

Mikro UAV-k vezérlő redundanciája

Napjainkban egyre nagyobb szerepet játszanak azok a robotikai eszközök [1], amelyek alkalmazása csökkenti az emberi életet-, egészséget fenyegető kockázatokat úgy a katonai, katasztrófavédelmi, mint a polgári alkalmazásokban [2]. Robot-, vagy távirányítású eszközök bevetése olyan helyeken célszerű, ahol a körülmények az emberi életet, egészséget súlyosan veszélyeztetik, mint például a magas radioaktív sugárzási szint, vegyileg szennyezett terület, harctér, vagy az ember számára nehezen megközelíthető területen kell feladatot végrehajtani, stb. [1] [2] [3].

A robotika fejlett eszközei között önálló csoportot alkotnak a pilóta nélkül repülő eszközök (Unmanned Air Vehicles – UAV). A széles körű felhasználásnak azonban korlátot szab a megbízhatóság. Jelen cikkben a mikro kategóriájú UAV-kkel foglalkozom, kiemelten ezen eszközök központi vezérlő egységének redundáns kialakításával.

A jogszabályi környezet jelenleg ezen repülő eszközök alkalmazását (elsősorban megbízhatósági okok miatt) csak zárt légtérben teszi lehetővé [4].

Korábbi cikkemben [4] megállapítottam továbbá azt, hogy az UAV-k fedélzetén helyet kell kapnia legalább kettő magasságmérő eszköznek, sebességmérőnek, iránytűnek, elfordulás- és csúszásjelzőnek, valamint egy műhorizontnak, vagy ezen műszerekkel ekvivalens adatot szolgáltató megbízható eszközöknek. Természetesen a tájékozódáshoz vagy elektronikus térképnek, vagy több kijelölt alternatív útvonalnak kell a fedélzeten rendelkezésre állnia, valamint a pillanatnyi helyzet meghatározáshoz elengedhetetlen a GPS vevő alkalmazása.

Azon eszközöket, melyek a repülési feladat végrehajtásához nélkülözhetetlenek, minden esetben legalább duplikálni kell. Az UAV fedélzetére telepített mérőeszközöknek és azok megbízhatóságának meg kell egyezniük az ember által vezetett légijárművekre telepítettekkel.

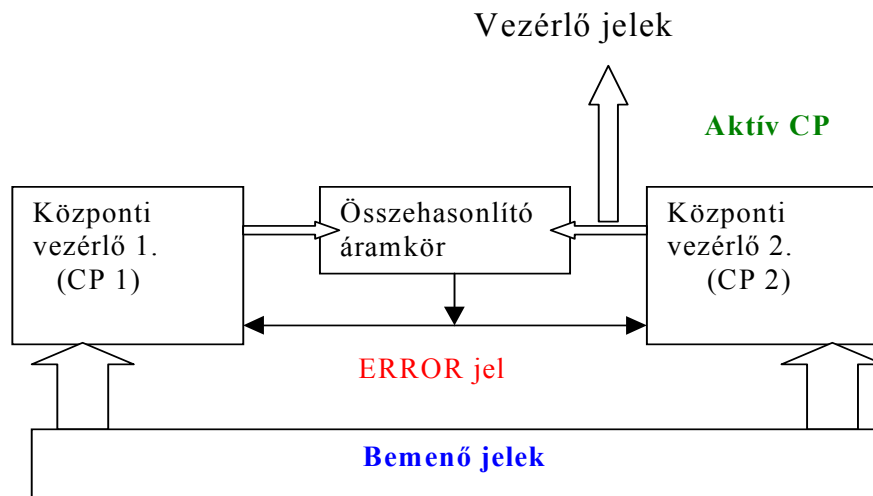
Kiemelt fontosságú kérdés továbbá a központi-vezérlő áramkör redundanciája, ami az embert (pilótát) hivatott helyettesíteni. Az UAV központi vezérlő áramkör meghibásodása a repülő eszköz zuhanásához vezethet, mely zuhanásnak a következményei, még mikro UAV-k esetén is beláthatatlanok.

Cikkemben át kívánom tekinteni a jelenleg az élet számos területén (például távközlési berendezésekben) alkalmazott redundáns központi vezérlő struktúrákat és megvizsgálom ezen struktúrák alkalmazhatóságát a mikro UAV-k vonatkozásában.

REDUNDÁNS VEZÉRLŐSTRUKTÚRA ELVEK

Melegtartalékolt rendszer (Hot standby)

A melegtartalékolt rendszerekben két egyenértékű vezérlő áramkör található (1. ábra). Mindkét vezérlő ugyanazt a bemenő információt fogadja és mindkét eszközben azonos szoftver fut, így hibamentes működés esetén mindkét eszköz ugyanazon döntések sorozatát hozza. Az egyik eszközt élesnek (aktívnek) nevezzük ki, vagyis az „éles” eszköz vezérlő jelei irányítják a folyamatot. A másik eszköz (melegtartalék – hot standby) vezérlő jelei csupán ellenőrzési céllal jelennek meg a rendszerben. Meghibásodás esetén a vezérlő jelekben eltérést fedezünk fel, mely hatására tesztekkel kell kiszűrni azt, hogy mely eszköz hibásodott meg. Az aktív eszköz szerepét a melegtartalékolt eszköz át tudja venni.



1. ábra – Melegtartalékolt vezérlő struktúra

Átkapcsolási taktika meghibásodás esetén

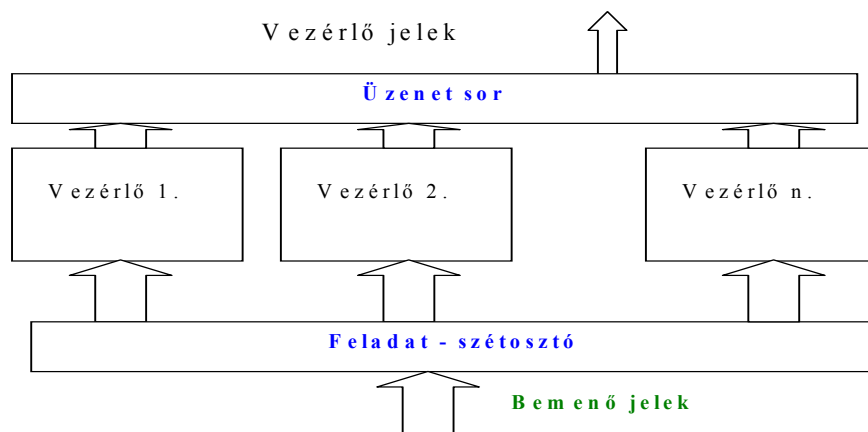
Eltérő vezérlő jelek esetén az összehasonlító áramkör (komparátor) hiba jelet szolgáltat mindkét vezérlőnek. A hibajel hatására először azt feltételezzük, hogy a melegtartalékolt rendszer hibásodott meg. Ezt azért tehetjük meg, mivel az aktív és a melegtartalékolt hardver és szoftver teljes mértékben azonos, így azok egyenlő eséllyel hibásodnak meg, vagyis hiba esetén 50-50% annak a valószínűsége, hogy az aktív-, vagy a melegtartalék vezérlőben állt elő hiba.

A fenti feltételezés alapján a melegtartalék CP-ben tesztutínokat futtatunk (memóriatesztek, aritmetikai- és logikai tesztek stb.), mely alapján az esetleges hiba nagy valószínűséggel kimutatható. Abban az esetben, ha a lefuttatott tesztek negatív eredménnyel zárulnak, vagyis hibamentességet mutatnak, akkor a továbbiakban azt kell feltételeznünk, hogy az aktív vezérlő hibásodott meg. Ekkor a már tesztelt, az eddig melegtartalékként üzemelő CP-t nevezzük ki aktívnak és a berendezést a továbbiakban már ez a vezérlő fogja irányítani. Természetesen az átkapcsolási folyamat során (amikor a melegtartalékolt CP aktív CP-vé válik) rövid idejű rendszer működési zavarok léphetnek fel, például távközlő berendezések esetén kapcsolatok bonthatnak el, hívások felépítése lehet sikertelen stb.

A rendszer egyik hátránya az, hogy részegység meghibásodás esetén rövid idejű működés kieséssel kell számolnunk. Ezen felül további működési bizonytalanságot jelenthet a „vaklárma” esetén történt átkapcsolás. Vaklármanak nevezzük azt az eseményt, amikor valamely processzor egységbe bejutó pillanatnyi zavarjel pillanatnyi hibás kimeneti jelet idéz elő. Ebben az esetben a tesztutínok futtatása mindkét processzor egység esetén negatív (hibamentes) eredménnyel zárul, de a melegtartalék-aktív átváltás ekkor is pillanatnyi üzemzavart jelenthet.

Terhelés megosztásban működő vezérlők (Load Sharing)

A terhelés megosztásban működő processzor struktúrák (2. ábra) esetén minimum kettő, vagy annál több általában egymással egyenértékű vezérlő dolgozik, így egy eszköz meghibásodása esetén a rendszer feladat megoldó sebessége ugyan csökken, de az működőképes marad.

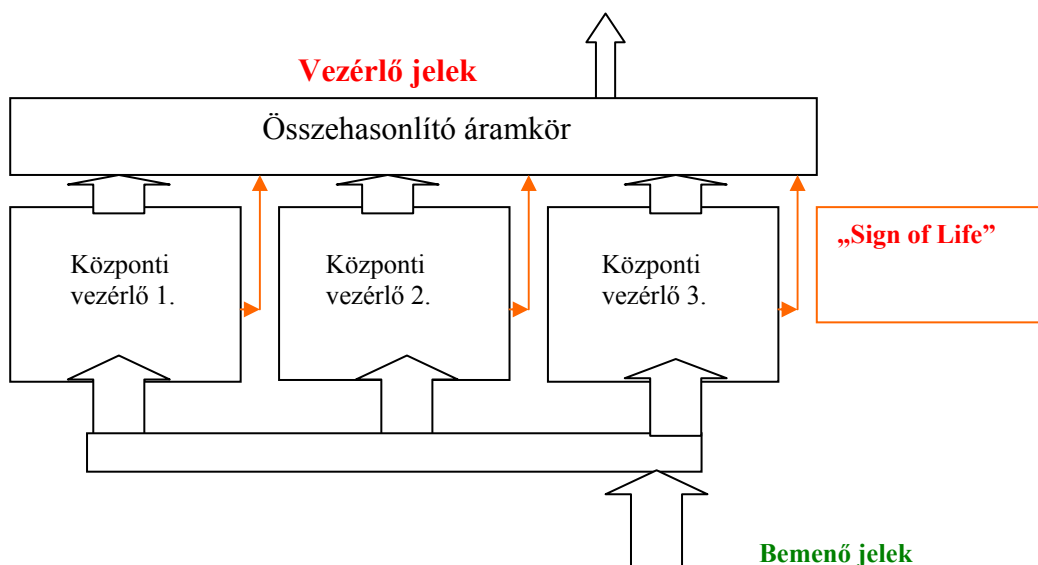


2. ábra Terhelés megosztásos vezérlő struktúra

A rendszer leggyengébb pontjának ezen struktúrában is a közös áramkörök tekinthetők a legkritikusabbnak. Jelen felépítésben a közös áramkörök jelentős intelligenciával és tároló képességgel rendelkeznek, mely növeli a meghibásodás kockázatát.

Többség döntés elvén működő redundáns központi vezérlő

A többség döntés elve alapján működő vezérlőkben (3. ábra) legalább három, funkcionálisan egyenértékű vezérlő hozza meg döntését. Mindegyik vezérlőáramkör ugyanazon bemenő jeleket fogadja, így hibamentes esetben természetesen mind ugyanazt a döntést hozza.



3. ábra – Többség döntés elvén működő struktúra

A struktúrából eredően a központi vezérlő áramköröknek csakis funkciójuk tekintetében kell megegyezniük, az egyes vezérlők hardver kialakítása, valamint a rajtuk futtatott szoftver származhat más gyártótól, fejlesztőtől. A struktúra hibátűrése nagyságrendekkel jobb az előző két struktúrához mérten, ugyanis az esetleg előforduló rejtett szoftverhibák hatása is nagy valószínűséggel kiküszöbölésre kerülhet a működés során. A struktúra azonban azt a veszélyt magában hordozza, hogyha két vezérlő egyszerre (előbb az egyik, majd a másik) „lefagy” vagy „kiakad”, -mert például

végtesen ciklusba kerülnek-, akkor két vezérlő azonosan szolgáltatja a hibás jelet és a többségi döntés értelmében a jól működő eszköz kisebbségben marad, így lényegében a központi vezérlő felmondja a szolgáltatást. Ezt úgy lehet kiküszöbölni, hogy csakis a működő eszköznek adunk „szavazati jogot”. A működésre a „sign of life” (életjel) jel bevezetésével következtetünk. Például az összehasonlító áramkör csakis annak a vezérlőnek a szavazatát fogadja el, mely eszköz megfelelő gyakorisággal életjelet ad magáról. Az „életjel” előállítás szoftveresen történik, mely legegyszerűbb esetben egy port bit invertálásával valósítható meg. Az erre vonatkozó utasítást (például: CPL bit) a program azon részébe kell beágyazni (például egy legalacsonyabb prioritású megszakításrutin), melyre a vezérlés nagy valószínűséggel csak akkor adódhat, ha az eszköz nem került végtesen ciklusba, vagy egyéb hibás állapotba.

MIKRO UAV VEZÉRLŐ KIALAKÍTÁS

Kialakítás szempontjai

Az előző fejezetben áttekintettük, a jól ismert redundáns vezérlő struktúrákat és azok hiányosságait. Az alkalmazhatóság vizsgálatát a továbbiakban úgy folytathatjuk, ha felállítjuk azon szempontrendszert, amelynek meg kell felelnie a vezérlőnek. A redundáns vezérlő kialakítás célja a megbízhatóság növelése azért, hogy a pilóta nélküli repülő eszköz repülési engedélyt kaphasson és ne csak kizárólag zárt légtérben legyen alkalmazható. Természetesen szem előtt kell tartanunk a kiépítés költségeit is, valamint azt a tényt, hogy a mikro UAV esetén a szállított teher mindössze néhány kilogramm lehet, tehát nagy tömegű vezérlőáramkör szállítása esetén a hasznos teherszállítási képesség jelentős mértékben lecsökken. Szintén szállított teherként jelentkezik az elektromos berendezések tápáram ellátását biztosító akkumulátorok, napelemek [9] tömege is, így a tervezésnél szintén ügyelni kell a teljesítményfelvételre. Követelmény továbbá a több szenzor (redundáns szenzor) jeleinek fogadása. Az áramkör kialakításánál ügyelni kell az EMC szempontokra, vagyis a rendszernek zavar állónak kell lennie és természetesen elektromágneses zavarokat sem bocsáthat ki. A vezérlő egységnek széles hőmérsékleti tartományban megbízhatóan kell működnie, a működést sem víz, sem vízpára nem veszélyeztetheti, vagyis gondoskodni kell a vezérlő vízállóságáról. Mechanikai elvárás továbbá a rázkódás és ütésállóság. A fenti elvárásokon felül az egységet úgy kell megtervezni, hogy a jelfeldolgozási sebesség elégséges legyen.

Hardver kialakítás legfontosabb követelményei 1.táblázat

Követelmény:	Ahol a követelményt figyelembe kell venni:
Elektromágneses kompatibilitás (EMC)	- Elvi kapcsolat kialakítása - PCB kialakítás - Mechanikai konstrukció
Pára és vízállóság	- Mechanikai konstrukció
Rázkódás és ütésállóság	- Alkatrész választás - Mechanikai konstrukció
Széles működési hőmérséklet tartomány	- Elvi kapcsolat kialakítása - Alkatrész választás - Mechanikai konstrukció
Elégséges jelfeldolgozási sebesség	- Elvi kapcsolat kialakítása - PCB kialakítás - Alkatrész választás
Kis fogyasztás	- Elvi kapcsolat kialakítása - Alkatrész választás
Több szenzor jelének fogadása	- Elvi kapcsolat kialakítása
Működés kiesés nélküli üzem	- Redundáns struktúra választás

A szempontrendszer alapján a többség döntés elvén működő vezérlőstruktúrát választottam. A legkritikusabb a közös áramkör (így az összehasonlító és kapcsoló áramkör), hiszen ezen áramkör meghibásodása (esetleges kiakadása) a teljes vezérlő hibáját eredményezi, és az, az UAV zuhanását idézi elő. A közös áramkörökre további szempontokat kell definiálni, vagyis ezen áramkörök megbízhatósága tekintetében kompromisszum kötésére kevés lehetőségünk van. Lehetőség szerint a közös áramköröket minimálisra kell szorítani. Az áramkörnek továbbá olyannak kell lennie, hogy az struktúrájából eredően ne, vagy minimálisan legyen zavarható. Az elvárások figyelembevételével tehát az összehasonlító áramkörünk memória- és visszacsatolás mentes, kizárólag kombinációs hálózat jellegű digitális, vagy visszacsatolás mentes analóg, esetleg nagy stabilitású visszacsatolt analóg lehet. Memória használatát azért kell kerülni az összehasonlító és kapcsoló áramkör kialakítása esetén, mert az egy esetleges hibás állapotot jegyezhet meg, vagy esetleg külső zavar hatására megváltozhat a tartalma, a visszacsatolás pedig gerjedést okozhat.

Áramköri kialakítás

A meghatározott szempontok figyelembevételével az alkalmazható CHIP-eket kellett kiválasztani. Széles hőmérsékleti tartományban ($-40^{\circ}\text{C}..+125^{\circ}\text{C}$) működőképes dsPIC (30F6010) jelfeldolgozó processzort választottam [5], melynek utasítás végrehajtási sebessége akár 30 MIPS is lehet és áramfelvétele relatív alacsony. Természetesen az áramfelvételt nagymértékben befolyásolja az, hogy a kontroller port kivezetéseinek mekkora áramot kívánunk elfolytatni. Az áramfelvételt szintén döntően befolyásolja a működtető órajel frekvenciája is. A frekvencia emelésével növekszik az áramkör utasítás végrehajtási sebessége, de az áramfelvétele is. A magas órajel frekvencia negatív hatást gyakorol továbbá az EMC elvárásokra, melyeket elsősorban a nyomtatott áramköri lap tervezésekor kell figyelembe venni [6][7][8].

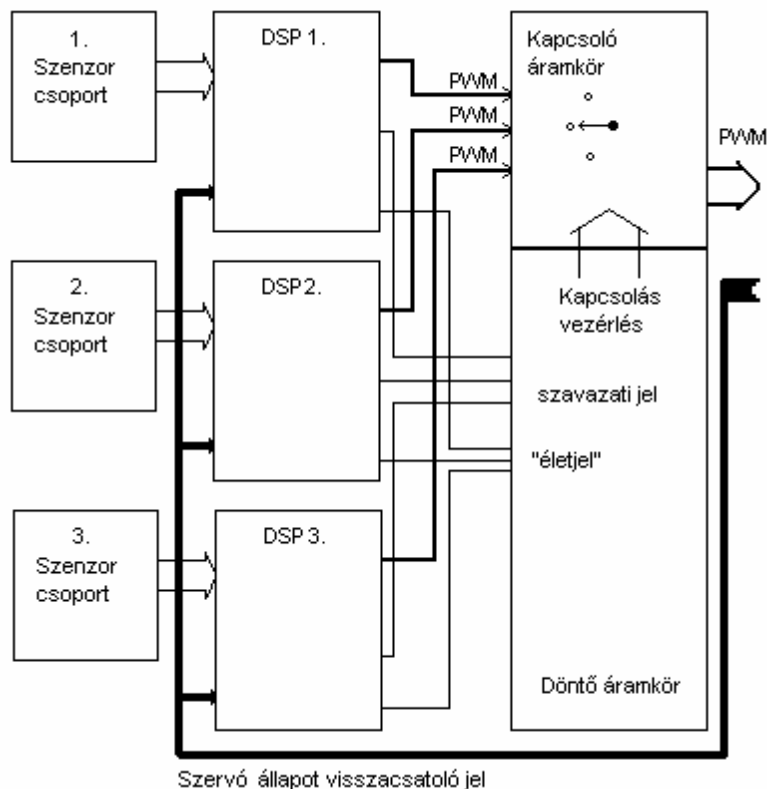
A választott (dsPIC) eszköz módosított Harvard architektúrájú, RISC utasításkészlettel rendelkező eszköz. A tokon belül 144 kbyte programtár, 8 kbyte adat RAM, valamint 4 kbyte adat tárolására alkalmas EEPROM van. 44 megszakításforrásból képes megszakításjelet fogadni, a megszakítások prioritása 8 szintű. Kimeneti portjai tekintetében 8 beépített, motor vezérlésére alkalmas PWM (Pulse Width Modulated) csatornával rendelkezik, továbbá SPI, I2C, UART és CAN busz periféria illesztő áramkörrel rendelkezik [5]. Mivel a DSP kontroller beépített memóriák és perifériák tekintetében igen gazdag, ezért a központi vezérlő viszonylag kevés számú külső elem felhasználásával kis méretű nyomtatott áramköri lapon felépíthető. Ez kis méretet, így kis helyigényt jelent, valamint az áramkör tömege is alacsony lesz. A kevés külső elem alkalmazása relatív kis számú csatlakozást és forrasztást jelent, ami szintén a meghibásodás valószínűségét csökkenti.

Az építőelemek, elektronikai alkatrészek választásakor fontos figyelembe venni a mechanikai rázkódás és ütésállás képességet. Különösen érzékeny építőelem a rezgés frekvenciáját meghatározó kristály, valamint az állítható elektronikus alkatrészek, például potenciométerek, de nem szabad megfeledkeznünk a csatlakozókról sem. Ez utóbbi építőelemek felhasználását lehetőség szerint kerülni kell, ha nem lehetséges, akkor beépített mennyiségüket minimális számúra kell szorítani és csakis minősített alkatrészeket szabad alkalmazni.

A rázkódás és ütésállósági képességet, valamint a víz- és páraállóságot az áramkörök műgyantás vagy szilikon gumis kiöntésével érhetjük el.

Az elektromágneses kompatibilitás kritériumainak a nyomtatott áramkör kialakításán túl, tápszűrő kondenzátorok beépítésével és árnyékoló dobozzal tehetünk eleget.

Áramköri kialakítást blokkséma szinten a következő oldalon láthatjuk.



4. ábra - μ UAV redundáns vezérlő kialakítás

Az ábrán látható, hogy a redundáns vezérlőt három egymástól függetlenül működő DSP-ből alakítom ki. Mindegyik vezérlő áramkörhöz kapcsolódnak a saját szenzorai (GPS vevő, magasság mérő, sebesség mérő stb.). Az ilyen struktúrájú kialakítással elkerültük a bemeneten különben szükséges közös áramköri kialakításokat.

A megfogalmazott követelmények és szempontok figyelembevételével a közös áramkörök digitális vezérlő jeleket, valamint digitális „életjelet” (SoL -t) fogad, a szavazás analóg jel formájában történik. A szavazati jelet a jelprocesszorok állítják elő a beépített D/A konverterük segítségével. A szavazati jel arányos a digitális vezérlő jellel. A döntő áramkörben a szavazati jeleket analóg komparátorok hasonlítják össze. Csak az a szavazati jel kerül felhasználásra, amely vezérlő „életjelet” is ad magáról. Az „életjel”, mint pulzáló négyszög impulzus jelentkezik, mely R-C tagon DC szintet eredményez. Abban az esetben, ha a pulzáló jel megszűnik, akkor τ időállandó szerint a kapacitív tag kisül. A kapacitáson a DC szint szintén komparátorral figyelhető. A DC szint egy megadott érték alá csökkenése esetén az adott kontroller szavazó jelét figyelmen kívül kell hagyni. A komparátor áramkörök kimentén áll elő a kapcsolást vezérlő digitális információ, mely memóriamentes kombinációs áramkört vezérel, mely a PWM jelek kapcsolását végzi.

Szoftver redundancia

A hardver redundanciához természetesen nagy arányú szoftver redundanciát is kell a rendszerbe beépíteni. Elsődleges szoftver redundanciának kell tekinteni azon szoftver modulokat, melyek a DSP vezérlő működését és a redundáns rendszerbe illesztését biztosítják. Ilyenek többek között a Watch Dog törlő és a Sign of Life jelek.

Másodlagos szoftver redundanciának tekinthetők azon eljárások, melyek a bemenő jelek zavarsszűrését végzik, valamint a bemenő adatok közti összefüggések alapján ellenőrzik a bemenő jelek helyességét.

Harmadik szintű szoftver redundanciának tekinthetjük az egyes részegységek meghibásodása esetén repülési taktikák, stratégiák váltását. A taktikai algoritmusok a hibafelismerése alapoznak. Egy mechanikus hiba, például mechanikai beszorulás úgy fedhető fel, hogy a szervó pozíciót visszacsatoljuk a vezérlőbe a szervóba épített potenciométerrel. Ennek kezelése természetesen további problémákat vet fel, mivel mindegyik jelprocesszor saját szenzorokkal rendelkezik, ezért pillanatnyi mérési pontatlanságból eredően még a hibátlanul működő vezérlők egymásnak ellentmondó szervó vezérlő jelet adhatnak ki. Természetesen ekkor is a többség döntés elve érvényesül, de azért, hogy ilyen esetben ne hogy taktikai algoritmus aktivizálódjon, ezért a komparátor áramkör döntését is vissza kell vezetni a vezérlő kontrollerekbe, vagyis mindegyik processzor tudja, hogy éppen az ő vezérlő jele érvényesült-e vagy sem.

Az elkészített algoritmusokat kódolásuk után stabilitási teszteknek kell alávetni. A stabilitási tesztek során kiemelt figyelmet érdemelnek a kvantálásból eredő nemlinearitások okozta határciklus jelenségek. [10]

A fentiekben felsorolt szoftver rutinok és algoritmusok, mint redundáns működést megvalósító tényezők kutatását megkezdtem, az ezzel kapcsolatos tudományos eredményeket további cikkeimben kívánom publikálni.

A központi vezérlő áramkörök redundáns kialakítása tehát olyan meghatározó kutatási irányvonal, melyek eredményeivel az UAV-k a jövőben Légialkalmassági Bizonyítványt kaphatnak, így használatuk nemcsak kizárólag elkülönített légtérben lesz elképzelhető. Természetesen a kutatás folyamán szem előtt kell tartanunk azt a tényt, hogy a központi vezérlő redundanciája és így annak megbízható működése csak szükséges, és nem elégséges feltétele a Légialkalmassági Bizonyítvány megszerzésének.

ÖSSZEFOGLALÓ

Jelen cikk a kisméretű, pilóta nélküli repülő eszközök központi vezérlő áramköreinek lehetséges struktúrájával foglalkozik. Cél a megbízhatóság növelése, mivel Magyarországon és az EU tagországaiban az UAV-k rendszerbe állítása (Légialkalmassági Bizonyítvány megszerzése) jelenleg nem lehetséges, az UAV-k repülése kizárólag zárt légtérben folytatható. A cikkben megjelölt kutatási irányvonal a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Elektronikai Hadviselés tanszékén végzett kutatások fontosságát és időszerűségét kívánja ismertetni.

FELHASZNÁLT IRODALOM, HIVATKOZÁS

- [1] László VÁNYA: Excepts from the history of unmanned ground vehicles development in USA. AARMS vol.2, No.2 (2004) Budapest, Hungary
- [2] GÁCSEI Zoltán: A kisméretű pilóta nélküli repülőgépek katonai alkalmazásának lehetőségei Gazdaságosság, hatékonyság és a biztonság a repülésben. Tudományos Konferencia, Szolnok, 2004. április 23.
- [3] Imre MAKKAY: Robotics in the 21th century AARMS vol.2, No.2 (2004) Budapest, Hungary
- [4] WÜHRL TIBOR: Pilóta nélküli repülőgépek repülési feltételei és a jogszabályi környezet Kard és Toll 2005. p 000 - 000
- [5] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.: dsPIC30F Programmer's Reference Manual 2003. (DS70030E)
- [6] GAURANG KAVAIYA: PCB Layout Fundamentals, EMC Newsletter ISSUE 2, January 2005. Microchip
- [7] JOE JULICHER: Ground Planning Case Study, EMC Newsletter ISSUE 2, January 2005. Microchip
- [8] AL RODRIGUEZ: PCB Design Techniques for High-speed Digital Systems, EMC Newsletter ISSUE 2, January 2005.
- [9] TURMEZEI Péter: Napelemes energiaellátó rendszerek katonai célú alkalmazásának kérdései. PhD értekezés. ZMNE Budapest, 2003.
- [10] ALFRED FETTWEIS - KLAUS MEERKÖTTER: Suppression of Parasitic Oscillation in Wave Digital Filters IEEE VOL. CAS-22, NO. 3, March 1975