés a 25 kg-nál kisebb felszálló tömegű mikro és mini repülőgépekre értendő.



a.,



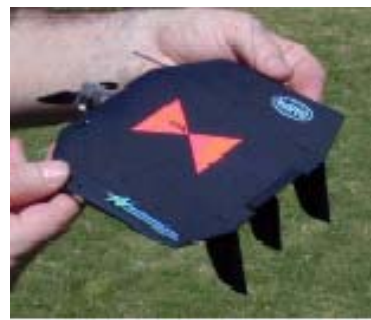
b.,

1. ábra. a., Global Hawk; b., Predator [4]

A nagyobb méretű, többcélú UAV-k hadműveleti és harcászati szintű feladatokat képesek ellátni, ennek megfelelően komolyabb háttértámogatást valamint nagyobb létszámú földi kiszolgáló és irányító személyzetet igényelnek. Ezzel ellentétben a kisméretű UAV-k, minimális infrastruktúra igényüknek köszönhetően, kisebb katonai alakulatok tevékenységét támogathatják közvetlenül [3][4][5][6][7][9][10][13][10][15].



a.,



b.,

2. ábra. a., Dragon Eye; b., Black Widow [4]

1.2.1 Forgószárnyas és egyéb VTOL UAV alkalmazások

A merevszárnyas repülőgépek a repülési sebesség, a hatótávolság, a szállítható tömeg és a határfok tekintetében a VTOL eszközöknél kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkeznek. Ennek ellenére számos – függőleges fel- és leszállást, mozgékonyt, alacsony repülési sebességet vagy lebegést igénylő – alkalmazásban a forgószárnyas vagy egyéb géptípusok használata a célravezető. A felhasználói igényeket és az adott feladat körülményeit figyelembe véve meghatározhatók azok a potenciális polgári és katonai VTOL UAV felhasználási területek, melyekben a merevszárnyas géptípusok kisebb hatékonysággal, vagy egyáltalán nem alkalmazhatók [8][9]:

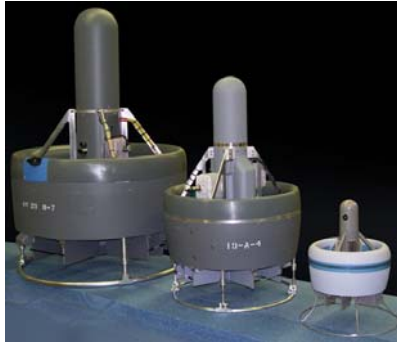
- **polgári feladatok:**
 - erdőtüzek alacsony magasságú megfigyelése;
 - vegyi és biológiai szennyeződések felderítése;
 - illegális fakitermelés és vadászat felderítése;
 - kutató és mentőfeladatok alacsony magasságú támogatása;
 - katasztrófák utáni kárfelmérés;
 - vulkánmegfigyelés és kitörés-előrejelzés;
 - filmipar és hírközlés;
 - gépjárműkövetés és megfigyelés;
 - nagyméretű építmények, gátak, villamos vezetékek felmérése;
- **katonai feladatok:**
 - alacsony magasságú megfigyelés és felderítés;
 - felderítés zárt épületekben és városi terepviszonyok között;
 - egyszer használatos érzékelők, aknák felderítése;
 - vegyi, biológiai és nukleáris fegyverek felkutatása;
 - gyanús személyek, eszközök megfigyelése és követése;
 - harci károk felderítése;
 - kutató és mentőalakulatok támogatása;
 - rádiókommunikációs átjátszóállomás;
 - közeli rádiókommunikáció felderítése, zavarása;

Az alkalmazási területek különféle igényeinek megfelelően a VTOL pilóta nélküli repülőgépek is változatos mérettel, teherbírással és felépítéssel rendelkezhetnek (3. táblázat).

	<i>iSTAR</i> (3/a. ábra)	<i>Cypher</i> (3/b. ábra)	<i>Eagle Eye</i> (4/a. ábra)	<i>Vigilante</i> (4/b. ábra)
Teljes súly	250-22,7-1,59 kg	113,4 kg	732 kg	284 kg
Hossz/átmérő	1,83-0,67-0,23 m	1,9 m	5 m	6 m
Rotorátmérő	- - -	1,2 m	2,5 m	7 m
Hasznos teher súlya	90,7-9,1-0,23 kg	22,6 kg	78 kg	83 kg
Repülési idő	5-2-1,3 óra	2,5 óra	5 óra	16 óra
Repülési magasság	- - -	1524 m	6000 m	4000 m
Akciórádiusz	900-185-120 km	30 km	-	925 km
Maximális sebesség	- - -	130 km/h	374 km/h	250 km/h
Irányítási mód	Autonóm	Autonóm	Autonóm, Táv- irányítás	Autonóm

3. táblázat. Ismertebb VTOL UAV-k paraméterei [10][13][10][11]

A függőleges fel és leszállás képességével rendelkező UAV-k között – a merevszárnyas típusoktól eltérően – gyakran találkozhatunk a hagyományos nagygépes konstrukcióktól merőben eltérő megoldásokkal (ducted-fan, tilt-rotor, quad-rotor, stb.).



a.,



b.,

3. ábra. a., iSTAR; b., Cypher [10][11]

Ennek sokszor az az oka, hogy a VTOL UAV alkalmazásokban gyakran szűk térben, akadályok közelében (keskeny utcákban, folyosókban, zárt épületekben) kell repülni. Az ilyen esetekben a Sikorsky-féle helikopterelrendezés főrotorja különösen sérülékeny mivel teljesen védtelen az esetleges ütközésektől [10][11][12][13][14][16][17][18].



a.,



b.,

4. ábra. a., Eagle Eye b., Vigilante [12][13]

1.2.2 Hazai UAV fejlesztések

Bár a Magyar Honvédségben jelenleg nincs pilóta nélküli repülőgép rendszeresítve, az első hazai fejlesztések már 1988-ban megindultak a Haditechnikai Intézetben (későbbi HM Technológiai Hivatal). Ennek eredményeképpen, magyar-cseh kooperációban megépült – az elsősorban harcászati szintű felderítési feladatok megoldására szánt – kisméretű Szokja-III pilóta nélküli repülőgép, melynek fontosabb paramétereit a 4. táb-

lázat foglalja össze. Az indítórakétás felszállás miatt a gyakorlatok drágának bizonyultak, a nehezen irányítható gép próbarepülései pedig gyakran végződtek géptöréssel, ezért a projektet leállították. A cseh hadsereg azóta a komplexum továbbfejlesztett változat már rendszerbe állította [15][16].

A Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem és a köré csoportosuló civil kutató és fejlesztő cégek az utóbbi időben igen intenzív kutatásokat folytattak az UAV-k elméletét és gyakorlati alkalmazását érintő kérdésekben. Az évek során számos sikeres tesztrepülést hajtottak végre különböző kisméretű, saját fejlesztésű merevszárnyas repülőeszközzel [20]. Ezek közül az Aero-Target Bt. METEOR-3R célrepülőgépe katonai alkalmazással is büszkélkedhet (4. táblázat). A 2005 nyarán sikeresen lezajlott lengyelországi légvédelmirakéta-éleslövészettel egybekötött harcászati gyakorlaton, ez az automatikus pályakövetéssel rendelkező UAV szolgált a MISTRAL légvédelmi rakéta célpontjául [21].

	<i>Szójka-II</i> (5/a. ábra)	<i>Meteor-3R</i> (5/b. ábra)
Teljes súly	145 kg	15 kg
Hossz	4,125 m	1,8 m
Szárnyfesztáv	4,1 m	2,7 m
Hasznos teher súlya	20 kg	4 kg
Repülési idő	3,5 óra	35 perc
Repülési magasság	3000m	2000 m
Akciórádiusz	100 km	40 km
Maximális sebesség	220 km/h	140 km/h
Írányítási mód	Távírányítás	Félautonóm, Távírányítás

4. táblázat. Hazai fejlesztésű pilóta nélküli repülőgépek fontosabb paraméterei [15][16][21]



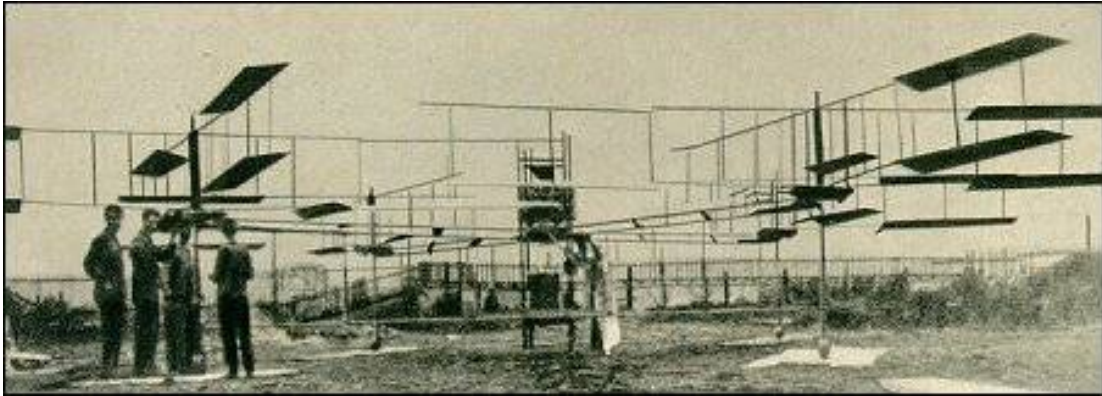
a.,



b.,

5. ábra. a., Szójka-II [19]; b., METEOR-3R célrepülőgép [21]

1.3. NÉGYROTOROS HELIKOPTER



6. ábra. Bréguet-Richet négyrotoros helikopter, *Gyroplane No. 1*, 1907 [23]

A négyrotoros elrendezésű helikopter gondolata nem új keletű. A Bréguet testvérek 1907-ben megépítették *Gyroplane No. 1* névre keresztelt robbanómotoros hajtású helikopterüket (6. ábra), amely az akkori híradások szerint képes volt 1,5 méter magasban



74. ábra. *Convertawings Model "A" Quadrotor*[23] [24]

lebegni. A géppel azonban csak függőleges irányban lehetett manőverezni, ugyanis a pilóta a fedélzetről kizárólag a motor fordulatszámát volt képes szabályozni a gázkar segítségével. Mivel igen instabil szerkezetnek bizonyult, néhány embernek a földről kellett kézzel stabilizálnia a lebegést. Az első valóban járműnek nevezhető négyrotoros helikopter prototípus a *Convertawings Model "A" Quadrotor* elnevezésű repülőgép volt (7.

ábra). Az 50-es években több sikeres próbarepülést is végrehajtottak vele, de megrendelések hiányában a projektet leállították [23].

Bár ember szállítására alkalmas négyrotoros helikopter soha nem jutott el valódi polgári vagy katonai alkalmazásig, kisméretű, pilóta nélküli társaival az utóbbi időben egyre gyakrabban lehet találkozni, elsősorban távirányítású modellek formájában (8. ábra). Emellett persze léteznek „komolyabb” rendeltetésű, nagymértékben automatizált működésű négyrotoros helikopterek is, mint például a német Diehl cég SensoCopter UAV-ja (9. ábra) [25].



8. ábra. Távirányítású négyrotoros helikopter modellek [26]



9. ábra. SensoCopter [25]

1.3.1 A négyrotoros helikopter mint UAV

Az 1.2.1 fejezetben említett VTOL UAV alkalmazások hordozó járműveinek konstrukcióját és méreteit, az adott feladat ellátásához szükséges repülési képességek, a környezeti feltételek és a lehetséges hasznos terhek ismeretében érdemes meghatározni. Ahol szűk térben – utcákban, folyosókban, zárt épületekben – vagy akadályok közelében kell repülni, olyan kisméretű, a véletlen ütközéseknek ellenálló, robosztus szerkezetű repülőgéptípust célszerű választani, amelyet néhány ember könnyedén képes szállítani és kezelni. Bár saját – demonstrációs céllal épült – kísérleti rendszerem a katonai alkalmazások magas minőségi követelményeit nem elégíti ki, egy megfelelően kialakított kisméretű (10. ábra) négyrotoros elrendezésű helikopterrel a fenti elvárásokat teljesíteni lehet⁵. Egy ilyen konstrukciótól reálisan a következő paramétereket lehet elvárni.

⁵ A magasabb minőségi követelményeknek is megfelelő négyrotoros konstrukció kialakításához, a kísérleti repülőgép átalakításához a későbbiekben ajánlásokat fogalmazok meg.

	<i>Négyrotoros UAV</i>
Teljes súly	1 - 2 kg
Hossz	0,5 - 1 m
Hasznos teher súlya	100 - 200 g
Repülési idő	25 - 30 perc
Repülési magasság	100 - 200 m
Akciórádiusz	1 - 2 km
Maximális sebesség	20 km/h

5. táblázat. Négyrotoros UAV paraméterei

A teherbírást figyelembe véve a következő alkalmazások és fedélzeti szenzorok jöhetnek számításba [25]:

- alacsony magasságú megfigyelés, felderítés
 - kisméretű elektro-optikai vagy infravörös szenzorokkal és ezek képeit le-sugárzó rádiócsatorna segítségével;
- vegyi, biológiai és nukleáris fegyverek felkutatása, szennyeződések felmérése;
 - vegyi-, biológiai- és sugárzásmérő szenzorok valamint a mérési adatokat lesugárzó rádiócsatorna segítségével;

Kísérleti rendszerem a kereskedelmi forgalomban X-UFO⁶ néven kapható távirányítású helikoptermodellre épül, amit saját tervezésű fedélzeti elektronikával egészítettem ki. Választásom legfőbb oka, hogy a sorozatgyártásból adódóan ez a helikopter típus viszonylag olcsó, másrészt a hasonló modellekhez képest (pl. Draganflyer⁷) robusztusabb felépítésű, és nem utolsó sorban a hazai forgalmazásnak köszönhetően könnyebben hozzáférhető.

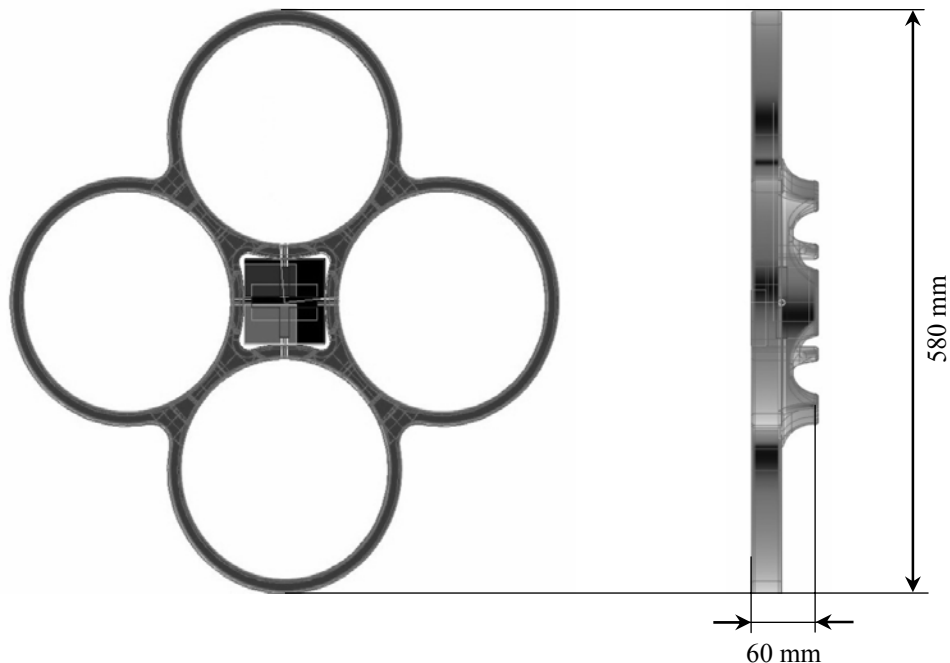
A pilóta nélküli légi járművek egyik igen fontos jellemzője az automatizált funkciók száma. Egy helikopter esetén – pusztán a repüléssel kapcsolatban – a következő egyszerűbb automatikus üzemmódok jöhetnek számításba: felszállás, függeszkedés, leszállás, vízszintes haladás, sebességkövetés, útvonalkövetés, vészleszállás. Saját kísérleti rendszeremben figyelembe kell venni, hogy a repülésszabályzó algoritmus tervezéséhez használt rendszermodell csak adott feltételek mellett érvényes. A helyes működés érdekében, ezeknek a feltételeknek minden üzemmódban teljesülniük kell. Ezt megfelelő szabályozótervezéssel kell biztosítani. További korlátozást jelent, hogy az általam al-

⁶ Bővebb információ: <http://www.xufo.com>

⁷ Bővebb információ: <http://www.draganfly.com>

kalmazott szenzortechnikával a pozíciót és a sebességet csak akkumulálódó hibával lehet mérni, ezért a hiba korrigálása érdekében a kezelőnek manuálisan is be kell avatkozni. Ez azonban korántsem jelent olyan nehézségű feladatot, mint a repülésszabályzó nélküli kézi repülésstabilizálás.

A fent leírtakat figyelembe véve, olyan repülésszabályzó rendszer megvalósítását tűztem ki célul, amely adott zárt térrészben meghatározott ideig képes a helikopter repülését függeszkeedés⁸ közeli állapotban stabilizálni, valamint képes adott hibával, stabil repülés mellett, sebesség illetve pozíció alapjel követésére. Az időtartamra, a zárt térrészre és a követési hibára vonatkozó adatokat, mint minőségi jellemzőket a tesztrepülések során fogom meghatározni.



10. ábra. A kísérleti négyrotoros helikopter méretei fedélzeti elektronika nélkül

1.3.2 Működési elv

Általánosságban elmondható, hogy a ma szolgálatot teljesítő helikopterek 95%-a – legyen az polgári vagy katonai alkalmazású – hagyományos Sikorsky-féle, egy főrotor egy farokrotor elrendezésű. A farokrotor egyrészt a főrotorra ható reaktív erők forgató-

⁸ Ha a helikopter egy térbeli pont meghatározott méretű környezetében tartózkodik függés közeli állapotban van. A térrész nagyságára vonatkozó elvárások géptípusonként változóak lehetnek.

nyomatékát ellensúlyozza, másrészt a repülés irányszögét lehet segítségével megváltoztatni. A helikopter függőleges és vízszintes mozgását a főrotor fordulatszámával és a rotorlapátok kollektív illetve ciklikus beállítási-szögének változtatásával lehet szabályozni. Az beállítási-szöggel a rotorlapátok által keltett felhajtóerő gyorsan és finoman állítható a fordulatszám hirtelen megváltoztatása nélkül. A rotorlapátok összetett mozgásáról – a beállítási-szög folyamatos változtatásáról egyetlen fordulat alatt – bonyolult mechanikai rendszer gondoskodik. Mindezek miatt – bár a technika fejlődésével mind a mechanika mind az irányító rendszerek egyre megbízhatóbbak és egyre jobb minőségűek – egy hagyományos felépítésű helikopter biztonságos üzemeltetése karbantartás- és szervizigényes [40].

1.3.2.1 Elektromos meghajtás

Négyrotoros elrendezéssel fix beállítási-szögű rotorokkal is irányíthatjuk a helikopter mozgását pusztán a négy rotor fordulatszámának változtatásával. Ehhez azonban olyan meghajtó-rendszerre van szükség, amely lehetővé teszi a rotorok gyors és pontos fordulatszám-változtatását. A hagyományos elrendezésű helikoptereknél a robbanómotoros meghajtás elegendő dinamikával rendelkezik, mivel nincs szükség hirtelen fordulatszám változtatásokra. Fix beállítási-szög esetén azonban, ahol a felhajtóerőt kizárólag a rotorok fordulatszámával szabályozzuk, a robbanómotoros meghajtás nem hatékony. A legkézenfekvőbb választás a probléma megoldására az elektromotoros meghajtás. A mai modern állandómágneses, kefe nélküli, háromfázisú elektromotorok mechanikailag robusztus, igénytelen berendezések. Fordulatszámuk a nagy nyomatéknak, a kis tehetetlenségű forgórésznek és a korszerű félvezető eszközöknek köszönhetően, széles tartományban precízen, és nagy dinamikával szabályozható [41][42]. A robbanómotorral ellentétben nem keletkezik kellemetlen égéstermék, hő, és zaj, ami egyrészt csökkenti a felderíthetőséget másrészt előnyös a beltéri alkalmazásokban.

Az elektromos meghajtás ellen egyetlen komoly érvet lehetne felhozni. Bár 70-95%-os hatásfok is elérhető – robbanómotoros meghajtás 25-40%-ával szemben – az energiaforrásként szolgáló akkumulátorok tárolt energia/tömeg mutatója egyelőre jóval kisebb, mint a fosszilis tüzelőanyagoké. Ez azt jelenti, hogy ma még egy tisztán elektromos meghajtású UAV kisebb hasznos teherrel és rövidebb ideig tartózkodhat a levegőben, mint egy robbanómotoros. Biztosra vehető azonban, hogy a mobil informatikai eszközök egyre bővülő piacának köszönhetően, a probléma enyhítésére megoldást jelentő

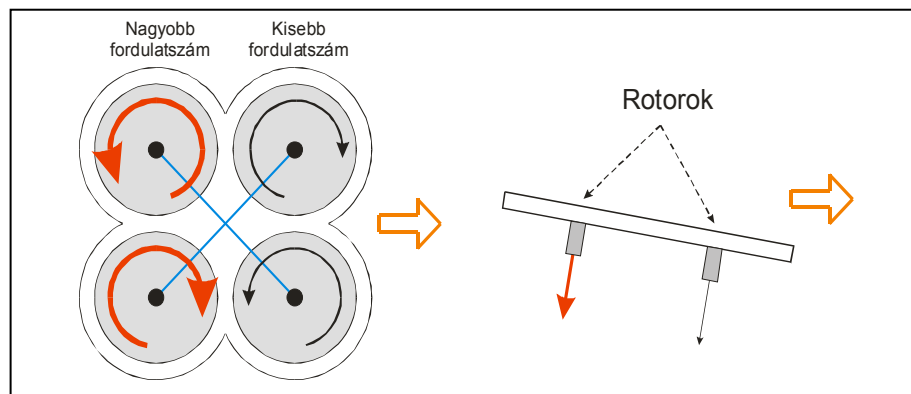
üzemanyagcella hamarosan elérhető alternatívája lesz az egyébként egyre jobb és jobb hatásfokú akkumulátoroknak [43].

Megjegyezném, hogy az X-UFO helikopter meghajtására hagyományos kefék egyenáramú motort használnak, ami szabályozástechnikailag viszonylag könnyen kezelhető. Ugyanezen okból kifolyólag saját kísérleti rendszeremben is meghagytam ezt a megoldást. Továbbfejlesztés esetén azonban célszerűbb kefe nélküli elektromotort választani, ami bonyolultabb hajtásszabályzó rendszert igényel, cserébe viszont minőség- és megbízhatóságbeli javulást eredményez.

1.3.2.2 A négyrotoros helikopter irányítása

A helikopter függőleges mozgását a négy rotor fordulatszámának együttes növelésével vagy csökkentésével lehet irányítani. Ez megfelel a hagyományos helikoptereknél megszokott kollektív beállítási-szög, illetve motorteljesítmény változtatásnak. Az oldalirányú mozgást az egymás mellett lévő rotorok fordulatszámának változtatásával lehet vezérelni, amit hagyományos esetben a ciklikus beállítási-szög változtatásával valósítanak meg.

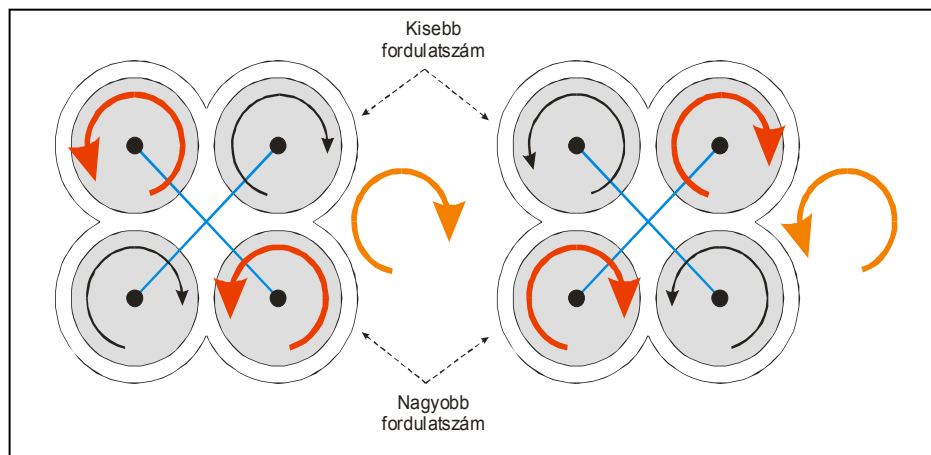
A 11. ábra alapján láthatjuk, hogy a bal oldali rotorok fordulatszámának növelésével a gép megdől, és a vízszintes irányban ható erőkomponensek miatt jobbra mozog.



11. ábra. Mozgás oldalirányban: Jobbra mozgáshoz a baloldali rotorokon növelni kell a fordulatszámot [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw]

A magasság megtartásához – vagyis az eredő felhajtóerő állandó értéken tartásához – a másik két rotorlapát fordulatszámát egyidejűleg csökkenteni kell. A balra-, előre- illetve hátramoogás hasonló elvek alapján következik. A függőleges tengely körüli forgó mozgás azonban már nem ennyire egyértelmű. A légellenállás miatt a rotorlapátokra

reaktív erő hat, amely a forgás irányával ellentétes. Az így keletkezett forgatónyomaté-
kot ellensúlyozza, hagyományos felépítésű helikopter esetén a farokrotor. A
négyrotoros elrendezés azonban szimmetrikus, ezért mindaddig, amíg az azonos irány-
ban forgó rotorok által létrehozott forgatónyomatékok eredője egyenlő, nincs függőle-
ges tengely körüli forgás. Amennyiben, például az óramutató járásával ellentétes irány-
ban forgó rotorpár fordulatszámát megnöveljük, a rájuk ható reaktív erők megnőnek,
így a helikopter az óramutató járásával megegyező irányban forogni kezd. Ebben az
esetben is érvényes, hogy a magasság megtartásához a másik két rotorlapát fordulat-
számát egyidejűleg csökkenteni kell. Az ellenkező irányú forgás hasonló elvek alapján
következik (12. ábra) [44][45][46].



12. ábra. Függőleges tengely körüli forgás átlósan elhelyezkedő rotorok fordulatszámának növelésével
[Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw]

1.4. A HELIKOPTER FIZIKAI MODELLJE

Ahhoz, hogy a merev testnek tekintett⁹ négyrotoros helikopter térbeli mozgását mate-
matikai egyenletekkel le tudjuk írni, ismernünk kell tömegközéppontjának sebességét és
az ebben a pontban a testhez rögzített koordináta rendszer szögsebességét. A pozíció, a
sebesség, a gyorsulás, az orientáció, a szögsebesség, a szöggyorsulás, vagyis azok a
fizikai mennyiségek, amelyeket a különböző mérési módszerek segítségével meg aka-
runk határozni, a tér-időben definiáltak. Ahhoz tehát, hogy egyértelmű megállapításokat

⁹ A helikopter valójában rugalmas alkotóelemekből épül fel melyek elasztikus mozgással jellemezhetők. Az értekezésben azonban az ebből adódó hatásokat elhanyagolhatónak tekintem.

tehessünk, definiálnunk kell vonatkoztatási rendszereinket, amelyekben ezeket a megnyiségeket megadjuk.

1.4.1 Koordinátarendszerek

Az olyan vonatkoztatási rendszereket, amelyekben a testek megőrzik nyugalmi állapotukat vagy egyenes vonalú egyenletes mozgásukat, amíg valamilyen erő nem hat rájuk, inercia-rendszereknek nevezzük. Ezek azért fontosak számunkra, mert az ilyen koordinátarendszerekben érvényesek a repülőgépeink térbeli mozgását leíró klasszikus (Newton-i) mechanika alaptörvényei. Különböféle repülő eszközeink a Föld légkörében mozognak, azonban a nap körül keringő és a tengelye körül forgó földhöz rögzített vonatkoztatási rendszer a definíció értelmében nem tekinthető inercia-rendszernek. Ha koordinátarendszerünket állócsillagokhoz rögzítjük jó közelítéssel inercia-rendszert kapunk, de ez a megoldás a nagy távolságok miatt kényelmetlen. Szerencsére a földi navigációs problémák döntő többségében elegendő, ha koordinátarendszerünk origója a Föld tömegközéppontjában van, és csak állását rögzítjük távoli álló csillagokhoz. Ezt a koordinátarendszert Föld középpontú inercia-rendszernek nevezzük (ECI¹⁰). Kis navigációs távolságok esetén további egyszerűsítéseket is alkalmazhatunk. A 13. ábra a repüléstechnikában használatos vonatkoztatási rendszereket szemlélteti. Kvázi inercia-rendszert kapunk, ha a Föld felszínét síknak tekintjük, és koordinátarendszerünk tengelyei rendre az Északi és a Keleti irányba, valamint a Föld középpontjának irányába mutatnak. Ezt a rendszert NED¹¹ koordinátarendszernek nevezzük. Nagyobb távolságok esetén azonban figyelembe kell vennünk, hogy a Föld nem sík, hanem geoid. A Föld középpontú és távoli csillagokhoz rögzített tengelyű ECI rendszer mellett létezik egy egyszerűsített, Földdel együtt forgó ECEF¹² rendszer is. A földi navigációban ugyancsak gyakran alkalmazott WGS-84¹³ rendszerben az objektumok pozíciója a hagyományos földrajzi szélesség, földrajzi hosszúság valamint magasság adatokkal definiált [47]. Mivel a navigáció során a választott inercia-rendszer és a vizsgált test, jelen esetben egy pilóta nélküli repülőgép egymáshoz viszonyított helyzetét és állását határozzuk meg, definiálnunk kell repülőgéphez rögzített koordináta rendszereket is. A test koordináta

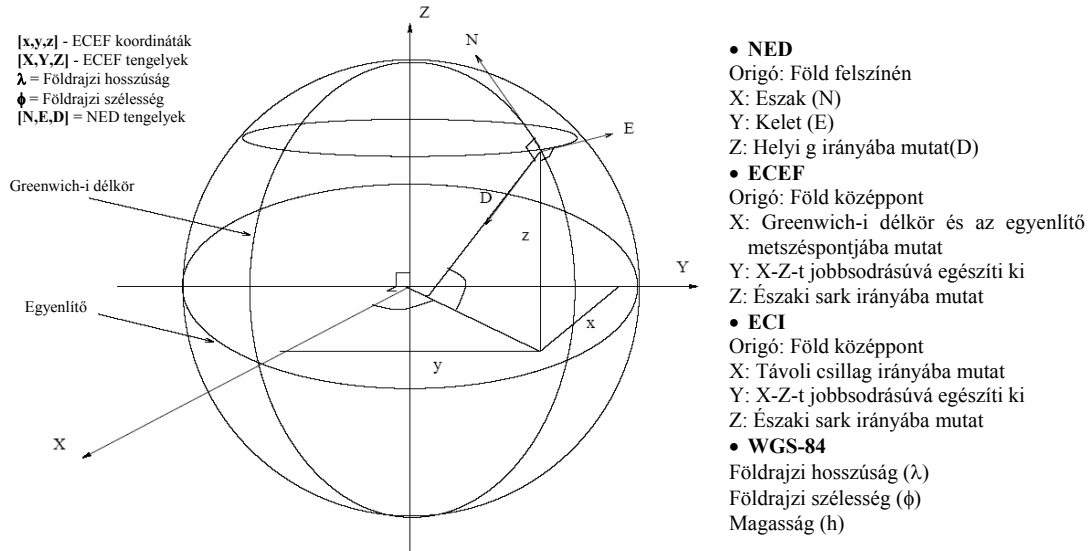
¹⁰ ECI: **E**arth-**C**entered-**I**nertial

¹¹ NED: **N**orth-**E**ast-**D**own

¹² ECEF: **E**arth-**C**entered-**E**arth- **F**ixed

¹³ WGS-84: **W**orld- **G**eodetic-**S**ystem- 1984

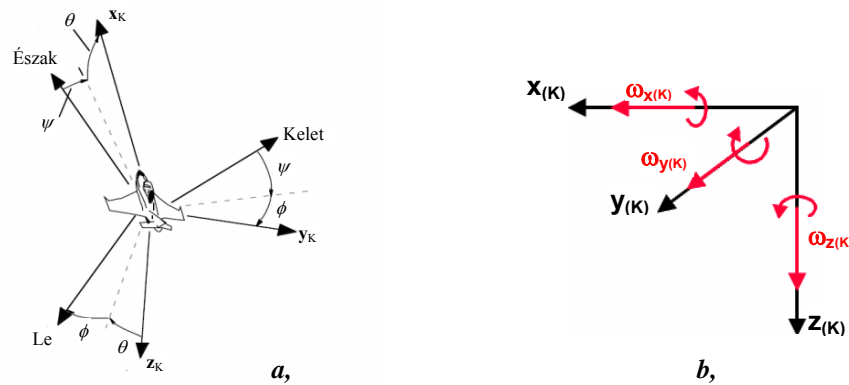
rendszerben az x tengely a repülőgép hossz tengelyének irányában előre, az y jobb oldalra, a z tengely pedig a kettőt jobbsodrású rendszerrel kiegészítve lefelé mutat. Az origó a tömegközéppontban van.



13. ábra. A repülésben használt fontosabb vonatkoztatási rendszerek [47]

A test-koordinátarendszernek fontos szerepe van a repülőgép mozgásegyenleteinek felírásakor, de navigációs szenzorok is ehhez a vonatkoztatási rendszerhez vannak rögzítve. Az orientációt a test koordinátarendszer, és egy a repülőgép tömegközéppontjában rögzített, az inercia rendszerrel azonos állású koordinátarendszer segítségével lehet jól jellemezni (14. ábra).

Szintén a repülőgéphez rögzített origójú vonatkoztatási rendszer az aerodinamikai vagy szél koordinátarendszer. Ennek x tengelye a relatív szél irányába, z tengelye a test koordináta rendszer x - z síkjában lefelé, y pedig a kettőt jobbsodrású rendszerrel kiegészítve x -től jobbra mutat. A szél koordinátarendszer főként az aerodinamikai erők számításakor előnyös, de segítségével kompenzálható a szelek zavaró hatása is. Mivel kísérleti rendszerben a megfelelő szenzorok hiánya miatt ezt a koordináta rendszert nem tudom meghatározni, a zavaró légmozgások irányára és nagyságára sem tudok méréssel következtetni. Az ilyen jellegű zavarások hatását csak az állapotváltozókon keresztül lehet érzékelni, ezekkel szembeni érzéketlenséget pedig teljes egészében a repülésszabályzó minőségi jellemzői határozzák meg. Egy későbbi továbbfejlesztés esetén azonban a zavaró légmozgások hatásának csökkentése érdekében további szenzorok alkalmazásával a szél koordináta rendszer használata indokolt lehet [48][49][50].



14. ábra. a., A test és a helyi inercia-koordináta-rendszer [47] valamint b., a test rendszerben mért gyorsulás és szögsebesség összetevők [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw]

Az értekezésben, adott ponton a földfelszínhez rögzített NED koordináta-rendszert fogom \mathbf{K}_0 inerciarendszernek tekinteni. A \mathbf{K}_0 -ban felvett mennyiségeket külön jelölés nélkül, a \mathbf{K} test-koordináta-rendszerben értendőket $_{(K)}$ alsóindexszel fogom feltüntetni.

1.4.2 Mozgásegyenletek

A négyrotoros helikoptert több bemenetű több kimenetű, MIMO¹⁴ rendszerként fogható fel. A pilóta vagy robotpilóta irányító jelei és a helikopter irányító jelekre adott válaszai közötti összefüggés – felhasználva a fizika tapasztalati törvényszerűségeit – matematikai egyenletek formájában írható le. A későbbi szabályozástechnikai tervezésben ezen egyenletrendszerből származtathatók a különböző repülési üzemmódok leírásához legmegfelelőbb, egyszerűsített matematikai modellek. Bár a teljes rendszer „valódi” bemenetei a motorok kapocsfeszültségei lesznek, első lépésben a rotorlapátokon ébredő, eredő felhajtó erőket fogom tekinteni formális bemeneti jeleknek. A későbbiekben természetesen figyelembe veszem az elektromotorokat is, mint közbenső dinamikus rendszereket.

Egy merev test mozgásállapotának időbeli változási sebességét a következő differenciál-egyenletrendszerrel írhatjuk le¹⁵ [51]:

¹⁴ MIMO: Multi-Input Multi-Output

¹⁵ Az (1.1/b) egyenletben szereplő vektoriális szorzat a következőképpen értelmezhető:

$$\underline{\dot{\Phi}} = \left[\underline{\omega} \times \begin{bmatrix} \Phi_{xx} \\ \Phi_{xy} \\ \Phi_{xz} \end{bmatrix}, \underline{\omega} \times \begin{bmatrix} \Phi_{yx} \\ \Phi_{yy} \\ \Phi_{yz} \end{bmatrix}, \underline{\omega} \times \begin{bmatrix} \Phi_{zx} \\ \Phi_{zy} \\ \Phi_{zz} \end{bmatrix} \right].$$

$$\begin{aligned}
\dot{\underline{\mathbf{r}}}(t) &= \underline{\mathbf{v}}(t) & \text{a,} \\
\dot{\underline{\Phi}}(t) &= \underline{\boldsymbol{\omega}}(t) \times \underline{\Phi}(t) & \text{b,} \\
\dot{\underline{\mathbf{P}}}(t) &= \underline{\mathbf{F}}(t) & \text{c,} \\
\dot{\underline{\mathbf{L}}}(t) &= \underline{\mathbf{M}}(t) & \text{d,}
\end{aligned} \tag{1.1}$$

ahol az idő szerinti differenciálás \mathbf{K}_0 -ban értendő,

$\underline{\mathbf{r}}(t)$: a tömegközéppont helyvektora, pozíciója

$\underline{\mathbf{v}}(t)$: a tömegközéppont sebességvektora

$\underline{\Phi}(t)$: a forgatási vagy rotáció mátrix¹⁶

$\underline{\boldsymbol{\omega}}(t)$: a szögsebesség-vektor

$\underline{\mathbf{P}}(t)$: a test impulzus- vagy lendületvektora

$\underline{\mathbf{F}}(t)$: a testre ható erők eredőjének vektora

$\underline{\mathbf{L}}(t)$: a test impulzusmomentum- vagy perdületvektora

$\underline{\mathbf{M}}(t)$: a nyomatékok eredőjének vektora

A \mathbf{K}_0 inercia-koordinátarendszerben definiált pozíció- és sebességvektor a test tömegközéppontjának haladó (transzlációs) mozgását írja le. A test azonban forgó (rotációs) mozgást is végezhet. A testhez tömegközéppontjában rögzített \mathbf{K} testkoordinátarendszer \mathbf{K}_0 -hoz viszonyított állását a 3x3-as méretű forgatási mátrixszal, annak változási sebességét pedig a szögsebesség vektorral adjuk meg. A szögsebesség vektor nagysága a forgás sebességét, iránya pedig a forgás tengelyét határozza meg. A $\underline{\Phi}(t)$ mátrixnak fizikai jelentést is adhatunk: a t időpontban $\underline{\Phi}(t)$ oszlopaiból képzett vektorok \mathbf{K}_0 -ban, a \mathbf{K} koordinátarendszer x_K , y_K és z_K tengelyeinek irányába mutatnak (15. ábra):

$$\underline{\Phi}(t) = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{yx} & \Phi_{zx} \\ \Phi_{xy} & \Phi_{yy} & \Phi_{zy} \\ \Phi_{xz} & \Phi_{yz} & \Phi_{zz} \end{bmatrix} \tag{1.2}$$

\mathbf{K} rendszert megkaphatjuk, ha \mathbf{K}_0 -t saját tengelye körül háromszor megfelelő sorrendben elforgatjuk. A transzlációs mozgástól eltérően – ahol az eltolások az egyes tenge-

¹⁶ Bármely \mathbf{K} béli $\underline{\mathbf{a}}_{(K)}$ vektorra:

$$\underline{\mathbf{a}}_{(K_0)} = \underline{\Phi} \underline{\mathbf{a}}_{(K)}$$

lyek mentén tetszőleges sorrendben elvégezhető – a forgatások sorrendje nem cserélhető fel. A 12 lehetséges forgatási sorrend közül a repüléstechnikában az x - y - z sorrendet használják. A forgatási szögeket rendre ϕ bedöntési-, θ bólintási- és ψ irányyszögnek szokás nevezni. Ez alapján a forgatási mátrixot a következő formában is megadhatjuk:

$$\underline{\underline{\Phi}}(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Az (1.1/b) kifejezésben szereplő vektoriális szorzat mátrixszorzásra egyszerűsödik, ha a szögsebesség vektort mátrix formában írjuk fel a következő módszer szerint:

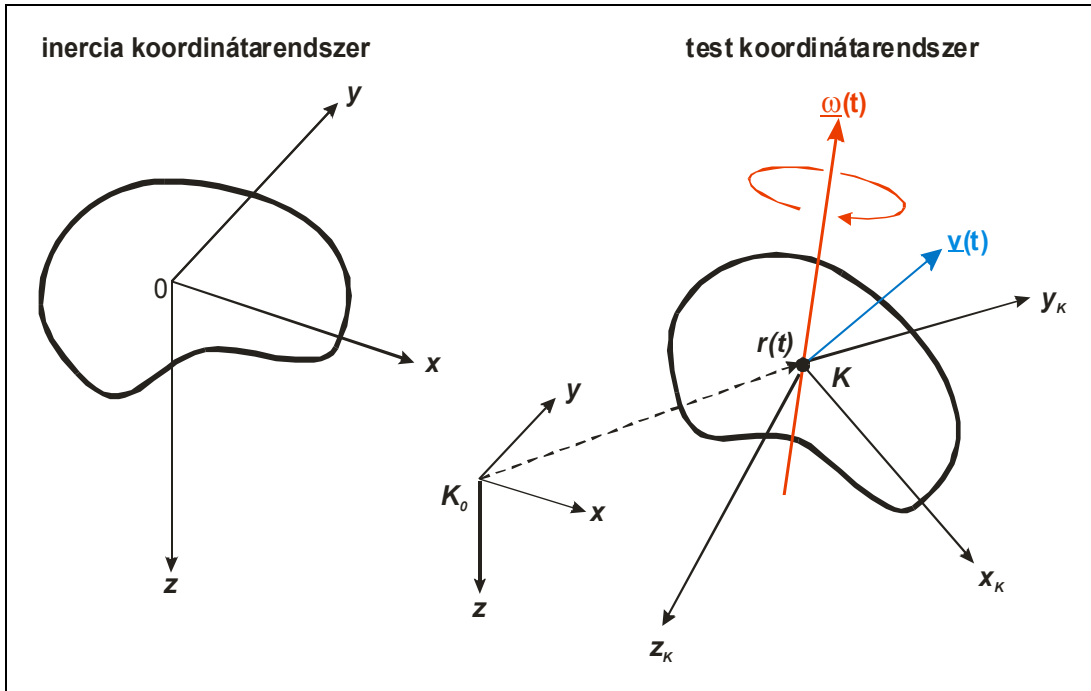
$$\underline{\underline{\omega}}(t) = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \rightarrow \underline{\underline{\tilde{\omega}}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Ez alapján:

$$\underline{\underline{\dot{\Phi}}}(t) = \underline{\underline{\tilde{\omega}}}(t) \underline{\underline{\Phi}}(t) \quad (1.5)$$

mátrixegyenletet kapjuk, ami egyenértékű (1.1/b) kifejezéssel.

Bár a merevszárnyú repülőgépekkel foglalkozó angolszász eredetű irodalmakban a szögsebesség komponensek tekintetében az $\underline{\underline{\omega}} = [p \ q \ r]$ jelölés a hagyományosan elterjedt, az egyértelműség és a könnyebb áttekinthetőség érdekében értekezésemben mindenfajta szögsebességet a fizikában megszokott – egymástól indexekkel megkülönböztetett – görög ómega (ω , Ω) betűkkel fogok jelölni.



15. ábra. Merev test általános mozgása. A translációs mozgás a tömegközéppontba mutató $\underline{r}(t)$ vektorral, a rotációs mozgás a tömegközéppontban rögzített test-koordináta rendszer és a referencia-koordináta-rendszer egymáshoz viszonyított helyzetét reprezentáló $\underline{\Phi}(t)$ mátrixszal leírható [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw].

Az (1.1) egyenletrendszer a \mathbf{K}_0 inercia-rendszerben érvényes. A forgó mozgásra vonatkozó összefüggéseket viszont célszerűbb a helikopter tömegközéppontjában rögzített \mathbf{K} test-koordináta-rendszerben megadni (a levezetés az 1. mellékletben található):

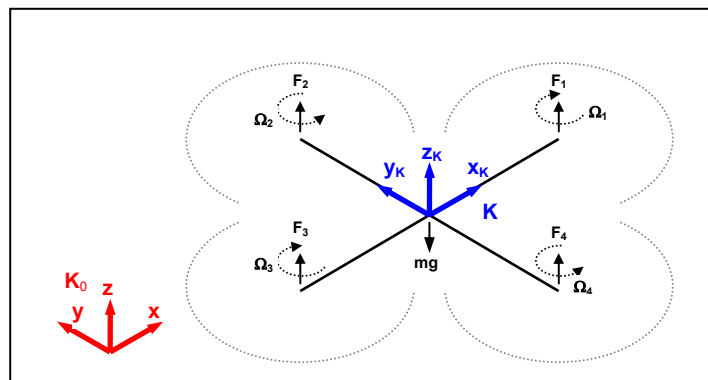
$$\begin{aligned}
 \dot{\underline{r}}(t) &= \underline{v}(t) \\
 m\dot{\underline{v}}(t) &= \sum_j^K \underline{F}_j(t) \\
 \underline{\dot{\Phi}}(t) &= \underline{\Phi}(t)\underline{\tilde{\omega}}_{(K)}(t) \\
 \underline{\mathbf{J}}_{(K)}\underline{\dot{\omega}}_{(K)}(t) &= -\underline{\omega}_{(K)}(t) \times \underline{\mathbf{J}}_{(K)}\underline{\omega}_{(K)}(t) + \sum_k^Z \underline{\mathbf{M}}_{k(K)}(t)
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

Az idő szerinti differenciálás (1.6) negyedik összefüggésénél a forgó \mathbf{K} koordináta-rendszerben értendő. Így egyrészt állandó $\underline{\mathbf{J}}_{(K)}$ tehetetlenségi tenzonnal számolhatunk, másrészt a navigációs szenzorok által szolgáltatott mérési adatok is ebben a rendszerben definiáltak [30][47][52] [53].

A merev testnek tekintett helikopter sárkányszerkezetének dinamikus viselkedését tehát az (1.6) egyenletrendszer írja le. Ez azonban még nem tartalmazza a rotorok fordulatszámja és a rendszerre ható erők és nyomatékok közötti összefüggéseket, de a rotorok, és az őket forgató elektromotorok dinamikus viselkedését sem. A rendszermodell ezen részei a következő fejezetekben kerülnek meghatározásra.

1.5. A KÍSÉRLETI RENDSZER MATEMATIKAI MODELLJÉNEK MEGHATÁROZÁSA

Ahhoz, hogy az előző fejezetben kapott matematikai modellt az általam választott négyrotoros helikopter esetében alkalmazni lehessen, meg kell határoznom a rendszer m tömegét, $\underline{J}_{(K)}$ tehetetlenségi tenzorát valamint a helikopterre ható erőket és nyomatékokat. A használt koordináta rendszerek, irányok és számozások a 16. ábrán láthatóak. A repüléstechnikában megszokott, hogy a test koordináta rendszer z_k tengelye a nehézségi gyorsulás irányába, lefelé mutat. Az általam használt inerciális mérőegységben azonban a mérőirányok ettől eltérő módon definiáltak, ezért értekezésemben a 16. ábra vonatkoztatási irányait fogom használni.



16. ábra. A K_0 és K koordináta rendszerek definíciója [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw]

1.5.1 Tömeg, tehetetlenségi tenzor meghatározása

A teljes rendszer tömegét az egyes alkotóelemek tömegének összegzésével kaphatjuk meg:

$$m_0 = \sum_i^N m_i \quad (1.7)$$

Megfelelő pontosságú mérleg segítségével az alkotóelemek, de akár a teljes rendszer tömege is egyszerűen lemérhető. A $\underline{\mathbf{J}}_{(K)}$ tehetetlenségi tenzor meghatározásához azonban bonyolultabb módszerek szükségesek.

A tehetetlenségi tenzor számításához felhasználhatjuk az integrál operátor additív tulajdonságát, vagyis az eredő tehetetlenségi tenzort felbonthatjuk a test egyes alkotóelemeinek tehetetlenségi tenzorainak összegére. Ha a testhez rögzített \mathbf{K} koordináta rendszerben adottak az alkotóelemek saját tömegközéppontra vonatkoztatott $\underline{\mathbf{J}}_{i(K)}^0$ tehetetlenségi tenzorai, valamint a tömegközéppontok $\underline{\mathbf{r}}_i$ helyvektorai, az eredő tehetetlenségi tenzor a Steiner-tétel alapján [27] a

$$\underline{\mathbf{J}}_{(K)} = \sum_i^N \underline{\mathbf{J}}_{i(K)} = \sum_i^N \left(\underline{\mathbf{J}}_{i(K)}^0 + m_i (\underline{\mathbf{r}}_i^T \underline{\mathbf{r}}_i \underline{\mathbf{I}} - \underline{\mathbf{r}}_i \underline{\mathbf{r}}_i^T) \right) \quad (1.8)$$

formulával számolható. Az eredő $\underline{\mathbf{r}}$ tömegközéppont helyvektor az $\underline{\mathbf{r}}_i$ vektorok tömeggel súlyozott átlaga:

$$\underline{\mathbf{r}} = \frac{1}{m_0} \sum_i^N m_i \underline{\mathbf{r}}_i \quad (1.9)$$

Amennyiben valamelyik alkotóelem $\underline{\mathbf{J}}_i$ tehetetlenségi tenzora egy \mathbf{K} -val nem azonos állású \mathbf{K}_i koordináta rendszerben van definiálva, $\underline{\mathbf{J}}_{i(K)}$ a következő formulával számolható:

$$\underline{\mathbf{J}}_{i(K)} = \underline{\Phi}_i \underline{\mathbf{J}}_i \underline{\Phi}_i^T \quad (1.10)$$

ahol $\underline{\Phi}_i$ a \mathbf{K}_i rendszer állását (\mathbf{K} -ban) reprezentáló forgatási mátrix [27][28][31].

A fenti módszer akkor alkalmazható, ha a testet alkotó részegységek jól közelíthetők homogén tömegeloszlású, egyszerű geometriai formákkal, vagy azok kombinációival, valamint ha a geometriai méreteket és távolságokat megfelelő pontossággal mérni tudjuk. Az így közelített elemek tehetetlenségi tenzorai már viszonylag könnyen számíthatók. További segítséget nyújtanak a gépészmérnöki gyakorlatban használatos CAD¹⁷ programok, melyekben lehetőség van a bennük megrajzolt 3D alakzatok tehetetlenségi tenzorának automatikus meghatározására.

¹⁷ CAD: Computer Aided Design

A számítások ellenőrzésére ad lehetőséget, ha a merev testből fizikai ingát készítünk: a testet, egy nem a tömegközéppontján átmenő vízszintes tengelynél felfüggesztjük, majd egyensúlyi helyzetéből kimozdítjuk. Ha ismerjük a test m tömegét és a forgástengely tömegközépponttól mért d távolságát, a lengésidőből meghatározhatjuk a kérdéses forgástengelyre vonatkozó Θ tehetetlenségi nyomatékot. Ha az ingát olyan kis α szöggel térítjük ki, hogy $\sin\alpha \approx \alpha$, a lengés periódus ideje a

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Theta}{mgd}} \quad (1.11)$$

formulával számolható [29].

A következő fejezetekben – feltételezve, hogy a négyrotoros helikopter főbb építőelemei jól közelíthetők homogén tömegeloszlású egyszerűbb térbeli testekkel – a fent említett módszereket felhasználva a CADKEY98 program segítségével kiszámolom rendszerem eredő tehetetlenségi tenzorát, majd méréssel ellenőrzöm a számítások helyességét. A közelítésekből és mérési pontatlanságokból adódó hiba nagyságrendjét számításokkal ellenőrzöm.

1.5.1.1 Tehetlenségi tenzor számítása

A helikopter részegységeit CADKEY98-ban szerkesztettem¹⁸ meg. A program saját globális koordináta-rendszerének bármely pontjában képes kiszámolni egy adott test tehetlenségi tenzorát (17. ábra) [54]. Ha minden részegységnél ugyanazt a referenciapontot adjuk meg – praktikusán a várt tömegközéppontot – a tehetlenségi tenzorokat koordináta-transzformáció nélkül össze lehet adni. Ezzel megkapjuk az eredő tehetlenségi tenzort.

Szerkesztéskor ügyeltem arra, hogy a program globális koordináta-rendszerének tengelyei és a helikopter feltételezett szimmetriatengelyei egybeessenek, így az eredő tehetlenségi tenzort jó közelítéssel diagonális formában kaptam meg.

A fentiek, illetve az (1.8-10) egyenletek figyelembe vételével a következő eredményeket kaptam (A mérések és számítások részletei a 2. mellékletben található):

- Az eredő tehetlenségi tenzor a rajzolás koordináta rendszerében:

¹⁸ Munkám során a CADKEY98 szoftver ingyenesen letölthető DEMO változatát használtam

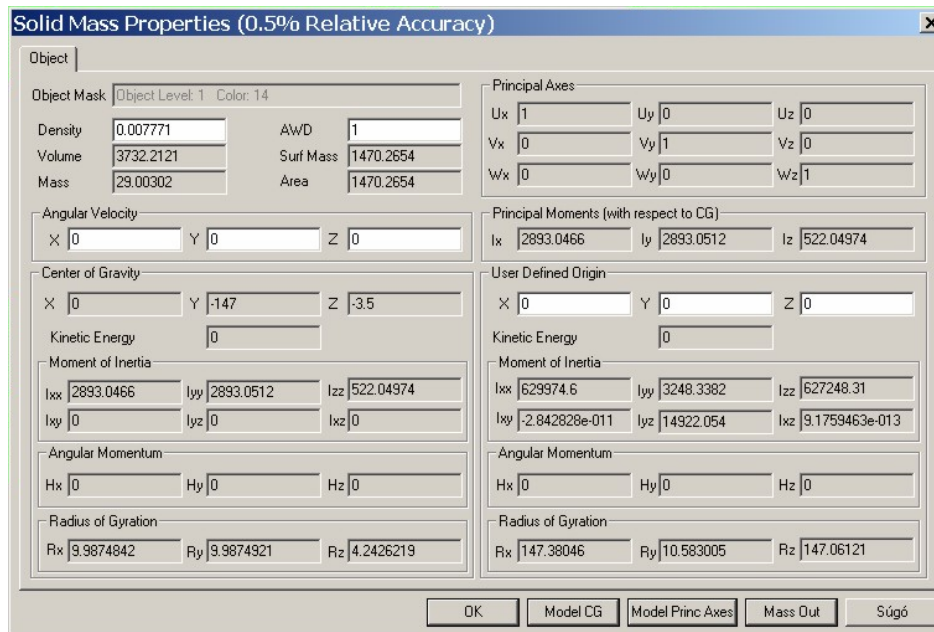
$$\mathbf{J}_{(K)} = \sum_i^N \mathbf{J}_{i(K)} = \begin{bmatrix} 2,37314 & 0,001497 & 0,024787 \\ 0,0014971 & 2,39331 & -0,003632 \\ 0,024787 & -0,003632 & 4,55262 \end{bmatrix} \cdot 10^6 \quad [\text{gmm}^2]$$

- Az össztömeg:

$$m_0 = \sum_i^N m_i = 390,2 \quad [\text{g}]$$

- A helikopter tömegközéppontja a rajzolás koordináta rendszerében:

$$\mathbf{r} = \frac{1}{m_0} \sum_i^N m_i \mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} -2,46 \\ -3,6 \\ 1,29 \end{bmatrix} \quad [\text{mm}]$$



17. ábra. Tehetlenségi adatok a CADKEY98 programban. Az adott test tehetlenségi tenzorát a „User Defined Origin” beviteli mező használatával tetszőleges pontban meg lehet határozni [Készítette: Turóczy A. - CADKEY98].

1.5.1.2 Tehetlenségi tenzor kísérleti meghatározása

A tehetlenségi tenzor J_{zz} elemének kísérleti meghatározásához a helikoptert felfüggesztettem egy a habszivacs védőkeretén átszúrt vékony acélrúd segítségével úgy, hogy a rúd párhuzamos legyen a helikopter z_K tengelyével. Az így kialakított inga len-

gésidejét optikai kapu és oszcilloszkóp segítségével (18. ábra) mértem meg az előző fejezetben leírtak és az (1.11) képlet alapján:

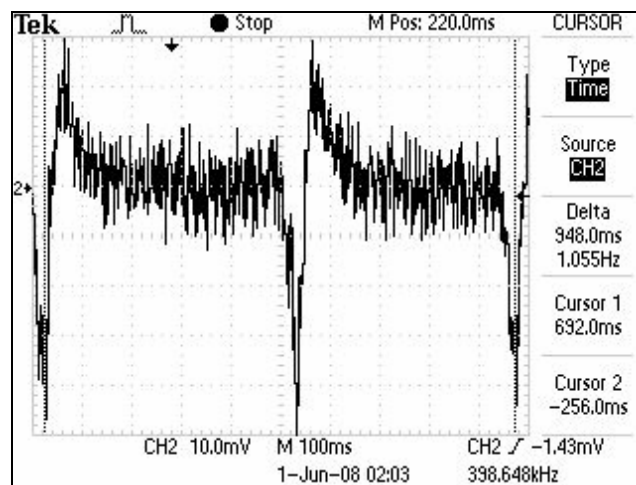
$$\begin{aligned}d &= 0,16 \text{ m} \\m &= 0,39 \text{ kg} \\g &= 9,81 \text{ m/s}^2 \\T &= 0,948 \text{ s}\end{aligned}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Theta}{mgd}} \longrightarrow \Theta = \frac{T^2 mgd}{4\pi^2} = \frac{0,948^2 \cdot 0,39 \cdot 9,81 \cdot 0,16}{4\pi^2} = 13,9 \cdot 10^{-3}$$

Ebből a tömegközépponton átmenő z_K tengelyre vonatkozó tehetetlenségi nyomaték a Steiner-tétel alapján számolható:

$$J_{zz} = \Theta - m \cdot d^2 = 13,9 \cdot 10^{-3} - 0,39 \cdot 0,16^2 = 3,95 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kg m}^2]$$

A méréssel és az elméleti számításokkal kapott J_{zz} tehetetlenségi nyomatékok között 15 % eltérés tapasztalható. A kapott paraméterek jószágáról és a rendszer paraméterérzékenységéről azonban csak a későbbi fejezetekben ismertetett érzékenységi vizsgálatokat és a próbarepüléseket követően lehet érdemi kijelentéseket tenni.



18. ábra. Az optikai kapu kimeneti jele. A helikopterből kialakított inga az optikai kapu előtt elhaladva megakadályozza a forrásból érkező infravörös fény érzékelőbe jutását. Az inga egy lengési periódus alatt kétszer takarja el az érzékelőt [Készítette: Turóczy A - Tektronix oszcilloszkóp képe]

1.5.2 Az elektromotor dinamikus viselkedése

Az egyenáramú elektromotor dinamikus viselkedését a

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_m(t)}{dt} J_m &= i(t)K_T - B\omega_m(t) \\ \frac{d i(t)}{dt} L &= u(t) - i(t)R - K_b\omega_m(t) \end{aligned} \quad (1.12)$$

egyenletrendszerrel írhatjuk le [32][33], ahol:

$u(t)$: a motor kapocsfeszültsége [V]

$i(t)$: a motor tekercsein átfolyó áram [A]

$\omega_m(t)$: a forgórész szögsebessége [rad/s]

R : a motor tekercselési ellenállása [Ω]

L : a motor induktivitása [H]

K_T : nyomatéktényező [Nm/A]

K_b : feszültségtényező [V/(rad/s)]

J_m : a fogórész és terhelések tehetetlenségi nyomatéka [Nm/(rad/s²)]

B : a mechanikai veszteségek együtthatója [Nm/(rad/s)] (ez az együttható a rotorra ható reaktív erők hatását is tartalmazza).

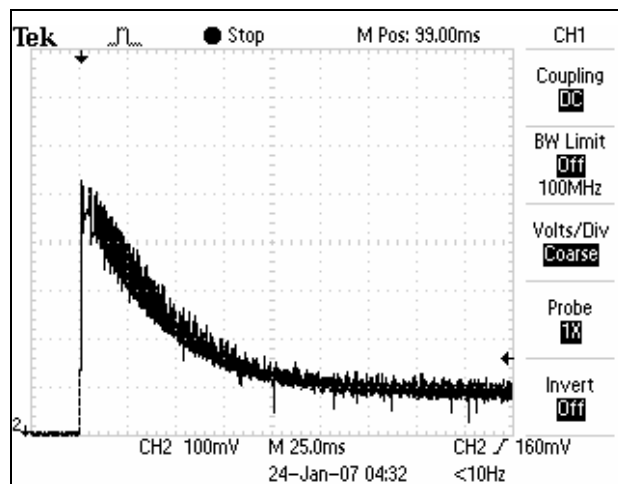
Mivel a nyomatéktényező és a feszültségtényező számértéke SI mértékegységekben definiálva megegyezik, a továbbiakban helyettük az indexek nélküli K motorállandó kifejezést fogom használni [33]. Az R ellenállást és az L induktivitást rögzített forgórész ($\omega_m(t) = 0$) mellett határozhatjuk meg. Állandó kapocsfeszültség esetén ($u(t) = \text{áll.}$), a tranziensek lecsengése után $di(t)/dt = 0$ lesz, így a feszültség és a motor tekercselésén átfolyó áram ismeretében R meghatározható. Az L induktivitás a rögzített forgórészű motor egységugrás jellegű gerjesztése ($u(t)$) esetén az R - L kör időállandójának segítségével, az átfolyó áram időfüggvényéből határozható meg. R és L , illetve a kapocsfeszültség és az áram ismeretében, állandó szögsebességgel szabadon forgó tengely mellett ($u(t) = \text{áll.}$, $i(t) = \text{áll.}$, $\omega_m(t) = \text{áll.}$) a K motorállandó már egyszerűen számolható. Az előzőekkel azonos feltételek mellett $d\omega_m(t)/dt = 0$ lesz, így a B együttható a szögsebesség ismeretében szintén meghatározható. A J_m tehetetlenségi nyomaték a forgó tömegek

geometriai adataiból – a helikopter tehetetlenségi tenzorának számításakor használt módszer alapján – közelítéssel, vagy a motor egységugrás jellegű gerjesztésével az átfolyó áram időfüggvényéből származtatható. A motor mérésének részletes leírása a 3. mellékletben található.

A motorjellemzők meghatározása után a **(1.12)** egyenletet átrendezve felírhatjuk a motor állapotváltozós egyenletét, ahol $i(t)$ és $\omega_m(t)$ állapotváltozók illetve kimeneti jelek, $u(t)$ pedig a bemenő jel:

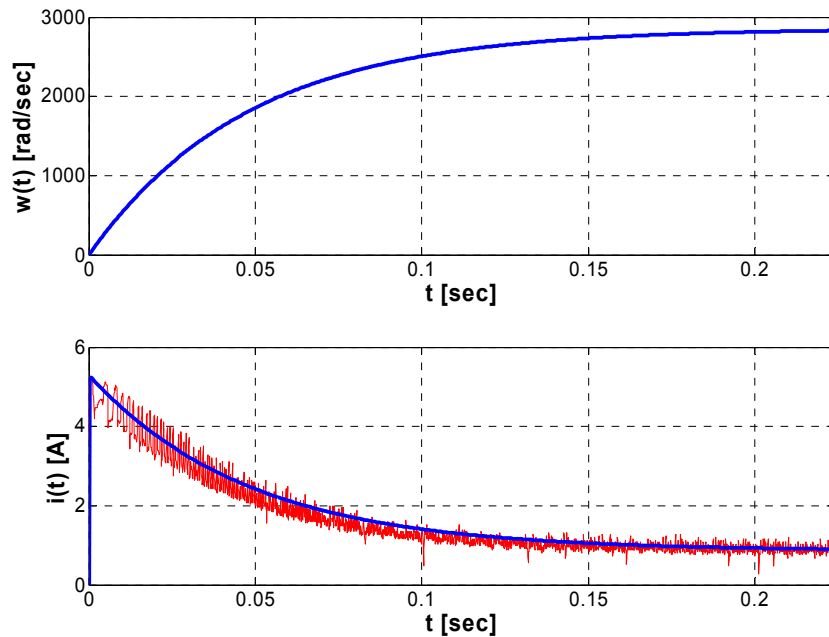
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_m \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J_m} & \frac{K}{J_m} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (1.13)$$

Mivel nem rendelkezem olyan eszközzel, amivel a motor szögsebességét megfelelő időbeli felbontással mérni lehetne, a valós rendszerrel csak a motoráramot tudtam oszcilloszkóp segítségével ábrázolni (19. ábra). A **(1.13)** állapotegyenlettel definiált lineáris rendszer egységugrás-válaszait azonban a MATLAB program felhasználásával egyszerűen meg tudtam határozni. Az eredmény a 20. ábrán kék színnel látható. Az alsó ábrán, az összehasonlítás megkönnyítése érdekében, a szimuláció görbéje mellett piros színnel a valós motoráramot is feltüntettem.



19. ábra. Motoráram egységugrás bemeneti feszültség esetén [Készítette: Turóczy A - Tektronix oszcilloszkóp képe]

Látható, hogy a motoráram tekintetében az (1.13) egyenlet, az általam meghatározott paraméterekkel elég nagy pontossággal közelíti a valóságban lejátszódó folyamatokat. Bár a szögsebesség tekintetében nem volt lehetőségem ilyen összehasonlításra, az előző állításból következik, hogy a közelítés a szögsebességre is megfelelő, ha elfogadjuk hogy az egyenáramú motor matematikai modellje (1.12) alakú.



20. ábra. A motortengely szögsebességének (felső görbe) és a motor áramának (alsó görbék) időfüggvénye egységugrás bemenő feszültség esetén. Az alsó ábrán a lineáris modell (kék színnel) és az oszcilloszkóppal mért valós motoráram (piros színnel) időfüggvényeit hasonlíthatjuk össze [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

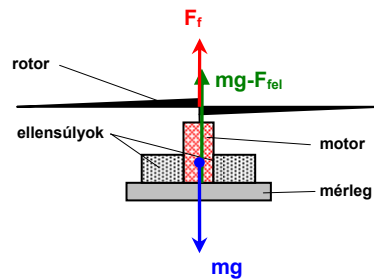
1.5.3 Rotorok által keltett erők és nyomatékok meghatározása

1.5.3.1 Felhajtóerő mérése

A rotorok által keltett felhajtóerő közelítő meghatározására statikus méréseket végeztem. A helikopter egyik rotorját, az őt meghajtó elektromotorral és megfelelő mennyiségű ellensúllyal együtt mereven rögzítettem egy nagy pontosságú digitális mérlegre a 21. ábrán látható módon. Különböző Ω rotor-szögsebesség értékeknél leolvastam a mérleg által mért tömeget majd kiszámoltam az ehhez tartozó felhajtóerőt. A rotor forgástengelye függőleges, vagyis a nehézségi gyorsulással azonos irányú. A mérlegre ható erő egyenlő, a rögzített tömegekre ható mg nehézségi erő valamint a rotorlapátok által keltett F_f felhajtóerő különbségével. Ebből a felhajtóerő számolható:

$$m_{mért} = m - \frac{F_f}{g} \quad \rightarrow \quad F_f = (m - m_{mért})g \quad (1.14)$$

A felhajtóerő - fordulatszám függvény meghatározásához több egymástól független mérést végeztem különböző fölfelszíntől mért magasságokban. A 6 - 100 cm-es mérési tartományban – a szakirodalmakban [55] leírtaktól eltérően – a magasság növekedésével nem tapasztaltam számottevő felhajtóerő csökkenést. Ennek oka az lehet, hogy a mérési elrendezés nem ad lehetőséget a földfelszín közelsége miatt létrejövő párnahatás kiküszöbölésére. A mérleg, kis felszíne ellenére valószínűleg nem elhanyagolható módon befolyásolta a mérést.



21. ábra. Rotor által keltett felhajtóerő mérése [Szerk.: Turóczy A. – Corel Draw]

A mérési eredmények a 22. ábrán láthatók sárga, lila és zöld színekkel. A kapott görbék igen jól közelíthetők a piros színnel ábrázolt

$$F_f(\Omega) = C_f \cdot \Omega^2 \quad (1.15)$$

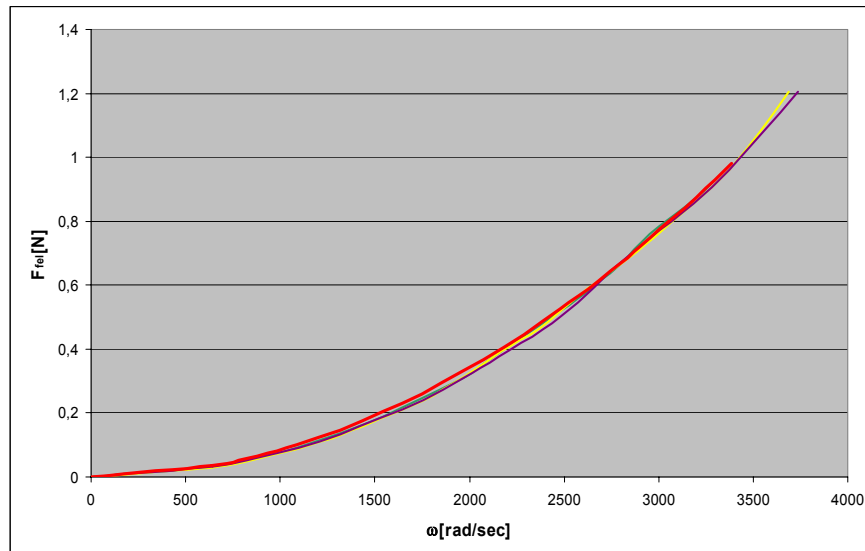
$$C_f = 8,5512 \cdot 10^{-8} \quad [\text{N}/(\text{rad}/\text{s})^2]$$

parabolával. Ebből a helikopter tömegközéppontjára ható eredő erő **K**-ban:

$$\underline{\mathbf{F}}_{f(K)} = C_f \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{F}}_{f(K)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_f (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

A fenti összefüggést a későbbiekben a helikopter dinamikus modelljében fogom felhasználni.



22. ábra. Felhajtóerő a motortengely szögsebességének függvényében
[Készítette: Turóczy A. - MS Excel]

A rotor szögsebességét optikai kapu és oszcilloszkóp segítségével mértem, amiből a motortengely szögsebességét a fogaskerék áttétel ismeretében határoztam meg:

$$\omega_{tengely} = \frac{n_r}{n_m} \Omega \quad N = \frac{n_r}{n_m} = \frac{69}{8} \quad (1.17)$$

ahol n_r a rotorhoz csatlakozó fogaskerék, n_m pedig a motor tengelyén lévő fogaskerék fogszáma.

Természetesen az \underline{F}_f erőt nagyban befolyásolják – a rotor földfelszíntől való távolsága mellett – a levegő aktuális fizikai jellemzői (nyomás, hőmérséklet stb.), így ezek a hatások a helikopter matematikai modelljében bizonytalansággént fognak jelentkezni.

1.5.3.2 Reaktív nyomaték mérése

A rotorra ható reaktív nyomaték a motor tengelyén, a motor által létrehozott $Ki(t)$ nyomatékkal ellentétes irányban hat. Tegyük fel, hogy a forgórészben és a fogaskerék áttételben keletkező mechanikai veszteségek a rotorlapáttal terhelt és a rotorlapát nélkül,

terheletlen állapotban forgó motornál azonosak. Ekkor a terhelés nélküli nyomaték, állandósult szögsebesség értékeknél ($\Omega(t) = \text{áll.}$, $i(t) = \text{áll.}$) pontosan annyival lesz kisebb a terhelt esetben kialakult nyomatéknál, mint a rotorlapátra ható reaktív nyomaték. A terhelt és a terheletlen motor szögsebesség-nyomaték görbéjének különbsége tehát, megadja a reaktív nyomaték szögsebesség függését. A számításoknál természetesen figyelembe kell venni a fogaskerék áttétel hatását.

A mérési eredmények a 23/a-b. ábrákon láthatók. A 23/c. ábra a különbségi nyomatékgörbét ábrázolja, ami jól közelíthető a sárga színnel jelölt

$$M_{rm}(\Omega) = 1,24 \cdot 10^{-10} \cdot \Omega^2 \quad (1.18)$$

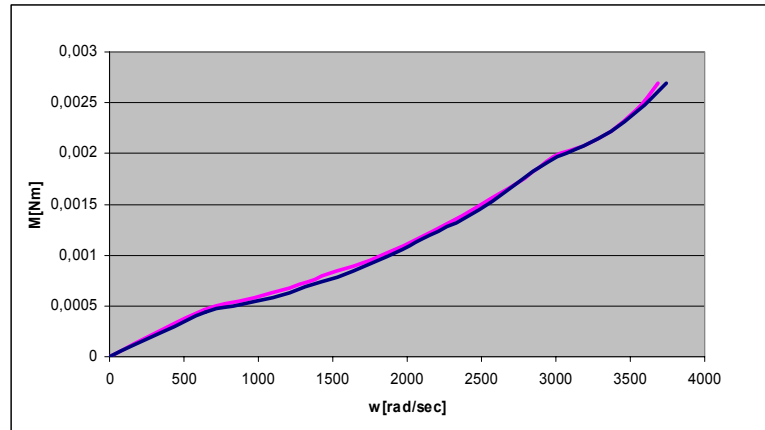
egyenletű parabolával. A motor tengelyére redukált reaktív nyomatékból a rotorlapát tengelyén fellépő nyomaték a fogaskerék áttétel segítségével számítható [27]:

$$\begin{aligned} M_r(\Omega) &= \frac{69}{8} M_{rm}(\Omega) \\ M_r(\Omega) &= C_r \cdot \Omega^2 \\ C_r &= 1,0695 \cdot 10^{-9} \quad [\text{Nm}/(\text{rad/s})^2] \end{aligned} \quad (1.19)$$

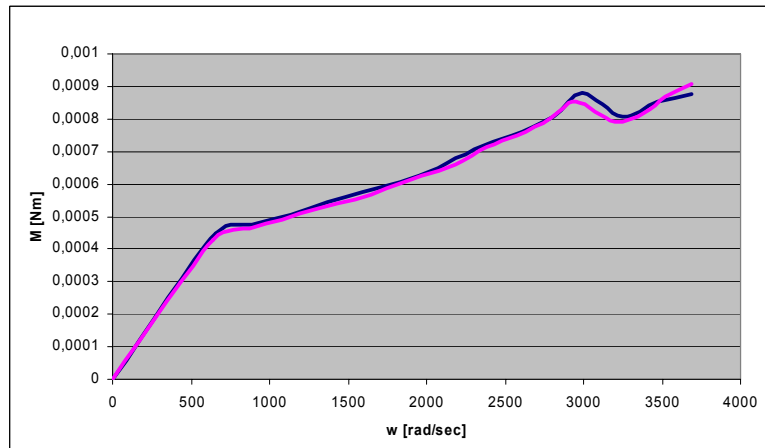
A rotorok levegővel történő kölcsönhatásából eredő nyomaték, a 16. ábra irányai szerint, az (1.16) és (1.19) összefüggések felhasználásával:

$$\underline{\mathbf{M}}_{\text{aero}(K)} = \begin{bmatrix} d \cdot C_f (\Omega_2^2 - \Omega_4^2) \\ d \cdot C_f (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ C_r (\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

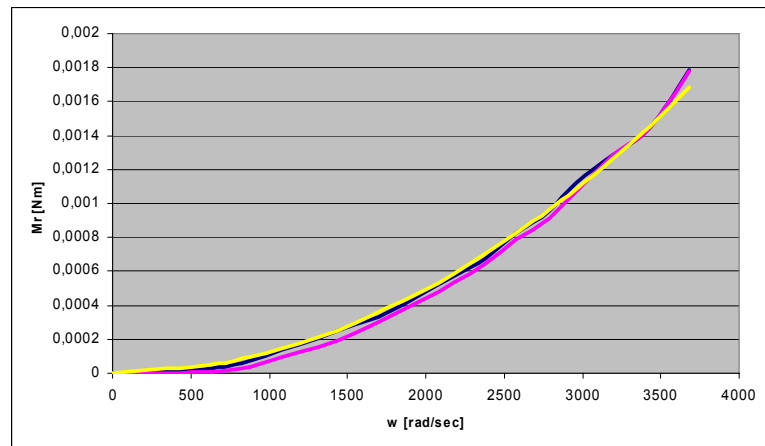
ahol $d = 170$ mm, a rotorok forgástengelyének z_K tengelytől való távolsága. A fenti összefüggést a későbbiekben a helikopter dinamikus modelljében fogom felhasználni.



a,



b,



c,

23. ábra. a., A motor nyomatéka rotorral terhelt és, b., terheletlen esetben. c., A motor tengelyére redukált reaktív nyomaték [Készítette: Turóczy A. - MS Excel]

1.5.4 Pörgettyű (giroszkóp) hatás

A rotorok, a fogaskerekek és a motorok forgórészei saját forgástengelyük körül forgómozgást végeznek. Ezek a tengelyek a helikopter mozgásának következtében maguk is elfordulhatnak, így az adott perdület vektor nagysága nem, de iránya megváltozik. A perdület megváltozása nyomatékot hoz létre (lásd 1. melléklet), mely merőleges mind a forgó tömeg, mind a helikopter szögsebesség vektorának irányára [44][46][27]. Az i -edik rotorra nézve:

$$\begin{aligned}\underline{\mathbf{L}}_{ri(K)} &= \underline{\mathbf{J}}_r \underline{\boldsymbol{\Omega}}_{i(K)} \\ \underline{\mathbf{M}}_{Gri(K)} &= \dot{\underline{\mathbf{L}}}_{ri(K)} = \underline{\boldsymbol{\omega}}_{(K)} \times \underline{\mathbf{L}}_{ri(K)} \\ \underline{\mathbf{M}}_{Gri(K)} &= \underline{\boldsymbol{\omega}}_{(K)} \times \underline{\mathbf{J}}_r \underline{\boldsymbol{\Omega}}_{i(K)}\end{aligned}\quad (1.21)$$

ahol $\underline{\mathbf{L}}_{ri(K)}$ az i -edik rotor perdülete, $\underline{\mathbf{J}}_r$ a rotor tehetetlenségi mátrixa a \mathbf{K} koordináta-rendszerben saját tömegközéppontjára vonatkoztatva, $\underline{\boldsymbol{\Omega}}_{i(K)}$ a rotor szögsebessége, $\underline{\boldsymbol{\omega}}_{(K)}$ a helikopter szögsebessége, valamint $\underline{\mathbf{M}}_{Gri(K)}$ a pörgettyűhatás következtében fellépő nyomaték. Mivel az $\underline{\boldsymbol{\Omega}}_{i(K)}$ vektor a \mathbf{K} koordináta rendszer z_K tengelyével párhuzamos, az $\underline{\mathbf{M}}_{Gri(K)}$ nyomatéknak csak x_K és y_K irányú komponensei lesznek. Ha a tehetetlenségi tenzor diagonális:

$$\underline{\mathbf{M}}_{Gri(K)} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{(K)} \times \underline{\mathbf{J}}_r \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_i \end{bmatrix}_{(K)} = \begin{bmatrix} \omega_y \mathbf{J}_{rz} \Omega_i \\ -\omega_x \mathbf{J}_{rz} \Omega_i \\ 0 \end{bmatrix}_{(K)} \quad (1.22)$$

A fogaskerekek és a motor-forgórészek hatása a fentiekhez hasonló módon számolható. Figyelembe kell azonban venni, hogy a motorok az $N = 69/8$ fogaskerék áttételnek megfelelően gyorsabban és ellentétes irányban mozognak. A fogaskerekek forgásából eredő $\underline{\mathbf{M}}_{Ggi(K)}$ és a motor forgórészek forgásából eredő $\underline{\mathbf{M}}_{Gfi(K)}$ giroszkópikus nyomatékok tehát:

$$\underline{\mathbf{M}}_{Ggi(K)} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{(K)} \times \underline{\mathbf{J}}_g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_i \end{bmatrix}_{(K)} = \begin{bmatrix} \omega_y \mathbf{J}_{gz} \Omega_i \\ -\omega_x \mathbf{J}_{gz} \Omega_i \\ 0 \end{bmatrix}_{(K)} \quad (1.23)$$

$$\underline{\mathbf{M}}_{\text{Gfi(K)}} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{(K)} \times \underline{\mathbf{J}}_{\text{f}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mathbf{N} \cdot \underline{\boldsymbol{\Omega}}_i \end{bmatrix}_{(K)} = \begin{bmatrix} -\omega_y \mathbf{J}_{fz} \mathbf{N} \underline{\boldsymbol{\Omega}}_i \\ \omega_x \mathbf{J}_{fz} \mathbf{N} \underline{\boldsymbol{\Omega}}_i \\ 0 \end{bmatrix}_{(K)} \quad (1.24)$$

A pörgettyűhatásból keletkező eredő forgatónyomaték így:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{M}}_{\text{G(K)}} &= \sum_{i=1}^4 (\underline{\mathbf{M}}_{\text{Gri(K)}} + \underline{\mathbf{M}}_{\text{Ggi(K)}} + \underline{\mathbf{M}}_{\text{Gfi(K)}}) \\ \mathbf{J}_{\text{re}} &= (\mathbf{J}_{\text{rz}} + \mathbf{J}_{\text{gz}} - \mathbf{N} \mathbf{J}_{fz}) \\ \underline{\mathbf{M}}_{\text{G(K)}} &= \mathbf{J}_{\text{re}} \begin{bmatrix} \omega_y (\Omega_2 + \Omega_4 - \Omega_1 - \Omega_3) \\ -\omega_x (\Omega_2 + \Omega_4 - \Omega_1 - \Omega_3) \\ 0 \end{bmatrix}_{(K)} \end{aligned} \quad (1.25)$$

1.6. A TELJES RENDSZER MATEMATIKAI MODELLJE

Az (1.6) egyenlet alapján, valamint az előző fejezetben meghatározott tehetetlenségi jellemzők, erők és nyomatékok ismeretében, a négyrotoros helikopter nemlineáris matematikai modellje a következő formában írható fel:

$$\begin{aligned} \underline{\dot{\mathbf{r}}}(t) &= \underline{\mathbf{v}}(t) \\ \underline{\dot{\mathbf{v}}}(t) &= -\underline{\mathbf{g}} + \frac{1}{m_0} \underline{\boldsymbol{\Phi}}(t) \cdot \underline{\mathbf{F}}_{\text{f(K)}}(t) \\ \underline{\dot{\boldsymbol{\Phi}}}(t) &= \underline{\boldsymbol{\Phi}}(t) \underline{\tilde{\boldsymbol{\omega}}}_{(K)}(t) \\ \underline{\dot{\boldsymbol{\omega}}}_{(K)}(t) &= \underline{\mathbf{J}}_{(K)}^{-1} (-\underline{\tilde{\boldsymbol{\omega}}}_{(K)}(t) \cdot \underline{\mathbf{J}}_{(K)} \underline{\boldsymbol{\omega}}_{(K)}(t) + \underline{\mathbf{M}}_{\text{aero(K)}}(t) - \underline{\mathbf{M}}_{\text{G(K)}}(t)) \end{aligned} \quad (1.26)$$

KÖVETKEZTETÉSEK

Megvizsgálva az elektromos meghajtású négyrotoros helikopter fizikai felépítését az alkalmazhatóság szempontjából a következő előnyös tulajdonságokat találtam: **helyből fel- és leszállás képessége**, a hagyományos elrendezésű helikopterhez képest **egyszerűbb mechanikai** konstrukció, a helikopter a négy rotor fordulatszámának szabályozásával irányítható, az elektromos meghajtásból következően csendesebb, **megbízhatóbb a működése**. A fentiekből arra következtetek, hogy a konstrukció **alkalmas katonai hírszerzési, felderítési és felügyeleti feladatok ellátására**, így az e területen végzett kutatói és fejlesztői tevékenységemből hasznos, új tudományos eredmények szülehetnek.

A merev testek általános mozgását leíró egyenletek vizsgálatai alapján megállapítottam, hogy a négyrotoros helikopter fizikai modelljének meghatározásához **a tehetetlenségi jellemzőket megfelelő pontossággal** kell mérni vagy becsülni. Az **általam választott módszer**, az elméleti számítások és az elvégzett kísérletek alapján **erre alkalmas**. Az elektromotorok és a rotorok fizikai jellemzőinek mérésekor az alábbi következtetésre jutottam: szakirodalmakban leírtaktól eltérően párnahatást – valószínűleg a mérési elrendezés korlátai miatt – a rotor-felhajtóerő mérésekor nem tapasztaltam. A későbbi szabályzótervezésnél figyelembe kell venni, hogy az általam felvett szögsebesség-felhajtóerő karakterisztikában ez, a valóságban létező hatás nem szerepel.

Megállapítottam, hogy a Newtoni fizika dinamikai egyenleteinek segítségével **fel lehet írni kísérleti rendszerem közelítő nemlineáris matematikai modelljét**, az abban szereplő **paramétereket számítással, méréssel és kísérletekkel meg lehet határozni**. A későbbi szabályzótervezésnél figyelembe kell venni a matematikai modell bizonytalanságait, nemlinearitásait, valamint az állapotváltozók közötti keresztbecsatolásokat. A lineáris szabályzótervezéshez a különböző üzemmódoknak megfelelő munkapontok közelében **a modellt linearizálni**, a keresztbecsatolásokat szükség esetén kompenzálni kell.

2. FEJEZET FEDÉLZETI ELEKTRONIKA

2.1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

[56][57][58] irodalmakban a szerzők bemutatják pilóta nélküli repülő eszközökbe szánt fedélzeti elektronikai rendszereiket és a hozzájuk tartozó földi irányító szoftvereket. A berendezések komplett megoldást kínálnak UAV rendszerek fejlesztéséhez.

A szerzők [59]-ben bemutatnak egy klasszikus felépítésű, robbanómotoros meghajtású helikoptermodell irányítására alkalmas fedélzeti elektronikai rendszert, amely vezeték nélküli adatátviteli rendszerrel, GPS¹⁹-el, inerciális szenzorokkal, ultrahangos magasságmérővel és nagyteljesítményű központi processzorral rendelkezik.

[60] irodalomban a szerzők bemutatják négyrotoros pilóta nélküli helikopterük fedélzeti elektronikai rendszerét, melyben 8-bites mikrokontrollert, MEMS²⁰ giroszkópokat és gyorsulásmérőket, valamint a rádió-távírányítású modelleknél használatos adó-vevő berendezéseket használnak.

[61]-ben a szerző egy négyrotoros helikopter-szimulátort mutat be, melyben lehetőség van a gép fizikai működése mellett a fedélzeti szenzorok modellezésére is. A szoftver célja az előzetes repülésszabályzó-tervezés segítése.

A szerzők [62][65][66] irodalmakban összefoglalják, hogy az adott alkalmazás számára legmegfelelőbb inerciális mérőrendszer kiválasztásához mely tényezőket kell figyelembe venni, milyen mérési hibákra kell számítani és ezeknek mik a forrásai. [48][50][67] irodalmakban a szerzők összefoglalják a különböző elveken működő giroszkópok és gyorsulásmérők legfontosabb tulajdonságait, [49]-ben megvizsgálják azok alkalmazhatóságát a kisméretű UAV-kben.

A szerzők [68]-ban bemutatják egy merevszárnyú pilóta nélküli repülőgép fedélzeti és földi elektronikai berendezéseit, valamint a kísérleti rendszerrel végzett próbarepülések mérési eredményeit.

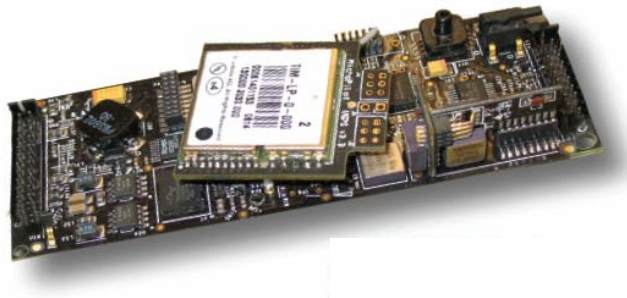
¹⁹ GPS: Global Positioning System

²⁰ MEMS: Micro Electro Mechanical System

2.2. LÉTEZŐ UAV ROBOTPILÓTA RENDSZEREK

A kereskedelmi forgalomban már jó ideje hozzáférhetők hobbi és kutatási célokra szánt robotpilóta rendszerek. Saját kísérleti rendszerem optimális kialakításához segítséget nyújthat a létező, és a gyakorlatban is kipróbált eszközök felépítésének és minőségi jellemzőinek vizsgálata. A következő fejezetekben két ismert gyártó termékét vizsgálom meg.

2.2.1 Micropilot MP2028⁹



24. ábra. Micropilot MP2028⁸ [56]

A Micropilot MP2028⁸ az egyik legismertebb, kereskedelmi forgalomban is beszerezhető, kisméretű, pilóta nélküli repülőgépekbe szerelhető, robotpilóta rendszer. Sikerének legfőbb oka, hogy a gyártó szinte minden, az automatikus repüléshez szükséges hardver elemet integrált egyetlen kis tömegű (28 g) és méretű (40 x 100 mm) kártyán. A PC-s földi irányító rendszer lehetővé teszi a fedélzeti egység állapotának valós idejű monitorozását, a repülésszabályozó paraméterek adott repülőgéphez való hangolását, valamint a repülési útvonal megtervezését és letöltését. A legfontosabb rendszerlemei a következők [56]:

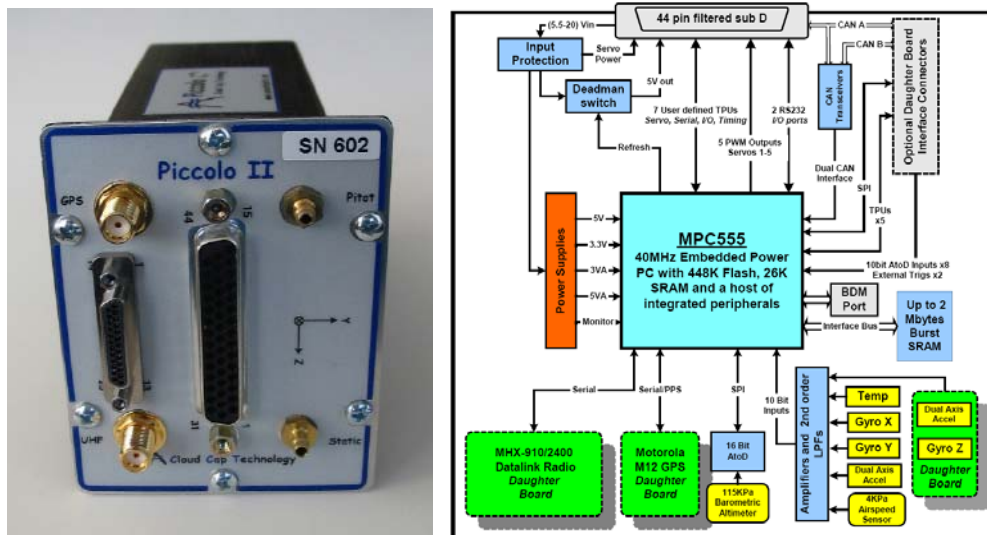
- x, y, z irányú MEMS gyorsulásmérők és giroszkópok;
- GPS vevő;
- barometrikus magasság- és szélesség mérő;
- ultrahangos magasságmérő csatlakozási felület;
- RF modem;
- 24 db RC²¹ - szervo vagy relé csatlakozó.

²¹ RC: Radio Controlled

2.2.2 Cloud Cap Piccolo

A Cloud Cap Technology Piccolo elnevezésű automatikus repülésirányító rendszerét kisméretű pilóta nélküli légi járművekhez ajánlja. A teljes rendszer a fedélzeti hardver és szoftver mellett egy PC-s földi állomást valamint szimulációs és fejlesztő környezetet is tartalmaz. Az egység legfontosabb jellemzői: nagy számítási teljesítmény, kis méret (122 x 61 x 38 mm), kis tömeg (90 g), teljesen automata és félautomata üzemmódok, hardver-bővítési lehetőség, szoftvertámogatás, könnyen szerelhető kivitel. A fedélzeti egység felépítése a 25. ábrán látható. Ez alapján a fontosabb részegységek a következők [57]:

- x, y, z irányú MEMS gyorsulásmérők;
- x, y, z irányú MEMS giroszkópok;
- GPS vevő;
- barometrikus magasság- és szélesség mérő;
- vezeték nélküli kommunikációs csatorna;
- MPC555 központi processzor, integrált PWM²² egységek;
- 10 db RC - szervó csatlakozó;
- a hasznos teher számára szabványos csatlakozófelületek (CAN, RS232...).



25. ábra. A Cloud Cap Technology *Piccolo* rendszere [57]

²² PWM: Pulse Width Modulation

2.3. SAJÁT TERVEZÉSŰ ROBOTPILÓTA RENDSZER

A kereskedelmi forgalomban kapható, viszonylag olcsó robotpilóta rendszerek szinte mindegyikére jellemző, hogy csatlakozó felületeik a rádió távirányítású repülőmodelleknél használt szenzorokhoz és szervomotorokhoz illeszkednek. Ennek oka, hogy a megcélzott vevőkör számára – akik főként lelkes modellezők vagy oktatási intézmények – ezek a repülő eszközök a leginkább hozzáférhetők. A szabványos csatlakozó felületnek köszönhetően ezek a robotpilóták könnyen beépíthetők többféle repülő eszközbe is, a szabályzó paraméterek adott konstrukcióhoz hangolása azonban eléggé nehézkes és időigényes feladat. További problémát okozhat az is, ha RC csatlakozó felülettel nem rendelkező beavatkozó szervet akarunk rendszerünkhöz illeszteni. Saját kísérleti rendszerem fedélzeti elektronikájának kiválasztásakor figyelembe kellett vennem azt is, hogy négyrotoros helikopterembe csak adott geometriai méretekkel rendelkező eszközt tudok beépíteni. Ezért saját fedélzeti elektronika tervezése és építése mellett döntöttem, kiindulási alapnak tekintve a létező robotpilótáknál látott megoldásokat. A következő fejezetekben a kísérleti négyrotoros pilóta nélküli helikopter robotpilóta rendszerének legfőbb építőelemeit mutatom be.

2.3.1 Szenzorok

A navigációs szenzorok a robotpilótánál hasonló funkciót töltenek be, mint az embernél az érzékszervei. Amikor az ember repülőgépet vezet, érzékszervei szolgáltatják a visszacsatoló jelet a légi jármű pillanatnyi állapotáról, segítségükkel határozza meg, hogyan kell irányítani a gép kormány szerveit ahhoz, hogy az a repülési feladatnak megfelelően mozogjon. A hatásmechanizmus a robotpilótánál is hasonló. A repülési feladatnak megfelelő irányítást a repülésszabályzó algoritmus is csak a helikopter aktuális mozgásállapotának ismeretében tudja megvalósítani. Minél több és pontosabb ez az információ, annál hatékonyabban képes követni a robotpilóta a megadott alapjelet.

2.3.1.1 Inerciális mérőegység (IMU²³)

Az inerciális navigációs berendezéseknél a pillanatnyi pozíciót, sebességet, és szögsebességet giroszkópok és gyorsulásmérők kimeneti jelének idő szerinti integrálásával

²³ IMU: Inertial Measurement Unit

kapjuk. Az első INS²⁴ berendezések hibás rendszerűek voltak, de karbantartás igényes mechanikai rendszerűek, és magas árak miatt az optikai és félvezetős giroszkópok megjelenése óta a modern repülő eszközökben szinte kizárólag strap-down (leszűzött) INS rendszereket alkalmaznak [69][70]. Ezekben a strap-down rendszerekben a szenzorok rögzített helyzetűek, vagyis együtt forognak a test koordináta rendszerrel. Valójában a mechanikus hibát itt matematikai számítások helyettesítik, vagyis a giroszkópok nem a mérőtengelyek stabilizálására szolgálnak, hanem a test koordinátarendszer szögelfordulásának mérésére. A szögelfordulásból a rendszer minden pillanatban „tudja” a mérőtengelyek orientációját. A robusztusság ára, hogy a gyorsulásmérő szenzoroknak néhányszor, a giroszkópoknak nagyságrendekkel nagyobb mérési dinamika tartománnyal és linearitással kell rendelkezniük ahhoz, hogy elérjék a hibás rendszerek pontosságát [71][72].

Saját kísérleti rendszerem számára a holland Xsens Technologies B.V. cég MTi inerciális navigációs szenzormodulját választottam (26. ábra). Választásom legfőbb okai:

- kis méret és tömeg;
- beágyazott rendszerekhez egyszerűen csatlakoztatható interfész (RS-232);
- kalibrált szenzorkimenetek;
- beépített jelfeldolgozó elektronika (DSP²⁵ alapú szenzor fúziós algoritmus)
- programozható mintavételi idő, navigációs adatformátum (Euler-szögek, forgatási mátrix, quaternió vektor).



26. ábra. Xsens MTi inerciális szenzormodul [52]

²⁴ INS: Inertial Navigation System

²⁵ DSP: Digital Signal Processor

A modul a benne lévő giroszkópok, gyorsulásmérők, és mágneses szenzorok által szolgáltatott analóg jelekből számolja ki a navigációs adatokat. A jelfeldolgozó processzorban megvalósított szenzorfüziós algoritmus lehetővé teszi, hogy a nyers szenzoradatoknál lényegesen pontosabb mérési eredményeket kapjunk [52].

2.3.1.2 Ultrahangos magasságmérő

Ultrahangos magasságmérő segítségével a helikopter földfelszín feletti pillanatnyi magasságát tudjuk meghatározni. Működési elve a következő. Az adó egy rövid hanghullámot bocsát ki, amely a földfelszínről visszaverődve az adó mellett elhelyezkedő vevőbe jut (27. ábra). A jel kibocsátása és vevőbe érkezése között eltelt idő egyenesen arányos az adó földfelszínétől való távolságának kétszeresével. Az arányszám a hang terjedési sebessége [72].

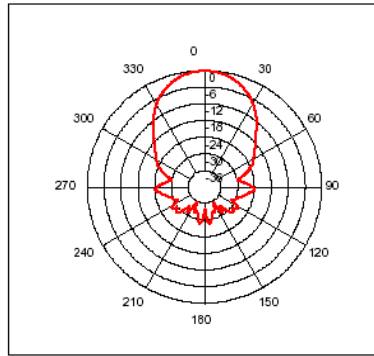


27. ábra. SRF08 ultrahangos távolságmérő modul [73]

Az általam választott SRF08, egy kisméretű, kis tömegű, és viszonylag olcsó ultrahangos távolságmérő modul. Szabványos I²C interfésszel²⁶ rendelkezik, így könnyen csatlakoztatható beágyazott rendszerekhez, mikrokontrollerekhez.

Egyszerű felépítéséből adódik, hogy a komolyabb ultrahangos távolságmérők mm-es esetleg µm-es felbontásához képest, csak 1 cm-es pontossággal rendelkezik. A szenzor iránykarakterisztikája a 28. ábrán látható [73]. Az SRF08 mérési eredményeit az inerciális mérőegység gyorsulás adataival kombinálva azonban finomabb térbeli felbontást is kaphatunk.

²⁶ I²C: Inter-Integrated Circuit



28. ábra. Az SRF08 iránykarakterisztikája [73]

2.3.2 Távirányítás, földi lépcső

2.3.2.1 Távirányítás

Távirányítási lehetőségre a helikopter kézi vagy félautomata repülési üzemmódjainál lehet szükség. A kézi üzemmód nem jelenti feltétlenül azt, hogy repülésszabályzó elektronika nem avatkozik be aktívan a repülés stabilizálásába. A rotorok pusztán kézi fordulatszám szabályozásával ugyanis nagyon nehéz lenne irányítani a repülőgépet. Inkább arról van szó, hogy a fedélzeti elektronika nem előre leprogramozott útvonal alapján, hanem a pilóta kormánymozdulatait követve irányítja a repülést. Ilyenkor ugyan a földi pilóta határozza meg a helikopter mozgásának irányát, a stabil repülésről azonban a robotpilóta gondoskodik.

A távirányítást egy 9 csatornás, Futaba FF9 távirányító pult, és hozzá tartozó vevő egység segítségével valósítottam meg (29. ábra), mely igen rugalmasan programozható. Az egyes csatornák hozzárendelhetők az irányító karokhoz vagy 2 és 3 állású kapcsolókhoz. A vevőből érkező, impulzus szélesség modulációval kódolt vezérlő információ a központi processzor eCAP²⁷ bemenetére kerül (lásd 2.3.4.3. fejezet). Ez a periféria alkalmas impulzushossz mérésre, így a vezérlő információ az átalakítás után a repülésszabályzóhoz már egyszerű számértékként fog megérkezni. A szabványos RC eszközknél az impulzusok szélessége 1 és 2 ms között változhat. Ezek az értékek a maximum kitérített botkormány állapotokat jelentik. Az alapértelmezésben lineáris és szimmetrikus botkormány karakterisztika az adóban átprogramozható, így lehetőség van különböző érzékenységgű, vagy éppen nemlineáris kormánytartományok definiálására [74].

²⁷ eCAP: extended CAPture



29. ábra. Futaba FF9 PCM távirányító és vevő egysége [74]

2.3.2.2 Vezeték-nélküli kommunikációs csatorna

A fedélzeti elektronika kézi irányítási üzemmódban a távirányító felől kap vezérlő jeleket. Olyan esetekben azonban, amikor a pilóta látótávolságon kívül irányítja a járművet, vagy amikor automatikus útvonalrepülés a feladat, a gépnek le is kell sugároznia a fedélzeti érzékelők adatait a földi irányító központba. Ezek az adatok lehetnek a GPS, az inerciális mérőegység, fedélzeti kamera vagy egyéb alkalmazás-specifikus szenzorok és berendezések által szolgáltatott információk. Az átviteli csatorna sávszélességét és teljesítményét a lesugárzandó adatmennyiség és a bevetési távolság függvényében kell kialakítani.



30. ábra. Maxstream XBEE rádiómodul [75]

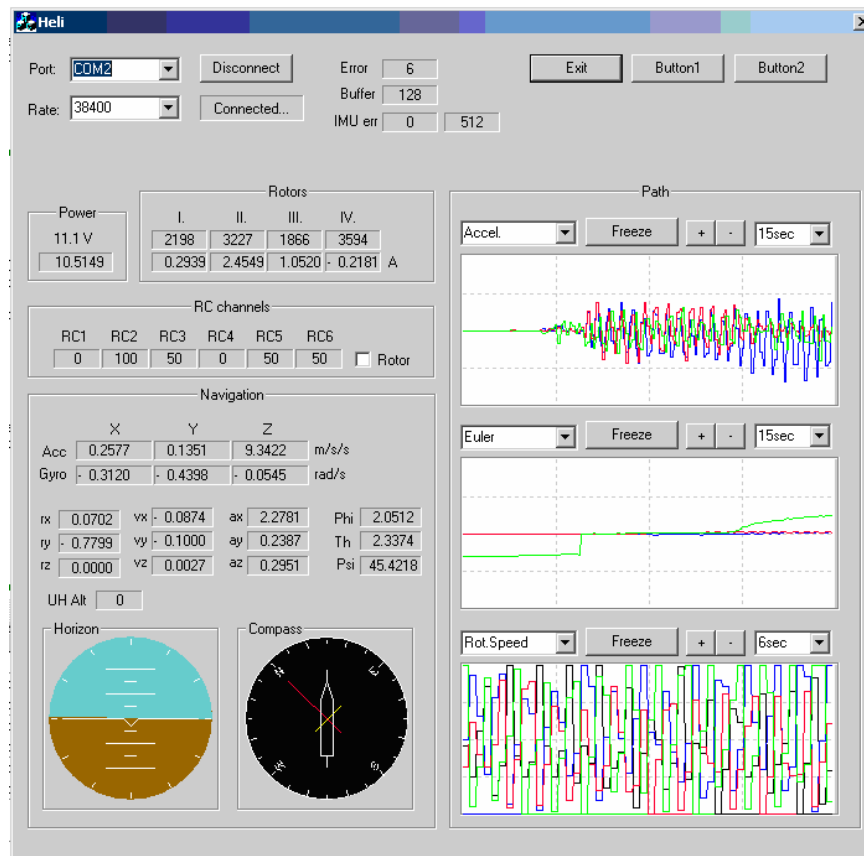
A földi irányító központ és a fedélzeti elektronika közötti kétirányú vezeték-nélküli adatátvitelt kísérleti rendszeremben két MaxStream XBEE rádiómodul segítségével valósítottam meg (30. ábra). Választásom egyik oka az volt, hogy az eszköz igen kis méretekkkel (24 x 33 x 8 mm) és tömeggel (8 g) rendelkezik, valamint további külső alkatrész nélkül csatlakoztatható szabványos UART²⁸ interfészhez. Emellett akár 115,2 Kbaud/sec-os adatátviteli sebesség is elérhető 100 m-es távolságon belül, ami a lesugár-

²⁸ UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter

zandó információk mennyiségét és a beltéri alkalmazást figyelembe véve megfelelő [75]. Nagyobb mennyiségű információ (pl. fedélzeti kamera képének) továbbításához nagyobb sávszélességű átviteli csatornát kell kialakítani.

2.3.2.3 Földi irányító rendszer

A földi lépcsőt egy Windows operációs rendszeren futó grafikus kezelői felülettel rendelkező programmal valósítottam meg, mely – a PC soros portjára csatlakozó XBEE modulon keresztül – fogadja, feldolgozza és megjeleníti a helikopter felől érkező adatokat. Ilyenek a navigációs adatok, a rotorok szögsebessége, a motorok árama, a telep töltöttsége, a távirányítóból érkező adatok stb. Emellett lehetőség van parancsok és különböző paraméterek továbbítására is a helikopter felé. Így repülési útvonalat tölthetünk le, beavatkozhatunk az aktuális feladat végrehajtásába, vagy a tesztrepülések alatt megváltoztathatjuk a szabályozók paramétereit.



31. ábra. A földi irányító rendszer grafikus kezelői felülete [Készítette: Turóczi A. – Visual C++]

A programot C++ nyelven írtam Microsoft Visual Studio fejlesztői környezetben. Az elvégzendő feladatokat három nagyobb csoportra lehet osztani, melyeket három párhuzamos programszál hajt végre. Az első a főprogram, amely a felhasználói aktivitást figyeli és kezeli le, emellett előkészíti a bevitt, küldésre szánt adatokat. A második szál a PC soros portján keresztül a helikopterrel kommunikál, míg a harmadik a beérkezett adatok alapján, a képernyőn megjeleníti és frissíti a helikopter aktuális állapotát jellemző információkat. A program grafikus kezelői felülete a 31. ábrán látható. (A programok forráskódja az értekezés terjedelmi korlátaira való tekintettel CD melléklet formájában került bemutatásra.)

2.3.3 Energiaellátás

A rendszer energiaellátásához egy 3 cellás, 11,1 V névleges feszültségű 1020mAh kapacitású lítium-polimer akkumulátort választottam (32. ábra). A tápforrással szemben támasztott legfőbb követelmények a minél kisebb tömeg/kapacitás és a nagy áramterhelhetőség voltak. A választott típus 20A-es maximális terhelést képes elviselni, ami a helikopter nagy áramigényű, gyors manővereinél is elegendő tartalékot jelent.



32. ábra. Lítium-polimer akkumulátor [76]

Lítium-polimer akkumulátor használatakor, a hosszú élettartam biztosításához fontos a telepfeszültség állandó monitorozása és a terhelés csökkentése vagy megszüntetése a meghibásodáshoz vezető feszültségérték elérése előtt. Ezt a feladatot a központi egységben valósítottam meg. A processzorban futó program az A/D átalakító által szolgáltatott mérési eredmények alapján minden szabályozási ciklusban ellenőrzi az akkumulátor feszültségét (lásd 2.3.4.4 fejezet). Egy kritikus érték elérésekor a vezeték nélküli kommunikációs csatornán értesíti az irányító személyzetet, aki maga végezheti el a

kényszerleszállást, vagy megvárhatja, amíg a fedélzeti elektronika a repülési magasság fokozatos csökkentésével landol. Az ajánlások szerint, egy 3,7 V-os cella biztonságosan 2,7 V-ig terhelhető, ez után a telep tartós károsodást szenvedhet [76]. Ennek figyelembevételével a terhelés csökkentését 9V-os telepfeszültségnél határoztam meg.

A fedélzeti elektronikai rendszer analóg, és digitális áramkörei által igényelt különböző stabilizált tápfeszültség értékeket, a 11,1 V-os névleges akkumulátorfeszültségből step-down DC/DC átalakítók segítségével hoztam létre.

2.3.4 Központi egység

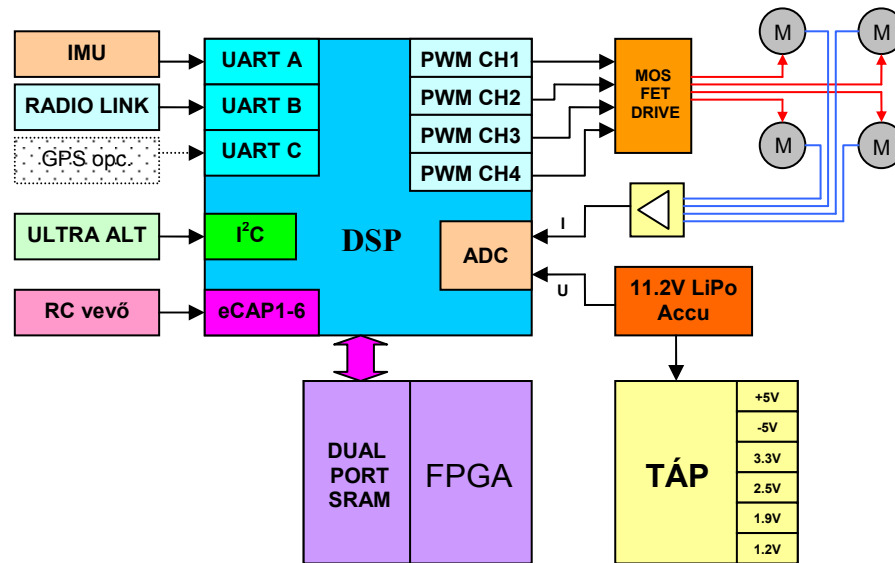
A központi egységben megvalósított digitális szabályzási körök mintavételi periódusát az inerciális mérőegység 100 Hz-es mintavételi frekvenciájához igazítottam. Ez azt jelenti, hogy 10 ms-os periódusidő alatt a következő feladatok mindegyikét el kell tudni végezni:

- a szenzoroktól érkező jelek fogadása és feldolgozása;
- a távirányítóból érkező jelek fogadása és feldolgozása;
- motoráramok mérése, A/D konverzió;
- a motor- és repülésszabályzó algoritmusok futtatása;
- a motorok vezérlése;
- kommunikáció a földi irányító rendszerrel.

A fentiek alapján, valamint figyelembe véve, hogy az inerciális mérőegység lebegőpontos mérési eredményeket szolgáltat, a választandó központi egységnek az alábbi tulajdonságokkal kell rendelkeznie:

- 2 szabványos UART interfész az IMU-hoz és a vezeték-nélküli csatornához;
- szabványos I²C interfész az ultrahangos magasságmérő modulhoz;
- számláló és időzítő egységek a távirányítótól érkező jelek fogadására;
- impulzusszélesség-modulátor a motorok vezérléséhez;
- A/D átalakító a motoráramok és az akkumulátorfeszültség méréséhez;
- lebegőpontos utasításkészlet;
- minél kisebb utasítás-végrehajtási idő.

Mivel rendelkezem némi Texas Instruments DSP-s szoftver- és hardverfejlesztési tapasztalattal, kézenfekvőnek látszott, hogy ettől a gyártótól válasszak mikroprocesszort kísérleti rendszerem számára is. Tartalék erőforrások biztosítása érdekében úgy döntöttem, hogy a kiválasztott TMS320F28335 processzor mellé egy rugalmasan konfigurálható FPGA²⁹ áramkört is elhelyezek, amely külső perifériaként fog funkcionálni. Ezek alapján felrajzoltam a négyrotoros helikopter fedélzeti elektronikai rendszerének egyszerűsített blokkvázlatát (33. ábra).



33. ábra. Kísérleti négyrotoros pilóta nélküli helikopter fedélzeti elektronikai rendszerének blokkvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

2.3.4.1 TMS320F28335 DSP

Fedélzeti elektronikai rendszerem központi egységének a Texas Instruments TMS320F28335 jelfeldolgozó processzorát választottam. A DSP – számítási képességeit és perifériakészletét tekintve – teljes egészében megfelel a központi egységgel szemben támasztott követelményeimnek. A fedélzeti elektronika és a programfejlesztés szempontjából legfontosabb tulajdonságai a következők:

- 32-bites C28x fixpontos + lebegőpontos mag;
- 6,67 ns-os ciklusidő (150 MHz-es órajel);
- 6 csatornás DMA³⁰;

²⁹ FPGA: Field Programmable Gate Array

³⁰ DMA: Direct Memory Access

- rugalmasan konfigurálható megszakítás kezelés;
- 16 vagy 32-bites külső buszinterfész;
- 256K x 16 Flash, 34K x 16 SRAM³¹ belső memória;
- ROM³²-ban tárolt trigonometrikus táblázatok;
- 18 PWM³³ kimenet;
- 6 számláló/időzítő bemenet (eCAP Unit);
- 8 32-bites és 6 16-bites számláló;
- 3 UART, egy I²C interfész;
- 16 csatornás 12-bites A/D;
- maximum 88 általános felhasználású I/O;
- JTAG³⁴ interfész és valós idejű emulációs lehetőség;
- szabványos C/C++ fejlesztői környezet és támogatás;
- TQFP tokozás.

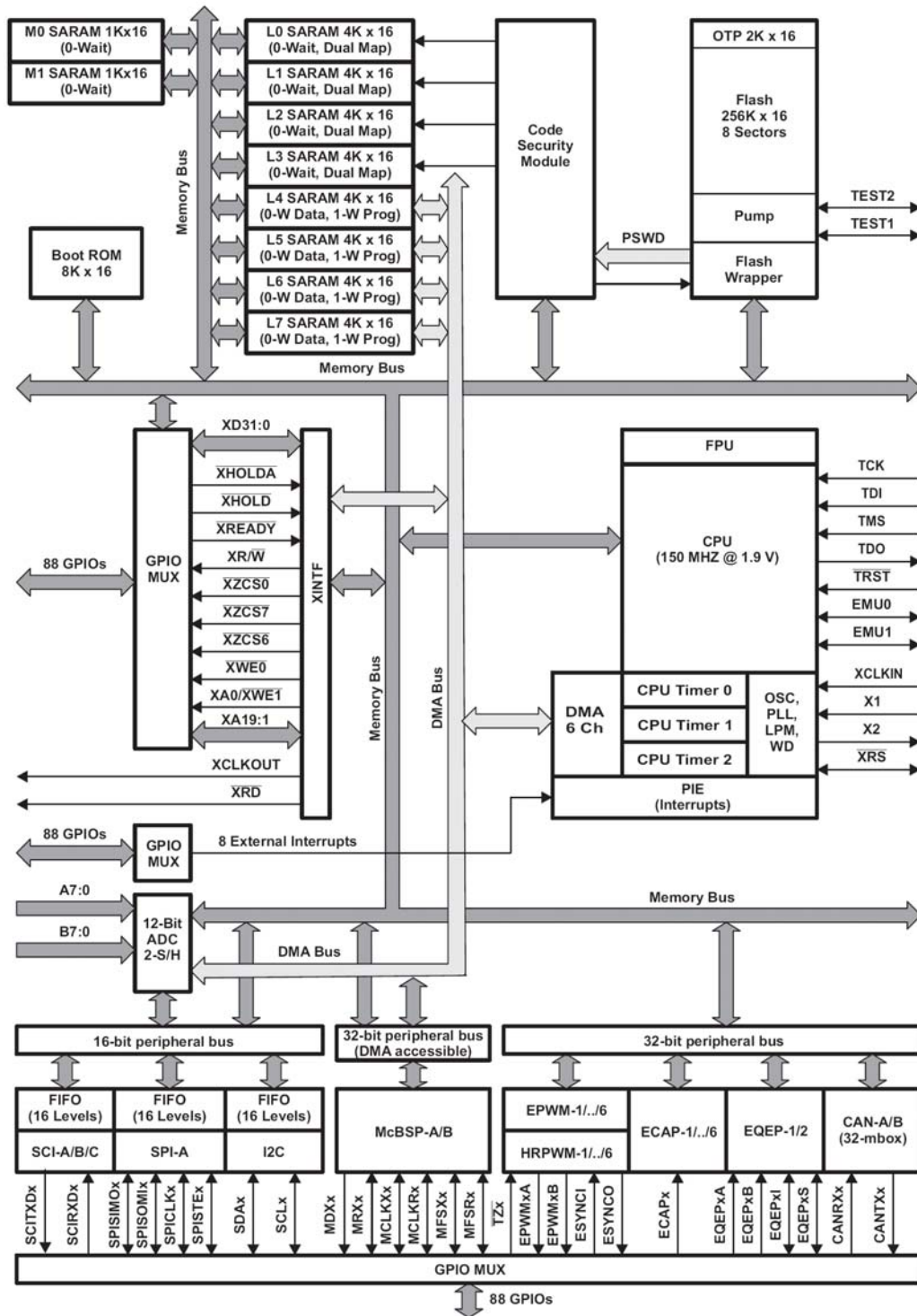
A TMS320F28335 a TMS320C28x 32-bites fixpontos processzorcsaládra épült, kiegészítve egy IEEE-754 szabvány szerinti 32-bites lebegőpontos maggal és számos, a mikrokontrollerekben megszokott perifériával. A processzor belső buszrendszere Harvard architektúrájú, vagyis a program és adatmemória egymástól függetlenül érhető el, lehetővé téve az utasítás olvasás, adat olvasás és adat írás műveletek egyetlen ciklus alatt történő végrehajtását. A perifériák jeleit egy multiplexerrel irányíthatjuk az egyes I/O lábakhoz. Ez azt jelenti, hogy a felhasználó saját igényeinek megfelelően választhatja ki a processzor kivezetéseinek funkcionalitását. Egy I/O láb maximum három adott perifériához csatlakoztatható, vagy általános felhasználású I/O-ként használható. A belső oszcillátor és FLASH memória lehetővé teszi, hogy a TMS320F28335 egy külső kvarckristály és néhány passzív alkatrész hozzáadásával, egycsipes, stand-alone központi egységként üzemeljen. A processzor funkcionális diagramját a 34. ábra szemlélteti [77].

³¹ SRAM: **S**ynchronous **R**andom **A**ccess **M**emory

³² ROM: **R**ead **O**nly **M**emory

³³ PWM: **P**ulse **W**idth **M**odulation

³⁴ JTAG: **J**oint **T**est **A**ction **G**roup



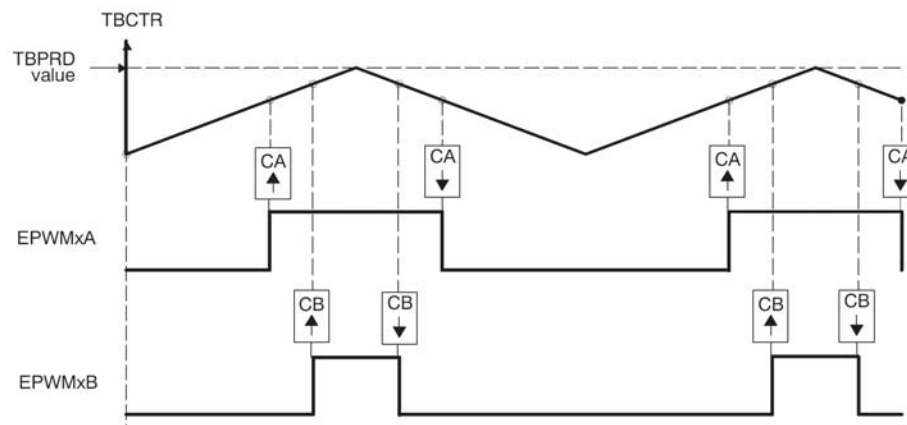
34. ábra. TMS320F28335 funkcionális blokkdiagramja [77]

2.3.4.2 Motorvezérlés

A fedélzeti automatika a helikopter rotorjait forgató DC motorok fordulatszámát csak közvetlen módon, a kapcsolófeszültség változtatásával tudja szabályozni. Ezt a változó

feszültség értéket digitális hajtásokban impulzusszélesség-modulációval szokták előállítani. A motor frekvenciával növekvő induktív reaktanciája miatt, az impulzusszélesség-modulációból adódó nagyfrekvenciás áramösszetevők amplitúdója jóval kisebb lesz, mint a moduláló jelből származó összetevőké. A motor tulajdonképpen aluláteresztő szűrőként viselkedik, ha kapocsfeszültséget tekintjük bemenő, a motoráramot pedig kimenő jelnek. A létrejövő nyomatékot tekintve a nagyfrekvenciás összetevők még kevésbé jelentkeznek a motor tengelyének nagy mechanikai időállandója miatt [32].

Az impulzusszélesség-modulált motorvezérlő jeleket a TMS320F28335 ePWM³⁵ moduljainak segítségével állítom elő. Minden egyes modul két csatornát tartalmaz, melyeket egymástól függetlenül is lehet modulálni. A működési elvet a 35. ábra alapján követhetjük. Az ePWM egység TBCTR³⁶ számlálója nulla és a kívánt felbontás által meghatározott maximális érték között föl-le számlál. A számláló értékét egy komparátor összehasonlítja a CA (CB) értékkel, mint moduláló jellel. Ha a számláló értéke nagyobb, mint a moduláló jelé, az EPWMxA (EPWMxB) kimenet 1-be, ha kisebb 0-ába állítja [78].



35. ábra. Szimmetrikus PWM kimeneti jel, független A-B csatorna modulációval [78]

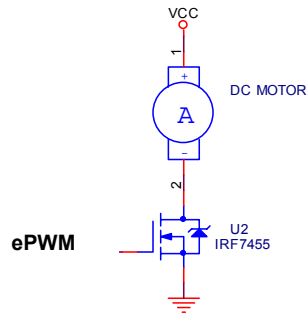
A processzor által előállított motorvezérlő PWM jelek nem alkalmasak a motorok közvetlen meghajtására, ezért szükség van olyan illesztő áramkörre, ami képes a motorok által igényelt áram leadására. Az egyszerűség kedvéért, és mivel csak egyirányú forgást kell biztosítani, a meghajtására motoronként egy-egy MOSFET³⁷ tranzisztort

³⁵ ePWM: extended PWM

³⁶ TBCTR: Time-Base Counter Register

³⁷ MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

használtam a 36. ábra kapcsolása szerint. Itt a motor egyik kapcsa fixen a tápfeszültségre van kötve, a másik pedig a vezérlő jelnek megfelelően lebeg, vagy a földre van kapcsolva, így terhelő áram csak bekapcsolt tranzisztor esetén tud folyni. Az ellenirányú áramok vezetéséről a tranzisztor védődiódája gondoskodik.



36. ábra. Teljesítménymeghajtó elektronika [Készítette: Turóczi A. – Orcad Capture]

2.3.4.3 RC jelek fogadása

Ahhoz hogy a távirányító egyes csatornáinak jeleiből feldolgozható, és a repülésszabályzó algoritmus számára értelmezhető számértéket kapjunk, az RC vevőből érkező impulzusok szélességét meg kell mérni. Ezt a feladatot a processzor eCAP moduljainak felhasználásával oldottam meg. Az egység alkalmas a bemenetére érkező fel- és lefutó impulzus élek időalaphoz viszonyított időpontjának mérésére. A működési elvet a 37. ábra alapján követhetjük. A modul időalapját a 32-bites CTR számláló adja. A bemeneti fel- és lefutó élek hatására a számláló aktuális értéke eltárolódik, majd a számlálás nullától folytatódik. Az eltárolt számláló értékekből az egység meghatározza az élek között eltelt időt [79].

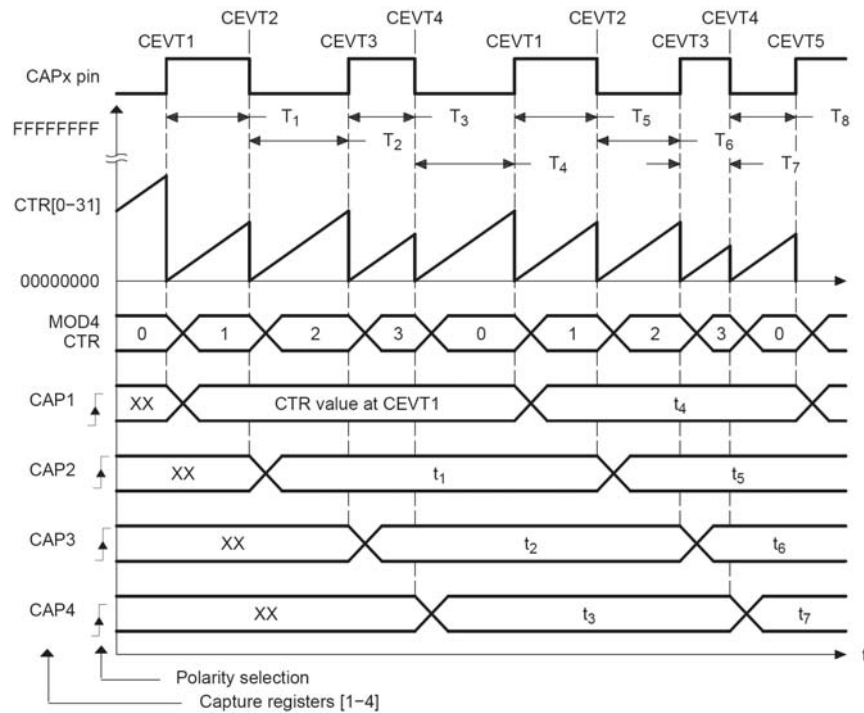
2.3.4.4 DSP program

A processzorban futó programot a Texas Instruments Code Composer Studio v3.3 programrendszerével készítettem el. A fejlesztői környezet lehetővé teszi a TMS320 DSP családba tartozó eszközök vonatkozásában C/C++ programok fejlesztését, céleszközbe való letöltését, futtatását és analizálását. Az általam készített program egyszerűsített folyamatábráját a 39. ábra szemlélteti. (A programok forráskódja az értekezés terjedelmi korlátaira való tekintettel CD melléklet formájában került bemutatásra.) A maradandó károsodások valószínűségének minimalizálása érdekében kísérleti rendszerem kényeszerleszállás esetén a magasság alapjel fokozatos csökkentésével landol. Az alapjel a

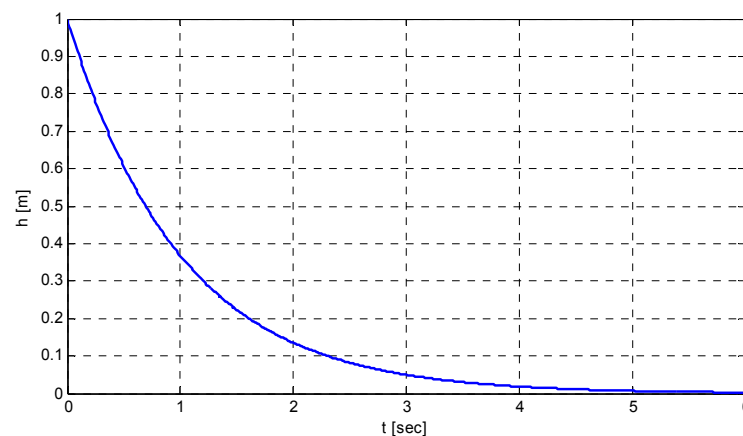
$$h_{ref}(t) = h_0 \cdot e^{-t} \quad (2.1)$$

időfüggvény szerint változik, melyet $h_0 = 1$ m kezdeti magasság esetére a 38. ábra szemléltet.

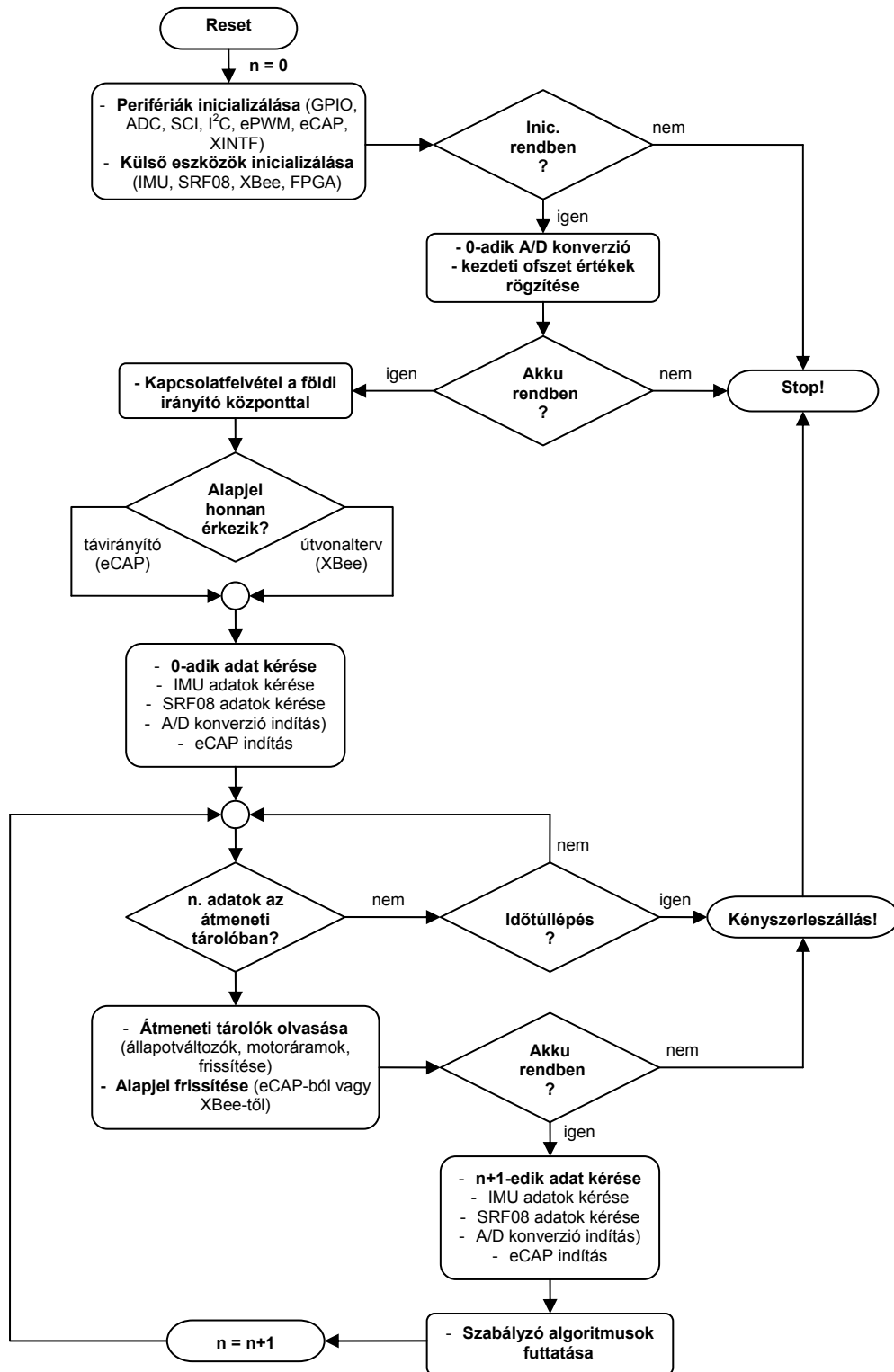
Az implementált szabályozó algoritmus működése részletesen a következő fejezetben kerül ismertetésre.



37. ábra. Impulzus-szélesség mérése az eCAP modul segítségével [79]



38. ábra. A magasság alapjel időfüggvénye 1 m-es kezdeti magasságból történő vészleszállás esetén [Készítette: Turóczy A. - Matlab]



39. ábra. A DSP-ben implementált program egyszerűsített folyamatábrája
[Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

KÖVETKEZTETÉSEK

Meglévő robotpilóta rendszerek és a szabályozástechnikai alapelvek tanulmányozását követően megállapítottam, hogy az automatikus repülési funkciók megvalósítása érdekében **a helikopter mozgásállapotát megfelelő pontossággal és időbeli felbontással mérni szükséges**. A pillanatnyi pozíciót, sebességet, gyorsulást valamint orientációt, szögsebességet és szöggyorsulást a mérési eredményekből meg kell határozni. **A gyakorlatban ezt a feladatot szenzorok és mérőberendezések valamint ezek jeleit feldolgozó digitális számítógép segítségével oldják meg**. Ez alapján arra a következtetésre jutottam, hogy **saját kísérleti rendszeremben kisméretű inerciális navigációs szenzorokat és ezek jeleit feldolgozó digitális áramköröket fogok használni**.

A hozzáférhetőséget és a rendelkezésemre álló anyagi forrásokat figyelembe véve kísérleti rendszerem számára kiválasztottam egy kisméretű inerciális navigációs mérőegységet, valamint egy ultrahangos magasságmérő modult. **A kiválasztásnál figyelembe vettem, hogy a szenzorok rendelkeznek a beágyazott rendszerekben alkalmazott, szabványos interfészekkel**.

A fedélzeti elektronikával való kommunikációnak kétirányúnak kell lennie, ezért egy **a távirányítástól független digitális kommunikációs csatornát is ki kell építeni** a helikopter és a földi irányító központ között. Ezzel lehetőség van a repülési adatok valósidejű monitorozására, valamint a tesztrepülések közötti átprogramozás idejének lerövidítésére. A földi irányító rendszernek **minden olyan információt** meg kell tudnia jeleníteni, **amely segítheti a helikoptert irányító személyzet döntéseit**.

Egy szabályozási periódus alatt **a központi egységnek igen nagy mennyiségű feladatot kell végrehajtania**, ezért érdemes olyan eszközt választani, amelynek periféria készlete illeszkedik a fedélzeti elektronikai rendszer egyéb komponenseihez.

A fejlesztési idő minimalizálása érdekében a fedélzeti mikroprocesszor kiválasztásakor, az ár és a hardverkiépítettség mellett azt is figyelembe kellett vennem, hogy Texas Instruments DSP-k programozása tekintetében több éves gyakorlattal rendelkezem. A kiválasztott nagyteljesítményű processzor mellé érdemes erőforrás tartálékot biztosítani, ezért a központi egységet egy Spartan III FPGA áramkörrel egészítettem ki.

A fejezetben leírt irányelvek alapján olyan **fedélzeti elektronikai rendszer tervezhető, amely alkalmas a kísérleti négyrotoros helikopter irányítására**.

3. FEJEZET REPÜLÉSSZABÁLYOZÓ RENDSZER TERVEZÉSE

3.1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A [80][86] irodalmakban a szerzők átfogó képet adnak a klasszikus, [83][84][89]-ben a modern szabályozástechnikai alapelvekről. [81][84][85]-ben a szerzők kifejezetten repüléstechnikai alkalmazások tükrében tárgyalják a számítógéppel segített szabályozó-tervezési eljárásokat. A szerzők [81][82][95] irodalmakban a robosztus szabályozások elméletét tárgyalják példaprogramok és szimulációk futtatási eredményeinek illusztrálásával.

[91][92][93]-ban a szerzők a sztochasztikus rendszerek vizsgálatával, azok modellezésével és szabályozástechnikai illetve jelfeldolgozási kérdéseivel foglalkoznak, algoritmikus megoldásokat adnak a külső és belső zajok optimális kezelésére. A szerzők [94]-ben esettanulmányokon keresztül tárgyalják a belső modell alapú (internal-model-based) szabályozás elveit. Bemutatott példák: egy alacsony pályán keringő műhold helyzetszabályozása, illetve egy merev és egy forgószárnyas repülőgép mozgó platformra történő landolása.

Négyrotoros kísérleti rendszerük stabilizálásához a szerzők [36]-ban javaslatot tesznek egy PD2 típusú szabályozó struktúra kialakítására. A test koordináta rendszer állását valamint a visszacsatoló jeleket quaternió-vektor segítségével határozzák meg.

[38]-ban a szerzők kombinált H^∞ /MBPC³⁸ szabályozót javasolnak négyrotoros UAV-juk hosszirányú és keresztirányú mozgásának szabályozására, valamint ismertetik a tipikus manőverekre elvégzett kísérleteik eredményeit.

[39]-ben négyrotoros helikopterük szabályozó rendszerében a szerzők elsődleges szenzorként két földi kamera képét használják fel. Kísérleteikben nemlineáris szabályozó struktúrák minőségi jellemzőit vizsgálják.

Miniatűr négyrotoros helikopteren elvégzett kísérletek eredményeit felhasználva [37]-ben a szerzők összehasonlítják klasszikus PID³⁹ és egy LQR⁴⁰ repülésszabályozó minőségi jellemzőit.

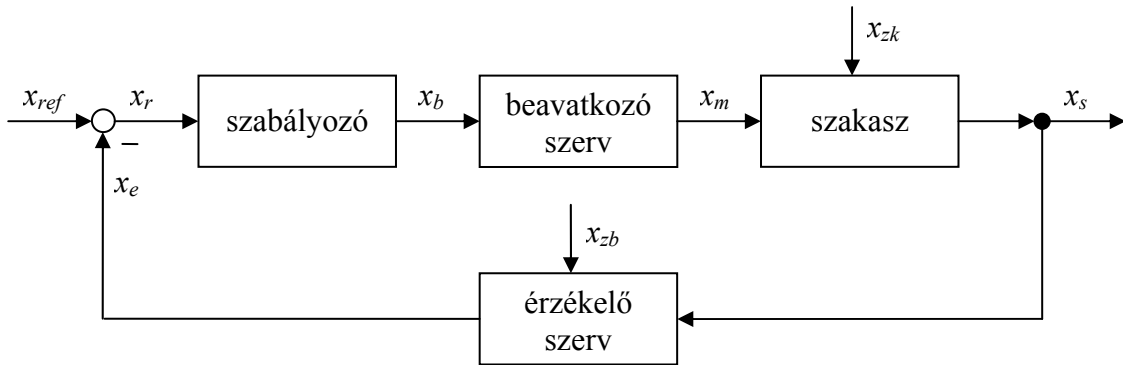
³⁸ MBPC: **M**odel **B**ased **P**redictive **C**ontrol

³⁹ PID: **P**roportional-**I**ntegral-**D**erivative

⁴⁰ LQR: **L**inear **Q**uadratic **R**egulator

3.2. SZABÁLYOZÁSTECHNIKAI ALAPELVEK

Az irányítási folyamatok általánosságban – legyenek kézi vagy automatikus működésűek – a következő lépések sorozatából állnak: érzékelés – döntéshozatal – utasítás – jel-formálás – beavatkozás. A folyamat a 40. ábra alapján jól követhető [80].



40. ábra. Szabályzási kör folyamatábrája [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

ahol:

- x_{ref} : referenciajel;
- x_r : rendelkező jel;
- x_b : beavatkozó jel;
- x_m : módosított jellemző;
- x_{zk} : külső zavarás;
- x_{zb} : belső zavarás;
- x_s : szabályozott jellemző;
- x_e : ellenőrző jel.

A tisztán ember által irányított folyamatoknál agyunk, mint döntéshozó (szabályozó) szerv, az érzékszerveink által közvetített információk alapján, az idegpályákon keresztül utasítást küld izmainkhoz, mint beavatkozó szervhez. A beérkező elektromos ingerek izmainkban mechanikai jellé alakulnak át, ezzel megvalósítva az irányítás célját [62][63]. (A fenti példa természetesen csak nagymértékben egyszerűsített leírása az emberi testben lejátszódó bonyolult elektro- és biokémiai folyamatoknak). Az önműködő irányítási rendszerekben – mint például az automatikus repülésszabályozó rendszerek – az irányítandó folyamatról érzékelők, műszerek adnak információt a környezet fizikai jellemzőinek mérésével. Az érzékelők kimenete általában villamos jel. A kiérté-

kelést és döntéshozatalt – a mai modern rendszerekben – általában digitális számítógép végzi. A kiadott utasítás ezután jelformáló és energia-átalakító rendszereken keresztül jut el a beavatkozó szervekhez.

Zárt szabályzási rendszer tervezésekor az a cél, hogy az adott dinamikus rendszerhez (szakaszhoz) találjunk egy olyan szabályzó struktúrát, amellyel a zárt (visszacsatolt) hurok:

- stabil;
- az alapjelet megfelelően követi;
- a külső zavaró jelek hatásait minimalizálja;
- a belső zajokat megfelelő minőséggel szűri;
- a paraméterváltozásokra kellően érzéketlen;
- megfelel az egyéb követelmények.

A fenti kritériumok elérhetőségét nagyban befolyásolja az, hogy mennyire pontosan ismerjük a szakaszban lejátszódó folyamatokat. A rendelkezésre álló matematikai modellek ugyanis csak közelítőleg írják le a valóságot, és a legtöbb esetben még egyszerűsítéseket is tartalmaznak a bonyolultság csökkentése érdekében. A szakasz viselkedését tehát általában egy zavaró hatásokkal és bizonytalanságokkal terhelt ideális matematikai modellel tudjuk csak jellemezni. A zavaró hatások és bizonytalanságok az alábbiak lehetnek:

- ismeretlen vagy nem jól ismert dinamikus hatások;
- ismert, de elhanyagolt dinamikus hatások;
- környezeti zavarok;
- szenzor zaj;
- modell paraméter bizonytalanság;
- időben változó modell paraméterek;
- nemlinearitások.

A lineáris rendszerek körében a szabályozótervezési módszereket két nagyobb csoportra szokták osztani. Az első, a klasszikus vagy analitikus szabályozótervezési módszer, amely frekvencia- és időtartománybeli függvények, grafikonok analízisével, bevált sza-

bályzóstruktúrák alkalmazásával (P, PI⁴¹, PID stb.) és azok paramétereinek fokozatos hangolásával próbálja kialakítani a zárt rendszer előírt tulajdonságait.

A módszer előnyei:

- megszámlálhatatlanul sok sikeres alkalmazás és gyakorlati tapasztalat;
- jól kidolgozott, bőséges irodalom és elméleti háttér;
- a tervezési idő, és a befektetett szellemi és számítási teljesítmény tekintetében hatékony módszer;
- egyszerű és átlátható szabályzó struktúra.

A módszer hátrányai:

- a több bemenetű, több kimenetű MIMO rendszerekben a szétcsatolás nem mindig alkalmazható, a próbálgatásos módszer pedig gyakran nem ad megfelelő eredményt;
- csak determinisztikus rendszerekre alkalmazható;
- nincs egységes, jól definiált szabályzó-tervezési algoritmus.

A második módszer a modern vagy szintetizáló szabályzó-tervezési módszer, mely jól definiált és tesztelt algoritmusok segítségével, sorozatos közelítéssel „megkeresi” az adott folyamathoz, az általunk választott kritériumok alapján optimális, vagy ahhoz közeli szabályzót. Természetesen ennek a módszernek is vannak előnyei és hátrányai.

Előnyök:

- könnyen használható, kidolgozott algoritmusok;
- az algoritmusok mindig stabil rendszert eredményeznek;
- MIMO rendszerekben is alkalmazható;
- a megfogalmazott tervezési kritériumok alapján optimális vagy közel-optimális szabályzó tervezhető;
- determinisztikus és sztochasztikus rendszerekre is alkalmazható.

⁴¹ P: Proportional; PI: Proportional-Integral

Hátrányok:

- a teljes állapotvektornak hozzáférhetőnek kell lennie;
- ha nem hozzáférhető az állapotváltozók állapotbecslést kell alkalmazni, ami bonyolultabb struktúrát eredményez;
- a módszerek újszerűsége miatt a klasszikus szabályozótervezési tapasztalatok kevésbé hasznosíthatók;
- viszonylag bonyolult matematikai apparátus szükséges az elméleti háttér megértéséhez

A következő fejezetekben – a teljesség igénye nélkül – röviden áttekintem a klasszikus és modern szabályozástechnikában leggyakrabban alkalmazott szabályzó-tervezési eljárásokat, és megvizsgálom ezek mennyire hasznosíthatók saját tervezési feladatom megvalósításában [80][81][82][83][84][86][87][95].

3.2.1 Klasszikus szabályozástechnika

A klasszikus szabályozástechnika témakörében bőséges magyar illetve idegen nyelvű irodalom áll rendelkezésre, ezért a következő fejezetekben csak a legfontosabb, az értekezés témájához szorosan kapcsolódó elméleti tudnivalókat és fogalmakat gyűjtöttem össze [80][81][83][84][85][86][87][88][91][92][93].

3.2.1.1 Rendszeranalízis

Az egyváltozós (SISO⁴²) lineáris rendszereket az időtartományban differenciálegyenletükkel, állapotegyenletükkel, súlyfüggvényükkel vagy átmeneti függvényükkel, a frekvenciatartományban átviteli függvényükkel jellemezhetjük. Ezek a leírásmódok, nulla kezdeti feltétel esetén, egymásba átszámíthatók és külön-külön egyértelműen meghatározzák az adott rendszert:

Differenciál egyenlet:

$$\begin{aligned} a_n y^{(n)} + \dots + a_1 y^{(1)} + a_0 y &= b_m u^{(m)} + \dots + b_1 u^{(1)} + b_0 u, \\ y(0) &= 0, \dots, y_{(n-1)}(0) = 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$(n \geq m)$

⁴² SISO: Single Input Single Output

Állapot egyenlet:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{\mathbf{x}}} &= \underline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{B}}u \\ y &= \underline{\mathbf{C}}\underline{\mathbf{x}} + Du \\ \underline{\mathbf{x}}(0) &= \underline{\mathbf{0}}\end{aligned}\quad (3.2)$$

Átviteli függvény:

$$W(s) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j s^j}{\sum_{i=0}^n a_i s^i} \quad W(s) = \underline{\mathbf{C}}(s\mathbf{I} - \underline{\mathbf{A}})^{-1}\underline{\mathbf{B}} + D \quad (n \geq m) \quad (3.3)$$

Súlyfüggvény:

$$\mathcal{L}\{w(t)\} = W(s) \quad \Leftrightarrow \quad w(t) = \mathcal{L}^{-1}\{W(s)\} = \frac{dv}{dt} \quad (3.4)$$

$$y(t) = \int_0^t u(t-\tau)w(\tau)d\tau \quad (3.5)$$

Átmeneti függvény:

$$\mathcal{L}\{v(t)\} = W(s)\frac{1}{s} \quad \Leftrightarrow \quad v(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{W(s)\frac{1}{s}\right\} = \int_0^t w(\tau)d\tau \quad (3.6)$$

$$y(t) = \int_0^t u(t-\tau)dv(\tau) \quad (3.7)$$

ahol $\mathcal{L}\{.\}$ és $\mathcal{L}^{-1}\{.\}$ a Laplace illetve az inverz-Laplace transzformáltakat jelölik.

A fentiekén kívül a lineáris rendszereket a frekvencia átviteli tulajdonságukat leíró $W(j\omega) = W(s)|_{s=j\omega}$ frekvenciafüggvénnyel is jellemezhetjük. A frekvenciafüggvényből a gyakorlatban a következő rendszerjellemező diagramokat szokás felrajzolni⁴³ (41. ábra):

Nyquist-görbe: $W(j\omega)$, $-\infty \leq \omega \leq \infty$ (a komplex síkon ábrázolva)

Bode-diagram: $a_{dB}(\omega) = 20 \lg|W(j\omega)|$ (amplitúdó-jelleggörbe)

$\phi(\omega) = \arg W(j\omega)$ (fázis-jelleggörbe)

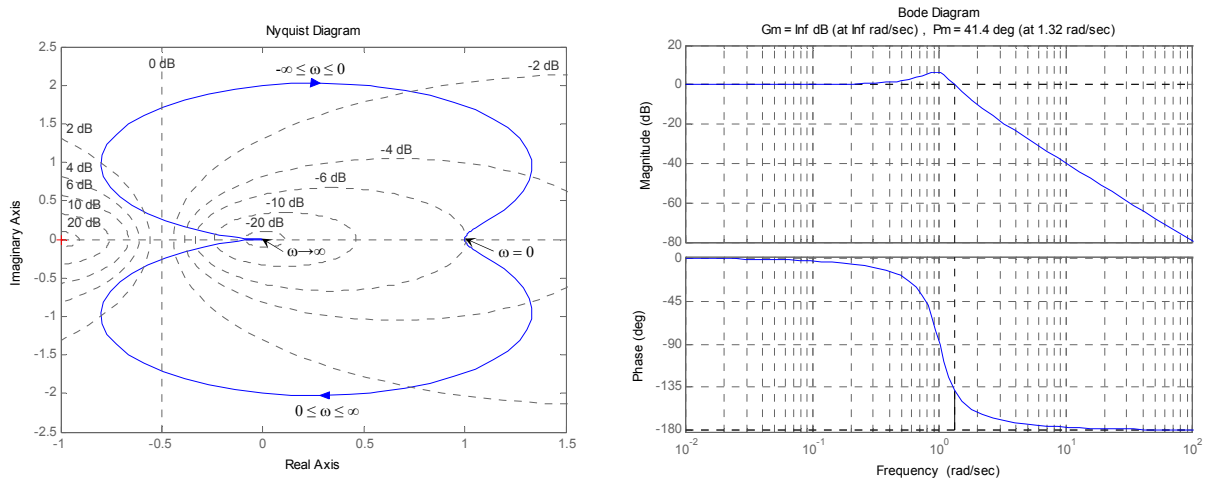
A felnyitott szabályozási kör Nyquist és Bode-diagramjai alapján eldönthető a zárt rendszer stabilitása. A Bode-diagram emellett – a frekvenciamenet ábrázolásával – további minőségi jellemzőkről is szemléletes képet ad.

⁴³ Az angolszász szakirodalmakban gyakran használják még a Nichols-diagramot is, melyben a frekvenciafüggvény abszolút értékét a fázistolási szög függvényében ábrázolják.

A frekvenciatartománybeli vizsgálatok során gyakran találkozhatunk a következő fogalmakkal:

- ω_c vágási körfrekvencia: Az a frekvencia, amelynél a Nyquist-görbe metszi az egységkört, vagyis $|W(j\omega_c)| = 1$, ebből $a_{dB}(\omega_c) = 0$ dB.
- ϕ_t fázistartalék: $\phi_t = \phi(\omega_c) + 180^\circ$ ahol $\phi(\omega_c)$ a $W(j\omega_c)$ -hez tartozó fázisszög.

A fázistartalékkal a zárt szabályzási kör paraméterváltozásokkal szembeni érzéketlenségét lehet jellemezni. Minél nagyobb a fázistartalék, annál kisebb az esélye annak, hogy a rendszer a bizonytalan paraméterek miatt a stabilitás határára kerül [83][86][87].



41. ábra. Kéttárolós lengő tag kétoldalas Nyquist illetve Bode-diagramja
[Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

3.2.1.2 Soros kompenzáció

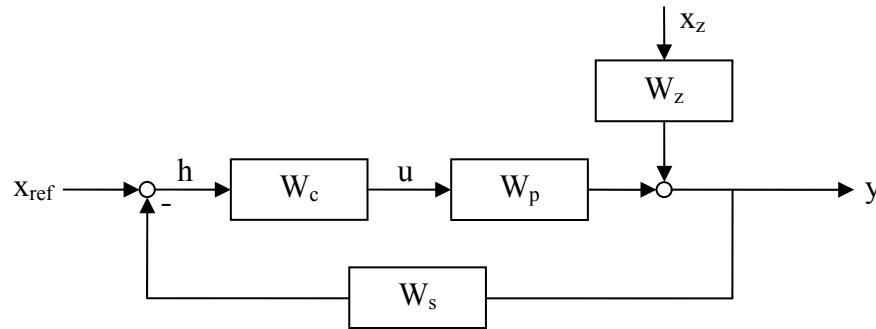
A klasszikus SISO szabályozás legtipikusabb formája, amikor a szabályozott szakasz és a szabályzó soros kapcsolást alkot (42. ábra). A szabályozás célja itt is az, hogy a szabályozott jellemző a lehető legpontosabban kövesse az alapjelet, és egyúttal a lehető legnagyobb mértékben legyen független a zavarástól. A szabályozott jellemző az

$$y(s) = \frac{W_c W_p}{1 + W_c W_p} u_a(s) + \frac{W_z}{1 + W_c W_p} u_z(s) \quad (3.8)$$

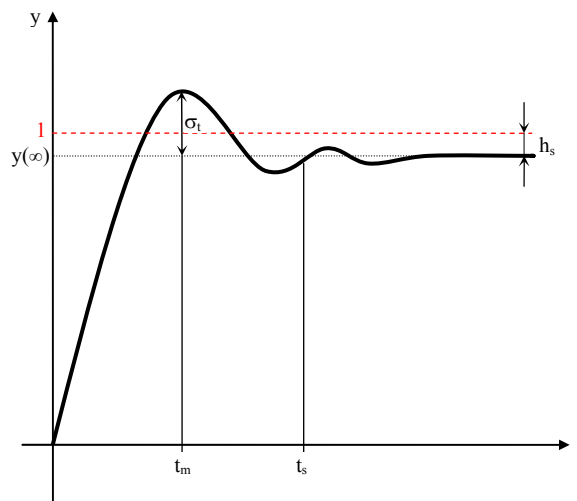
összefüggéssel írható le.

A stabilitáson túl, a zárt rendszerre vonatkozó minőségi jellemzőket az $u(t)=\varepsilon(t)$ egységugrás bemeneti jelre adott válasz időfüggvények alapján szokták megfogalmazni (43. ábra):

- a σ_t túllendülés legyen kisebb egy adott értéknél (általában 0~25%);
- a t_s szabályozási idő legyen minimális;
- a h_s statikus hiba legyen minimális;



42. ábra. SISO szabályozási kör hatásvázlata. W_c a szabályzó, W_p a szakasz, W_z a zavarás, W_s az érzékelő átviteli függvénye. x_{ref} az alapjel, h a hibajel u az irányító jel x_z a zavaró jel, y a szabályozott jellemző [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]



43. ábra. Zárt SISO rendszer egységugrás válasza [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

Gyakorlati tapasztalat hogy a h_t túllendülést a $W_0=W_cW_p$ nyitott kör ϕ_t fázistöbblete, a t_s szabályozási időt W_0 ω_c vágási körfrekvenciája, a h_s statikus hibát W_0 körerősítése és k típuszáma szabja meg.

A kompenzációs szabályozókat az elemi P, I és D alaptagokból szokták felépíteni (6. táblázat), az alaptagokat azonban önmagukban ritkán szokták valós rendszerekben alkalmazni.

Típus	$W_c(s)$ átviteli függvény
P	k_c
I	$\frac{k_c}{sT_i} = \frac{k_i}{s}$
D	$k_c \frac{1+sT_d}{sT}$

6. táblázat. P, I, D alaptagok

A gyakorlatban – megfelelően megválasztott időállandókkal – csak bizonyos frekvenciatartományokon belül biztosítják az I és D hatások érvényesülését (7. táblázat). [80][87][88]:

Típus	$W_c(s)$ átviteli függvény
PI	$k_c \frac{1+sT_i}{sT_i}$
PD	$k_c \frac{1+sT_d}{1+sT}$
PID	$K_c \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1+sT} \right)$

7. táblázat. A leggyakoribb kompenzációs szabályzók

A soros kompenzációs módszert az elektromotorok szabályzótervezésénél fogom használni.

3.2.2 Modern szabályozástechnika

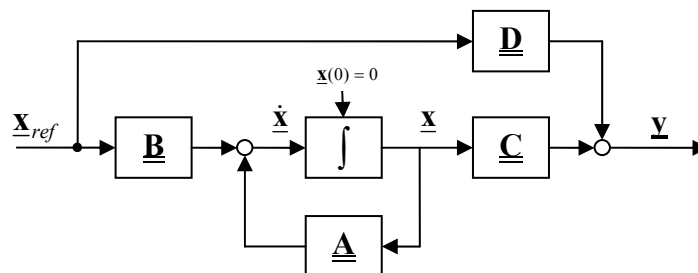
A modern szabályozáselmélet az 1960-as évek elejétől indult fejlődésnek. Kidolgozták az állapot-visszacsatoláson és állapot-megfigyelőn alapuló, kvadratikus kritérium szerint optimális tervezési módszereket, valamint a sztochasztikus jelek optimális szűrését. Később megjelentek a változó rendszer esetén is optimális viselkedést biztosító robusztus tervezési eljárások, de fokozatosan teret hódítottak maguknak a szabályozáselméletben a soft-computing technikák is [80][81][82][84][85][89][90][92][93][94][95].

3.2.2.1 Irányíthatóság és megfigyelhetőség

A MIMO rendszerekkel foglalkozó modern lineáris szabályzó-tervezési eljárásokban többnyire az irányítandó rendszer:

$$\begin{aligned}\underline{\dot{x}} &= \underline{A}\underline{x} + \underline{B}\underline{u} \\ \underline{y} &= \underline{C}\underline{x} + \underline{D}\underline{u}\end{aligned}\quad (3.9)$$

állapotteres leírásmódjából indulnak ki, melyből a 44. ábra hatásvázlatát lehet felrajzolni [80][81][82][84]. Az első feladat tehát az egyenletben szereplő mátrixok meghatározása, vagyis a rendszer lineáris matematikai modelljének felállítása. Ezen mátrixok, valamint a felhasználó által megadott egyéb paraméterek alapján, a kidolgozott matematikai apparátusra épülő szabályzó-tervezési algoritmus soros kompenzátort ad eredményül. Ilyen előre „legyártott” algoritmusokat találhatunk a MATLAB program Control System és Robust Control Toolbox-aiban: `lqr.m`, `lqg.m`, `hinf.m`, `musyn.m` stb.



44. ábra. Állapotteres rendszerleírás hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

A (3.9) rendszermodellnél csak akkor alkalmazható teljes állapot-visszacsatolás, ha a rendszer:

- irányítható, vagyis megfelelő bemenő jel esetén, a rendszer bármelyik állapotváltozója illetve kimeneti jele véges idő alatt tetszőleges állapotból egy tetszőleges másik állapotba átvihető;
- megfigyelhető, vagyis a bemenet és a kimenet ismeretében az állapotváltozók mindegyike előállítható vagy becsülhető.

Az irányíthatóság és megfigyelhetőség szükséges és elégséges feltétele n dimenziós rendszer esetén, hogy a $\underline{\underline{\mathbf{C}}}_{\text{contr}}$ irányíthatósági és a $\underline{\underline{\mathbf{C}}}_{\text{obs}}$ megfigyelhetőségi tesztmátrixok rangja n legyen:

$$\underline{\underline{\mathbf{C}}}_{\text{contr}} = [\underline{\underline{\mathbf{B}}} \quad \underline{\underline{\mathbf{A}\mathbf{B}}} \quad \underline{\underline{\mathbf{A}^2\mathbf{B}}} \quad \dots \quad \underline{\underline{\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}}}] \quad \underline{\underline{\mathbf{C}}}_{\text{obs}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{\mathbf{C}}} \\ \underline{\underline{\mathbf{C}\mathbf{A}}} \\ \underline{\underline{\mathbf{C}\mathbf{A}^2}} \\ \vdots \\ \underline{\underline{\mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1}}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Az irányíthatóság és megfigyelhetőség vizsgálatára MATLAB-ban a `ctrb.m` és `obsv.m` függvények állnak rendelkezésre.

Megjegyezném, hogy az egyszerűség kedvéért a továbbiakban a gyakorlati rendszerek többségére jellemző $\underline{\underline{\mathbf{D}}} = 0$ esetet fogom feltételezni [81][82][83][84].

3.2.2.2 LQR szabályozótervezési módszer

A többváltozós modern szabályzó-tervezési eljárások egyike az LQR módszer, amely a

$$J = \frac{1}{2} \int_{t=0}^{\infty} (\underline{\underline{\mathbf{x}}}^T \underline{\underline{\mathbf{Q}}} \underline{\underline{\mathbf{x}}} + \underline{\underline{\mathbf{u}}}^T \underline{\underline{\mathbf{R}}} \underline{\underline{\mathbf{u}}}) dt \quad (3.11)$$

négyzetes integrálkritérium minimálásával optimális állapot-visszacsatolási mátrixot ad eredményül. Az optimális vezérlési törvény zérusértékű bemeneti jel esetén:

$$\underline{\underline{\mathbf{u}}} = -\underline{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{opt}} \underline{\underline{\mathbf{x}}} \quad (3.12)$$

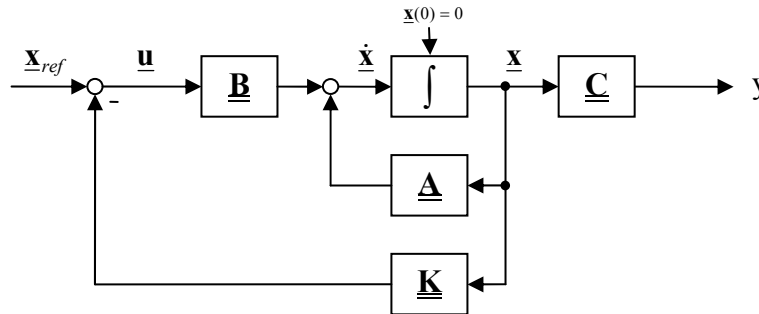
lesz, melyből a 45. ábra hatásvázlata következik. A $\underline{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{opt}}$ visszacsatolási mátrixot $\underline{\underline{\mathbf{A}}}$, $\underline{\underline{\mathbf{B}}}$, $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$, és $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$ ismeretében az

$$\underline{\underline{\mathbf{A}}}^T \underline{\underline{\mathbf{P}}} + \underline{\underline{\mathbf{P}}}^T \underline{\underline{\mathbf{A}}} + \underline{\underline{\mathbf{Q}}} - \underline{\underline{\mathbf{P}}}\underline{\underline{\mathbf{B}}}\underline{\underline{\mathbf{R}}}^{-1}\underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{P}}} = \underline{\underline{\mathbf{0}}} \quad (3.13)$$

Riccati-egyenlet $\underline{\underline{\mathbf{P}}}$ megoldásából határozhatjuk meg:

$$\underline{\underline{\mathbf{K}}}_{opt} = \underline{\underline{\mathbf{R}}}^{-1} \underline{\underline{\mathbf{B}}}^T \underline{\underline{\mathbf{P}}} \quad (3.14)$$

A feladat megoldását a MATLAB programcsalád Control System Toolbox csomagjának `lqr` . m függvénye támogatja.



45. ábra. Teljes állapot-visszacsatolású szabályozási rendszer hatásvázlata
[Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

A $J = \text{minimum}$ tervezési kritériumnak nincs olyan szemléletes fizikai jelentése, mint a klasszikus módszereknél megszokott fázistöbblet, túllendülés, szabályzási idő stb. kifejezéseknek. Ezért a hagyományos értelemben vett minőségi jellemzők $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$ és $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$ súlyozó mátrixokkal történő beállítása némi tervezési tapasztalatot igényel. Az azonban a (3.11) költségfüncionálból adódik, hogy ha $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$ elemeit növeljük, ahhoz hogy J kis értékű maradjon $\underline{\mathbf{x}}(t)$ -nek is kis értékűnek kell lennie. Ebből következik, hogy a visszacsatolt rendszerben nagyobb $\underline{\mathbf{u}}(t)$ beavatkozó jelet is meg lehet engedni, vagyis a rendszerre a nagy túlszabályozás lesz jellemző. Másrészt, ha $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$ elemeit növeljük, ahhoz hogy J kis értékű maradjon $\underline{\mathbf{u}}(t)$ -nek is kis értékűnek kell lennie. Ilyenkor a szabályozási rendszer működéséhez kisebb teljesítményű beavatkozó szervek is elegendőek. A $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$ és $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$ mátrixok kiválasztásakor figyelembe kell venni, hogy a szabályozott szakasz $\underline{\mathbf{u}}(t)$, $\underline{\mathbf{x}}(t)$ és $\underline{\mathbf{y}}(t)$ jelei a valóságban korlátosak lehetnek [83][84][89][16][91].

A $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$ és $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$ súlyozó mátrixok megválasztására, első közelítésre használhatjuk a reciprok négyzetes szabályt, vagyis

$$\underline{\underline{\mathbf{Q}}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_{1\max}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{x_{2\max}^2} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{x_{n\max}^2} \end{bmatrix} \quad \underline{\underline{\mathbf{R}}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{u_{1\max}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{u_{2\max}^2} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{u_{k\max}^2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

ahol $x_{i\max}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) az i -edik állapotváltozó, $u_{j\max}$ ($j = 1, 2, \dots, k$) pedig a j -edik beavatkozó jel megengedett maximális értéke. Ha a kezdeti beállításokkal a zárt rendszerre nem kapunk megfelelő minőségi jellemzőket, akkor a súlyozó mátrixok elemeit addig változtatjuk, amíg el nem érjük a megadott követelményeket [84][91].

3.2.2.3 LQG szabályozótervezési módszer

Az LQR módszernél feltételeztük, hogy a rendszer összes állapotváltozója hozzáférhető, így a teljes-állapotvisszacsatolás megvalósítható. A gyakorlatban azonban nem minden esetben lehetséges vagy gazdaságos minden állapotváltozó mérése, ráadásul a mérési eredményeket tökéletlen, zajos, és korlátozott sávzélességű szenzorok szolgáltatják. Ezért az állapotváltozókat a mérési eredményekből, a zajok statisztikai jellemzőinek és a rendszer dinamikus modelljének ismeretében kell megbecsülni, az állapotvisszacsatolást pedig a becsült állapotváltozóról kell megvalósítani. Erre a problémára, kvadratikus kritérium szerint optimális megoldást ad az LQG⁴⁴ tervezési módszer. Az LQG feladat a szeparációs elv alapján [83][84][89][91] szétbontható egy optimális LQE⁴⁵ állapotbecslési és egy LQR optimális szabályzó-tervezési feladatra (lásd: 3.2.2.2).

Az állapotbecsléshez az irányított szakasz lineáris állapotterez leírásából és a rendszert terhelő zajok statisztikai tulajdonságaiból indulunk ki:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{\mathbf{x}}} &= \underline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{B}}\underline{\mathbf{u}} + \underline{\mathbf{G}}\underline{\mathbf{w}} \\ \underline{\mathbf{y}} &= \underline{\mathbf{C}}\underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{v}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

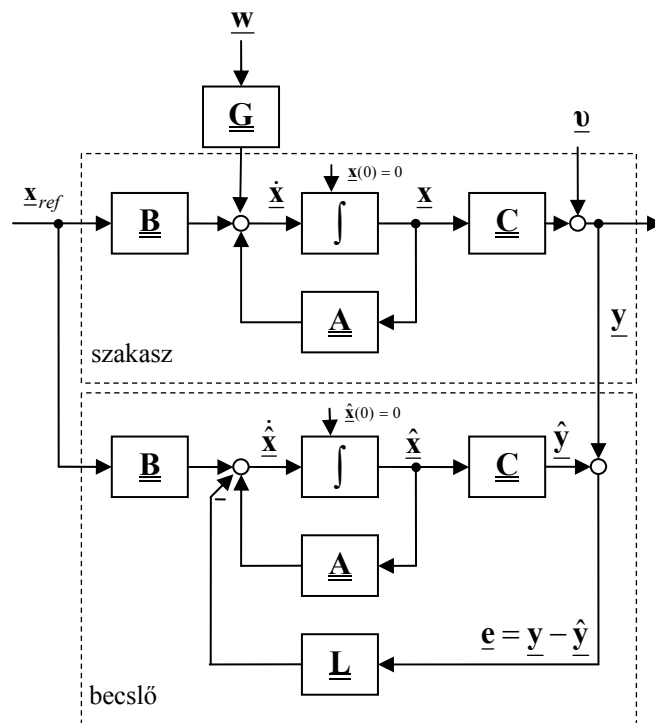
ahol a $\underline{\mathbf{w}}(t)$ rendszerzaj és a $\underline{\mathbf{v}}(t)$ szenzorzaj korrelálatlan, normális eloszlású, zérus várható értékű, $\underline{\mathbf{Q}}_w$ és $\underline{\mathbf{R}}_v$ kovarianciájú sztochasztikus mennyiségek melyekre:

⁴⁴ LQG: Linear Quadratic Gaussian

⁴⁵ LQE: Linear Quadratic Estimator

$$\begin{aligned}
 E\{\underline{\mathbf{w}}(t)\} &= 0 & E\{\underline{\mathbf{v}}(t)\} &= 0 \\
 E\{\underline{\mathbf{w}}(t)\underline{\mathbf{w}}^T(t+\tau)\} &= \underline{\mathbf{Q}}_w \delta(\tau) & E\{\underline{\mathbf{v}}(t)\underline{\mathbf{v}}^T(t+\tau)\} &= \underline{\mathbf{R}}_v \delta(\tau) \\
 E\{\underline{\mathbf{w}}(t)\underline{\mathbf{v}}^T(t+\tau)\} &= 0
 \end{aligned} \quad (3.17)$$

A 46. ábrán a szakasz, és annak állapotváltozóit becslő Kálmán-Bucy szűrő hatásvázlata látható. A mért $\underline{\mathbf{y}}(t)$ kimenet és a becsült $\hat{\underline{\mathbf{y}}}(t)$ kimenet közötti különbség az $\underline{\mathbf{e}}(t) = \underline{\mathbf{y}}(t) - \hat{\underline{\mathbf{y}}}(t)$ kimeneti hibajel, a megfelelően választott $\underline{\mathbf{L}}$ súlyozó mátrixon keresztül vissza van csatolva a becslő integrátorának bemenetére.



46. ábra. Kálmán-Bucy szűrő hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

A becslés akkor lesz optimális, ha a valós $\underline{\mathbf{x}}(t)$ és a becsült $\hat{\underline{\mathbf{x}}}(t)$ állapotvektorok $\tilde{\underline{\mathbf{x}}}(t) = \underline{\mathbf{x}}(t) - \hat{\underline{\mathbf{x}}}(t)$ különbségének varianciája minimális értékű, vagyis:

$$E\{\tilde{\underline{\mathbf{x}}}(t)\tilde{\underline{\mathbf{x}}}^T(t)\} = \min \quad (3.18)$$

A (3.18) kritériumnak megfelelő $t \rightarrow \infty$ statikus $\underline{\mathbf{L}}$ visszacsatolási mátrixot a becslő

$$\underline{\mathbf{A}}\underline{\mathbf{P}} + \underline{\mathbf{P}}\underline{\mathbf{A}}^T + \underline{\mathbf{G}}\underline{\mathbf{Q}}\underline{\mathbf{G}}^T - \underline{\mathbf{P}}\underline{\mathbf{C}}^T\underline{\mathbf{R}}^{-1}\underline{\mathbf{C}}\underline{\mathbf{P}} = \underline{\mathbf{0}} \quad (3.19)$$

Riccati egyenlet $\underline{\mathbf{P}}$ költségmátrix megoldásából kaphatjuk meg:

$$\underline{\mathbf{L}}_{opt} = \underline{\mathbf{P}}\underline{\mathbf{C}}^T\underline{\mathbf{R}}^{-1} \quad (3.20)$$

A 46. ábra hatásvázlatát felhasználva felírható az optimális állapotbecslő állapotegyenlete:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\underline{\mathbf{x}}}} &= (\underline{\mathbf{A}} - \underline{\mathbf{L}}\underline{\mathbf{C}})\hat{\underline{\mathbf{x}}} + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{B}} & \underline{\mathbf{L}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{u}} \\ \underline{\mathbf{y}} \end{bmatrix} \\ \hat{\underline{\mathbf{y}}} &= \underline{\mathbf{C}}\hat{\underline{\mathbf{x}}} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Könnyen észrevehető a hasonlóság az optimális állapotbecslési és az LQR feladat között. A (3.13-14) és (3.19-20) kifejezések teljesen azonosak az alábbi megfeleltetésekkel:

LQR optimális irányítás	Optimális állapotbecslés
$\underline{\mathbf{A}}$	$\underline{\mathbf{A}}^T$
$\underline{\mathbf{Q}}$	$\underline{\mathbf{Q}}_w$
$\underline{\mathbf{B}}$	$\underline{\mathbf{C}}^T$
$\underline{\mathbf{R}}$	$\underline{\mathbf{R}}_v$
$\underline{\mathbf{K}}$	$\underline{\mathbf{L}}^T$
$\underline{\mathbf{P}}$	$\underline{\mathbf{P}}$

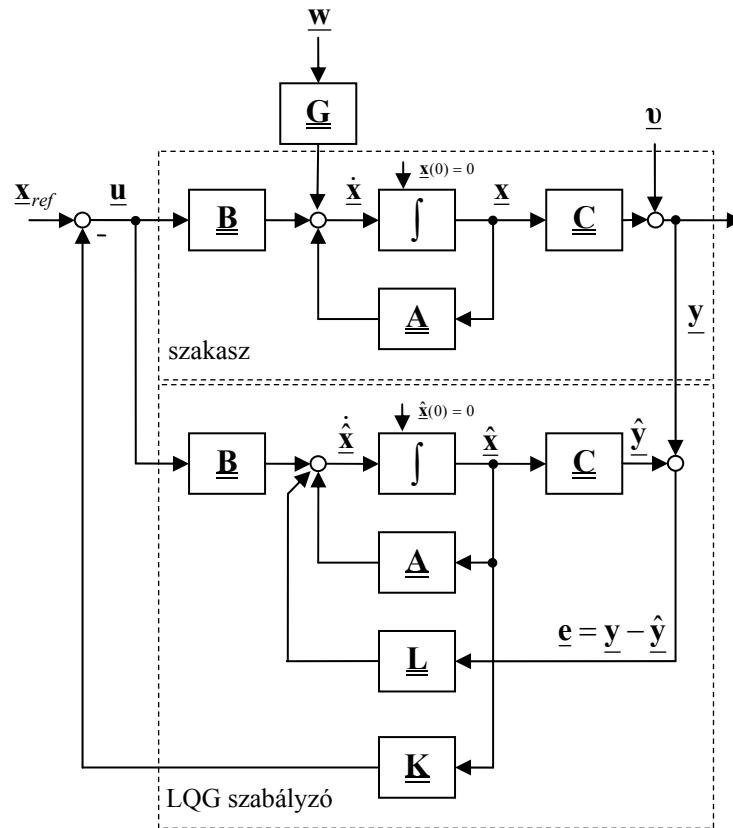
A teljes LQG szabályzó hatásvázlatát a 47. ábra szemlélteti. Az $\underline{\mathbf{A}}$, $\underline{\mathbf{B}}$, $\underline{\mathbf{C}}$, $\underline{\mathbf{G}}$, $\underline{\mathbf{Q}}_w$ és $\underline{\mathbf{R}}_v$ mátrixok időfüggők is lehetnek, ilyenkor az általános

$$\underline{\mathbf{A}}(t)\underline{\mathbf{P}}(t) + \underline{\mathbf{P}}(t)\underline{\mathbf{A}}^T(t) + \underline{\mathbf{G}}(t)\underline{\mathbf{Q}}_w(t)\underline{\mathbf{G}}^T(t) - \underline{\mathbf{P}}(t)\underline{\mathbf{C}}^T(t)\underline{\mathbf{R}}_v^{-1}(t)\underline{\mathbf{C}}(t)\underline{\mathbf{P}}(t) = \dot{\underline{\mathbf{P}}}(t) \quad (3.22)$$

Riccati egyenlet adja meg a szintén időfüggő, (3.18) szerint optimális

$$\underline{\underline{L}}_{opt}(t) = \underline{\underline{P}}(t)\underline{\underline{C}}^T(t)\underline{\underline{R}}_v^{-1}(t) \quad (3.23)$$

visszacsatolási mátrixot.



47. ábra. LQG szabályozási rendszer hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

A fentiekben a $\underline{\underline{w}}(t)$ és $\underline{\underline{v}}(t)$ zajokat korrelálatlan fehérzajként jellemeztük, a gyakorlatban azonban ez ritkán igaz. Ha a rendszerzaj és a szenzorzajok korreláltak, az

$$E\left\{\begin{bmatrix} \underline{\underline{w}}(t) \\ \underline{\underline{v}}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\underline{w}}(t) & \underline{\underline{v}}(t) \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{Q}} & \underline{\underline{N}} \\ \underline{\underline{N}} & \underline{\underline{R}}_v \end{bmatrix} \delta(\tau) \quad (3.24)$$

általános kovariancia mátrix $\underline{\underline{N}}$ keresztkorrelációs intenzitásmátrixa nem zérus, az optimális statikus $\underline{\underline{L}}$ visszacsatolási mátrixot pedig az

$$\underline{\underline{\mathbf{A}}}\underline{\underline{\mathbf{P}}} + \underline{\underline{\mathbf{P}}}\underline{\underline{\mathbf{A}}}^T + \underline{\underline{\mathbf{G}}}\underline{\underline{\mathbf{Q}}}\underline{\underline{\mathbf{G}}}^T - (\underline{\underline{\mathbf{P}}}\underline{\underline{\mathbf{C}}}^T + \underline{\underline{\mathbf{N}}})\underline{\underline{\mathbf{R}}}_D^{-1}(\underline{\underline{\mathbf{P}}}\underline{\underline{\mathbf{C}}}^T + \underline{\underline{\mathbf{N}}})^T = \underline{\underline{\mathbf{0}}} \quad (3.25)$$

$$\underline{\underline{\mathbf{L}}}_{opt} = (\underline{\underline{\mathbf{P}}}\underline{\underline{\mathbf{C}}}^T + \underline{\underline{\mathbf{N}}})\underline{\underline{\mathbf{R}}}_D^{-1} \quad (3.26)$$

egyenletek alapján határozhatjuk meg. Ezen kívül a szenzorok kimeneti jelei általában aluláteresztő szűrőn keresztül A/D átalakítóra kerülnek, ezért a hasznos jellel együtt a szenzor zaj is sávkorlátozott lesz. A keletkező „színes” zajt ilyenkor úgy modellezhetjük, hogy a rendszer állapotteret leírását kibővítjük a szűrőt reprezentáló további állapotváltozókkal és együttható mátrixokkal, így a kiegészített rendszert érő zavarokra továbbra is fehérzajként tekinthetünk. A módszer a sávkorlátozott rendszerzajra is alkalmazható [83][84][89][91][93][95].

3.2.3 Minőségi követelmények

A pilóta nélküli légi járművek műszaki követelményeinek tekintetében – a terület kiforratlanságából adódóan – nincsen széles körűen elfogadott és alkalmazott szabványrendszer. Ezért az UAV repülésszabályozójával szemben támasztott minőségi követelmények meghatározásakor, elsősorban a pilóta által vezetett repülőgépeknél szokásos előírások adhatnak iránymutatást.

A katonai alkalmazású pilóta vezette légi járművek repülési tulajdonságaira vonatkozó, valamint repülésszabályozó rendszereik tervezésekor követendő irányelveket határoznak meg a MIL-F-8785C [96] és MIL-F-9490D [97] szabványok. Méret és tömeg alapján [96] különböző kategóriákat (Class I-IV.) definiál, [97] megadja e kategóriákban a repülésszabályozó rendszertől – adott üzemmódokban – elvárt minőségi jellemzőket. Példaként a 8. táblázatban összefoglaltam a szabványban megadott, ϕ , θ és ψ szögekre valamint a 9. táblázatban a magasság alapjelekre vonatkozó maximális megengedett követési hibákat.

Szabályozott jellemző	statikus hiba szélcsendben	Effektív hiba turbulens áraml.
ϕ	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 5^\circ$
θ	$\pm 1^\circ$	$\pm 10^\circ$
ψ	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 5^\circ$

8. táblázat. ϕ , θ , ψ szögekre megengedhető maximális alapjel-követési hiba [97]

θ bedöntési szög Magasság (láb)	0 - 1°	1 - 30°	30 - 60°
55000 - 80000	$\pm 0,1\% - \pm 0,2\%$	± 60 láb vagy $\pm 0,3\%$	± 90 láb vagy $\pm 0,4\%$
30000 - 55000	$\pm 0,1\%$		
0 - 30000	± 30 láb		

9. táblázat. Maximális megengedhető magasságtartási hiba adott bedöntési szögekre [97]

Mivel saját négyrotoros rendszerem elsősorban kísérleti céllal – az elmélet gyakorlati alkalmazhatóságának demonstrálására – épült, a szabványokban és egyéb ajánlásokban megfogalmazott konkrét műszaki elvárások teljesítésére nem törekedtem, azok teljesülését és feltételeit nem vizsgáltam. E terület kutatása nem képezi értekezésem tárgyát, bár kísérleti rendszerem továbbfejlesztése esetén mindenképpen figyelembe kell venni az irányadó szabványok és jogszabályok előírásait [98].

3.3. MOTORSZABÁLYZÓ TERVEZÉSE

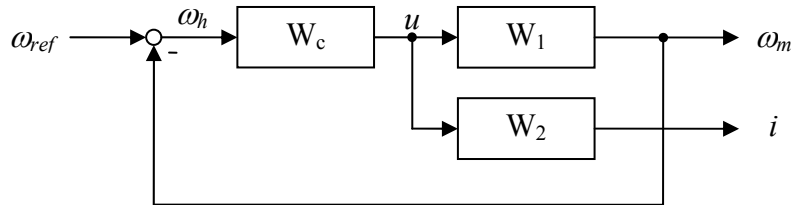
Az 1.5.2 fejezetben leírtak alapján a kapocsfeszültség időfüggvénye, mint bemeneti jel, a dinamikai egyenletek által meghatározott módon, a motor tekercseiben áramot, tengelyén pedig nyomatékot hoz létre. A motor szögsebességét ez a nyomaték, valamint a motor tengelyére ható összes terhelő és veszteségi nyomaték együttesen határozza meg. Az (1.13) állapotváltozós modellből, a soros kompenzációs szabályzó tervezéséhez meg kell határozni az átviteli függvényeket [32][83][84][88]:

$$\begin{aligned}
 W_1(s) &= \frac{\omega_m(s)}{u(s)} = \frac{K}{(J_m L)s^2 + (J_m R + LB)s + BR + K^2} = \frac{7,178 \cdot 10^7}{s^2 + 6900s + 1,76 \cdot 10^5} \\
 W_2(s) &= \frac{i(s)}{u(s)} = \frac{J_m s + B}{(J_m L)s^2 + (J_m R + LB)s + BR + K^2} = \frac{6897s + 2,17 \cdot 10^4}{s^2 + 6900s + 1,76 \cdot 10^5}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

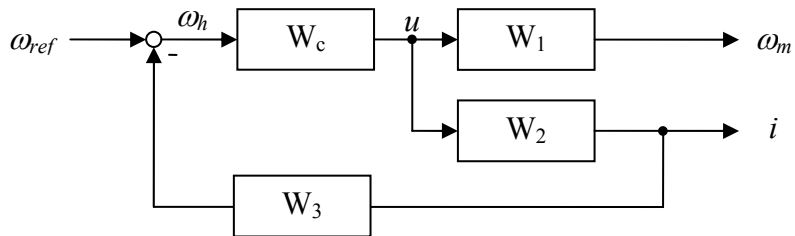
A fentiek alapján a zárt motor-fordulatszám szabályzási kör hatásvázlata a 48. ábra szerint alakul. A motor szögsebességét azonban nem lehet közvetlenül mérni (nincs fordulatszám-mérő szenzor), ezért azt a motoráram és a motor modelljének segítségével lehet megbecsülni:

$$W_3(s) = \frac{\omega_m(s)}{i(s)} = \frac{K}{J_m s + B} = \frac{1,04 \cdot 10^4}{s + 3.146} \tag{3.28}$$

Ez alapján a szabályozási kör hatásvázlata a 49. ábra szerint módosul. A modellparaméterek pontatlansága miatt a szögsebesség ilyen módon való meghatározása ω_m -ben statikus hibát fog eredményezni. Ennek a hibának a kompenzálását a repülésszabályozóra fogom bízni.



48. ábra. Zárt motor-fordulatszám szabályzási kör [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]



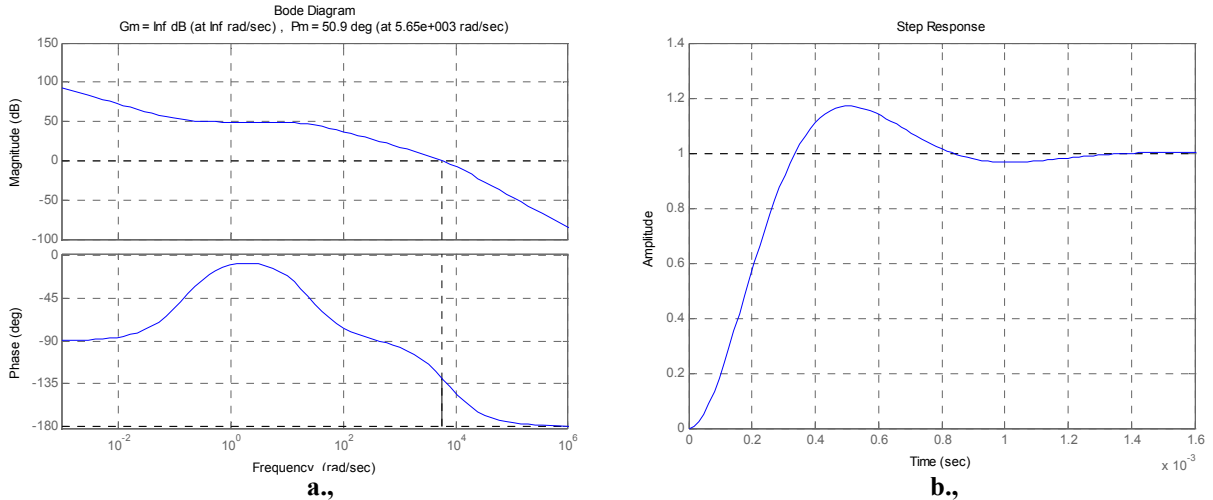
49. ábra. Módosított fordulatszám szabályzási kör, motoráramról történő visszacsatolással [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]

A $W_c(s)$ szabályzó tervezését az ideális állapotot reprezentáló 48. ábra alapján fogom elvégezni, a motorparaméterek pontatlanságának hatását pedig a valóságos rendszert leíró 49. ábra alapján vizsgálom meg.

A soros kompenzációhoz PI szabályzó struktúrát választottam. Az integráló tagnak köszönhetően így az ideális zárt kör statikus hibája, egységugrás bemenet esetén zérus lesz. A gyakorlattól eltérően itt a póluskiejtés módszere nem ad megfelelő eredményt, mivel a korlátos motorfeszültség miatt az arányos tag növelésével nem gyorsul jobban a rendszer. Az integrálási időt ezért úgy kell megválasztani, hogy legalább 45° -os fázistartalékot biztosítva a zárt rendszer, a módosított jellemző korlátosságát is figyelembe véve a lehető leggyorsabb maradjon. Sorozatos számítógépes szimulációk eredményeképpen a

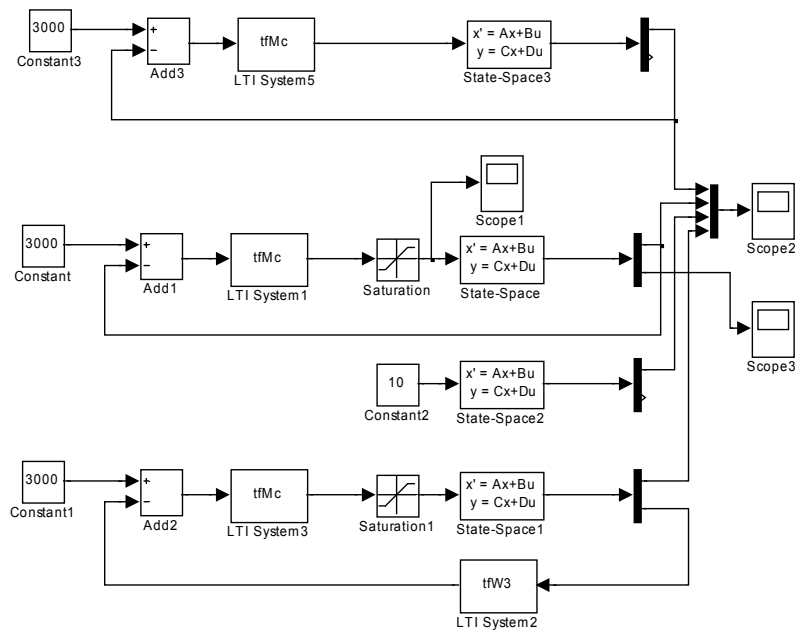
$$W_c(s) = \frac{s + 0,1}{s} \quad (3.29)$$

átviteli-függvényű szabályzót megfelelően találtam. Ezzel a fázistartalék közel 60° lesz. A (3.29)-el felépített felnyitott kör Bode-diagramját és a zárt kör egységugrás választ az 50/a-b. ábrák szemléltetik.



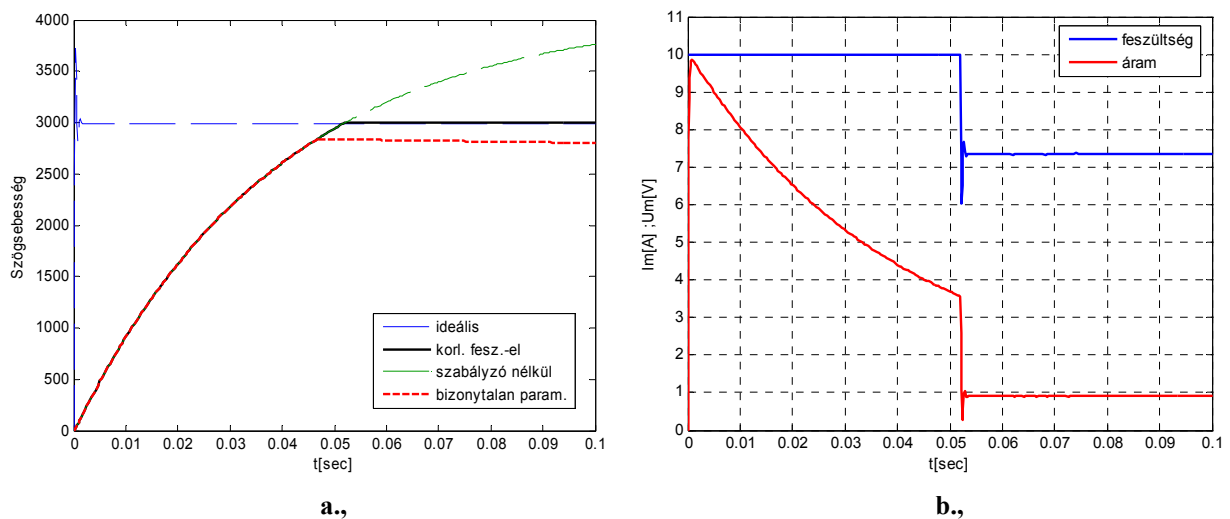
50. ábra. A felnyitott kör a., Bode-diagramja és b., a zárt kör egységugrás válasza
[Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

Ez az egységugrás válasz félvezető lehet, ugyanis nem veszi figyelembe a korlátos motorfeszültséget. Ezért a korlátos motorfeszültség és a bizonytalan motorparaméterek szabályzási körre kifejtett hatásának vizsgálatára MATLAB Simulink környezetben szimulációkat végeztem az 51. ábrán látható modellel.



51. ábra. Simulink modell a korlátos motorfeszültség és a bizonytalan motorparaméterek szabályzási körre kifejtett hatásának vizsgálatára [Készítette: Turóczy A. - Simulink]

A kapott görbék (52. ábra) alapján elmondható, hogy ideális esetben (kék szaggatott vonal) a szabályozási idő nagyságrendekkel kisebb lenne, mint a valóságban, ahol a korlátozott motorfeszültség miatt a zárt rendszer egységugrás válasza (fekete vonal) az alapjel értékének eléréséig egybeesik a szabályozatlan motor egységugrás válaszával (zöld szaggatott vonal). Továbbá a motoráramról visszacsatolt, és a bizonytalan motorparaméterekből meghatározott $W_3(s)$ -el kiegészített, a valóságos rendszert legjobban közelítő szabályzó struktúra egységugrás válasza (piros szaggatott vonal) a várt statikus hibával képes csak követni az alapjelet.



52. ábra. Motor a., szögsebesség, b., áram és feszültség jelalakok [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

A szimulációban a $W_3(s)$ átviteli függvény paramétereinek a névlegeshez képest eltérő értékeket adtam:

$$K_e = 0,95 \cdot K$$

$$J_{me} = 1,05 \cdot J_m$$

$$B_e = 0,93 \cdot B$$

3.4. A NÉGYROTOROS HELIKOPTER LINEÁRIS MATEMATIKAI MODELLJÉNEK MEGHATÁROZÁSA KIS BEDÖNTÉSI ÉS BÓLINTÁSI SZÖGEK ESETÉN

Az (1.26) nemlineáris matematikai modellben az orientációt az $\underline{\Phi}(t)$ forgatási mátrix jellemzi. Állapotváltozónak azonban érdemes a ϕ bedöntési-, θ bólintási- és ψ irány-szögeket választani, melyeket az (1.3) forgatási mátrixból a

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\Phi_{zy}}{\Phi_{zz}}\right) \quad \theta = -\sin^{-1}(\Phi_{zx}) \quad \psi = \tan^{-1}\left(\frac{\Phi_{yx}}{\Phi_{xx}}\right) \quad (3.30)$$

formulák segítségével számíthatunk ki. A ϕ , θ és ψ szögek változási sebességét, vagyis idő szerinti deriváltját, (1.26) és (3.30) felhasználásával a **K** test-koordinátarendszerben mért szögsebességek függvényeként is kifejezhetjük⁴⁶ [80][83][99][100]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta \sin \phi & \tan \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{(K)} \quad (3.31)$$

A (3.31) egyenlet és az 1.5 fejezetben kapott eredmények felhasználásával a négyrotoros helikopter nemlineáris matematikai modellje:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{r}_x \\ \dot{r}_y \\ \dot{r}_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (\cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi)(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \frac{C_f}{m_0} \\ (\cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi)(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \frac{C_f}{m_0} \\ -g + (\cos \phi \cos \theta)(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \frac{C_f}{m_0} \end{bmatrix} \quad (3.32) \\ \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \omega_x + \omega_y \sin \phi \tan \theta + \omega_z \cos \phi \tan \theta \\ \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi \\ \omega_y \sin \phi \sec \theta + \omega_z \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix}_{(K)} \\ \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix}_{(K)} &= \begin{bmatrix} \left(\frac{J_{yy} - J_{zz}}{J_{xx}}\right) \omega_z \omega_y + \left(\frac{d \cdot C_f}{J_{xx}}\right) (\Omega_2^2 - \Omega_4^2) - \left(\frac{J_r}{J_{xx}}\right) \omega_y (\Omega_2 + \Omega_4 - \Omega_1 - \Omega_3) \\ \left(\frac{J_{zz} - J_{xx}}{J_{yy}}\right) \omega_z \omega_x + \left(\frac{d \cdot C_f}{J_{yy}}\right) (\Omega_3^2 - \Omega_1^2) + \left(\frac{J_r}{J_{yy}}\right) \omega_x (\Omega_2 + \Omega_4 - \Omega_1 - \Omega_3) \\ \left(\frac{J_{xx} - J_{yy}}{J_{zz}}\right) \omega_x \omega_y + \left(\frac{C_r}{J_{zz}}\right) (\Omega_1^2 + \Omega_3^2 - \Omega_2^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix}_{(K)} \end{aligned}$$

⁴⁶ A $\sec \theta = 1/\cos \theta$ tényező $\theta = \pm 90^\circ$ estén nem definiált értékű, ez azonban kis szögkitérések esetén nem okoz problémát [47][52].

A (3.32) egyenletrendszer kis szögkitérésekre történő linearizálásához az alábbiakat feltételezem:

1. A ϕ és θ szögek 30° -nál kisebbek, ekkor $\sin\phi \approx \phi$, $\cos\phi \approx 1$, $\sin\theta \approx \theta$, $\cos\theta \approx 1$ közelítés alkalmazható.
2. Ha $1 > a \approx 0$ és $1 > b \approx 0$ akkor $a \gg a \cdot b$ és $b \gg b \cdot a$ közelítés használható.
3. Lebegéshez közeli állapotban $(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \approx U1 = \text{állandó}$.
4. A rotorok felhajtóerejére vonatkozó (1.15) négyzetes jelleggörbe az üzemi fordulatszám tartományban (2000-4000 rad/s) jól közelíthető az alábbi összefüggéssel (53. ábra):

$$F_f(\Omega) = C_f \cdot \Omega^2 \approx C_{f_n} \Omega - c_{f_n}$$

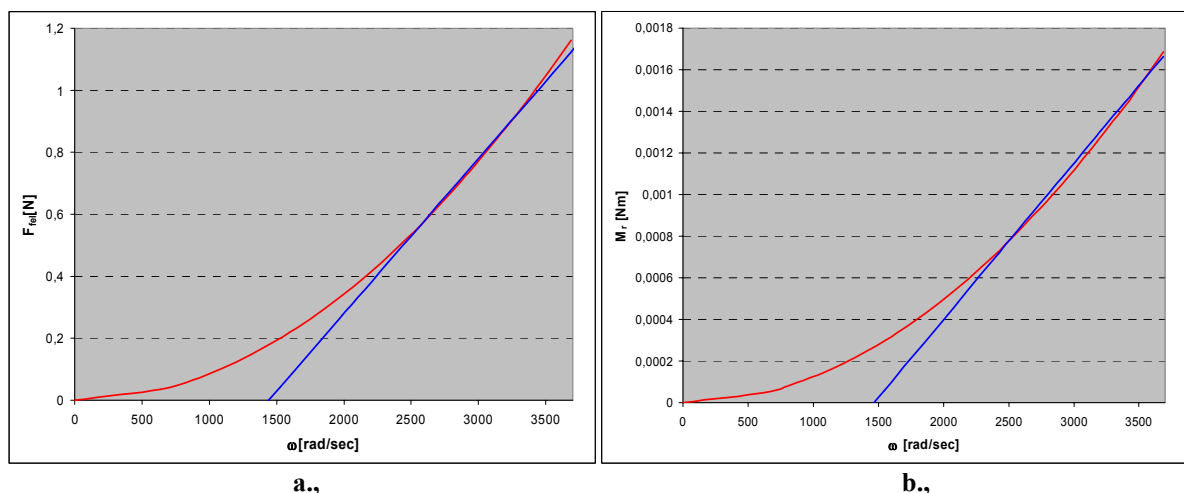
$$C_f = 8,5512 \cdot 10^{-8} \quad C_{f_n} = 5 \cdot 10^{-4} \quad c_{f_n} = 0,72$$

5. A rotorok által keltett reaktív nyomatékra vonatkozó (1.18) négyzetes jelleggörbe az üzemi fordulatszám tartományban (2000-4000 rad/s) jól közelíthető az alábbi összefüggéssel (53. ábra):

$$M_r(\Omega) = C_r \cdot \Omega^2 \approx C_{r_n} \Omega - c_{r_n}$$

$$C_r = 1,0695 \cdot 10^{-9} \quad C_{r_n} = 7,5 \cdot 10^{-7} \quad c_{r_n} = 1,1 \cdot 10^{-3}$$

6. A szögsebességekre vonatkozó összefüggésben a forgó koordinátarendszer miatt keletkező nyomatékok elhanyagolhatóak.



53. ábra. a., A felhajtóerő és a b., reaktív nyomaték négyzetes jelleggörbéjének lineáris közelítése [Készítette: Turóczy A. - MS Excel]

A négyrotoros helikopter repülésszabályozásával foglalkozó irodalmak szinte mindegyikében [34][35][36][37][38][39] – az egyes rotor-szögsebességek helyett – az

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \\ \Omega_4 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

összefüggés szerinti jeleket tekintik bemenő jeleknek. A Simulink-ben elvégzett szimulációk eredményei alapján azonban arra a következtetésre jutottam, hogy a (3.33) szerinti bemenő jelekkel tervezett LQR szabályzók nem képesek kompenzálni a meghajtó rendszerben – a négy motor valóságban eltérő paramétereire miatt – jelentkező aszimmetriát. A rotor-szögsebességeket tekintve bemeneti jelnek ez a jelenség kompenzálható, ezért saját rendszeremben a bemeneti jelek:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \\ \Omega_4 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

A fentiek alapján felírható a négyrotoros helikopter kis szögkitérésekre érvényes lineáris matematikai modellje:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{r}_x \\ \dot{r}_y \\ \dot{r}_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \theta(U_1 C_{fn} - 4c_{fn}) \frac{1}{m_0} \\ -\phi(U_1 C_{fn} - 4c_{fn}) \frac{1}{m_0} \\ -g + (u_1 + u_2 + u_3 + u_4)(C_{fn} - 4c_{fn}) \frac{1}{m_0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{(K)} & \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix}_{(K)} &= \begin{bmatrix} \left(\frac{d \cdot C_{fn}}{J_{xx}} \right) (u_2 - u_4) \\ \left(\frac{d \cdot C_{fn}}{J_{yy}} \right) (u_3 - u_1) \\ \left(\frac{C_m}{J_{zz}} \right) (u_1 + u_3 - u_2 - u_4) \end{bmatrix}_{(K)} \end{aligned} \quad (3.35)$$

A (3.35) egyenletből a helikopter (3.9) alaknak megfelelő állapotegyenlete, az egyszerűség kedvéért a (K) indexek elhagyásával:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{r}_x \\ \dot{r}_y \\ \dot{r}_z \\ \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9,7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -9,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{[12 \times 12]}} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 28,6 & 0 & -28,6 \\ -28,4 & 0 & 28,4 & 0 \\ 0,13 & -0,13 & 0,13 & -0,13 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{[4 \times 12]}} \cdot 10^{-3} \underbrace{\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}_{[1 \times 4]}} \\
 \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_{[12 \times 12]}} \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \underbrace{\mathbf{D}}_{\mathbf{D}_{[4 \times 12]}} \mathbf{u}_{[1 \times 4]} \quad \mathbf{D}_{[4 \times 12]} = \mathbf{0} \\
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

3.5. FEDÉLZETI LQG REPÜLÉSSZABÁLYZÓ TERVEZÉSE

3.5.1 Optimális állapotbecslő tervezése

A repülésirányító automatikának az a feladata, hogy a test koordináta rendszer origójának sebessége valamint a tengelyek szögsebessége a repülési feladatnak megfelelően változzon a navigációs koordináta rendszerhez képest. Amennyiben útvonalrepülésről van szó, ez azt jelenti, hogy a repülőgép tömegközéppontja előre definiált térbeli pontokon keresztül halad. A szabályzó algoritmusnak tehát „ismernie” kell a helikopter ak-

tuális mozgásállapotát, ami saját kísérleti rendszeremben megegyezik a rendszermodell állapotváltozóinak ismeretével. Az állapotváltozóknak azonban csak egy részét lehet közvetlenül mérni, a többit becsülni kell. A mérés és becslés nagy részét szerencsére az Xsens MTi inerciális szenzormodul elvégzi. A beépített gyorsulásmérők, giroszkópok – melyek a $\dot{\mathbf{v}}_{(K)}(t)$ gyorsulás és $\underline{\boldsymbol{\omega}}_{(K)}(t)$ szögsebességet közvetlenül mérik – és mágneses szenzorok kalibrált mérési eredményeit felhasználva, a modul, szenzorfüziós algoritmus-a segítségével, adott pontossággal képes meghatározni a ϕ , θ , és ψ Euler-szögeket, vagyis a helikopter orientációját. Az $\mathbf{r}(t)$ pozíciót és a $\mathbf{v}(t)$ sebességet a gyorsulás adatokból csak integrálással lehet számolni. Ez a gyorsulásmérő mérési pontatlansága (zaj, nemlinearitás, tengelyszög eltérés stb.) miatt a pozíció és sebesség adatokban akkumulálódó hibát eredményez. A problémát a gyakorlatban további szenzorok alkalmazásával szokták orvosolni [47][91][50]:

- magasságmérés abszolút nyomásmérővel;
- szélesség mérés differenciális nyomásmérővel;
- ultrahangos magasságmérés kis magasságokban;
- lézeres távolságmérés;
- rádiónavigáció (ILS⁴⁷, VOR⁴⁸, ADF⁴⁹...);
- globális helyzet-meghatározás (GPS);
- képfeldolgozáson alapuló helyzet-meghatározás.

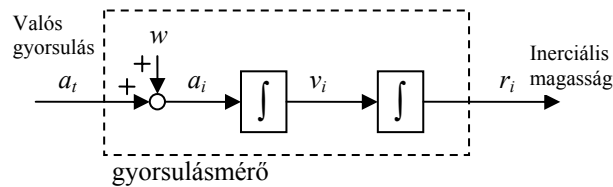
Saját beltéri alkalmazású kísérleti rendszerem számára a felsorolt megoldások közül csak az ultrahangos magasságmérés és a képfeldolgozáson alapuló helyzet-meghatározás jöhet számításba, de ez utóbbit bonyolultsága, számítási teljesítményigénye és költségei miatt elvettem. Az ultrahangos magasságmérővel az r_z pozíciót és a v_z sebességet akkumulálódó hiba nélkül lehet mérni, az r_x , r_y , v_x és v_y állapotváltozók azonban továbbra is csak integrálással számíthatók. Ebből következik, hogy a repülésszabályzó csak növekvő hibával lesz képes követni, az ezekre a bemenetekre adott alapjelet.

⁴⁷ ILS: Instrumental Landing System

⁴⁸ VOR: VHF Omni Range

⁴⁹ ADF: Automatic Direction Finder

Az r_z állapotváltozót, a magasságot, az ultrahangos magasságmérővel közvetlenül, az inerciális mérőegység z_k irányú gyorsulásmérőjével közvetve, a gyorsulás adat kétszeres idő szerinti integrálásával határozhatjuk meg. Az ultrahangos magasságmérő kis térbeli és időbeli felbontással, de időben állandó mérési hibával rendelkezik. Ennek komplementereként, a gyorsulásmérővel viszonylag nagy térbeli és időbeli felbontás érhető el, de a gyorsulásmérés hibájának kétszeri integrálása a magasság adatban akkumulálódó hibát eredményez. Érdeemes tehát mindkét mérési módszert felhasználva megbecsülni a magasság adatot, így pontosabb eredményt kaphatunk, mint az egyes mérésekkel külön-külön. Ezt a feladatot a gyakorlatban Kálmán-szűrő segítségével szokták megvalósítani, mely a meghatározandó és mért mennyiségek közötti dinamikus modell és a szenorzajok statisztikai jellemzőinek ismeretében optimális becslést biztosít (lásd 3.2.2.3 fejezet).

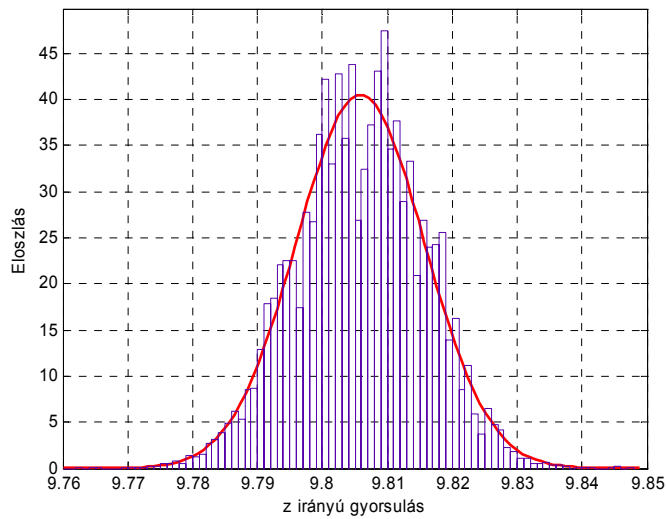


54. ábra. A gyorsulásmérő modellje [Készítette: Turóczy A. - MS Word]

Az inerciális mérőegység z_k irányú gyorsulásmérőjének zajtulajdonságait méréssorozattal határoztam meg, melyben felhasználtam a szenzor 54. ábra szerinti modelljét [91]. A mérés során a modult közel vízszintes helyzetben rögzítettem, ezzel biztosítottam, hogy a z_k irányú gyorsulásmérőre csak az állandó $a_t = g$ értékű nehézségi gyorsulás hasson. Az 54. ábra jelöléseit használva:

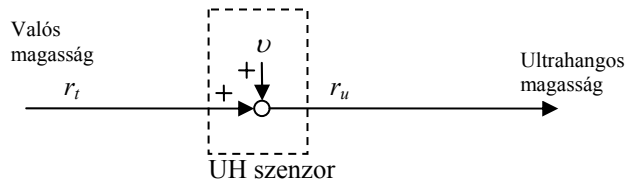
$$\begin{aligned} a_i &= a_t + w \\ a_t &= g = \text{áll.} \end{aligned} \quad (3.37)$$

A kapott a_i adatsort így normális eloszlású, $m = 9.805$ várható értékű, $\sigma = 0,01$ szórású normális eloszlással lehet közelíteni. Az eloszlás paramétereit a MATLAB Statistical Toolbox `normfit.m` függvényének segítségével határoztam meg. A mérési eredmények és az azt közelítő normális eloszlás sűrűségfüggvényét az 55. ábra szemlélteti.



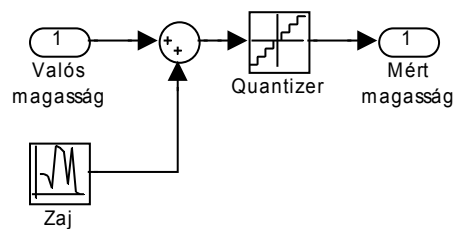
55. ábra. A Xsens modul z_k irányú gyorsulás jelének eloszlása $m = 9,805$ várható értékű, $\sigma = 0,01$ szórású normális eloszlással közelítve [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

A (3.37) összefüggések alapján a w szenzor-zaj eloszlása ugyancsak $\sigma_w = 0,01$ szórású, de $m_w = 0$ várható értékű normális eloszlás lesz.



56. ábra. Az ultrahangos magasságmérő modellje [Készítette: Turóczy A. - MS Word]

Az ultrahangos magasságmérő zajmodelljének meghatározásához az 56. ábra hatásvázlatát MATLAB Simulink környezetben kiegészítettem egy kvantáló egységgel, amely a szenzor 1 cm-es felbontását hivatott modellezni (57. ábra).



57. ábra. Az ultrahangos magasságmérő Simulink modellje [Készítette: Turóczy A. - Simulink]

A szimuláció és az ultrahangos szenzorral végzett mérések tapasztalataira támaszkodva arra a következtetésre jutottam, hogy az 57. ábra Simulink modellje a zajforrás $\sigma_v = 0,01$ szórású, $m_v = 0$ várható értékű normális eloszlású kimeneti jele esetén megfelelő pontossággal közelíti a valóságban lejátszódó folyamatokat. A fentiek alapján definiálhatjuk az

$$\begin{aligned} Q_w &= \sigma_w^2 \\ R_v &= \sigma_v^2 \end{aligned} \quad (3.38)$$

kovarianciákat.

A Kálmán-szűrő tervezéshez felírtam a magasságmérésre vonatkozó (3.9) szerinti

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_i \\ \dot{r}_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ r_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} a_i + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} w \\ (\dot{\underline{\mathbf{x}}} &= \underline{\underline{\mathbf{A}}} \underline{\underline{\mathbf{x}}} + \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\underline{\mathbf{u}}} + \underline{\underline{\mathbf{G}}} \underline{\underline{\mathbf{w}}}) \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} r_u &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} v_i \\ r_i \end{bmatrix} + v \\ (\underline{\underline{\mathbf{y}}} &= \underline{\underline{\mathbf{C}}} \underline{\underline{\mathbf{x}}} + \underline{\underline{\mathbf{v}}}) \end{aligned} \quad (3.40)$$

állapotegyenletet, amelyből (3.38-40) összefüggéseket felhasználva, a MATLAB kalman.m függvényének segítségével kiszámoltam az állapotbecslő optimális $\underline{\underline{\mathbf{L}}}$ visszacsatoló mátrixát:

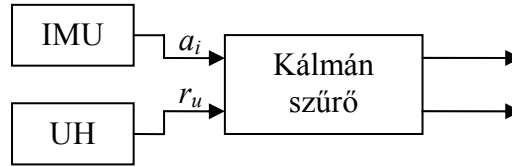
$$\underline{\underline{\mathbf{L}}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Felhasználva a (3.21) és (3.39-41) összefüggéseket az optimális állapotbecslő (58. ábra) állapotegyenlete:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{v}_i \\ \hat{r}_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_i \\ \hat{r}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \\ r_u \end{bmatrix} \\ (\dot{\underline{\underline{\hat{\mathbf{x}}}}} &= (\underline{\underline{\mathbf{A}}} - \underline{\underline{\mathbf{L}}}\underline{\underline{\mathbf{C}}}) \underline{\underline{\hat{\mathbf{x}}}} + \underline{\underline{\mathbf{B}}} \underline{\underline{\mathbf{L}}} \begin{bmatrix} \underline{\underline{\mathbf{u}}} \\ \underline{\underline{\mathbf{y}}} \end{bmatrix}) \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_i \\ \hat{r}_i \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

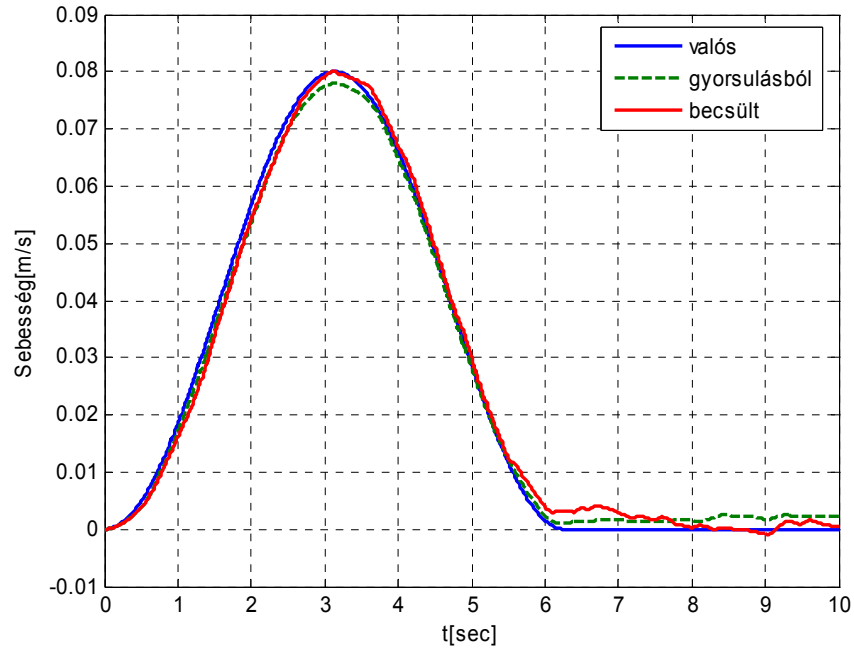
$$(\underline{\hat{y}} = \underline{\underline{C}} \underline{\hat{x}})$$



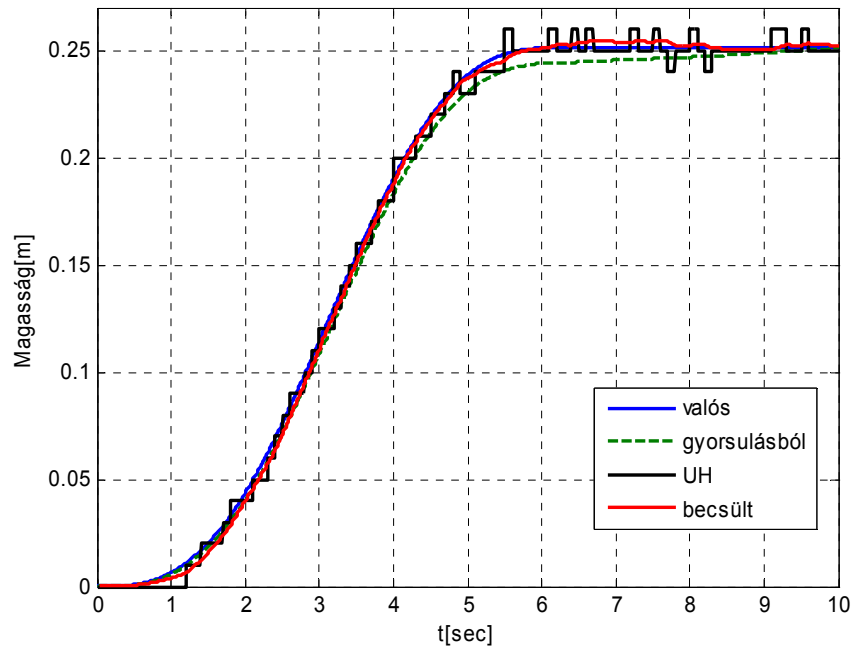
58. ábra. Állapotbecslő hatásvázlata [Készítette: Turóczy A. - MS Word]

A megtervezett Kálmán-szűrő működésének ellenőrzésére MATLAB Simulink környezetben szimulációt végeztem melynek eredményét az 59-60. ábrák szemléltetik.

Fontos megjegyezni, hogy a z_k irányú gyorsulásmérő a \mathbf{K} test-koordináta rendszerbeli $a_{z(K)}$ gyorsulást méri, ami csak kis ($< 20^\circ$) ϕ és θ szögek esetén lesz közelítőleg egyenlő a magasságmérésnél használt inerciarendszerbeli a_z gyorsulással. Ez a korlátozás azonban az ultrahangos magasságmérő miatt is szükséges, mivel a szenzor keskeny iránykarakterisztikája miatt megbízhatóan, csak a helikopter korlátozott ϕ és θ szögkitérése esetén használható. A pontosság érdekében azonban a fedélzeti repülésszabályzó szoftverben – a kiszámított forgatási mátrix segítségével – az inercia-rendszerbeli gyorsulásokat is meghatározom.



59. ábra. Sebesség időfüggvények [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]



60. ábra. Magasság időfüggvények [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

3.5.2 LQR szabályzó tervezése

A négyrotoros helikopter 3.4. fejezetben megadott (3.34), kis szögkitérésekre érvényes lineáris matematikai modelljéből kiindulva, a megfelelő súlyozó mátrixok meghatározása után az LQR szabályzó \mathbf{K} visszacsatolási mátrixa a MATLAB `lqr` .m függvényének segítségével egyszerűen számolható. Az így létrejövő szabályozási rendszer statikus viselkedését azonban nagyban befolyásolja a rendszerparaméterek ismeretének pontossága, valamint a rendszer kimenetét érő zavarok hatása. A statikus hiba elhárítása érdekében ezért a külső visszacsatolási hurokba integrátort célszerű beiktatni. Ezt a módszert tulajdonképpen az állapotváltozók számának bővítésére lehet visszavezetni, bár az új állapotváltozók valójában a szabályzóban keletkeznek.

Az r_x , és r_y állapotváltozóknál nincs értelme integrátor beiktatásának, mivel a jelek a zajos gyorsulásmérésből kerülnek meghatározásra, és ebből adódóan akkumulálódó hibát tartalmaznak. A v_x , v_y , v_z , ϕ , θ , ω_x , ω_y és ω_z állapotváltozóknál szintén nincs szükség integrátorra, mivel az integrál jelek az \mathbf{A} mátrixon történő belső visszacsatolás következtében más állapotváltozókon keresztül hozzáférhetők.

A fenti megfontolások alapján a (3.36) szerinti modellt kiegészítettem két további állapotváltozóval melyekre:

$$\begin{aligned} \dot{r}_z &= r_z \\ \dot{\psi}_i &= \psi \end{aligned} \quad (3.44)$$

Ezzel rendszerem paramétermátrixai, felhasználva (3.36)-ban alkalmazott jelöléseket, az alábbiak lesznek:

$$\begin{array}{c}
 \dot{r}_z \\
 \dot{\psi}_i \\
 \dot{r}_x \\
 \dot{r}_y \\
 \dot{r}_z \\
 \dot{v}_x \\
 \dot{v}_y \\
 \dot{v}_z \\
 \dot{\phi} \\
 \dot{\theta} \\
 \dot{\psi} \\
 \dot{\omega}_x \\
 \dot{\omega}_y \\
 \dot{\omega}_z
 \end{array}
 =
 \underbrace{\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9,7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -9,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{[14 \times 14]}}
 \underbrace{\begin{bmatrix}
 r_z \\
 \psi_i \\
 r_x \\
 r_y \\
 r_z \\
 v_x \\
 v_y \\
 v_z \\
 \phi \\
 \theta \\
 \psi \\
 \omega_x \\
 \omega_y \\
 \omega_z
 \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_{[14 \times 14]}}
 +
 \underbrace{\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 28,6 & 0 & -28,6 \\
 -28,4 & 0 & 28,4 & 0 \\
 0,13 & 0,13 & 0,13 & 0,13
 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{[4 \times 14]}}
 \cdot 10^{-3}
 \underbrace{\begin{bmatrix}
 u_1 \\
 u_2 \\
 u_3 \\
 u_4
 \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}_{[1 \times 4]}}$$

$$\underline{\mathbf{y}}_{[1 \times 14]} = \underline{\mathbf{C}}_{[14 \times 14]} \underline{\mathbf{x}}_{[14 \times 14]} + \underline{\mathbf{D}}_{[4 \times 14]} \underline{\mathbf{u}}_{[1 \times 4]} \quad \underline{\mathbf{C}}_{[14 \times 14]} = \underline{\mathbf{I}} \quad \underline{\mathbf{D}}_{[4 \times 14]} = \underline{\mathbf{0}} \quad (3.45)$$

Az LQR tervezési feladat megoldásához a $\underline{\mathbf{Q}}$ és $\underline{\mathbf{R}}$ súlyozó-mátrixokat is meg kell határozni. Első közelítésben a 3.2.2.2 fejezetben ismertetett reciprok négyzetes szabályt alkalmaztam. Sorozatos szimuláció és paraméterhangolás után az alábbi súlyozó-mátrixokat találtam megfelelőnek⁵⁰:

$$\begin{aligned}
 \underline{\mathbf{Q}} &= \text{diag}(0,01, 0,11, 100, 100, 1, 1, 1, 1, 3,64, 3,64, 0,02, 0,04, 0,04, 0,1) \\
 \underline{\mathbf{R}} &= \text{diag}(8,93, 8,93, 8,93, 8,93) \cdot 10^{-8}
 \end{aligned} \quad (3.46)$$

A MATLAB `lqr` .m program futtatásának eredménye a (3.45-46) egyenletekből származó $\underline{\mathbf{A}}$, $\underline{\mathbf{B}}$, $\underline{\mathbf{Q}}$ és $\underline{\mathbf{R}}$ mátrixok megadásával a

$$\underline{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix}
 0,16 & 0,55 & 23,6 & 0 & 1,85 & 9,7 & 0 & 1,92 & 0 & -18,3 & 1,72 & 0 & -1,7 & 2,61 \\
 0,16 & -0,55 & 0 & 23,6 & 1,85 & 0 & 9,7 & 1,92 & 18,3 & 0 & -1,72 & 1,7 & 0 & -2,61 \\
 0,16 & 0,55 & -23,6 & 0 & 1,85 & -9,7 & 0 & 1,92 & 0 & 18,3 & 1,72 & 0 & 1,7 & 2,61 \\
 0,16 & -0,55 & 0 & -23,6 & 1,85 & 0 & -9,7 & 1,92 & -18,3 & 0 & -1,72 & -1,7 & 0 & -2,61
 \end{bmatrix} \cdot 10^3$$

visszacsatoló mátrix.

⁵⁰ A „diag()” jelölés diagonális mátrixot jelöl, ahol a zárójelben lévő értékek a mátrix főátlójának elemei

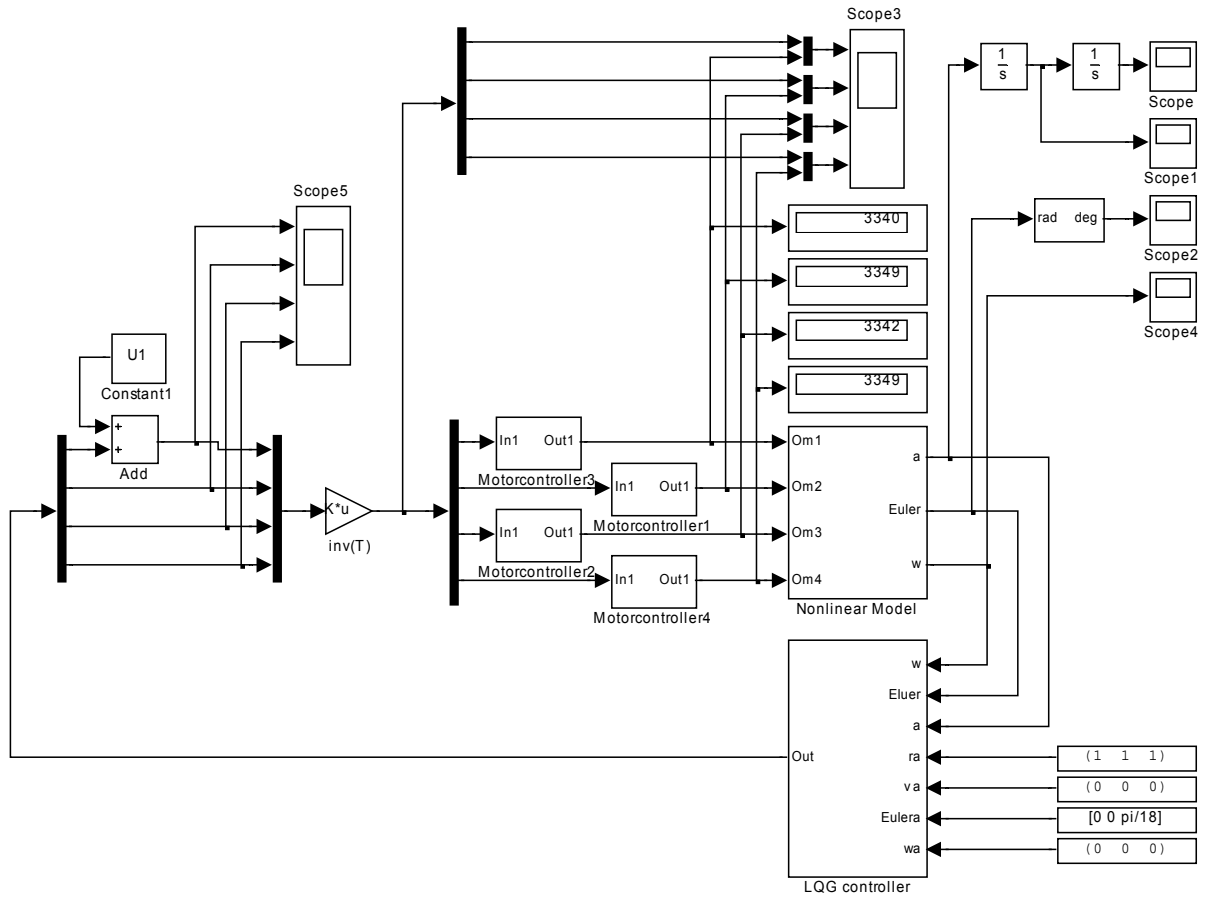
3.5.3 Szimuláció

A fedélzeti repülésszabályozó tervezését nagyban segítette, hogy – felhasználva eddigi eredményeimet – megrajoltam kísérleti rendszerem MATLAB Simulink modelljét. A modellel végzett szimulációk eredményeit felhasználva következtetéseket vonhattam le a rendszerben lezajló folyamatokról és a szabályzó körök minőségi jellemzőiről anélkül, hogy a valóságos rendszer épségét veszélyeztettem volna. Természetesen a szimuláció nem helyettesíti a valós rendszerrel végzett kísérleteket, a megfelelő szabályzó struktúra kialakításának és a paraméterek hangolásának folyamatát azonban nagymértékben felgyorsítja.

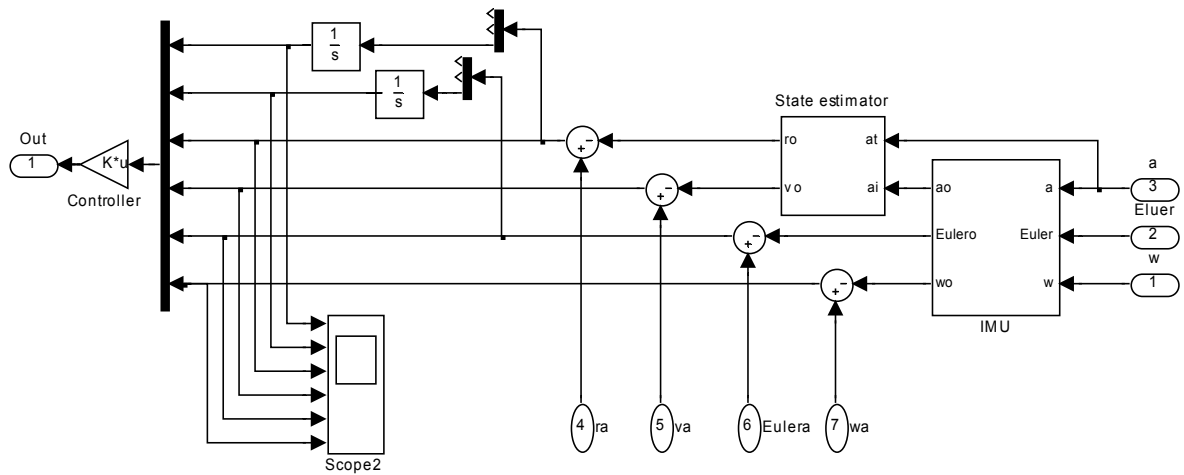
A teljes rendszermodell a 61. ábrán, a szabályzó modellje pedig a 62. ábrán látható. A rendszer

$$\begin{aligned} r_{ax} &= r_{ay} = r_{az} = 1 \text{ m,} \\ v_{ax} &= v_{ay} = v_{az} = 0 \text{ m/s,} \\ w_{ax} &= w_{ay} = w_{az} = 0 \text{ rad/sec,} \\ \phi_a &= \theta_a = 0^\circ, \psi_a = 10^\circ \end{aligned}$$

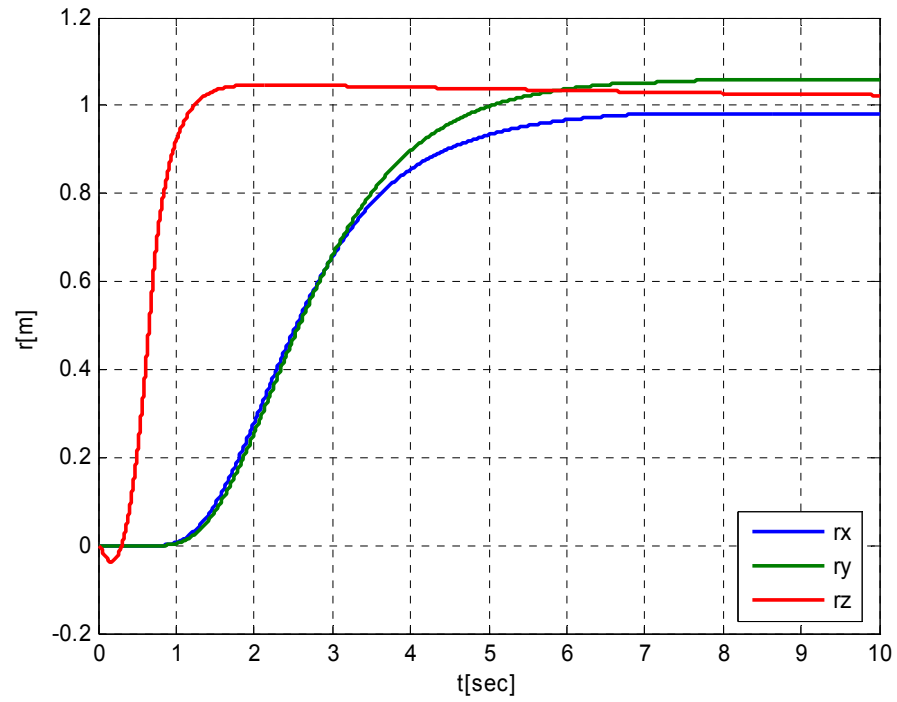
alapjelekre lefuttatott szimulációjának eredményeit a 63-66. ábrák szemléltetik. Hosszabb szimulációs időt választva láthatóvá válik, hogy az r_x , r_y , v_x , v_y jelek – a vártak megfelelően – csak akkumulálódó hibával képesek követni az alapjelet. A szabályzási időt – a motorszabályzónál tapasztaltakhoz hasonlóan – a korlátos motorfeszültség miatt ugyancsak korlátos rotor-szögsebesség határozza meg, ezért a rendszert csak a tápfeszültség növelésével és/vagy a beavatkozó szervek cseréjével lehetne felgyorsítani.



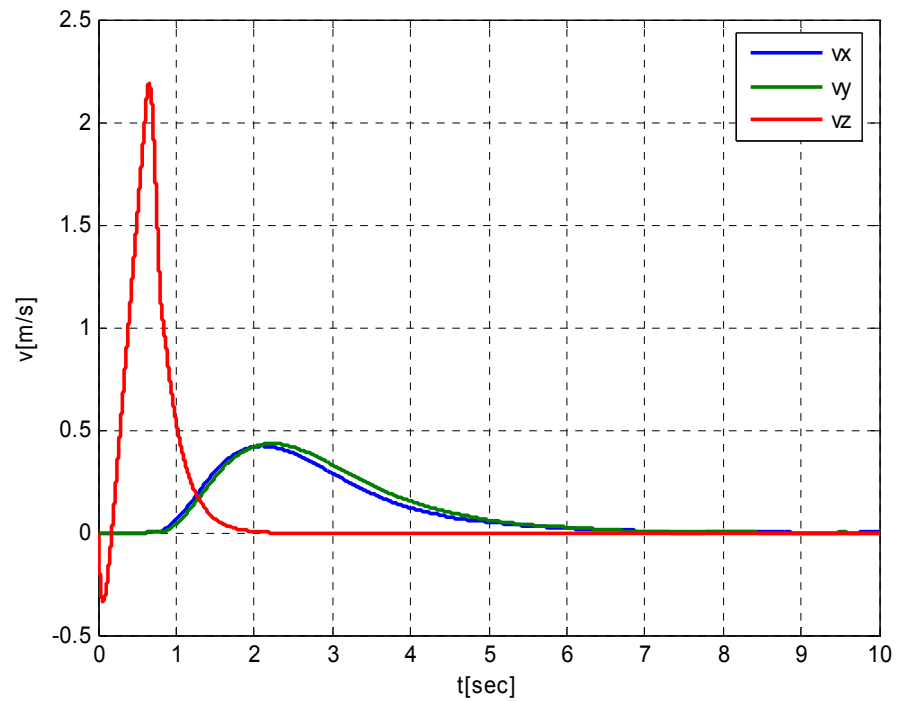
61. ábra. Kísérleti rendszerem Simulink modellje [Készítette: Turóczy A. - Simulink]



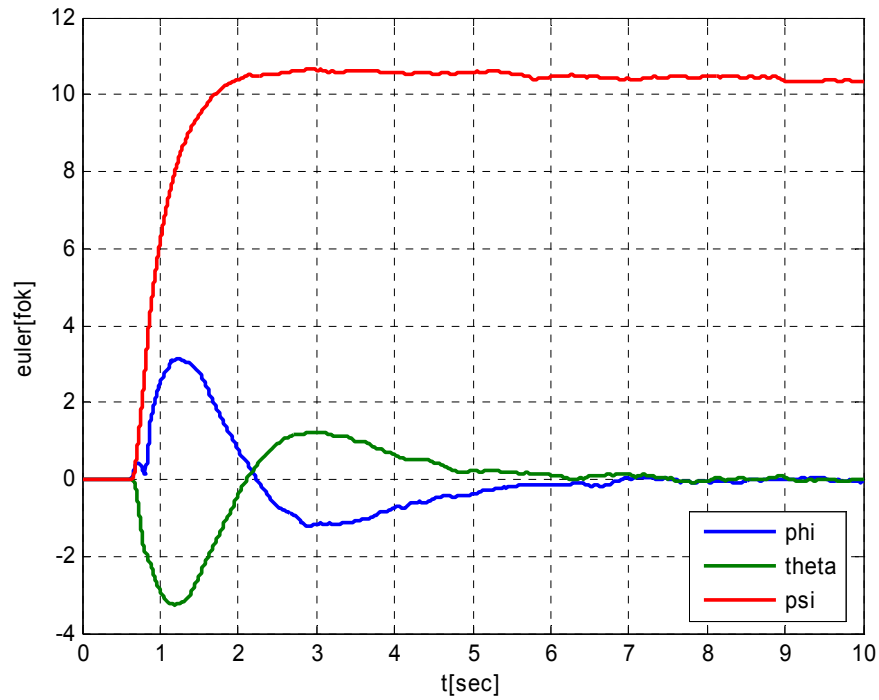
62. ábra. A szabályzó Simulink modellje [Készítette: Turóczy A. - Simulink]



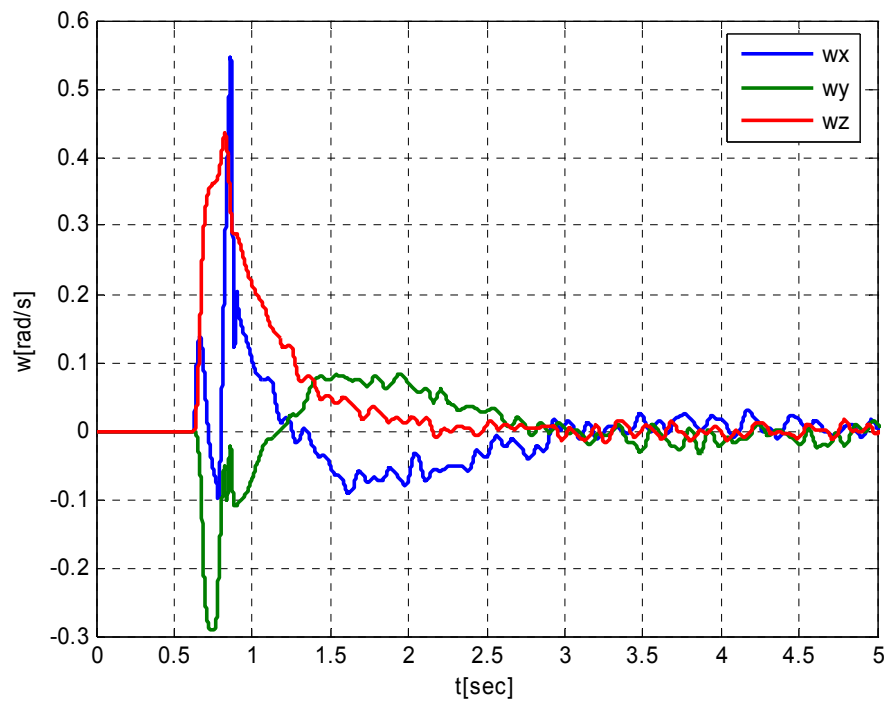
63. ábra. Az r_x , r_y és r_z pozíció időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]



64. ábra. Az v_x , v_y és v_z sebességek időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]



65. ábra. A ϕ , θ és ψ szögek időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]



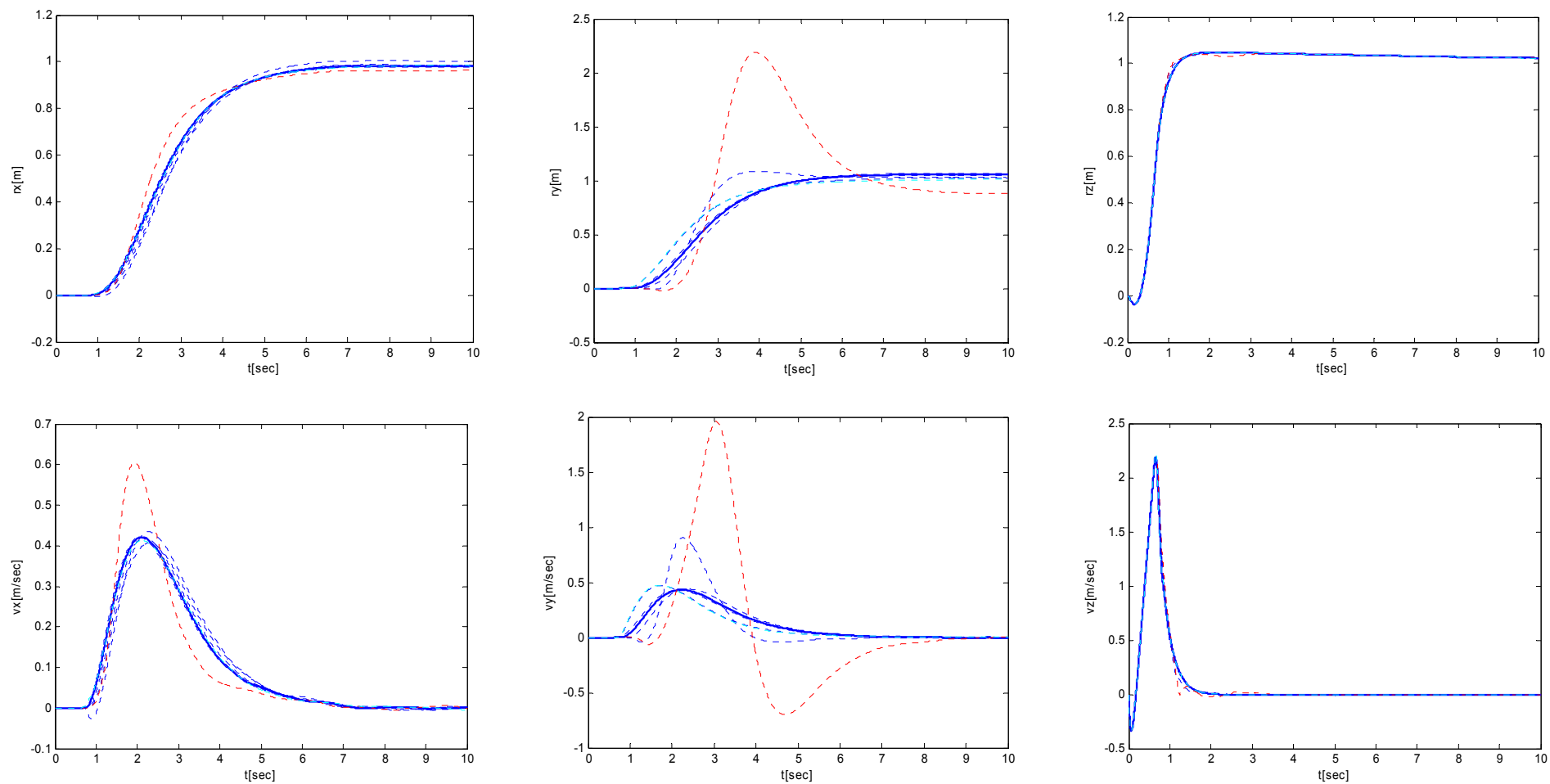
66. ábra. Az ω_x , ω_y és ω_z szögsebességek időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

3.5.4 Paraméter-érzékenységi vizsgálat

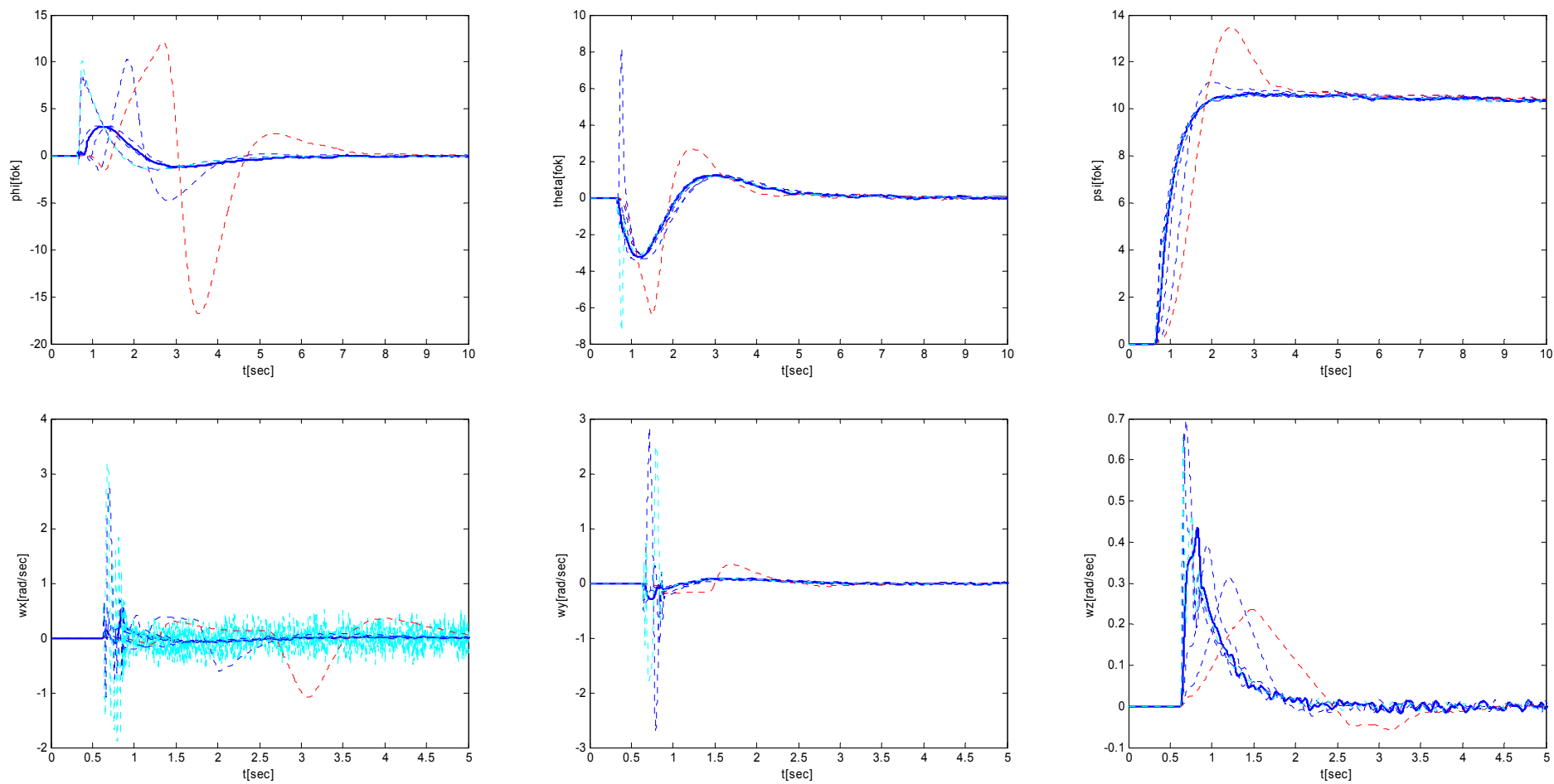
A szabályozó körök kialakításakor a tervező a számítások és kísérletek segítségével meghatározott matematikai modellből indul ki, feltételezve, hogy az megfelelő pontossággal közelíti a valóságban lejátszódó folyamatokat. A modell paramétereit azonban – különféle okok miatt – csak véges pontossággal lehet meghatározni. Felmerülhet ezért a kérdés, hogy a pontatlan modell alapján összeállított valós szabályozási rendszer minőségi jellemzőit mennyire befolyásolják az egyes paraméterbizonytalanságok.

Az értekezés terjedelmi korlátaira való tekintettel az érzékenységi vizsgálatok eredményeit csak a helikopter tehetetlenségi nyomatékainak vonatkozásában ismertetem, bár a megfelelő visszacsatoló mátrix kiválasztásakor egyéb paraméterbizonytalanságok hatását is megvizsgáltam. Ehhez a 3.5.3 fejezethez hasonlóan szimulációkat végeztem. A nemlineáris modellben paraméterként szereplő tehetetlenségi nyomatékokat névleges értékük környezetében ($1/20 \cdot J_{névl}$ -től $20 \cdot J_{névl}$ -ig) változtattam, majd a szimulációk eredményeül adódó időfüggvényeket közös koordináta-rendszerben ábrázolva összehasonlítottam (67-68. ábrák). A névleges értékekkel adódó görbék folytonos, a névlegestől eltérőket pedig szaggatott vonallal jelöltem. Az $1/20 \cdot J_{névl}$ és a $20 \cdot J_{névl}$ tehetetlenségi nyomatékok görbéit rendre világoskék és piros színekkel ábrázoltam.

A vizsgálatok eredményeképpen elmondható, hogy a zárt rendszer akkor is stabil marad az adott bemenő jelek esetén, ha a helikopter fő tehetetlenségi nyomatékainak számításakor egy nagyságrendet tévedünk a valós viszonyokhoz képest. Továbbá a névleges értékkel adódó görbékhez képest csak jelentéktelen változás érzékelhető az $1/2$ -szeres és 2-szeres $J_{névl}$ értékek között. Ennél nagyobb hibára az általam meghatározott tehetetlenségi tenzor esetén nagy valószínűséggel nem kell számítani. Nagyobb hiba esetén azonban, egyes minőségi jellemzők tekintetében a hibával arányos romlás tapasztalható. A vizsgált szélső értékeknél az állapotváltozók többségénél jelentős beállási-idő növekedés és lengés figyelhető meg.



67. ábra. Pozíció és sebesség komponensek különböző tehetetlenségi nyomatékok esetén [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]



68. ábra Euler-szög és szögsebesség komponensek különböző tehetetlenségi nyomatékok esetén [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]

3.6. TESZTREPÜLÉSEK

Már a valós rendszeren (69. ábra) elvégzett első kísérletek alkalmával kiderült, hogy az inerciális mérőegység rendkívül érzékeny a forgó rotorok által keltett rezgésekre, ezért a modult megfelelő rezgéscsillapító anyagok (gumi, habzivacs) segítségével rögzítettem a helikopter sárkányszerkezetéhez. Az álló rotorokkal, rezgésmentes állapotban elvégzett mérések eredményeihez képest, forgó rotoroknál – a rezgéscsillapítás ellenére – jelentős zaj és mérési-hiba növekedést tapasztaltam. A zajos gyorsulásmérés miatt a sebesség és pozíció adatokban keletkező hiba elfogadhatatlanul nagynak adódott, ezért arra a következtetésre jutottam, hogy az x - y irányú helyzetszabályozást további szenzorok (pl. fedélzeti kamera+képfeldolgozás) alkalmazása nélkül kísérleti rendszeremmel nem lehet megvalósítani.

A függeszkedéshez közeli repülési állapot stabilizálásához a z magasság, a ϕ bedöntési-, a θ bólintási és ψ irányszögek szabályozását tűztem ki célul. Ehhez a 3.5.2 fejezetben meghatározott szabályozó struktúrát át kellett alakítanom. Lineáris rendszermodelllem a következőképpen módosult:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{r}_{iz} \\ \dot{r}_z \\ \dot{v}_z \\ \dot{\phi}_i \\ \dot{\theta}_i \\ \dot{\psi}_i \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix}}_{\mathbf{\dot{x}}_{[1 \times 12]}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{[12 \times 12]}} \underbrace{\begin{bmatrix} r_{iz} \\ r_z \\ v_z \\ \phi_i \\ \theta_i \\ \psi_i \\ \phi \\ \theta \\ \psi \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_{[1 \times 12]}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 28,6 & 0 & -28,6 \\ -28,4 & 0 & 28,4 & 0 \\ 0,13 & 0,13 & 0,13 & 0,13 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{[4 \times 12]}} \cdot 10^{-3} \underbrace{\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}_{[1 \times 4]}} \quad (3.47)
 \end{aligned}$$

$$\underline{\mathbf{y}}_{[1 \times 12]} = \underline{\mathbf{C}}_{[12 \times 12]} \underline{\mathbf{x}}_{[1 \times 12]} + \underline{\mathbf{D}}_{[4 \times 12]} \underline{\mathbf{u}}_{[1 \times 4]} \quad \underline{\mathbf{C}}_{[14 \times 12]} = \underline{\mathbf{I}} \quad \underline{\mathbf{D}}_{[4 \times 12]} = \underline{\mathbf{0}}$$

Az r_{iz} , ϕ_i , θ_i és ψ_i állapotváltozókat a 3.5.2 fejezetben ismertetett elvek alapján, az r_z , ϕ , θ és ψ állapotváltozók statikus alapjel-követési hibájának csökkentése érdekében vezetem be. Az LQR tervezési feladat megoldásához a $\underline{\mathbf{Q}}$ és $\underline{\mathbf{R}}$ súlyozó-mátrixokat ismét

meg kellett határozni. Sorozatos szimuláció, paraméterhangolás és próbarepülés után végül az alábbi súlyozó-mátrixokat találtam megfelelőnek:

$$\underline{\underline{\mathbf{Q}}} = \text{diag}(0.001, 0.004, 0.1, 0.02, 0.02, 0.0001, 4.05, 4.05, 0.0016, 1.01, 1.01, 0.0016) \cdot 10^3 \quad (3.48)$$

$$\underline{\underline{\mathbf{R}}} = \text{diag}(8.93, 8.93, 8.93, 8.93) \cdot 10^{-8}$$

A MATLAB `lqr` .m program futtatási eredménye a (3.47-48) egyenletekből származó $\underline{\underline{\mathbf{A}}}$, $\underline{\underline{\mathbf{B}}}$, $\underline{\underline{\mathbf{Q}}}$ és $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$ mátrixok megadásával a

$$\underline{\underline{\mathbf{K}}} = 1 \begin{bmatrix} 0.016 & 0.082 & 0.168 & 0 & -0.11 & 0.005 & 0 & -1.55 & 0.029 & & -0.7533 & 0.039 \\ 0.016 & 0.082 & 0.168 & 0.11 & 0 & -0.005 & 1.55 & & -0.029 & 0.753 & 0 & -0.039 \\ 0.016 & 0.082 & 0.168 & 0 & 0.11 & 0.005 & 0 & 1.55 & 0.029 & & 0.7533 & 0.039 \\ 0.016 & 0.082 & 0.168 & -0.11 & 0 & -0.005 & -1.55 & & -0.029 & -0.753 & 0 & -0.039 \end{bmatrix} \cdot 10^5$$

visszacsatoló mátrix.

A $\underline{\underline{\mathbf{K}}}$ -val visszacsatolt zárt szabályozási rendszer néhány másodpercig képes a helikoptert függeszkedés közeli repülési állapotban beavatkozás nélkül stabilizálni. Mivel rendszerem nem képes megfelelő pontossággal érzékelni az x - y irányú gyorsulás lassú megváltozását, az x - y irányú pozíció „megúszását” a távirányítón keresztül, a ϕ és θ alapjelek módosításával kézzel kompenzálni szükséges. A különböző magasságokban végrehajtott próbarepüléseket összehasonlítva elmondható, hogy kis ($< 0,5$ m) magasságokban a rotorlapátok által keltett turbulens légáramlatok zavaró hatása miatt gyakrabban kell a távirányítóval beavatkozni. A magasság és az irányszög tekintetében nincs szükség kézi korrekcióra. (A programok forráskódja az értekezés terjedelmi korlátaira való tekintettel CD melléklet formájában került bemutatásra.)



69. ábra. Kísérleti négyrotoros pilóta nélküli helikopter [Fényképezte: Turóczy A.]

KÖVETKEZTETÉSEK

A klasszikus szabályozásmélet tanulmányozását követően arra a következtetésre jutottam, hogy a helikopter meghajtásául szolgáló **elektromotorok fordulatszám szabályozójának előzetes tervezéséhez a klasszikus soros szabályzó-tervezési eljárást fogom választani**. Mivel az elektromotoroknál nem használok fordulatszámmerést, az aktuális **fordulatszámot** a motor modelljének ismeretében, **a motoráramból kell megbecsülni**. A fordulatszám-szabályzó így a motoráramról kap visszacsatoló jelet. A szabályzási-kör működési sebességének a korlátos motorfeszültség szab határt. A MATLAB Simulink-ben elvégzett szimulációk alapján a **megtervezett PI motorszabályzót megfelelőnek találtam**.

A modern szabályozásmélet tanulmányozását követően arra a következtetésre jutottam, hogy a **helikopter fedélzeti automatikus repülésszabályozójának előzetes tervezéséhez az LQG módszert választom**. A helikopter nemlineáris matematikai modelljéből, egyszerűsítéseket és elhanyagolásokat alkalmazva **meghatároztam kísérleti rendszerem kis bedöntési és bólintási szögekre érvényes lineáris matematikai modelljét**, amelyhez így lineáris szabályzó tervezhető.

A helikopter lineáris modelljében szereplő állapotváltozók közül, nem mindegyiket lehet közvetlenül mérni, ezért a teljes állapot-visszacsatolás megvalósításához **állapotbecslést kellett alkalmaznom**. A **magasságméréshez Kálmán-szűrőt terveztem**, amely az ultrahangos magasságmérő és az inerciális mérőegység méréseit használja fel az optimális becsléshez.

Az irányszögben és a magasságban keletkező statikus hiba megszüntetése érdekében **az állapotvektort további két állapotváltozóval kell kibővíteni**. A többi, közvetlenül nem mérhető állapotváltozónál tapasztalható alapjel-követési hibát további szenzorok alkalmazása nélkül nem lehet kiküszöbölni. **A megtervezett LQG szabályzót**, a MATLAB Simulink-ben elvégzett szimulációk alapján **megfelelőnek találtam**. A tehetlenségi nyomatékok tekintetében elvégzett érzékenységi vizsgálatok alapján elmondható, hogy **a szabályzó viszonylag nagy paraméterbizonytalanság esetén is képes a rendszert stabilizálni**. A tehetlenségi nyomatékok számításakor általam vétett hiba a zárt rendszer minőségi jellemzőiben nem okoz észrevehető romlást.

A valós rendszerrel elvégzett mérések és kísérletek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy **kísérleti rendszeremmel az x - y pozíció szabályozásával nem valósítha-**

tó meg stabil repülésszabályozás. Ezért az előzetesen szimulációval meghatározott, és megfelelőnek talált **szabályzó struktúrát át kellett alakítanom.** Szabályozott jellemzőknek az r_z , ϕ , θ és ψ állapotváltozókat választva, a korábbi szabályozótervezésnél használt elveket követve, valamint a szimulációk és próbarepülések mérési eredményeit felhasználva **olyan szabályzó struktúrát sikerült kialakítanom, amely képes a valós rendszer repülését függeszkedés közeli üzemmódban stabilizálni.**

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEIM

A négyrotoros elrendezésű pilóta nélküli helikoptert a lebegés, a helyből fel- és leszállás képessége, a robosztus konstrukció, a csendes működés alkalmassá teszi katonai hírszerzési, felderítési és felügyeleti feladatok ellátására.

Automatikus repülésszabályzó rendszer tervezéséhez meg kell határozni egy matematikai modellt, amely a helikopter valós működését kellő pontossággal közelíti. A szimulációk és a sikeres tesztrepülések eredményei alapján kimondható, hogy az általam kidolgozott módszerek alkalmasak a sárkányszerkezet tehetetlenségi tenzorának, és az elektromotorok dinamikai modelljének számítására, valamint a helikopter általam meghatározott nemlineáris matematikai modellje megfelelő pontossággal közelíti a valós rendszerben lejátszódó folyamatokat.

Az automatikus repülési funkciók megvalósítása érdekében a helikopter mozgásállapotát megfelelő pontossággal és időbeli felbontással szükséges mérni. A gyakorlatban ezt a feladatot szenzorok és mérőberendezések, valamint ezek jeleit feldolgozó digitális számítógép segítségével oldják meg. Ez alapján arra a következtetésre jutottam, hogy saját kísérleti rendszeremben kisméretű inerciális és egyéb navigációs szenzorokat, valamint ezek jeleit feldolgozó digitális áramköröket fogok használni.

A tesztrepülések eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az általam megtervezett és megépített fedélzeti hardver és kifejlesztett szoftver eszközök alkalmasak négyrotoros pilóta nélküli helikopter repülésszabályzó funkcióinak ellátására. A teljesen autonóm működés – például útvonalkövetés – megvalósításához azonban szükség van olyan további szenzorok beépítésére, melyekkel az x - y pozíció adatokat megfelelő pontossággal lehet mérni.

A nemlineáris modell segítségével meghatároztam a helikopter kis szögkitérésekre érvényes lineáris matematikai modellje. A szimulációk alapján a lineáris matematikai modellhez PI motorszabályzó és LQG repülésszabályzó tervezhető, amellyel a rendszer képes a helikopter repülését kis bedöntési és bólintási szögek esetén stabilizálni. A kísérleti rendszerrel megvalósított zárt szabályozási kör minőségi jellemzőit csak további szenzorok alkalmazásával, illetve a meghajtó-rendszer cseréjével lehet javítani.

A valós rendszerrel elvégzett mérések és kísérletek eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a függeszkedés közeli repülési állapot stabilizálásához az előzetesen meghatározott szabályozó struktúrát – az általam alkalmazott fedélzeti szenzorok korlátai miatt – át kell alakítanom. A korábban alkalmazott szabályozótervezési folyamatot követve, valamint a tesztrepülések eredményeit felhasználva az átalakított szabályozó struktúrával sikerült olyan zárt rendszert kialakítanom, amely képes kísérleti négyrotoros rendszerem repülését stabilizálni.

TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEIM

1. A fizika törvényszerűségeiből kiindulva, meghatároztam kísérleti négyrotoros helikopterem nemlineáris matematikai modelljét, benne a sárkányszerkezet tehetetlenégi tenzorát és a helikopter meghajtását szolgáló elektromotorok dinamikus egyenleteit. Számításaim helyességét kísérleti úton igazoltam.
2. Saját tervezésű, illetve kereskedelmi forgalomban beszerezhető robotpilóta rendszerek tanulmányozása során szerzett tapasztalataimat felhasználva, megterveztem a négyrotoros helikopter fedélzeti automatikus repülésirányító rendszerét, majd a szenzorok és a számítási teljesítménnyel szemben támasztott követelmények figyelembe vételével megépítettem egy saját kísérleti rendszerem irányítására alkalmas robotpilóta rendszert.
3. A nemlineáris rendszermodellből kiindulva számítások és szimuláció segítségével, elhanyagolásokat és közelítéseket alkalmazva meghatároztam a kísérleti helikopter kis bedöntési és bólintási szögekre érvényes lineáris matematikai modelljét.
4. Figyelembe véve a meghatározott lineáris modell ismert bizonytalansági tényezőit, MATLAB valamint MATLAB Simulink környezet segítségével repülésszabályzót terveztem, mely az általam megvalósított fedélzeti elektronikai rendszerben implementálva képes a kísérleti négyrotoros helikoptert függeszkedés közeli repülési üzemmódban stabilizálni. A rendszer ezzel megfelelően stabil platformot szolgáltat fedélzeti optikai szenzorok fogadására, valamint alkalmas optikai felderítési feladatok ellátására.

AJÁNLÁSAIM

Tekintettel arra, hogy négyrotoros pilóta nélküli helikopter számos polgári és katonai alkalmazásban hasznosítható, javaslom a bemutatott kísérleti négyrotoros rendszer hazai továbbfejlesztését. A megbízhatóságban és a minőségi jellemzőkben jelentős javulás érhető el háromfázisú szenzornélküli hajtás, képfeldolgozáson alapuló helyzetmeghatározás, GPS, barometrikus magasságmérés stb. alkalmazásával. Ezen kívül javaslom a habszivacs védőkeret szilárdabb anyagból történő kialakítását és a teljes mechanikai szerkezet megerősítését. E témakörök további kutatások tárgyát képezhetik.

Budapest, 2008. június 4.

Turóczi Antal

PUBLIKÁCIÓS JEGYZÉK

Lektorált folyóirat cikkek

1. **Turóczy Antal:** *Önjáró robotok fedélzeti helyzet-meghatározó eszközei*, Repüléstudományi közlemények, XV. évfolyam 35. szám, p185-194, 2003.
2. **Turóczy Antal:** *Pilóta nélküli légi járművek navigációs berendezései*, Bolyai Szemle, 2006. 1. szám p179-193.
3. **Turóczy Antal:** *Katonai alkalmazású robotok villamos meghajtása*, GÉP folyóirat, LVII. évfolyam, 2006/5. p44-52.
4. **Turóczy Antal:** *Négyrotoros pilóta nélküli helikopter fedélzeti automatikus repülésszabályzó rendszerének tervezése*, Hadmérnök, Különszám: Robothadviselés 6, <http://zrinyi.zmne.hu/hadmernok/>
5. **Turóczy Antal:** *Négyrotoros pilóta nélküli helikopter fedélzeti elektronikai rendszerre*, Hadmérnök Különszám: Robothadviselés Tudományos Konferencia 2007. <http://zrinyi.zmne.hu/hadmernok/>
6. **Turóczy Antal:** *Jelfeldolgozás digitális műholdas kommunikációs rendszerekben*, Hadmérnök III. évfolyam 1. szám 2008. március, <http://zrinyi.zmne.hu/hadmernok/>
7. **Turóczy Antal:** *Négyrotoros pilóta nélküli helikopter fedélzeti repülésszabályzójának előzetes tervezése LQG módszerrel*, Repüléstudományi közlemények különszám: Repüléstudományi konferencia 2008.

Lektorált idegen nyelvű folyóirat cikkek

1. **Imre Makkay, Antal Turóczy:** *Onboard Electronics of UAVs*, AARMS, Volume 5, Issue 2, 2006. p237-243.

TUDOMÁNYOS ELŐADÁSOK

Magyar nyelvű előadások

1. **Turóczy Antal:** *Önjáró robotok fedélzeti elektronikai rendszerei*, Százéves a Magyar Géprepülés konferencia, Szolnok, 2003. Április 4.
2. **Turóczy Antal:** *Pilóta nélküli légi járművek navigációs berendezései*, Robothadviselés 5. tudományos konferencia, Budapest, 2005.
3. **Turóczy Antal:** *Négyrotoros pilóta nélküli helikopter fedélzeti automatikus repülés-szabályzó rendszerének tervezése*, Robothadviselés 6. Tudományos Szakmai Konferencia, Budapest, 2006.
4. **Turóczy Antal:** *Négyrotoros pilóta nélküli helikopter matematikai modelljének meghatározása*, Tavasz Szél konferencia-kiadvány 2007 p134-143, Doktoranduszok Országos Szövetsége, 2007.
5. **Turóczy Antal:** *Négyrotoros pilóta nélküli helikopter fedélzeti elektronikai rendszere*, Robothadviselés Tudományos Konferencia 2007. november 27.

Idegen nyelvű előadások

1. **Dr. Imre Makkay, Antal Turóczy:** *Hungarian Solution for Advanced Tactical UAVs*, in: UAV and UCAV Symposium „Threats and Possibilities in Future Networked Defences” MAY 22nd and 23rd 2003 in Stockholm, Sweden, CD melléklet
2. **Dr. Imre Makkay, Andras Molnar, Antal Turóczy:** *Stabilization concepts of UAVs*, in: 9th UAVNET Meeting 26-27 January 2004, Amsterdam, http://www.uavnet.com/DL/Document_Library/Amsterdam_Meeting/UAV_stabilization_Makkay.pdf
3. **Miklós Koncz, Antal Turóczy:** *Autopilot applications for different UAV airframes*, in: 11th UAVNET Meeting 6-7 September 2004 in Budapest, Hungary, http://www.uavnet.com/DL/Document_Library/Budapest_Meeting/Autopilot_Koncz.pdf

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] **Makkay I., Várhegyi I.:** *Információs korszak, információs háború, biztonságkultúra*, OMIKK, Budapest, 2000. ISBN: 963-593-238-3
- [2] **Haig Zs., Várhegyi I.:** *Hadviselés az információs hadszíntéren*, Zrínyi Kiadó, Budapest, 2005. ISBN: 963-327-391-9
- [3] **Kovács L.:** *Az elektronikai felderítés korszerű eszközei, eljárásai és azok alkalmazhatósága a magyar honvédségben*, PhD. értekezés, ZMNE, 2003.
- [4] **Gácsér Z.:** *Napjaink katonai műveleteiben alkalmazott pilóta nélküli repülőeszközök*, Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben, Konferencia kiadvány (CD), ZMNE, Szolnok, 2005.
- [5] **Palik M.:** *A harcászati pilóta nélküli repülő eszközök képességei*, Repüléstudományi közlemények, Különszám, 2006.
- [6] *Black Widow*, Letöltve: 2008-01-10.
<http://www.uavforum.com/vehicles/developmental/blackwidow.htm>
- [7] **Vincze Gy.:** *MIKADO*, Letöltve 2007-10-06.
http://honvedelem.hu/files/9/8723/mikado_vincze_gyula_alez.pdf
- [8] **G. M. Saggiani, B. Teodorani:** *Rotary wing UAV potential applications: an analytical study through a matrix method*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Volume 76, Number 1, p6-14, 2004.
- [9] *Unmanned Aerial Vehicle: Development Trends and Technology Forecast*, Letöltve: 2008-01-10. <https://www.dsta.gov.sg/index.php/DSTA-2005-Chapter-2/Page-4.html>
- [10] *Cypher*, Letöltve: 2008-01-10.
<http://www.uavforum.com/vehicles/developmental/cypher.htm>
- [11] **Allied Aerospace:** *The "iSTAR" UAV System*, Letöltve: 2008-01-10.
<http://www.alliedaerospace.com/pdfs/UAV%20Brochure.pdf>
- [12] *Vigilante UAV*, Letöltve: 2008-01-10.
<http://www.globalsecurity.org/intell/systems/vigilante.htm>
- [13] *Eagle Eye*, Letöltve: 2008-01-10.
<http://www.uavforum.com/vehicles/developmental/eagleeye.htm>

- [14] *'Flying Platform' project at the University of Exeter*, Letöltve: 2008-01-10.
http://www.projects.ex.ac.uk/uav/j_muelaner
- [15] **Kovács L., Ványa L.:** *Pilóta nélküli repülőgépek a terrorizmus elleni harcban*, Pilóta nélküli és szállító repülőgépek katonai alkalmazhatósága, Repüléstudományi közlemények különszám, 2007.
- [16] **Szegedi P.:** *Repülésszabályzó rendszerek szabályozóinak számítógépes analízise és szintézise*, PhD értekezés, 2005.
- [17] **M. W. McKee:** *VTOL UAVs Come of Age: US Navy Begins Development of VTUAV*, Letöltve: 2008-01-10. <http://www.vtol.org/uavpaper/NavyUAV.htm>
- [18] **Murphy D., Cycon J.:** *Applications for mini VTOL UAV for law enforcement*, Letöltve: 2007-02-05. <http://www.spawar.navy.mil/robots/pubs/spie3577.pdf>
- [19] *Sojka UAV*, <http://www.lompraha.cz/images/foto/vtulapvo/sojka/36.jpg>
- [20] **Molnár A.:** *A polgári és katonai robotjárművek fejlesztésében alkalmazott új eljárások és technikai megoldások*, PhD értekezés, ZMNE, 2005.
- [21] **Koncz M.:** *Célrepülőgépek alkalmazásának és elektronikai rendszereinek vizsgálata*, PhD értekezés tervezet, ZMNE, 2008.
- [22] **Stone R.H., Clarke G.:** *The T-Wing: A VTOL UAV for Defense and Civilian Applications*, Letöltve: 2007-02-05.
http://www.aeromech.usyd.edu.au/uav/twing/pdfs/UAVAustConference_T_Wing_1_final.pdf
- [23] **Leishmann, Gordon:** *A History of Helicopter Flight*, Letöltve: 2007-02-05.
<http://www.glue.umd.edu/~leishman/Aero/history.html>
- [24] **Cradle of Aviation:** Letöltve: 2007-02-05.
<http://www.cradleofaviation.org/exhibits/jet/quadrotor/quad.html>
- [25] **Diehl BGT Defense GmbH & Co KG:** *System Description SensoCopter*, System description, 2006.
- [26] **RC Toys**, Letöltve: 2007-02-05. <http://www.rc toys.com/rc-products-catalog/RC-HELICOPTERS-DRAGANFLYER-VTI.html>
- [27] **Csizmadia, Nádori:** *Mechanika Mérnököknek: Mozgástan*, Nemzeti tankönyvkiadó, 1997. ISBN: 963-19-2353-3
- [28] **Gilber, Sólyom:** *Fizika mérnököknek*, Műegyetemi kiadó, 1994. ISBN: 963-420-443-0

- [29] **Pacher:** *Fizika*, Kézirat, Budapesti Műszaki Egyetem, Letöltés: 2007-02-05, http://bme.ysoft.net/2_felev/Fizika_C1/pacher/
- [30] **C. P. Fritzen:** *Dynamics of machines and systems*, Lecture notes, Universitat Siegen, Utolsó letöltés: 2007-02-05, <http://www3.uni-siegen.de/fb11/imr3/download/dynmachsys.html.en?lang=en>
- [31] **V. P. Stokes:** *The mass moment of inertia*, Systems and Control dept., Uppsala University, Sweden.
- [32] **Schmidt I., Vincze Gyné., Veszprémi K.:** *Villamos szervó és robothajtások*, Műegyetemi Kiadó, 2000. ISBN: 963-420-642-5
- [33] **Chiasson, J:** *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*, Wiley, 2005., ISBN-987-0-471-68449-7
- [34] **P. McKerrow:** *Modeling the Draganflyer four-rotor helicopter*, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation New Orleans, LA, April 2004. Letöltve: 2007-02-05. <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1099&context=infopaper>
- [35] **P. Pounds, R. Mahony, J. Gresham:** *Towards Dynamically-Favourable Quad-Rotor Aerial Robots*, Australian National University, Canberra, Australia, Letöltve: 2007-02-05. <http://www.araa.asn.au/acra/acra2004/papers/pounds.pdf>
- [36] **A. Tayebi, S. McGilvray:** *Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 14, No. 3, May 2006. Letöltve: 2007-02-05. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/87/34103/01624481.pdf>
- [37] **S. Bouabdallah, A. Noth, R. Siegwart:** *PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor*, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland, Letöltve: 2007-02-05. <http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/330.pdf>
- [38] **M. Chen, M. Huzmezan:** *A Combined MBPC/ 2 DOF H_∞ Controller for a Quad Rotor UAV*, University of British Columbia, Vancouver, Letöltve: 2007-02-05. <http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=406&gTable=Paper&gID=11130>
- [39] **E. Altug, J. P. Ostrowski, C. J. Taylor:** *Quadrotor Control Using Dual Camera Visual Feedback*, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003, Letöltve: 2007-02-05. <http://www2.itu.edu.tr/~altuger/Documents/Papers/ICRA2003.pdf>

- [40] **Wagtendonk, W. J.:** *Principles of Helicopter Flight*, ISBN: 1560272171
- [41] **Turóczy A.:** *Katonai alkalmazású robotok villamos meghajtása*, Gép folyóirat, 2006. p44-52.
- [42] **Turóczy A.:** *Onboard Electronics of UAVs*, AARMS, Vol.5. No.2. 2006. p237-243.
- [43] **Ballard Power Systems:** Letöltve: 2007-09-15.
http://www.ballard.com/About_Ballard/News_Events_Press_Room/News_and_Events/Technology_in_the_News/Default.htm
- [44] **T. Hamel, R. Mahony, R. Lozano and J. Ostrowski:** *Dynamic modeling and configuration stabilization for an X4-flyer*, In Proc. of IFAC World Congress, Barcelona, Spain, 2002. Letöltve: 2007-09-15.
http://www.quanser.com/english/downloads/products/X4flyer_Hamel_2012.pdf
- [45] **Waslander, Hoffmann, Jang:** *Multi-Agent Quadrotor Testbed Control Design*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005. Letöltve: 2007-09-15.
http://www.eecs.berkeley.edu/~tomlin/papers/conferences/whjt05_iros.pdf
- [46] **Bouabdallah, S., Murrieri, P., and Siegwart, R.:** *Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor*, ICRA, New Orleans, April 2004. Letöltve: 2007-09-15.
<http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/325.pdf>
- [47] **S. Rönback:** *Development of a INS/GPS navigation loop*, Master's thesis, Lulea University of technology, 2000.
- [48] **S. H. Stovall:** *Basic Inertial Navigation*, Naval Air Warfare Center Weapons Division, 1997. Letöltve: 2007-09-15.
<http://www.fas.org/spp/military/program/nav/basicnav.pdf>
- [49] **Turóczy A.:** *Pilóta nélküli légi járművek navigációs berendezései*, Bólyai szemle, 2006. I. szám. p179-193.
- [50] **Grewal, Weill, Andrews:** *Global Positioning Systems, Inertial, Navigation, and Integration*, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [51] **D. Baraff:** *An introduction to physically based modeling*, Robotocs Institute, Carnegie Mellon University, 1997., Letöltés: 2007-02-05,
<http://www.cs.cmu.edu/~baraff/sigcourse/notesd2.pdf>
- [52] **Xsens Technologies:** *MTi and MTx User Manual and Technical Documentation*, Enschede, 2005.

- [53] **Mathworks, Inc.:** *Matlap 7.0 Release 14 Help*, 2004.
- [54] **Bognár G.:** *Testmodellézés és 2D rajzolás CADKEY-vel*, SZÁMALK Kiadó 1999.
- [55] **Leishman:** *Principles of Helicopter Aerodynamics*, Cambridge University Press 2006., ISBN-10: 0521858607
- [56] **MicroPilot Inc.:** *MicroPilot MP2028g*, Installation and Operation Guide, Manitoba Canada, 2005. Letöltés: 2007-02-05
http://spacegrant.colorado.edu/boulder/past/Peregrine05032007/Documentation/MicroPilot_Autopilot_Manual.pdf
- [57] **Cloud Cap Technology:** *Piccolo System User Guide*, Hood River, 2004.
Letöltés: 2007-02-05.
<http://www.cloudcaptech.com/download/Piccolo/Piccolo%20System%20Software/Version%201.3.0/Docs/Piccolo%20User's%20Guide.pdf>
- [58] **O-NAVI, LLC:** *6 Degree-of-Freedom MEMS IMU / GPS Autopilot Module*, Specifications, Letöltés: 2007-02-05. http://www.o-navi.com/phoenix_ax.htm
- [59] **V. Gavrilets, A. Shterenberg, M. A. Dahleh, E. Feron,** *Avionics System for a Small Unmanned Helicopter Performing Aggressive Maneuvers*, M.I.T., Cambridge, MA, Letöltve: 2007-02-05.
<http://web.mit.edu/~feron/Public/www/DASC.pdf>
- [60] **S. D. Hanford, L. N. Long, J. F. Horn:** *A Small Semi-Autonomous Rotary-Wing Unmanned Air Vehicle*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Info-tech@Aerospace Conference, Paper No. 2005-7077, Letöltve: 2007-02-05.
<http://www.personal.psu.edu/lnl/papers/aiaa20057077.pdf>
- [61] **R. Barclay:** *A Generic Simulator for Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicles*, Final Report for COM3021 Undergraduate Dissertation submitted on 4th May 2005, University of Sheffield, Letöltve: 2007-02-05.
<http://www.dcs.shef.ac.uk/intranet/teaching/projects/archive/ug2005/pdf/u0rb.pdf>
- [62] **Szabolcsi R.:** *A repülőgép-vezető repülésbiztonság szempontjából kritikus paramétereinek meghatározása*, Debreceni Műszaki Közlemények, V. évf., 2006/3. szám, HU ISSN 1587-9801, (13-24) o., Debreceni Egyetem, Műszaki Főiskolai Kar, 2006.

- [63] **Szabolcsi R.:** *A repülőgép-vezető kritikus paramétereinek komplex vizsgálata az oldalirányú irányítási csatornában*, Repüléstudományi Közlemények, HU ISSN 1417-0604, XVIII. évf., 38. szám, 2006/1, (97-117) o., 2006.
- [64] **E. v. Hinueber:** *If you investigate in an inertial measurement system what technical data you should analyse and compare before making your decision*, iMAR GmbH, 2005, Letöltve: 2007-02-05. http://www.imar-navigation.de/beispiele/decision_assistant.pdf
- [65] **iMAR GmbH**, *iDIS-FMS, Configuration and Usage*, iMAR GmbH, Im Reihersbruch 3, D-66386 St. Ingbert, Letöltve: 2007-02-05. http://www.imar-navigation.de/download/dis_fms_doc_en.pdf
- [66] **X. Niu, N. El-Sheimy:** *The Development of a Low-cost MEMS IMU/GPS Navigation System for Land Vehicles Using Auxiliary Velocity Updates in the Body, Frame*, The University of Calgary, Letöltve: 2007-02-05. <http://www.geomatics.ucalgary.ca/research/MMSensor/Research/publications/2005/2005%20-%2044%20-%20Niu%20and%20ElSheimy%20-%20Development%20of%20a%20Low-cost%20MEMS%20IMU-GPS%20Navigation%20System%20for%20Land.pdf>
- [67] **A. D. KING:** *Inertial Navigation – Forty Years of Evolution*, GEC Review. 13, No 3, 1998., Letöltve: 2007-02-05. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=9910119>
- [68] **J. Kim, S. Wishart, S. Sukkarieh:** *Real-time Navigation, Guidance, and Control of a UAV using Low-cost Sensors*, Springer Berlin / Heidelberg 2006. ISBN 978-3-540-32801-8
- [69] **J. H. Sharp:** *Laser Gyroscopes*, University of Glasgow, Letöltve: 2007-02-05. http://www.mech.gla.ac.uk/~sharpj/lectures/lasers/notes/laser_gyro.pdf
- [70] **N. Barbour, G. Schmidt:** *Inertial Sensor Technology Trends*, from the Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles 20-21 August 1998, Cambridge, MA, pp. 55-62, Letöltve: 2007-02-05. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/7361/21198/00983473.pdf?arnumber=983473>
- [71] **Y. Paturel:** *PHINS, An All-In-One Sensor for DP Applications*, DYNAMIC POSITIONING CONFERENCE September 28-30, 2004. Letöltve: 2007-02-05. http://www.dynamic-positioning.com/dp2004/sensors_paturel.pdf

- [72] **Turóczi A.:** *Önjáró robotok fedélzeti helyzet-meghatározó eszközei*, Repüléstudományi közlemények, XV. évfolyam 35. szám, 2003. p185-194.
- [73] *SRF08 Ultra sonic range finder Technical Specification*, Letöltés: 2007-11-30, [http://www.robot-electronics.co.uk/html/SRF08 Ultra sonic range finder.htm](http://www.robot-electronics.co.uk/html/SRF08%20Ultra%20sonic%20range%20finder.htm)
- [74] **Hobbico, Inc.:** *9CP Super Instruction Manual*, 2004.
- [75] **Maxstream Inc.:** *XBee/XBee Pro OEM RF Modules*, Lindon, 2006. <http://www.ekom-ltd.com/products/maxstream/documents/XBee.pdf>
- [76] **EEBM Co., Ltd.:** *Lithium Polymer Battery*, Data Sheet, 2007.
- [77] **Texas Instruments:** *TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332 Digital Signal Controllers*, Data Manual, 2007.
- [78] **Texas Instruments:** *TMS320x28xx, 28xxx Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module*, Reference Guide, 2007. Letöltés: 2007-11-30, <http://focus.ti.com/lit/ug/spru791d/spru791d.pdf>
- [79] **Texas Instruments:** *TMS320x28xx, 28xxx Enhanced Capture (eCAP) Module*, Reference Guide, 2007. Letöltés: 2007-11-30, <http://focus.ti.com/lit/ug/spru807b/spru807b.pdf>
- [80] **Lantos B.:** *Irányítási rendszerek elmélete és tervezése II.*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001. ISBN: 963-05-7922-7
- [81] **Mangiacasale:** *Airplane Control Systems, μ -synthesis with Matlab*, Levrotto & Bella Editrice S.a.s., Torino, 1996.
- [82] **Gu, Petkov, Konstantinov:** *Robust Control Design*, Springer-Verlag, London, 2005. ISBN-10: 1-85233-983-7
- [83] **Lantos B.:** *Irányítási rendszerek elmélete és tervezése I.*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002. ISBN: 963-05-7787-9
- [84] **Szabolcsi R.:** *Modern szabályozástechnika*, Egyetemi Jegyzet, Budapest 2004.
- [85] **A. E. Bryson:** *Control of Spacecraft and Aircraft*, Princeton University Press, New Jersey, 1994., ISBN: 0-691-08782-2
- [86] **Fodor Gy.:** *Jelek és rendszerek II.*, Műegyetemi Kiadó, 1996.
- [87] **Tuschák R.:** *Szabályozástechnika*, Műegyetemi Kiadó, 1997.
- [88] **Szilágyi B.:** *Folytonos szabályozás rendszertechnikai méretezése*, Egyetemi jegyzet, Műegyetem Kiadó, 1998.
- [89] **Ad Damen:** *Modern Control Theory*, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2002.

- [90] **B. Anderson, J Moore:** *Optimal Filtering*, Dover Publications, Inc., Mineola N.Y., 1979, ISBN: 0-486-43938-0
- [91] **P. S. Maybeck:** *Stochastic Models, Estimation, and Control Volume III.*, Academic Press, London, 1982.
- [92] **P. S. Maybeck:** *Stochastic Models, Estimation, and Control Volume I*, Academic Press, London, 1979.
- [93] **Simon:** *Optimal State Estimation*, Wiley and Sons, Inc., Hoboken NJ, 2006. ISBN: 978-0-471-70858-2
- [94] **A. Isidori, L. Marconi, A. Serrani:** *Robust Autonomous Guidance, An Internal Model Approach*, Springer-Verlag London 2003., ISBN: 1-85233-695-1
- [95] **K. J. Åström:** *Model Uncertainty and Robust Control*, Lund University, Lund, Sweden, Letöltve: 2007-02-05.
<http://www.ee.adfa.edu.au/staff/hrp/Literature/articles/astrom-modeluncertainty.pdf>
- [96] **MIL-F-8785C:** *Flying Qualities of Piloted Airplanes*, Military Specifications, 1980.
- [97] **MIL-F-9490D:** *Flight Control Systems - Design, Installation and Test of Piloted Aircraft*, Military Specifications, 1975.
- [98] **Wührl T.:** *Kisméretű pilóta nélküli repülőgépek biztonságtechnikája*, Doktori értekezés, ZMNE, 2008.
- [99] **Stimac:** *Precision Navigation for Aerospace Applications*, Massachusetts Institute of Technology, 2004. Letöltés: 2007-11-30,
<http://dspace.mit.edu/bitstream/1721.1/16676/1/56844726.pdf>
- [100] **R. A. Hull, C. Ham, R. W. Johnson:** *Systematic Design of Attitude Control Systems for a Satellite in Circular Orbit with Guaranteed Performance and Stability*, Florida Space Institute, Orlando, Florida, Letöltés: 2007-11-30,
<http://www2.itu.edu.tr/~altuger/Documents/Papers/ICRA2003.pdf>

1. MELLÉKLET A MOZGÁSEGYENLETEK SZÁRMAZTATÁSA A TEST KOORDINÁTA-RENDSZERBEN

A K_0 inercia-rendszerben felírt, merev testre vonatkozó kiindulási mozgásegyenletrendszerünk:

$$\dot{\underline{\mathbf{r}}} = \underline{\mathbf{v}} \quad (\text{M1.1/a})$$

$$\dot{\underline{\Phi}} = \underline{\tilde{\omega}} \cdot \underline{\Phi} \quad (\text{M1.1/b})$$

$$\dot{\underline{\mathbf{P}}} = \underline{\mathbf{F}} \quad (\text{M1.1/c})$$

$$\dot{\underline{\mathbf{L}}} = \underline{\mathbf{M}} \quad (\text{M1.1/d})$$

A tömegközéppont tétele kimondja, hogy „egy mechanikai rendszer tömegközéppontja úgy mozog, mintha a rendszer teljes tömege ott összpontosulna, és erre a pontra a külső erők eredője hatna⁵¹”. Eszerint, és Newton II., az impulzusra vonatkozó (M1.1/c) axiómája alapján:

$$\dot{\underline{\mathbf{P}}}(t) = \underline{\mathbf{F}}(t) \quad \longrightarrow \quad \boxed{m \dot{\underline{\mathbf{v}}}(t) = \sum_j^K \underline{\mathbf{F}}_j(t)}, \quad m = \sum_i^N m_i \quad (\text{M1.2})$$

ahol m a test teljes tömege, m_i a testet alkotó N számú részegység i -edik elemének tömege, $\underline{\mathbf{F}}_j(t)$ pedig a testre ható j -edik erővektor ($j = 1, 2, 3 \dots K$; $i = 1, 2, 3 \dots N$).

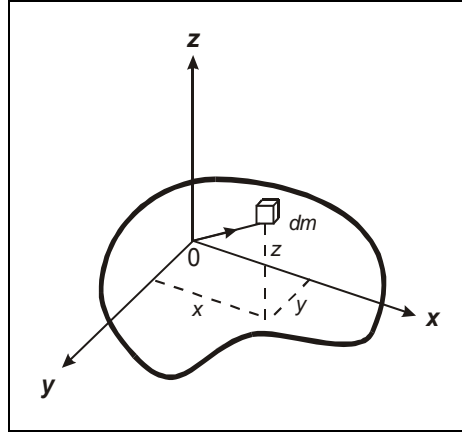
Az impulzus $\underline{\mathbf{P}}(t) = m \underline{\mathbf{v}}(t)$ képletéhez hasonlóan definiálhatjuk a forgó mozgásra vonatkozó impulzusmomentumot is: $\underline{\mathbf{L}}(t) = \underline{\mathbf{J}}(t) \underline{\omega}(t)$. Ez alapján:

$$\frac{d}{dt} \underline{\mathbf{L}}(t) = \underline{\mathbf{M}}(t) \quad \longrightarrow \quad \frac{d}{dt} [\underline{\mathbf{J}}(t) \underline{\omega}(t)] = \sum_k^Z \underline{\mathbf{M}}_k(t) \quad (\text{M1.3})$$

ahol, $\underline{\mathbf{M}}_k(t)$ a testre ható k -edik forgatónyomaték vektor ($k = 1, 2, 3 \dots Z$), $\underline{\mathbf{J}}(t)$ pedig egy 3×3 -as méretű mátrix, amit tehetetlenségi tenzornak nevezünk (70. ábra):

⁵¹ Gilber, Sólyom: Fizika mérnököknek - 129. oldal, Műegyetemi kiadó, 1994.

$$\underline{\underline{\mathbf{J}}} = \begin{bmatrix} J_{xx} & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{yx} & J_{yy} & -J_{yz} \\ -J_{zx} & -J_{zy} & J_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{M1.4})$$



70. ábra. Tehetetlenségi tenzor számítása [Készítette: Turóczi A. – Corel Draw]

$$\begin{aligned} J_{xx} &= \int_m (y^2 + z^2) dm & J_{xy} &= J_{yx} = \int_m xy \, dm \\ J_{yy} &= \int_m (x^2 + z^2) dm & J_{yz} &= J_{zy} = \int_m yz \, dm \\ J_{zz} &= \int_m (x^2 + y^2) dm & J_{zx} &= J_{xz} = \int_m xz \, dm \end{aligned} \quad (\text{M1.5})$$

J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} az x , y , z tengelyekre számított tehetetlenségi nyomatékok, J_{xy} , J_{xz} , J_{yz} pedig a tengelyek által meghatározott síkokra számított tehetetlenségi nyomatékok. A tehetetlenségi tenzor a test tömegeloszlását írja le a választott referencia ponthoz képest. Ha ez a referencia pont \mathbf{K}_0 -ban van rögzítve, $\underline{\underline{\mathbf{J}}}(t)$ a test mozgása miatt időben változó lesz. Állandó tömegű merev test esetén a \mathbf{K} -ban számolt tehetetlenségi tenzor azonban szerencsére állandó, így az ott kapott $\underline{\underline{\mathbf{J}}}(\mathbf{K})$ a tömeghez hasonlóan fizikai jellemzőként adható meg, bár pontos meghatározása a homogén tömegeloszlású, egyszerű geometriával rendelkező testektől (gömb, henger, téglatest stb.) eltekintve sokszor nehézkes. Megjegyezném, hogy mindig található olyan \mathbf{K} koordináta rendszer, amelyben $\underline{\underline{\mathbf{J}}}(\mathbf{K})$ diagonális mátrix. Ilyenkor az x_K , y_K , z_K tengelyek tehetetlenségi fő tengelyek [27][31][51].

A \mathbf{K} koordináta rendszerbe történő átszámításhoz a szakirodalomban jól ismert formulákat használhatjuk [27][28][29][30]:

Bármely \mathbf{K} béli $\underline{\mathbf{a}}_{(K)}$ vektorra: $\underline{\mathbf{a}} = \underline{\underline{\Phi}} \underline{\mathbf{a}}_{(K)}$ (M1.6)

A tehetetlenségi tenzorra: $\underline{\underline{\mathbf{J}}} = \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\mathbf{J}}}_{(K)} \underline{\underline{\Phi}}^T$ (M1.7)

A szögsebesség mátrixra: $\underline{\underline{\tilde{\omega}}} = \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\tilde{\omega}}}_{(K)} \underline{\underline{\Phi}}^T$ (M1.8)

(M1.1/b)-ből: $\underline{\underline{\dot{\Phi}}} = \underline{\underline{\tilde{\omega}}} \cdot \underline{\underline{\Phi}} \rightarrow \underline{\underline{\dot{\Phi}}} \underline{\underline{\Phi}}^T = \underline{\underline{\tilde{\omega}}}$

Ezt behelyettesítve (M1.8)-ba:

$$\underline{\underline{\dot{\Phi}}} \underline{\underline{\Phi}}^T = \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\tilde{\omega}}}_{(K)} \underline{\underline{\Phi}}^T$$

$$\boxed{\underline{\underline{\dot{\Phi}}} = \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\tilde{\omega}}}_{(K)}} \quad \text{(M1.9)}$$

(M1.1/d)-ben felhasználva (M1.6)-ot:

$$\frac{d}{dt} \underline{\underline{\mathbf{L}}} = \underline{\underline{\mathbf{M}}} \rightarrow \frac{d}{dt} (\underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\mathbf{L}}}_{(K)}) = \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\mathbf{M}}}_{(K)}$$

$$\underline{\underline{\dot{\Phi}}} \underline{\underline{\mathbf{L}}}_{(K)} + \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\dot{\mathbf{L}}}}_{(K)} = \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\mathbf{M}}}_{(K)} \quad / \underline{\underline{\Phi}}^T \cdot$$

$$\underline{\underline{\Phi}}^T \underline{\underline{\dot{\Phi}}} \underline{\underline{\mathbf{L}}}_{(K)} + \underline{\underline{\Phi}}^T \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\dot{\mathbf{L}}}}_{(K)} = \underline{\underline{\Phi}}^T \underline{\underline{\Phi}} \underline{\underline{\mathbf{M}}}_{(K)}$$

Mivel⁵²:

$$\underline{\underline{\Phi}}^T \underline{\underline{\dot{\Phi}}} = \underline{\underline{\tilde{\omega}}}_{(K)} \quad ; \quad \underline{\underline{\Phi}}^T \underline{\underline{\Phi}} = \underline{\underline{\mathbf{I}}} \quad ; \quad \underline{\underline{\dot{\mathbf{L}}}}_{(K)} = \underline{\underline{\mathbf{J}}}_{(K)} \underline{\underline{\dot{\omega}}}_{(K)}$$

$$\boxed{\underline{\underline{\mathbf{J}}}_{(K)} \underline{\underline{\dot{\omega}}}_{(K)} = -\underline{\underline{\tilde{\omega}}}_{(K)} \underline{\underline{\mathbf{J}}}_{(K)} \underline{\underline{\omega}}_{(K)} + \underline{\underline{\mathbf{M}}}_{(K)}} \quad \text{(M1.10)}$$

⁵² Az identitásmátrix: $\underline{\underline{\mathbf{I}}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

2. MELLÉKLET A TEHETETLENSÉGI TENZOR MEGHATÁROZÁSA

A CADKEY98 programban az adatokat a következő mértékegységek szerint kell megadni és értelmezni:

Távolságok: [mm]
 Térfogat: [mm³]
 Tömeg: [g]
 Sűrűség: [g / mm³]
 Tehetetlenségi nyomatékok: [g mm²]

A négyrotoros helikoptert a következő részegységekre bontottam fel:

Habszivacs keret (71. ábra, zöld színnel):

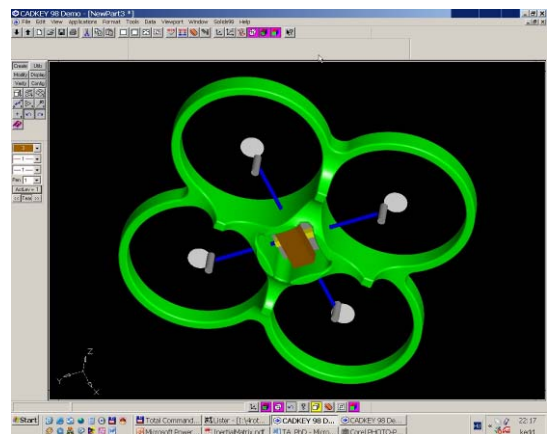
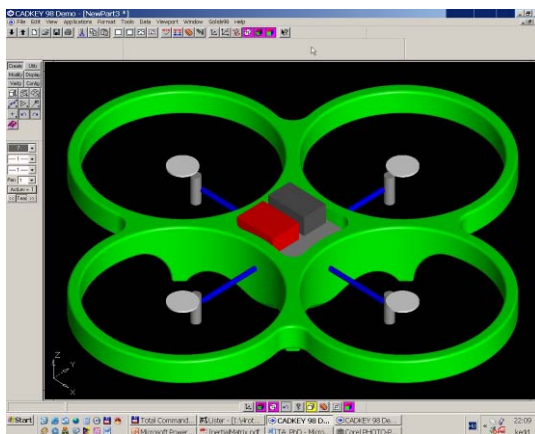
- 4 db gyűrű, külső sugár: 124 mm; belső sugár 110 mm; + lábak

- Össztömeg: $m_1=31$ g

- Tömegközéppont: $\underline{r}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 7,8 \end{bmatrix}$

- Tehetetlenségi tenzor:

$$\underline{J}_1 = \begin{bmatrix} 556514 & -2,84 & 0,01 \\ -2,84 & 556482 & -3,4 \\ 0,01 & -3,4 & 1096948 \end{bmatrix}$$



71. ábra. CADKEY98-ban megrajzolt négyrotoros helikopter. Az egyes részegységeket eltérő színekkel ábrázoltam [Készítette: Turóczy A. – CadKey98]

Motorok (71. ábra, világos szürke színnel):

- 4 db henger, sugár: 6 mm; magasság: 33 mm

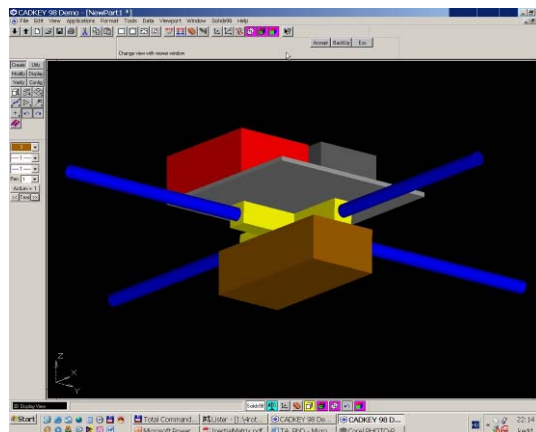
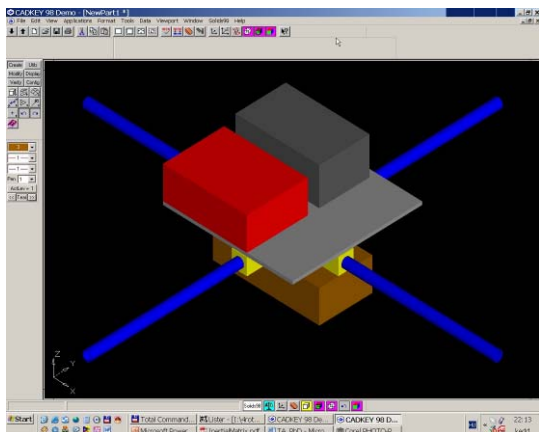
- Tömeg: $m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 29$ g

$$\text{- Tömegközéppontok: } \underline{\mathbf{r}}_2 = \begin{bmatrix} -147 \\ 0 \\ -7.5 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{r}}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 147 \\ -7.5 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{r}}_4 = \begin{bmatrix} 147 \\ 0 \\ -7.5 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{r}}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ -147 \\ -7.5 \end{bmatrix}$$

- Tehetetlenségi tenzorok:

$$\underline{\mathbf{J}}_2 = \begin{bmatrix} 4524 & 0 & -31972 \\ 0 & 631185 & 0 \\ -31972 & 0 & 627183 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_3 = \begin{bmatrix} 631185 & 0 & 0 \\ 0 & 4524 & 31972 \\ 0 & 31972 & 627183 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{J}}_4 = \begin{bmatrix} 4524 & 0 & 31972 \\ 0 & 631185 & 0 \\ 31972 & 0 & 627183 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_5 = \begin{bmatrix} 631185 & 0 & 0 \\ 0 & 4524 & -31972 \\ 0 & -31972 & 627183 \end{bmatrix}$$



72. ábra. CADKEY98-ban megrajzolt részegységek a habszivacs keret és a motorok nélkül [Készítette: Turóczy A. – CadKey98]

Rögzítő kereszt (72. ábra, sárga színnel):

- 1 db test

- tömeg: 14.4 g

$$\underline{\mathbf{r}}_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_6 = \begin{bmatrix} 3342 & 0 & 0 \\ 0 & 3342 & 0 \\ 0 & 0 & 6443 \end{bmatrix}$$

Rögzítő rudak (72. ábra, kék színnel):

- 4 db cső; külső átmérő : 6 mm; belső átmérő 5 mm; Hossz: 100 mm

- Tömeg: 2,2 g

$$\text{- Tömegközéppontok: } \underline{\mathbf{r}}_7 = \begin{bmatrix} -85 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{r}}_8 = \begin{bmatrix} 0 \\ 85 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{r}}_9 = \begin{bmatrix} 85 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{r}}_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ -85 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Tehetetlenségi tenzorok:

$$\underline{\mathbf{J}}_7 = \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 \\ 0 & 17735 & 0 \\ 0 & 0 & 17735 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_8 = \begin{bmatrix} 17735 & 0 & 0 \\ 0 & 17 & 0 \\ 0 & 0 & 17735 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{J}}_9 = \begin{bmatrix} 17 & 0 & 0 \\ 0 & 17735 & 0 \\ 0 & 0 & 17735 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{10} = \begin{bmatrix} 17735 & 0 & 0 \\ 0 & 17 & 0 \\ 0 & 0 & 17735 \end{bmatrix}$$

Akkumulátor (72. ábra, barna színnel):

- 1 db téglatest
- méretek: 70 x 35 x 20 mm
- tömeg: 94 g

$$\underline{\mathbf{r}}_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -15 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{11} = \begin{bmatrix} 32438 & 0 & 0 \\ 0 & 60002 & 0 \\ 0 & 0 & 45939 \end{bmatrix}$$

IMU (72. ábra, piros színnel):

- 1 db téglatest
- méretek: 55 x 40 x 20 mm
- tömeg: 29 g

$$\underline{\mathbf{r}}_{12} = \begin{bmatrix} -15 \\ -22,5 \\ 25 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{12} = \begin{bmatrix} 37639 & -9787 & 10875 \\ -9787 & 32927 & 16312 \\ 10875 & 16312 & 32383 \end{bmatrix}$$

RC vevő (72. ábra, sötétszürke színnel):

- 1 db téglatest
- méretek: 55 x 33 x 23 mm
- tömeg: 35 g

$$\underline{\mathbf{r}}_{13} = \begin{bmatrix} -15 \\ 21,5 \\ 26,5 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{13} = \begin{bmatrix} 45476 & 11287 & 13912 \\ 11287 & 42819 & -19941 \\ 13912 & -19941 & 36052 \end{bmatrix}$$

NYÁK lemez (72. ábra, világosszürke színnel):

- 1 db téglatest
- méretek: 85 x 85 x 2 mm
- tömeg: 40 g

$$\underline{\mathbf{r}}_{14} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 14 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{14} = \begin{bmatrix} 31935 & 0 & 0 \\ 0 & 31935 & 0 \\ 0 & 0 & 48165 \end{bmatrix}$$

Rotorlapátok:

- 4 db henger, sugár: 100 mm; magasság: 5 mm

- Tömeg: $m_{15} = m_{16} = m_{17} = m_{18} = 3,5$ g

- Tömegközéppontok: $\underline{\mathbf{r}}_{15} = \begin{bmatrix} -170 \\ 0 \\ 18 \end{bmatrix}$ $\underline{\mathbf{r}}_{16} = \begin{bmatrix} 170 \\ 0 \\ 18 \end{bmatrix}$ $\underline{\mathbf{r}}_{17} = \begin{bmatrix} 0 \\ 170 \\ 18 \end{bmatrix}$ $\underline{\mathbf{r}}_{18} = \begin{bmatrix} 0 \\ -170 \\ 18 \end{bmatrix}$

- Tehetetlenségi tenzorok:

$$\underline{\mathbf{J}}_{15} = \begin{bmatrix} 9890 & 0 & 10710 \\ 0 & 111040 & 0 \\ 10710 & 0 & 118650 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{16} = \begin{bmatrix} 9890 & 0 & -10710 \\ 0 & 111040 & 0 \\ -10710 & 0 & 118650 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{J}}_{17} = \begin{bmatrix} 111040 & 0 & 0 \\ 0 & 9890 & -10710 \\ 0 & -10710 & 118650 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{18} = \begin{bmatrix} 111040 & 0 & 0 \\ 0 & 9890 & 10710 \\ 0 & 10710 & 118650 \end{bmatrix}$$

Fogaskerek (71. ábra, fehér színnel):

- 4 db henger, sugár: 17,5 mm; magasság: 2 mm

- Tömeg: $m_{19} = m_{20} = m_{21} = m_{22} = 2$ g

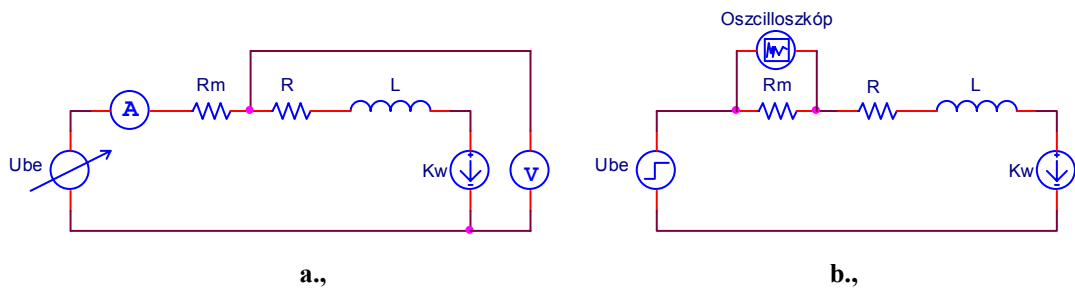
- Tömegközéppontok: $\underline{\mathbf{r}}_{19} = \begin{bmatrix} -170 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix}$ $\underline{\mathbf{r}}_{20} = \begin{bmatrix} 170 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix}$ $\underline{\mathbf{r}}_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 170 \\ 10 \end{bmatrix}$ $\underline{\mathbf{r}}_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ -170 \\ 10 \end{bmatrix}$

- Tehetetlenségi tenzorok:

$$\underline{\mathbf{J}}_{19} = \begin{bmatrix} 354 & 0 & 3400 \\ 0 & 58157 & 0 \\ 3400 & 0 & 58106 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{20} = \begin{bmatrix} 354 & 0 & -3400 \\ 0 & 58157 & 0 \\ -3400 & 0 & 58106 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{J}}_{21} = \begin{bmatrix} 58157 & 0 & 0 \\ 0 & 354 & -3400 \\ 0 & -3400 & 58106 \end{bmatrix} \quad \underline{\mathbf{J}}_{22} = \begin{bmatrix} 58157 & 0 & 0 \\ 0 & 354 & 3400 \\ 0 & 3400 & 58106 \end{bmatrix}$$

3. MELLÉKLET AZ EGYENÁRAMÚ MOTOR MÉRÉSE



73. ábra. A motorparaméterek meghatározásához felépített kapcsolások sematikus ábrái, **a.**, statikus mérésekhez, **b.**, tranziens vizsgálatokhoz [Készítette: Turóczy A. - Orcad]

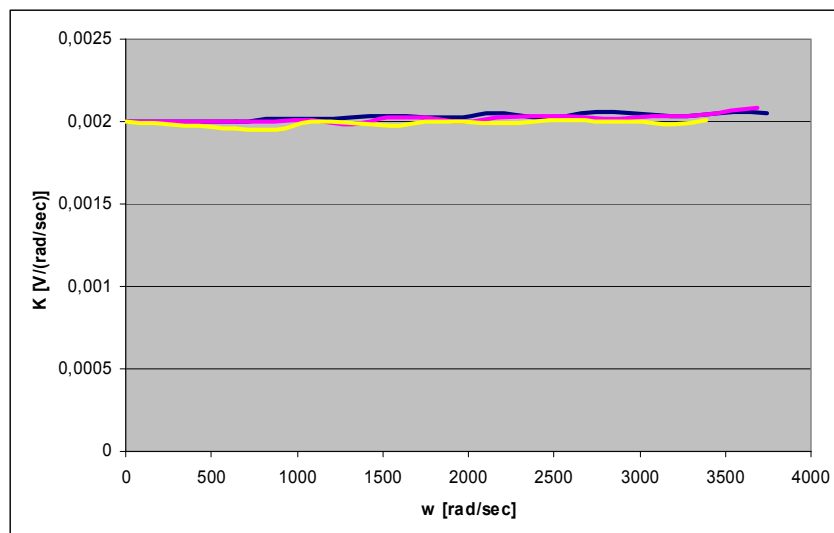
A motor paramétereinek meghatározásához a 73. ábra kapcsolásait valósítottam meg, ahol a rotor fogaskerék áttételen keresztül csatlakozik a motor tengelyére. R_m ismert értékű mérőellenállás. A motor szögsebességét pedig reflexiós optokapu segítségével mértem, mely az előtte elhaladó rotorlapátokról visszaverődő fényt érzékeli. A méréseket az 1.5.2 fejezetben leírt elvek alapján végeztem el. Az R , K és B paraméterek meghatározásához a 73/a. ábra, az L és J_m paraméterekhez a 73/b. ábra kapcsolását használtam. A rögzített tengelyű motor kapcsain mért feszültség és az azon átfolyó áram hányadosából $R = 1\Omega$ belső ellenállást mértem. Állandó szögsebességgel szabadon forgó tengely esetén $di(t)/dt = 0$, így a K motorállandó az (1.12) összefüggés szerint

$$K = \frac{U - iR}{\omega} \quad (\text{M3.1})$$

képlettel határozható meg. A mérés eredménye a 74. ábrán látható, ami alapján elmondható, hogy a motorállandó az adott szögsebesség tartományban közel állandó $K = 0,00215$ értékű. Az (1.12) összefüggés alapján K ismeretében a B paraméter is meghatározható. Mivel $d\omega/dt = 0$

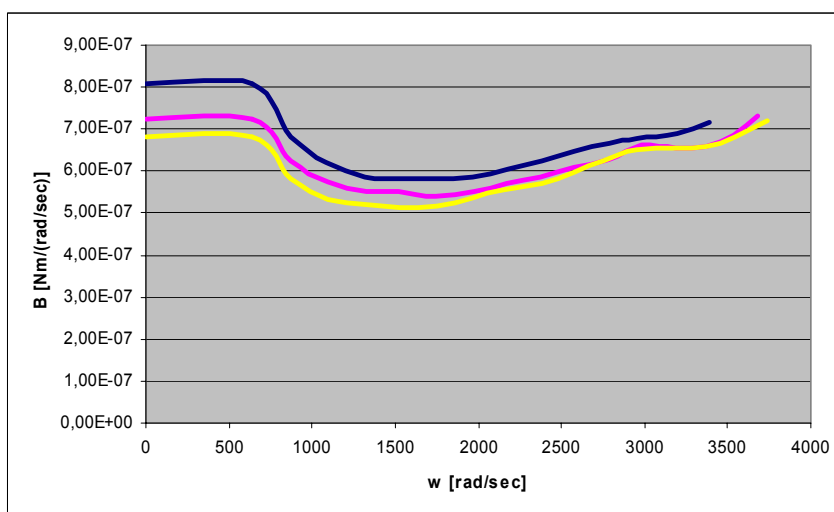
$$B = \frac{Ki}{\omega} \quad (\text{M3.2})$$

A B paraméter értéke a szögsebesség függvényében a 75. ábrán látható. Bár a görbék alapján ez a paraméter nem állandó, a motor matematikai modelljében $B = 6,5 \cdot 10^{-7}$ értékűnek fogom közelíteni.



74. ábra. K motorállandó a motortengely szögsebességének függvényében

[Készítette: Turóczy A. - MS Excel]



75. ábra. B paraméter a motortengely szögsebességének függvényében [Készítette: Turóczy A. - MS Excel]

[Készítette: Turóczy A. - MS Excel]

Rögzített tengelynél, egységugrás jellegű feszültség esetén, a motor tekercsein átfolyó áram jelalakját a 76. ábra szemlélteti. Az induktivitás meghatározásakor felhasználtam, hogy egy R - L kör $\tau = L/R$ időállandója egyenlő azzal az idővel, ami ahhoz kell,

hogy a tekercsen folyó áram elérje maximális értékének 63%-át. A 76. ábra alapján ez 105 μs -nak adódott. Ebből, és a körben lévő ohmikus ellenállások értékének ismeretéből:

$$L = 105\mu\text{s} \cdot 1,385\Omega = 145 \mu\text{H} . \quad (\text{M3.3})$$

A J_m tehetetlenségi nyomatékot a motor forgórészének, a rotort meghajtó fogaskerék és a rotorlapát tömeg, illetve geometriai adataiból számoltam ki:

Motor forgórész: $r_f = 4,1$ mm sugarú henger; $h_f = 20$ mm; tömeg: $m_f = 5,4$ g;

Tehetlenségi nyomatéka:

$$I_{fx} = I_{fy} = (1/12)m_f (r_f^2 + h_f^2) = 1,8756 \cdot 10^{-7} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]}$$

$$J_{fz} = (1/2)m_f \cdot r_f^2 = 4,5387 \cdot 10^{-8} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]}$$

Fogaskerék: $r_g = 17,5$ mm sugarú henger; $h_g = 2$ mm; tömeg: $m_g = 2$ g;

Tehetlenségi nyomatéka:

$$I_{gx} = I_{gy} = (1/12)m_g (r_g^2 + h_g^2) = 5,17 \cdot 10^{-8} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]}$$

$$J_{gz} = (1/2)m_g \cdot r_g^2 = 3,0625 \cdot 10^{-7} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]}$$

Rotor: téglatest $a = 8$, $b = 200$; $c = 1$ mm oldalakkal; tömeg: $m_r = 3,5$ g;

Tehetlenségi nyomatéka:

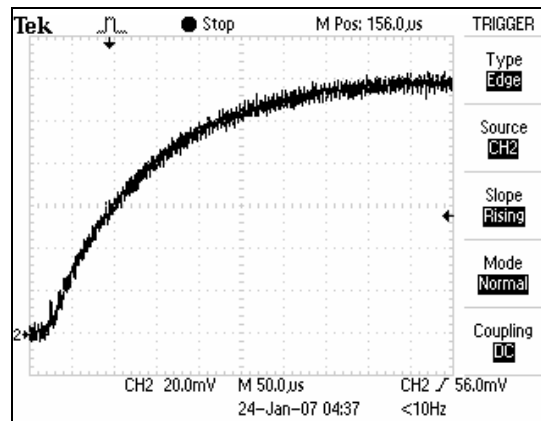
$$I_{rx} = (1/12)m_r \cdot (b^2 + c^2) = 1,1667 \cdot 10^{-5} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]}$$

$$I_{ry} = (1/12)m_r \cdot (a^2 + c^2) = 1,8958 \cdot 10^{-8} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]}$$

$$J_{rz} = (1/12)m_r \cdot (a^2 + b^2) = 1,1685 \cdot 10^{-5} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]}$$

Mivel a fogaskerék és a rotor az $N = 69/8$ értékű fogaskerék áttétel miatt lassabban forog, tehetlenségi nyomatékuk a motor tengelyén az áttétel reciproknégyzet-szereseként jelenik meg [27]. Eszerint:

$$\begin{aligned} J_m &= J_{fz} + J_{gz} \frac{1}{N^2} + J_{rz} \frac{1}{N^2} \\ J_m &= 4,5387 \cdot 10^{-8} + 3,0675 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{8^2}{69^2} + 1,1685 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{8^2}{69^2} \\ J_m &= 2,0658 \cdot 10^{-7} \text{ [Nm/(rad/s}^2\text{)]} \end{aligned} \quad (\text{M3.4})$$



76. ábra. A motoráram jelalakja egységugrás bemeneti feszültség és rögzített forgórész esetén [Készítette: Turóczy A. – Tektronix Oszcilloszkóp]

4. MELLÉKLET JELÖLÉSEK

a	skalár
$\underline{\mathbf{a}}$	vektor
a_x	az $\underline{\mathbf{a}}$ vektor x irányú komponense
$\underline{\mathbf{A}}$	mátrix
A_{ij}	az $\underline{\mathbf{A}}$ mátrix i -edik oszlopának j -edik eleme
\mathbf{K}	test-koordinátarendszer
\mathbf{K}_0	inercia koordináta-rendszer
t	idő
$\underline{\mathbf{r}}$	pozíció, helyzet vektor
ϕ, θ, ψ	bedöntési-, bólintási- és irányyszög
$\underline{\mathbf{v}}$	sebesség vektor
$\underline{\boldsymbol{\omega}}, \underline{\boldsymbol{\Omega}}$	szögsebesség vektor
$\underline{\mathbf{a}}$	gyorsulás vektor
$\underline{\mathbf{F}}$	erő vektor
$\underline{\mathbf{M}}$	nyomaték vektor
$\underline{\mathbf{P}}$	impulzus, lendület vektor
$\underline{\mathbf{L}}$	impulzus-momentum, perdület vektor
$\underline{\boldsymbol{\Phi}}$	forgatási vagy rotáció mátrix
$\underline{\mathbf{Q}}$	az állapotváltozók súlyozó mátrixa
$\underline{\mathbf{R}}$	a bemeneti vektor rendezőinek súlyozó mátrixa
$\underline{\underline{\mathbf{P}}}$	költségmátrix
m	tömeg
\ominus	tehetetlenségi nyomaték
$\underline{\mathbf{J}}$	tehetetlenségi tenzor
d	távolság
$\underline{\mathbf{g}}$	nehézségi gyorsulás vektor
u	feszültség
i	áram
R	ellenállás

L	induktivitás
$\delta(t)$	Dirac-delta
$\mathcal{L}\{.\}$	Laplace operátor
$E\{.\}$	Várható érték operátor

5. MELLÉKLET RÖVIDÍTÉSEK ÉS IDEGEN KIFEJEZÉSEK GYŰJTEMÉNYE

A/D	Analog Digital (converter)
ADF	Automatic Direction Finder
CAD	Computer Aided Design
DC	Direct Current
DMA	Direct Memory Access
DSP	Digital Signal Processor
ECEF	Earth- Centered-Earth- Fixed
ECI	Earth-Centered-Inertial
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPS	Global Positioning System
I/O	Input/Output
I²C	Inter-Integrated Circuit
ILS	Instrumental Landing System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
JTAG	Joint Test Action Group
LQR	Linear Quadratic Regulator
LQG	Linear Quadratic Gaussian
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MIMO	Multi Input Multi Output
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
NED	North East Down
P, I, D	Proportional, Integral, Derivative
PC	Personal Computer
PWM	Pulse Width Modulation
RC	Radio Controlled
ROM	Read Only Memory
SISO	Single Input Single Output

SRAM	Synchronous Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VOR	VHF Omni Range
VTOL	Vertical Take-off and Landing
WGS-84	World- Geodetic-System- 1984

6. MELLÉKLET ÁBRÁK JEGYZÉKE

1. ábra. a., Global Hawk; b., Predator [4]	14
2. ábra. a., Dragon Eye; b., Black Widow [4].....	14
3. ábra. a., iSTAR; b., Cypher [10][11]	16
4. ábra. a., Eagle Eye b., Vigilante [12][13]	16
5. ábra. Szojka-II; b., METEOR-3R célrepülőgép	17
6. ábra. Bréguet-Richet négyrotoros helikopter, <i>Gyroplane No. 1</i> , 1907 [23]	18
7. ábra. Convertawings Model "A" Quadrotor[6.] [7.]	18
8. ábra. Távirányítású négyrotoros helikopter modellek [26].....	19
9. ábra. SensoCopter [25]	19
10. ábra. A kísérleti négyrotoros helikopter méretei fedélzeti elektronika nélkül.....	21
11. ábra. Mozgás oldalirányban [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw].....	23
12. ábra. Fügőleges tengely körüli forgás átlósan elhelyezkedő rotorok fordulatszámának növelésével [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw].....	24
13. ábra. A repülésben használt fontosabb vonatkoztatási rendszerek [30.]	26
14. ábra. A test és a helyi inercia-koordinátarendszer [47] b.) valamint a test rendszerben mért gyorsulás és szögsebesség összetevők [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw]	27
15. ábra. Merev test általános mozgása. [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw].	30
16. ábra. A K_0 és K koordináta rendszerek definíciója [Szerk.: Turóczy A. - Corel Draw]	31
17. ábra. Tehetetlenségi adatok a CADKEY98 programban [Készítette: Turóczy A. - CADKEY98].	34
18. ábra. Az optikai kapu kimeneti jele [Készítette: Turóczy A - Tektronix oszcilloszkóp képe].....	35
19. ábra. Motoráram egységugrás bemeneti feszültség esetén [Készítette: Turóczy A - Tektronix oszcilloszkóp képe]	37
20. ábra. A motortengely szögsebességének (felső görbe) és a motor áramának (alsó görbék) időfüggvénye egységugrás bemenő feszültség esetén [Készítette: Turóczy A. - MATLAB].....	38
21. ábra. Rotor által keltett felhajtóerő mérése [Szerk.: Turóczy A. – Corel Draw].....	39

22. ábra. Felhajtóerő a motortengely szögsebességének függvényében [Készítette: Turóczy A. - MS Excel].....	40
23. ábra. a., A motor nyomatéka rotorral terhelt és, b., terheletlen esetben. c., A motor tengelyére redukált reaktív nyomaték [Készítette: Turóczy A. - MS Excel]	42
24. ábra. Micropilot MP2028 ^g [56].....	47
25. ábra. A Cloud Cap Technology <i>Piccolo</i> rendszere [57]	48
26. ábra. Xsens MTi inerciális szenzormodul [52].....	50
27. ábra. SRF08 ultrahangos távolságmérő modul [73]	51
28. ábra. Az SRF08 iránykarakterisztikája [73]	52
29. ábra. Futaba FF9 PCM távirányító és vevő egysége [74].....	53
30. ábra. Maxstream XBEE rádiómodul [75].....	53
31. ábra. A földi irányító rendszer grafikus kezelői felülete [Készítette: Turóczy A. – Visual C++]	54
32. ábra. Lítium-polimer akkumulátor [76].....	55
33. ábra. Kísérleti négyrotoros pilóta nélküli helikopter fedélzeti elektronikai rendszerének blokkvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]	57
34. ábra. TMS320F28335 funkcionális blokkdiagramja [77].....	59
35. ábra. Szimmetrikus PWM kimeneti jel, független A-B csatorna modulációval [78]	60
36. ábra. Teljesítménymeghajtó elektronika [Készítette: Turóczy A. – Orcad Capture]	61
37. ábra. Impulzus-szélesség mérése az eCAP modul segítségével [79].....	62
38. ábra. A magasság alapjel időfüggvénye 1 m-es kezdeti magasságból történő vészleszállás esetén [Készítette: Turóczy A. - Matlab].....	62
39. ábra. A DSP-ben implementált program egyszerűsített folyamatábrája [Szerk.: Turóczy A. - MS Word].....	63
40. ábra. Szabályzási kör folyamatábrája [Szerk.: Turóczy A. - MS Word].....	66
41. ábra. Kéttárolós lengő tag kétoldalas Nyquist illetve Bode-diagramja [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	71
42. ábra. SISO szabályozási kör hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]	72
43. ábra. Zárt SISO rendszer egységugrás válaszai [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]....	72
44. ábra. Állapotterez rendszerleírás hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word].....	74
45. ábra. Teljes állapot-visszaesatolású szabályozási rendszer hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word].....	76
46. ábra. Kálmán-Bucy Szűrő hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word].....	78

47. ábra. LQG szabályozási rendszer hatásvázlata [Szerk.: Turóczy A. - MS Word].....	80
48. ábra. Zárt motor-fordulatszám szabályzási kör [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]	83
49. ábra. Módosított fordulatszám szabályzási kör, motoráramról történő visszacsatolással [Szerk.: Turóczy A. - MS Word]	83
50. ábra. A felnyitott kör a., Bode-diagramja és b., a zárt kör egységugrás válasza [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	84
51. ábra. Simulink modell a korlátos motorfeszültség és a bizonytalan motorparaméterek szabályzási körre kifejtett hatásának vizsgálatára [Készítette: Turóczy A. - Simulink].....	84
52. ábra. Motor a., szögsebesség, b., áram és feszültség jelalakok [Készítette: Turóczy A. - MATLAB].....	85
53. ábra. a., A felhajtóerő és a b., reaktív nyomaték négyzetes jelleggörbéjének lineáris közelítése [Készítette: Turóczy A. - MS Excel]	87
54. ábra. A gyorsulásmérő modellje [Készítette: Turóczy A. - MS Word].....	91
55. ábra. A Xsens modul z_k irányú gyorsulás jelének eloszlása $m = 9,805$ várható értékű, $\sigma = 0,01$ szórású normális eloszlással közelítve [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	92
56. ábra. Az ultrahangos magasságmérő modellje [Készítette: Turóczy A. - MS Word]	92
57. ábra. Az ultrahangos magasságmérő Simulink modellje [Készítette: Turóczy A. - Simulink]	92
58. ábra. Állapotbecslő hatásvázlata [Készítette: Turóczy A. - MS Word]	94
59. ábra. Sebesség időfüggvények [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	95
60. ábra. Magasság időfüggvények [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	95
61. ábra. Kísérleti rendszerem Simulink modellje [Készítette: Turóczy A. - Simulink].	99
62. ábra. A szabályzó Simulink modellje [Készítette: Turóczy A. - Simulink]	99
63. ábra. Az r_x , r_y és r_z pozíció időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB].....	100
64. ábra. Az v_x , v_y és v_z sebességek időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	100
65. ábra. A ϕ , θ és ψ szögek időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB].....	101
66. ábra. Az ω_x , ω_y és ω_z szögsebességek időfüggvényei [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	101

67. ábra. Pozíció és sebesség komponensek különböző tehetetlenségi nyomatékok esetén [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	103
68. ábra Euler-szög és szögsebesség komponensek különböző tehetetlenségi nyomatékok esetén [Készítette: Turóczy A. - MATLAB]	104
69. ábra. Kísérleti négyrotoros pilóta nélküli helikopter	107
70. ábra. Tehetetlenségi tenzor számítása [Készítette: Turóczy A. – Corel Draw].....	124
71. ábra. CADKEY98-ban megrajzolt négyrotoros helikopter. Az egyes részegységeket eltérő színekkel ábrázoltam [Készítette: Turóczy A. – CadKey98]	126
72. ábra. CADKEY98-ban megrajzolt részegységek a habszivacs keret és a motorok nélkül [Készítette: Turóczy A. – CadKey98]	127
73. ábra. A motorparaméterek meghatározásához felépített kapcsolások sematikus ábrái, a., statikus mérésekhez, b., tranziens vizsgálatokhoz [Készítette: Turóczy A. - Orcad]	130
74. ábra. K motorállandó a motortengely szögsebességének függvényében [Készítette: Turóczy A. - MS Excel].....	131
75. ábra. B paraméter a motortengely szögsebességének függvényében [Készítette: Turóczy A. - MS Excel].....	131
76. ábra. A motoráram jelalakja egységugrás bemeneti feszültség és rögzített forgórész esetén [Készítette.: Turóczy A. – Tektronix Oszcilloszkóp].....	133

7. MELLÉKLET TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat. Az UAV-k osztályozása	13
2. táblázat. Ismertebb pilóta nélküli repülőgéptípusok paraméterei [4][6].....	13
3. táblázat. Ismertebb VTOL UAV-k paraméterei [10][13][10][11].....	15
4. táblázat. Hazai fejlesztésű pilóta nélküli repülőgépek fontosabb paraméterei [15][16][21]	17
5. táblázat. Négyrotoros UAV paraméterei	20
6. táblázat. P, I, D alaptagok	73
7. táblázat. A leggyakoribb kompenzációs szabályzók	73
8. táblázat. ϕ , θ , ψ szögekre megengedhető maximális alapjel-követési hiba [97].....	81
9. táblázat. Maximális megengedhető magasságtartási hiba adott bedöntési szögekre [97].....	82