



REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

Kiemelt közlemények

AHMAD ALHOSBAN: Assessment of the GIS-Aided Precise Approach Using the GNSS-GBAS Landing Systems

**REIZINGER PATRIK, HUSZÁR PÉTER,
MILÁNKOVICH DOROTTYA, SZÉLL ALEXANDRA:**
Kisműholdak fejlesztése a sokoldalúság és a könnyű
reprodukálhatóság tükrében

HUSZÁR PÉTER: Drónok elleni fenyegetések
a kibertérből

32. évf. (2020)
2. szám

HU ISSN 1417-0604 (nyomtatott)
HU ISSN 1789-770X (elektronikus)



LUDOVIKA
EGYETEMI KIADÓ

Repüléstudományi Közlemények

Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar tudományos kiadványa

Elektronikus kiadás
HU ISSN 1789-770X

Nyomtatott kiadás
HU ISSN 1417-0604

A szerkesztőbizottság elnöke

Prof. Dr. Óvári Gyula (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

A szerkesztőbizottság tagjai

Dr. Dunai Pál (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Bottyán Zsolt (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Kavás László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Makkay Imre (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Pokorádi László (Óbudai Egyetem)
Dr.h.c. doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD., MBA, LL.M. (Kassai Műszaki Egyetem, Szlovákia)
Dr. Palik Mátyás (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Szabolcsi Róbert (Óbudai Egyetem)
Dr. Szilvássy László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

Főszerkesztő

Dr. Békési Bertold (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

Szerkesztőség

Dr. Békési Bertold (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Kavás László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Szilvássy László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Szerkesztőség címe: 5008 Szolnok, Kilián út 1.
Levelezési címe: 5008 Szolnok, Pf. 1.
e-mail: RepTudKozl@uni-nke.hu

Kiadó

Ludovika Egyetemi Kiadó Nonprofit Kft.
1089 Budapest, Orczy út 1.
kiado@uni-nke.hu • +36 1 432 9000

A kiadásért felel: Koltányi Gergely ügyvezető igazgató

Borítókép: a képet Kóvári László (jetplanes.blog.hu) készítette



Tartalom

Bozóki János, Kavás László: Katonai légi jármű-alkatrész örvényáramos anyagvizsgálatának lehetőségei és tapasztalatai	5
Huszár Péter: Távoli drónazonosítás.	19
Mies Gerald, Zentay Péter: Machine Tools and Industrial Robots as Key Technologies to Enable Industry 4.0	37
Ahmad Alhosban: Assessment of the GIS-Aided Precise Approach Using the GNSS-GBAS Landing Systems	49
Faltin Zsolt, Beneda Károly: Centrifugálkompresszor-karakterisztika regressziója a teljes működési tartományban nem lineáris matematikai modellhez	67
Reizinger Patrik, Huszár Péter, Milánkovich Dorottya, Széll Alexandra: Kisműholdak fejlesztése a sokoldalúság és a könnyű reprodukálhatóság tükrében . .	81
Szűcs Viktor, Gajdács László: A 3D nyomtatás lehetőségei a repülőgépiparban	97
Menyhárt József, Gerald Mies, Komlósi István: Measurement Chamber Design for Testing Batteries of the Electric Vehicles	105
Beneda Károly Tamás, Faltin Zsolt: Tízéves a teljes hatáskörű digitális elektronikus hajtómű-szabályozó rendszerek fejlesztése a BME VRHT-n	117
Kővári Bálint, Kolat Máté, Haraszi Sándor, Gyenis Tamás, Vörös Dániel, Rohács József, Bicsák György: Area Scanning with Reinforcement Learning and MCTS in Smart City Applications	137
Huszár Péter: Drónok elleni fenyegetések a kibertérből.	155
Peregy Zoltán, Venczel Márk: Nemzetközi repülőterek kiberbiztonsági kihívásai	165



Bozóki János,¹ Kavas László²

Katonai légijármű-alkatrész örvényáramos anyagvizsgálatának lehetőségei és tapasztalatai

Napjainkig a Magyar Honvédség légierijének kötelékében számos új, a kor technikai színvonalán álló haditechnikai eszköz állt hadrendbe (JAS-39 EBS HU Gripen harcászati repülőgép, Airbus A319 szállító repülőgépek, Airbus H145M helikopterváltozatok). Ezek megjelenésével együtt jár a korszerű üzemeltetési és diagnosztikai rendszerek alkalmazása is, amelyek egyik speciális eleme a roncsolásmentes anyagvizsgálat. Az üzemeltetésben részt vevő szakemberek felkészültségének szintje a roncsolásmentes vizsgálatok hatékony alkalmazásának egyik legfőbb tényezője. E publikáció egy, a katonai légi járművek üzemeltetése során felhasználható, nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező, örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer alkalmazási lehetőségét, sajátosságait és az alkalmazó ezen a téren szerzett tapasztalatait mutatja be.

Kulcsszavak: örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálat, légi járművek üzemeltetése, harcászati repülőgép, szállító repülőgép, helikopter

Possibilities and Experiences of Eddy Current Testing of Military Aircraft Components

To date, several high-tech military equipment (JAS-39 EBS HU Gripen combat aircraft, Airbus A319 transport aircraft, Eurocopter H145M helicopter variants) have been deployed in the Hungarian Defence Forces. With their deployment, a need has emerged to apply modern operating and diagnostic systems, one of them being non-destructive testing (NDT). One of the many key factors of applying successful non-destructive testing is the level of competence of the personnel involved. This publication is about to describe the applicability and characteristics, as well as the experience gained while applying an eddy current testing method with high spatial resolution used during the operation of military aircraft.

Keywords: eddy current non-destructive material testing, aircraft operation, combat aircraft, transport aircraft, helicopter

¹ MH Légi jármű Javitóüzem, parancsnok, e-mail: leju.pk@mil.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1897-7392>

² Nemzeti Közsolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék, egyetemi docens, e-mail: kavas.laszlo@uni-nke.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7375-3527>

1. Bevezetés

A katonai repülőeszközök üzemeltetésében, a mindennapi gyakorló-kiképző repülések mellett gyakori az országhatáron kívüli, műveleti területeken való megjelenés is. E feladatok többsége a szállító repülőgépeket (AN-26, és A319 típusok) érinti, de a NATO-szövetségi feladatok, közös harcászati gyakorlatok során, a rendszerben álló harcászati repülőgépeket és szállító helikoptereket is bevetik. Az ilyen speciális felhasználási módok szükségessé tették már a korábbi időszakban is az akkor üzemeltetett típusokra alkalmazható háborús sérülések javítási képesség megteremtését és folyamatos fenntartását. A napjainkban megvalósuló haderőfejlesztési program számos korszerű, sokoldalúan alkalmazható, nagy harcértékkel rendelkező és újszerű szerkezeti megoldásokat, építőanyagokat tartalmazó légi jármű-típust állított hadrendbe a Magyar Honvédségben. Az új repülőgépek, helikopterek beszerzése, rendszerbe állítása nem csak az üzemeltető alakulatok számára jelent feladatrendszer-változást, az ezen eszközök javítására, időszakos karbantartására felkészített szervezetnek nem mellékes feladatként a sérülések javítás elemeit is testre, illetve szerkezeti technológiai szintre kell szabnia. A korszerű szerkezeti anyagokhoz többek között illeszteni kell egy hibafeltáró alrendszert is. Az idesorolható különböző eljárásokra a megoldandó feladatok széles skálája, valamint az egyes módszerek alkalmazhatóságának korlátai miatt van szükség. Az eltérő fizikai elven működő roncsolásmentes vizsgálati módszerek nem egyformán használhatók a hibák detektálására vagy anyagtulajdonságok jellemzésére, ezért azok teljesítőképességét, alkalmazási lehetőségeit mindig szem előtt kell tartani. A megoldandó feladat tisztázását követően a leginkább megfelelő roncsolásmentes vizsgálati eljárást vagy ezek kombinációit szükséges alkalmazni. A használandó módszer nagymértékben függ a vizsgálati tárgyakban várható folytonossági hiány típusától, méretétől, irányítottságától, a keresett eltérés pozíciójától, felületi mélységi helyzetétől. A publikációban egy, a katonai légi járművek üzemeltetése során felhasználható, nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező, örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer (ET)³ alkalmazási lehetőségét, sajátosságait és az alkalmazó ezen a téren szerzett tapasztalatait mutatja be egy repülőgépre felszerelhető rakétaindító berendezés (NMML)⁴ áramvonalazó lemezének vizsgálatán keresztül.

2. Egy vizsgálandó munkadarab bemutatása

Az NMML rakétaindító berendezés áramvonalazó lemeze kovácsolt elemek összehegesztéseiből álló alumíniumszerkezet (1. és 2. ábra). Nagy sebességű repülésnél a kialakításából adódóan csökkenti a repülőgép légellenállását, és megakadályozza a hangebesség felett kialakuló káros lökéshullámok létrejöttét.

³ ET: Eddy Current Test, örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer.

⁴ NMML: NATO Multi Missile Launcher, rakétaindító berendezés.



1. ábra

JAS-39 GRIPEN repülőgépre függesztett NMMML rakétaindító berendezés. Forrás: Peták György – Szabó József: *A Gripen*. Budapest, Petit Real Könyvkiadó, 2003. 43.

A JAS-39 GRIPEN harcászati vadászbombázó repülőgép sebessége 2,0 Mach nagy magasságon, 1,2 Mach tengerszinten. A Mach-szám (M)⁵ egy dimenziómentes mennyiség, egy objektum haladási sebességének és az áramló közeg helyi hangsebességének hányadosa.⁶

$$M = \frac{V_i}{a}$$

- V_i : a légi jármű levegőhöz viszonyított, valóságos repülési sebessége [m/s]
- a : helyi hangsebesség [m/s]

A nemzetközi egyezményes légkör (ISA)⁷ adatai szerint 1000 m magasságban a hang terjedési sebessége $a = 336,434$ m/s, és $M = 1,2$ esetén a repülőgép repülési sebessége $V_i = 1453$ km/h.

A Gripen +9 és -3 g értékű túlterhelés elviselésére képes. A „g” terhelési többes egy mértékegység nélküli szám, amely megmutatja, hogy a repülőgépre, annak szerkezeti elemeire vagy akár annak utasaira, a saját súlyukat hányszorosan meghaladó (terhelő) erő hat. A terhelési többes felhasználható a repülőgép különböző repülési manőverei, repülési fázisai során ébredő terhelések általános jellemzésére. A terhelések tárgyalásakor természetesen a hőmérséklet-változásokról sem szabad megfeledkezni, hiszen 10 000 méter magasságban közel -50 °C a hőmérséklet, míg a kifutópályán +40 °C is lehetséges.⁸

⁵ M : Mach-szám, egy dimenziómentes mennyiség.

⁶ Robert W. Fox – Alan T. McDonald: *Introduction to Fluid Mechanics*. USA, John Wiley & Sons, 1994. 439–440.

⁷ ISA: International Standard Atmosphere, nemzetközi egyezményes légkör.

⁸ Kavás László: *Harcászati repülőgép kiválasztásának módszere, gazdasági hatékonysági mutatók alapján, kis létszámú haderő légierőjének korszerűsítésére*. PhD-értekezés, Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2009. 23–31.



2. ábra

NMML rakétaindító berendezés áramvonalazó lemeze. Forrás: Bozóki János felvétele

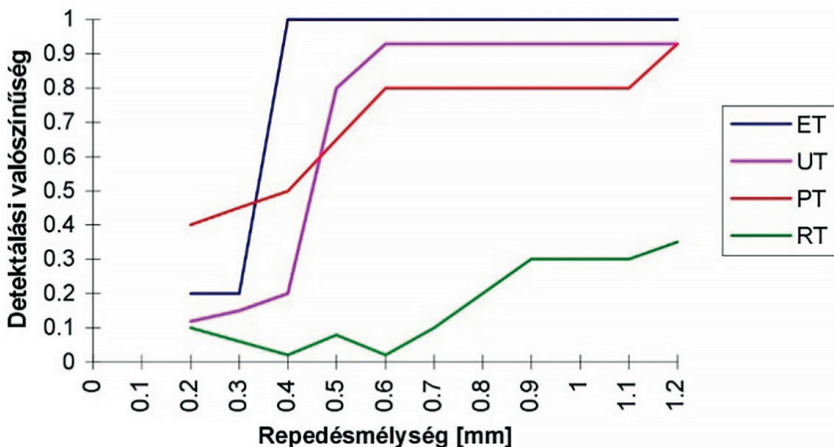
Az áramvonalazó lemez fő igénybevételét a légerőkből létrejövő erőhatás hozza létre. Nagy magasságon, nagy sebességű repülésnél a repülőgép szerkezetén nagymértékű hőmérséklet-ingadozás jön létre. Ezáltal csökkennek az áramvonalazó lemez szilárdsági és merevségi jellemzői. Járulékos feszültségek keletkeznek, amelyek a külső terhelésekből származó feszültségekkel összegződve a stabilitás elvesztését vagy az áramvonalazó lemezen kialakuló repedéseket és egyéb folytonossági hiányokat eredményezhetnek. A feszültséggyűjtő helyeken lassú alakváltozás keletkezik, amely az áramvonalazó lemez roncsolódását idézheti elő.

3. A roncsolásmentes anyagvizsgálat vizsgálati módszerének kiválasztása

Az elsődleges szempont természetesen az, hogy az adott eljárással érzékelni lehessen a vizsgálni kívánt anyagtulajdonságot. Például örvényáramos mérést csak elektromosan vezető anyagokon lehet végezni, és ezeken is csak olyan paraméterek határozhatók meg, amelyek az örvényáramok erősségét, valamint eloszlását befolyásolják.⁹ A következő kérdés az, hogy a szóba jöhető eljárások közül melyik biztosítja a megkövetelt érzékenységet és pontosságot (3. ábra). Belső anyaghibákat például sokkal könnyebben fel lehet deríteni

⁹ Hugo L. Libby: *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1971. 52–53.

ultrahanggal, mint örvényáramokkal, felületi repedéseknél viszont éppen fordított a helyzet.¹⁰ Az érzékenység és a pontosság, megbízhatóság egy adott módszeren belül függ a konkrét vizsgálati technikától is. További lényeges szempont, hogy a módszer hatékonysága kielégítő legyen, azaz a rendelkezésre álló idő alatt meg lehessen vizsgálni a szükséges mennyiségű mintát. Nem mindegy ugyanis, hogy gyártás közben kell ellenőrzést végezni (például dróthúzásnál), vagy bizonyos alkatrészek kritikus helyeinek vizsgálatára van szükség (például repülőgépek időszakos karbantartásakor). A hibakereső vizsgálatok megválasztásának fontos szempontja a kimutatni kívánt folytonossági hiány jellege, alakja, mérete is (1. táblázat). A vizsgálatot végző szakembernek alaposan ismernie kell a vizsgált anyag jellemzőit, az üzemeltetés során a rajta keletkező erőhatásokat, tönkremenetelének okát és folyamatát is. Végezetül, természetesen fölmerülnek gazdasági szempontok is, ezeknek figyelembevételével azonban már túlmutatnak az anyagvizsgálat kérdéskörén. A roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások közül egyik sem tökéletesen megbízható, 100%-os megbízhatóság nem érhető el.



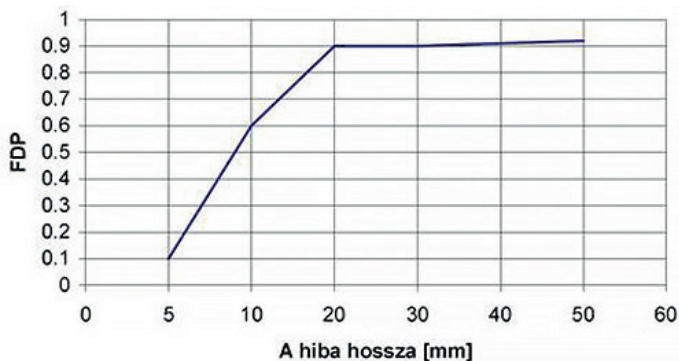
3. ábra

Különböző roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek megbízhatósága. Forrás: Tóth László – Serge Crutzen: *Roncsolásmentes vizsgálati módszerek*. Miskolc, Miskolci Egyetem, 1999. 29–30.

A 3. ábra a különböző roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek megbízhatóságát mutatja be, és megállapítható, hogy az ET-vizsgálat 0,35–1,2 mm-es lemezvastagságoknál is igen magas megbízhatósággal rendelkezik.¹¹

¹⁰ Tóth Ferenc: Roncsolásmentes anyagvizsgálatok. *Anyagvizsgálók Lapja*, (1994), 3. 72–111.

¹¹ J. Boogaard – G. M. Van Dijk: NDT Reliability and product quality. *NDT & E International*, 26. (1993), 3. 149–155.



4. ábra

Örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer detektálási valószínűsége különböző hosszúságú folytonossági hiányok esetén. Forrás: Tóth László – Serge Crutzen: *Roncsolásmentes vizsgálati módszerek*. Miskolc, Miskolci Egyetem, 1999. 29–30.

A 4. ábra alapján megállapítható hogy az ET-vizsgálat igen rövid folytonossági hiányok detektálását is magas megbízhatósággal kimutatja.¹² A roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel elérhető határérzékenységet az 1. táblázat alapján határozhatjuk meg.¹³

1. táblázat

A roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel elérhető határérzékenység. Forrás: Rohács József – Simon István: *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1989. 406–407.

Vizsgálati módszer	Az észlelt repedés min. mérete, mm		
	Nyílásszélesség a felületnél	Mélység	Hosszúság
Optikai vizuális:			
• szemmel	0,1	–	2...3
• optikai készülékkel	0,01...0,1	–	2...3
Folyadékpenetrációs	0,001...0,05	0,1	0,1...0,3
Mágnesporos	0,001	0,1	0,5...1
Örvényáramos	0,001	0,3...0,5	1,5...5
Ultrahangos:			
• felületi hullámok esetén (lapátéleken)	0,001	0,3	–
• lemez hullámok esetén	0,001	0,1	10
• rezonanciaeljárás esetén ¹⁴	–	–	–
Röntgensugaras	0,1	az átvilágított vastagság 1,5...3%-a	–

Az örvényáramos mérőszondákat felhasználva az anyaghiba elhelyezkedéséről, esetleges térbeli kiterjedéséről is információt kapunk. Ennek gyakorlati jelentősége markánsan akkor jelentkezik, amikor kritikus elhelyezkedésű vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni a biztonság számára irreleváns, egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól.

¹² S. Crutzen – F. Frank – L. Fabbri – P. Lemaitre: *Compilation of NDE effectiveness data*. Final Issue, The Netherlands, JRC Petten, 1999. 60–61.

¹³ Rohács József – Simon István: *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1989. 406–407.

¹⁴ *Rezonanciaeljárás*: 25 mm² területű elégtelen ragasztás észlelését teszi lehetővé.

Az örvényáramos anyagvizsgálati módszer sokoldalúan alkalmazható, azonban ennek is megvannak a maga korlátai. Helytelen tehát az a szemlélet, amely megpróbálja szembeállítani az egyéb roncsolásmentes eljárásokkal (például a repedésvizsgálat területén az ultrahangos vagy a folyadékbehatolásos módszerrel), hiszen ezek sokkal inkább kiegészítik, mintsem helyettesítik egymást. Egyéb eljárásokkal történő összehasonlításakor az örvényáramos módszer mellett a következő indokok szólnak:

- nincs szükség mechanikai kontaktusra a szonda és a vizsgálandó objektum között;
- nem igényel felület-előkészítést, és utólag sem kell a mintát tisztítani;
- igen gyors, folyamatos mérést tesz lehetővé;
- alkalmazása semmilyen környezet- és egészségvédelmi problémát nem vet föl.

Tekintetbe kell azonban venni az alábbi hátrányokat is:

- csak a minta felületközeli tartományáról ad információt;
- a detektált jel számos paramétertől függ, ezért viszonylag sok zavaró effektusra lehet számítani;
- az optimális mérési paraméterek megválasztása és az eredmények kiértékelése sok esetben képzett szakembert követel.

Az örvényáramos módszeren belül valamilyen konkrét mérés technika alkalmazását szintén az előzőekben tárgyalt szempontok alapján lehet eldönteni. Ennek kapcsán meg kell határozni az adott feladathoz illeszkedő szonda és mérőműszer típusát, valamint a vizsgálat paramétereit.

4. Örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer megtervezése

4.1. Szondaválasztás

A vizsgálati problémához illeszkedő mérőszonda kiválasztása a minta alakja (mérete), a szükséges mérési érzékenység és hatékonyság alapján történik. Gyűrű-, illetve belsőszondával egyszerű alakzatok (rudak, csövek, furatok) vizsgálhatók. Ezekkel a szondákkal a minta teljes keresztmetszetét vizsgálhatjuk (pontosabban: abból egy olyan vastag réteget, amelyet a skin-effektus megenged). Elsősorban tehát az egész keresztmetszetre kiterjedő minőségváltozásokat (például az eltérő ötvözet tartalmat) mutatják ki jól. Kevésbé érzékenyek viszont arra, ha csak egy szűk tartományban módosul az örvényáramok útja és sűrűsége (például egy repedés vagy zárvány miatt). Amennyiben azonban a nagy érzékenység nem követelmény, hatékonyan alkalmazhatók hibafelderítésre is, mivel egyszerű és gyors vizsgálatot tesznek lehetővé. Tapintószondával – ha az elegendően kicsi – tetszőleges alakú mintán végezhető nagy érzékenységű vizsgálat. Ennek viszont ára van: a vizsgálandó objektum teljes felületének

letapogatása, különösen bonyolult alakzatoknál sok időt igényel. A különböző kialakítású örvényáramos anyagvizsgáló szondákat az 5. ábrán láthatjuk.¹⁵

A cikkünkben bemutatott mérés az OLYMPUS ML/100kHz–500kHz/A/60.03/4FX szondával történt.



5. ábra
Örvényáramos anyagvizsgáló szondák. Forrás: Bozóki János felvétele

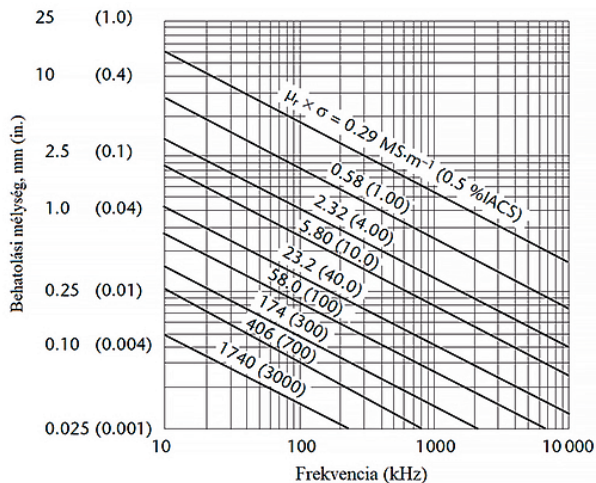
4.2. Frekvenciaválasztás

A frekvenciát a szükséges behatolási mélység, az érzékenység és a vizsgálati sebesség figyelembevételével kell megválasztani. A frekvenciaválasztás szempontjából a behatolási mélység nem igényel bonyolult megfontolásokat. Egyes esetekben az a cél, hogy az anyag mélyebb rétegeit is vizsgálhassuk (például hibakeresés), máskor viszont csak a felületet akarjuk ellenőrizni.¹⁶ A feladat alapján meghatározott behatolási mélységhez tartozó felső, illetve alsó határfrekvencia a 6. ábráról egyszerűen leolvasható. (Például 500 kHz-en vörösréz mintánál a standard behatolási mélység $\delta = 0,1$ mm.)¹⁷

¹⁵ Donald J. Hagemeyer: *Fundamentals of Eddy Current Testing*. Columbus, Ohio, American Society for Nondestructive Testing, 1990. 61–62.

¹⁶ Patrick O. Moore: *Electromagnetic Testing*. In *Nondestructive Testing Handbook*. 3rd edition. Vol. 5. Columbus, American Society for Nondestructive Testing, 2004. 21–23.

¹⁷ Kajdi Gyula: *Anyagvizsgálat örvényáramokkal*. Budapest, Szakmai Továbbképző és Átképző Vállalat 1990. 47–48.



6. ábra

Behatolási mélység változása a frekvencia függvényében.¹⁸ Forrás: Kajdi (1990) i. m. 47–48.

A vizsgálati sebesség és a kívánt hibafelbontás együttesen meghatároznak egy alsó határfrekvenciát, amely alatt a hibák már nem detektálhatók teljes biztonsággal. A frekvencia megválasztásának alapvető szempontja az a magától értetődő igény is, hogy a mérési érzékenység az adott vizsgálat során a lehető legnagyobb legyen. A mérőrendszereknek különböző paraméterek egységnyi megváltozására adott relatív jelváltozása általában erősen frekvenciafüggő.

Az ellenőrzési feladathoz 200 kHz frekvenciát választottam, igazodva az alkatrész anyagához és a szükségés behatolási mélység követelményéhez.

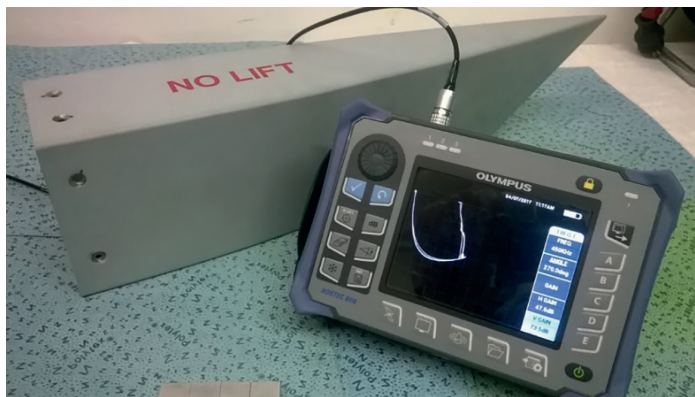
4.3. Műszerválasztás

Az előzőekben leírt szempontok alapján megtervezett méréshez általában katalógusok és prospektusok segítségével meg lehet találni a megfelelő műszert vagy vizsgálóberendezést. A gyártók rendszerint széles szondaválasztékot is kínálnak, amelyből az esetleg meglévő műszerekhez pótlólag is lehet rendelni. A Magyar Honvédség üzemeltetési rendszerében többféle működési elvű és rendeltetésű örvényáramos készülék van rendszeresítve.

- A klasszikus örvényáramú mérés technikai elvek alapján működő az anyag és a mágnes tér között kialakuló kölcsönhatás mértékének vizsgálatára alkalmas impedanciatekercs felhasználásával épített vizsgálókészülék (lásd: 7. ábra).
- A nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező mágnesszenzorra épülő örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálati berendezés.¹⁹

¹⁸ σ : elektromos vezetőképesség (siemens/méter – S/m); μ : relatív mágneses permeabilitás (henry/méter, H/m).

¹⁹ Vértesy Gábor – Gasparics Antal – Pávó József: Elektromágneses roncsolásmentes anyagvizsgálat nagy érzékenységű mágnesestér-mérő szenzor alkalmazásával. *Anyagvizsgálók Lapja*, 15. (2005), 2. 46–48. 47.



7. ábra

Örvényáramos anyagvizsgáló készülék. Forrás: Kavás László felvétele

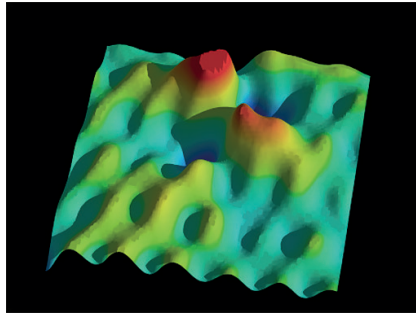
5. Mágnesszenzor alkalmazása örvényáramú anyagvizsgálati eljárások területén

A klasszikus örvényáramú anyagvizsgálat lehetőségeiben rejlő ellentmondásokat a gerjesztés és az érzékelés szétválasztásával lehet feloldani. Ez a szeparáció lehetővé teszi, hogy olyan gerjesztőtérrel alkalmazzunk, amely esetében a kimutatandó hibahely a lehető legjobban megzavarja az anyag belsejében az örvényáramok eloszlását; illetve hogy a mérőelemet térben úgy helyezzük el, hogy az a lehető legérzékenyebb módon észlelje ezt a zavart (az örvényáramok térbeli eloszlásának torzulása hatására, a mágnes térben megjelenő torzulásokat). A kellő behatolási mélység biztosítására elektromosan jól vezető anyagok (például alumínium) esetében az alkalmazható gerjesztőtér-frekvencia mindössze néhány kHz. Ilyen alacsony frekvenciájú mágnes teret induktív módon már nehézkes mérni, nagy érzékenységet pedig egyéb fizikai okok miatt lehetetlen elérni. Így kézenfekvő, hogy az örvényáramú anyagvizsgálati mérőfejben az érzékelő elem szerepét egy magas szenzibilitású mágnesszenzor (Fluxset) töltsse be. A kisméretű Fluxset mágneses térmérő eszközt két tulajdonsága teszi ideálissá az örvényáramú anyagvizsgálatra:

- nagy térbeli felbontóképesség (jobb mint 50 μm);
- frekvenciafüggetlen érzékenysége (amely a nagy behatolási mélységet igénylő alacsonyfrekvenciás vizsgálatok során döntő jelentőségű).

A bonyolultabb belső szerkezetű, összetett, többrétegű anyagok esetében is megvalósítható a képalkotás. A helikopterforgószárny-lapát méhsejtszerkezetének a „FluxGet” örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálati berendezés segítségével készített képe látható a 8. ábrán.²⁰

²⁰ Bozóki János et al.: Applying Eddy Current Non Destructive Testing (NDT) Equipment for Military Aircraft Maintenance. *Transport Means* 2015, 2015. 349–352.

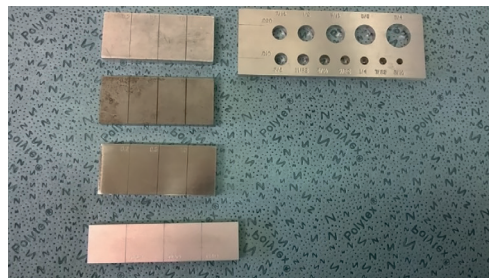


8. ábra

A helikopterforgószárny-lapát deformálódott méhsejtszerkezetéről alkotott kép. Forrás: Vértesy–Gasparics–Pávó (2005) i. m. 47.

5.1. Kalibráció

Ha örvényáramos készülékünket valamilyen mennyiség (például vezetőképesség, repedésmélység, keménység) számszerű meghatározására akarjuk használni, akkor ehhez eszközünket kalibrálni kell. A kalibráció lényege az, hogy a mindenkor műszerkijelzést egyértelműen megfeleltetjük a mérendő mennyiség valamilyen értékének. Ez a megfelelés természetesen csak adott beállítás mellett lesz érvényes, a készülékparaméterek megváltoztatása új kalibrációt tesz szükségessé. Az örvényáramos vizsgálat ráadásul több fizikai és geometriai paraméterre érzékeny, egyetlen kalibráció nem terjeszthető ki minden elrendezésre, szondatípusra, illetve anyagfajtára. A hitelesítést az egyes esetekben mindig külön kell végrehajtani. A kalibrációhoz ellenőrző próbatestekre van szükség, azaz olyan mintákra, amelyeknek a mérés szempontjából meghatározó paramétere számszerűen ismert, egyéb tulajdonságai (például alakja, permeabilitása) pedig megegyeznek a vizsgálandó alkatrész megfelelő paramétereivel. Ehhez olyan etalonsorozatot használunk, amelynek darabjaiban különböző, ismert mélységű (többnyire mesterséges) repedések találhatók (lásd: 9. ábra).²¹



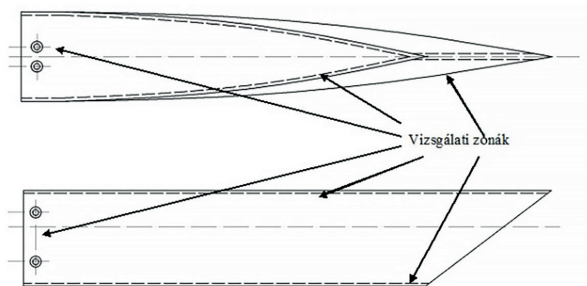
9. ábra

Kalibráló etalonok. Forrás: Bozóki János felvétele

²¹ Vernice A. Mayer: *Annual Book of ASTM Standards*. Nondestructive Testing, Volume 03.03., Eagan, MN, USA, ASTM INTERNATIONAL, 2018. 55–56.

6. Az örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálat végrehajtása

A repülőgéppalkatrész-tervező vagy -gyártó szervezet a tervezési előírások, illetve az üzemeltetési tapasztalatok alapján kiszolgálási közlönyökben határozza meg a vizsgálat elfogadási szintjét és az ellenőrzés gyakoriságát.²² A vizsgálat célja az áramvonalazó lemez hegesztési varratai környezetében a felületközeli vagy felületre nyitott repedések kimutatása. A vizsgálati zónák az áramvonalazó lemezek hegesztési varratainak szaggatott vonallal jelzett környezete a 10. ábra szerint.



10. ábra

Az áramvonalazó lemez vizsgálati zónái alul- és oldalnézetben. Forrás: D. Cox: *Service Bulletin ML-7700000-001 (Rev 1) MML-NMML – Rear Fairing Cracking*. Cobham Mission Equipment Proprietary Data, Dorset, England, 2012.

Az előző fejezetekben leírtak alapján és a kiszolgálási közlönyben előírtak figyelembevételével a kalibrált mérőberendezéssel a vizsgálati zónákban található hegesztési varratok vizsgálatát megfelelő lépésközzel haladva a tapintószondával a teljes vizsgálati zónát lefedve az ellenőrzés végrehajtható. A vizsgálókészülék kijelzőjén az elemelést követően a vizsgálati zónák letapogatása során, ha nem jelenik meg jelzés, akkor az alkatrész megfelelő, és továbbüzemeltethető (lásd: 11. ábra).

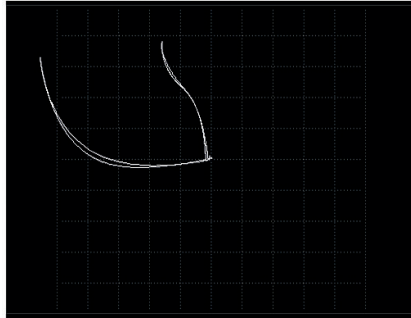


11. ábra

A vizsgálókészülék kijelzőjén az elemelés jele. Forrás: Bozóki János felvétele

²² D. Cox: *Service Bulletin ML-7700000-001 (Rev 1) MML-NMML – Rear Fairing Cracking*. Cobham Mission Equipment Proprietary Data, Dorset, England, 2012.

Repedés vagy más folytonossági hiány esetén a képernyőn az előző fejezetekben elemzett módon és irányban jelenik meg a hibajel (12. ábra).



12. ábra

A vizsgáló készülék kijelzőjén a repedés jele. Forrás: Bozóki János felvétele

Repedés feltárása esetén meg kell határozni a repedés hosszát. Ha a repedés hossza meghaladja a kiszámítási közlönyben előírt paramétereket, a szerelt lemezborítást üzemképtelennek kell tekinteni, és a rakétaindító sint a további vizsgálatokig el kell különíteni.

7. Repülőeszköz élettartama alatt végrehajtott NDT-vizsgálatok²³

NDT-vizsgálatot természetesen a repülőgép üzemeltetése, élettartama alatt nagyon sok esetben kell végrehajtani. Normál üzemeltetési viszonyok között a gyártó egyértelműen meghatározza, melyek azok az NDT-vizsgálatok, amelyeket megfelelő ciklusidőnként vagy egyedi esetekben végre kell hajtani a meghatározott alkatrészekben. A kidolgozott üzemeltetési okmányok, illetve az időközönként kiadott bulletinek az üzemeltetést végrehajtó állomány rendelkezésére állnak. A szakemberek felkészítését és a megfelelő gyakorlati idő megszerzését követően az ellenőrzések végrehajthatók.

A légi járművek normál üzemeltetési viszonyoktól eltérő esetekben is hajthatnak végre feladatot. Katonai repülőeszközök rendeltetésüknek megfelelően a kiképzést követően harci alkalmazásban is részt vehetnek. Műveleti területen történő alkalmazás esetén a kézfegyverektől vagy más tisztító eszköz behatására sérülések keletkezhetnek a repülőtechnika szinte bármelyik rendszerén. A javítás sikeres végrehajtásának egyik elengedhetetlen feltétele a folytonossági hiányok pontos, gyors felderítése. Az NDT által biztosított információkra támaszkodva a javítást végrehajtó állomány biztosítani tudja a technikai eszköz újbóli hadrafoghatóságát. Az előző fejezetekben ismertetett örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárás előnyeit kihasználva nagymértékben hozzájárul a feladat sikeres végrehajtásához.²⁴

²³ NDT: Non Destructive Testing, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer.

²⁴ Charles F. Tiffany: *Aging of U.S. Air Force Aircraft: Final Report*. Washington, D. C., The National Academies Press, 1999. 65–66.

8. Következtetések

A bemutatott örvényáramos vizsgálat alkalmazásával a katonai légi járművek üzemeltetése során kialakuló anyagfolytonossági hiányok elhelyezkedéséről, esetleges térbeli kiterjedéséről is nyerhető információ. Ennek gyakorlati jelentősége akkor jelentkezik igazán, amikor kritikus elhelyezkedésű vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni a biztonság számára irreleváns egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól. A légi járművek hadrafoghatóságának biztosításához magas szintű kiképzettséggel, gyakorlattal és felszereltséggel rendelkező szakemberek közreműködési szükségességek. Az örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálat szélsőséges üzemeltetési viszonyok között akár műveleti területen is széles körben alkalmazható.

Felhasznált irodalom

- Boogaard, J. – G. M. Van Dijk: NDT Reliability and product quality. *NDT & E International*, 26. (1993), 3. 149–155. DOI: [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(93\)90601-P](https://doi.org/10.1016/0963-8695(93)90601-P)
- Bozóki János – Óvári Gyula – Varga Béla – Kavás László: Applying Eddy Current Non Destructive Testing (NDT) Equipment for Military Aircraft Maintenance. *Transport Means 2015*, 2015.
- Cox, D.: *Service Bulletin ML-7700000-001 (Rev 1) MML-NMML – Rear Fairing Cracking*. Cobham Mission Equipment Proprietary Data, Dorset, England, 2012.
- Crutzen, S. – F. Frank – L. Fabbri – P. Lemaitre: *Compilation of NDE effectiveness data*. Final Issue, The Netherlands, JRC Petten, 1999.
- Fox, Robert W. – Alan T. McDonald: *Introduction to Fluid Mechanics*. USA, John Wiley & Sons, 1994.
- Hagemaijer, Donald J.: *Fundamentals of Eddy Current Testing*. Columbus, Ohio, American Society for Nondestructive Testing, 1990.
- Kajdi Gyula: *Anyagvizsgálat örvényáramokkal*. Budapest, Szakmai Továbbképző és Átképző Vállalat, 1990.
- Kavás László: *Harcászati repülőgép kiválasztásának módszere, gazdasági hatékonysági mutatók alapján, kis létszámú haderő légierejének korszerűsítésére*. PhD-értekezés, Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2009.
- Libby, Hugo L.: *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1971.
- Mayer, Vernice A.: *Annual Book of ASTM Standards*. Nondestructive Testing, Volume 03.03., Eagan, MN, USA, ASTM INTERNATIONAL, 2018.
- Moore, Patrick O.: Electromagnetic Testing. In *Nondestructive Testing Handbook*. 3rd edition. Vol. 5. Columbus, American Society for Nondestructive Testing, 2004.
- Peták György – Szabó József: *A Gripen*. Budapest, Petit Real Könyvkiadó, 2003.
- Rohács József – Simon István: *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1989.
- Tiffany, Charles F.: *Aging of U.S. Air Force Aircraft: Final Report*. Washington, D. C., The National Academies Press, 1999.
- Tóth Ferenc: Roncsolásmentes anyagvizsgálatok. *Anyagvizsgálók Lapja*, (1994), 3. 72–111.
- Tóth László – Serge Crutzen: *Roncsolásmentes vizsgálati módszerek*. Miskolc, Miskolci Egyetem, 1999.
- Vértesy Gábor – Gasparics Antal – Pávó József: Elektromágneses roncsolásmentes anyagvizsgálat nagy érzékenységű mágnesestér-mérő szenzor alkalmazásával. *Anyagvizsgálók Lapja*, 15. (2005), 2. 46–48.

Huszár Péter¹

Távoli drónazonosítás

A kereskedelmi forgalomban kapható kis méretű pilóta nélküli repülőgépek elterjedésével kapcsolatban a tudományos világ és a közvélemény hasonló módon megosztott. Egyesek üdvözlik a drónok növekvő térnyerését, és a lehető leggyorsabban munkára fognák őket, annak ellenére is, hogy számos kérdés megválaszolatlan a területen. Mások viszont kételkednek abban, hogy a drónhasználat trendjei fenntarthatóak lennének. Mára nyilvánvalóvá vált, hogy ezek az eszközök túlnőtték a játékkategóriát. A legnagyobb darabszámban eladott modellekben számos pozitív felhasználási lehetőség mellett komoly kockázat is rejlik. A két tábor éppen ezért abban egyetért, hogy a drónok további elterjedésének és a kapcsolódó ipari szegmens növekedésének egyik legnagyobb akadályára, a drónok azonosíthatósági problémáira mielőbb hatékony megoldást kell találni. A publikáció bemutatja a drónok azonosításával kapcsolatban felmerülő problémákat, majd kitér arra, hogy ezek milyen összefüggésben vannak a drónok elleni védekezéssel. Ismertetem a távoli drónazonosítás különböző definícióit, követelményeit, végül bemutatom az alkalmazható technológiák csoportjait és konkrét példákon keresztül azok előnyeit és hátrányait.

Kulcsszavak: *távoli drónazonosítás, egyedi drónazonosító, UAS távoli azonosítás*

Drone Remote Identification

The public and the scientific world is divided by the widespread of commercially available small aircraft systems. Some people welcome the increasing capability of drones and would use them as soon as possible despite the many unanswered questions. Others doubt the sustainability of current commercial drone usage trends. It is obvious that drones cannot be treated as toys anymore. There are numerous risks beside the many advantages in case of the most selling drones. Therefore the two sides agree that one of the biggest obstacles before the drone industry is the identification, thus it has to be addressed and solved as soon as possible. The publication presents the problems of drone identification, and highlights the relationship with counter unmanned aircraft vehicle technologies. Describes the definitions and requirements of remote drone identification. Finally, it presents the groups of available technologies through examples and compares their advantages and disadvantages.

Keywords: *drone remote identification, unique drone identifier, UAS remote identification*

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola, doktori hallgató, e-mail: huszar.peter.92@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6169-3777>

1. Bevezetés

A kereskedelmi forgalomban szabadon hozzáférhető, kis méretű pilóta nélküli repülő, elterjedt nevükön drónok, növekvő népszerűségnek örvendenek. Különösen igaz ez az utóbbi évekre visszatekintve. Azonban a szegmenshez kapcsolódó legfrissebb gazdasági mutatók elmaradtak az előrejelzésektől. Néhány évvel ezelőtt számos vállalkozás jött létre világszerte, amelyek tevékenységi körei szorosan kapcsolódtak a drónok ipari és üzleti felhasználásához. A kezdeti elvárások és a szektorba investált óriási tőke ellenére számos drónipari cég ment csődbe az elmúlt években. A drónok körüli felhajtás egyre inkább visszatér a realitások talajára. Ennek egyik oka a nagyon lassan alakuló szabályozói környezet. E területen azonban érzékeltetni lehet a folyamatos munkát, az Európai Unióban például az Európai Repülésbiztonsági Ügynökség (European Union Aviation Safety Agency, EASA), az Egyesült Államokban többek között a Szövetségi Légügyi Hivatal (Federal Aviation Administration, FAA) részéről. 2020-ban hatályba lép az Európai Unió idevonatkozó rendelete is. Ezek természetesen még nem teljes körűek, és sok tekintetben vitatott intézkedések, de a folyamat elindult. A drónszektor szabályozatlansága miatti bizonytalanság, amely egy vállalat számára mint negatív externália jelentkezik, némiképp mérséklődni látszik, de a szabályok önmagukban nem elegendők, ha azok ellenőrzésére és betartatására nincsen lehetőség.

A szabályok betartatására és ellenőrzésére, a szabályos drónhasználat biztosítására a publikáció írásának idejében nincs hatékony módszer. Nem áll rendelkezésre széles körben elterjedt technológiai megoldás a drónok és operátorok azonosítására. Ezzel pedig elérkeztünk a fenti probléma másik okához, a drónok azonosíthatóságához vagy éppen annak hiányához. A szabályokat megsértő operátorokat a legritkább esetben tudják csak felelősségre vonni. Csak speciális engedéllyel kivitelezhetőek olyan drónműveletek, amelyek nagy jelentőséggel bírnának. Ilyen például a látóhatáron túli repülés (Beyond Visual Line of Sight, BVLOS), ami nélkül nincs értelme többek között a drónos csomagküldésnek vagy az olyan hosszú nyomvonalú infrastruktúrák monitorozásának, mint a táv- és csővezetékek. Az emberek feletti és az éjszakai repülés is egy sor új kihívást rejtenek.

A drónok újabb és újabb felhasználási területei feltételeinek biztosítása mellett fontos, hogy megoldás szülessen egy másik égető problémára, a magánszférára és az információbiztonságra jelentett kockázatok mérséklésére is. Számos szervezetet és magánszemélyt érthető módon aggodalommal tölt el a jelenlegi „drónforradalom”. A veszélyek mérséklésére pedig különböző megoldásokkal állnak elő, de a drónok elleni védekezés folyamata és eszköztársa nem lehet teljes a hatékony azonosítási eljárások nélkül.

A fenti problémák megoldásának kulcsa a drónok azonosíthatóságában rejlik, de adódik a kérdés, hogy egyáltalán mit értünk drónazonosítás alatt? Hogyan függ ez össze a drónok elleni védekezéssel? Milyen technológia erre a legalkalmasabb? Milyen követelményeknek kell megfelelnie? Milyen adatok alapján lehet azonosítani egy drónt és annak operátorát úgy, hogy az ne sértsen személyiségi jogokat és adatvédelmi szabályokat? A továbbiakban ezekről lesz szó.

2. A távoli azonosítás és a drónok elleni védekezés

Az azonosítás kulcsfontosságú szerepet játszik a drónok elleni védekezés (CUAV – Counter Unmanned Aerial Vehicle – drónokkal szembeni védekezésre használható technológiák és módszerek összefoglaló neve) folyamatában is, ahogy arra egy másik tanulmány² is rámutat. E folyamat három főbb részre osztható, amelyek a következők: 1. felderítés, 2. azonosítás, 3. ellentevékenység. A folyamat egyes részei eltérő eszközöket és képességeket igényelnek a védekező féltől. Ezek birtoklása és használata, főként az ellentevékenység fázisához tartozó eszközök (például rádiófrekvenciás zavarók), szigorú szabályozás alá esik. A drónazonosítás a védekezési folyamat egy olyan sarkalatos pontja, ahol meg kell határozni, hogy milyen eszközökkel lépünk fel a drónnal szemben. A védekezés megpróbálhatja pusztán elriasztani a drónt, de azonosító hiányában olyan eszközt is bevetethetne, amely leszállásra kényszeríti vagy megsemmisíti azt. Napjaink kereskedelmi forgalomban kapható drónjai akár egy autó árát is elérhetik, hasznos tehertől függően. Az azonosítás során elkövetett hiba és az ebből fakadó CUAV-eszközök megalapozatlan használata akár büntetőjogi felelősségre vonást, kártérítési pert is vonhat maga után. Emiatt fontos, hogy minél megbízhatóbban azonosítható legyen egy drón és annak az operátora. El lehessen dönteni, hogy egy eltévedt eszközről van szó, amely az operátor felkészületlenségéből vagy tapasztalatlanságából repül éppen olyan terület felett, ahol azt nem lenne szabad, vagy szándékos behatolás, adatgyűjtés, csempészás, bűnös tevékenység zajlik. Ekkor indokolt lehet a drón földre kényszerítése is, szemben az első esettel.

Jelenleg a CUAV kontextusában egy drón azonosíthatósága merőben mást jelent, mint klasszikus értelemben véve egy személyé vagy egy járműé. A CUAV-eszközök fejlesztői és gyártói számára azt jelenti, hogy meghatározzák egy drón fizikai jellemzőit, például pozícióját, haladási irányát, sebességvektorát és esetleg a méretét. Egyes technológiák segítségével akár még a drón típusa és gyártója is megismerhető. Ez az azonosítás viszont csak arra elegendő, hogy a riasztási mechanizmusok és az ellentevékenység megkezdődhessenek. Az operátor személye azonban továbbra is ismeretlen marad, felelősségre vonás nem történik. Ezért fontos tisztázni, hogy egy drón azonosíthatósága a CUAV-technológiák és a távoli drónazonosítás területein eltérő tartalommal rendelkezik. Míg a fogalom az első esetben nem terjed ki az operátor személyére, addig a második eset a távoli drónazonosítás szerves része. A két értelmezésnek a jövőben közelednie, sőt egymást fednie kell, hiszen a távoli azonosítás a drónok elleni védekezés eszköztrendszerének szerves részévé kell hogy váljon.

3. A drónazonosítás definíciója és követelményei

Napjaink járműveit jellemzően rendszámmal, lajstromszámmal azonosítjuk. Ezek az azonosítók bizonyos távolságon belül jól láthatók és leolvashatók. Segítségükkel egy hatósági adatbázisból az arra jogosultak ellenőrizhetik a tulajdonos vagy üzemeltető személyét és az ő személyes adatait. Ezzel biztosítva egyrészt a felelősségre vonhatóságot, másrészt pedig a tulajdonos személyes adatainak védelmét. Visszatartó erőt jelenthet a közlekedési kihágásokkal szemben, mivel a jármű vezetője tudja azt, hogy ha nem tartja be a rá vonatkozó szabályokat, vagy

² Bódi Antal – Szabó Tivadar – Wühl Tibor: Drónok követése közhiteles módon. *Repüléstudományi Közlemények*, 28. (2017), 2. 111–118.

szándékosan kárt okoz járművével, akkor az egyedi azonosító alapján kideríthető a saját személyazonossága. Így a későbbiekben felelősségre vonhatóvá válik.³

A kis méretű pilóta nélküli repülőeszközök, kiváltképp a kereskedelmi forgalomban szabadon hozzáférhető esetében a probléma egyik forrása, hogy azok nem rendelkeznek ilyen azonosítóval. Méretükből kifolyólag a hagyományos, rendszám jellegű azonosítás nem jöhet szóba. A másik probléma a pilótanélküliségből fakad. A hagyományos járművekkel ellentétben, a drónoperátor nincs a légi jármű fedélzetén, hanem attól akár több kilométer távolságban is lehet, ami miatt csökken a tettenérés és a felelősségre vonás esélye.

A távoli drónazonosítás elterjedésével elkerülhető a terület túlszabályozása. Segítségével növelhető a közbizalom a drónokkal szemben. Érthető módon sokakat zavar, ha például a háza felett vagy a közvetlen közelében meglát egy drónt, amelynek nem tudja a célját. Ez bizonyos körülmények között az illető személyiségi jogait is sértheti, hiszen információkat gyűjthetnek róla a beleegyezése nélkül. Viszont, ha lenne egy olyan módszer, amellyel gyorsan és egyértelműen azonosíthatóak lennének a közelben működő drónok, akkor enyhítené az aggodalmakat, és növelné a bizalmat a drónalkalmazásokban is. Mint egy rendszám az autók esetében. A szabályokat megszegő operátorok kiszűrhetők, és felelősségre vonhatók. Ez ösztönözi a szabályos és etikus drónfelhasználást.

A távoli drónazonosítás alapul szolgál, sőt követelménye a pilóta nélküli légi járművek forgalmi menedzsmenjtét biztosító rendszereknek (Unmanned Aircraft System Traffic Management, UTM), valamint az USpace kezdeményezéseknek is, amelyek célja, hogy nagy fokú automatizáltság mellett lehetővé tegye komplex UAV-műveletek végrehajtását 500 láb alatti légtérben.⁴

3.1. Európai Unió

A területre vonatkozó legújabb, 2019. május 24-én megjelent, a pilóta nélküli légi jármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról szóló (EU) 2019/945 és a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról szóló (EU) 2019/947 rendeletek ugyan nem kifejezetten a távoli azonosítást írják le és határozzák meg, de a definíciója és a minimális követelmények már megtalálhatók bennük. Ezek alapján a drónok közvetlen távoli azonosítása egy olyan folyamatot és az ahhoz kapcsolódó rendszert jelöl, amely a műveletet végző drónról információkat közöl úgy, hogy ahhoz nem szükséges a fizikai hozzáférés. Ezeknek az információknak természetesen része az azonosító, de nem kizárólag csak abból áll.⁵ Az (EU) 2019/945 rendelet 6. része alapján a közvetlen távoli azonosítás megvalósulásához a drónnak vagy az azon elhelyezett kiegészítő eszköznek a repülés során, valós időben egy nyilvános protokoll használatával sugározni kell a következő adatokat:

- az üzembentartó regisztrációs számát;

³ Michael Crenshaw: License Plates for Drones: Resolving Privacy Concerns Using Remote Identification Technology. *Journal of Engineering and Public Policy*, 20. (2016), 8.

⁴ Dobi Sándor Gábor – Fekete Róbert Tamás – Rohács Dániel: Az európai UTM helyzete és jövője. *Repüléstudományi Közlemények*, 30. (2018), 2. 189–204.

⁵ EU 2019/947: Az Európai Bizottság végrehajtási rendelete a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról. 2019. 2. cikk, 1. bek.

- egy egyedi, ANSI/CTA2063 szabványnak megfelelő eszközazonosítót, amely négy karakternyi gyártói kódból, egy karakter szériaszám hosszúságát leíró hexadecimális értékből és végül a termék szériaszámából álló karaktersorozat;⁶
- a drón földrajzi helyzetét, felszíni vagy felszállóhely feletti magasságát;
- valódi északhoz viszonyított útvonalát és földhöz viszonyított sebességét;
- az operátor vagy a felszállási pont földrajzi helyzetét.

Mindezt úgy, hogy hatótávolságán belüli mobil eszközökkel azt venni lehessen.⁷

3.2. Egyesült Államok

Az Egyesült Államokban a drónok távoli azonosításával kapcsolatos törvényjavaslatot⁸ az FAA 2019. december 31-én nyújtotta be, és 2020. március 2-ig lehetett azzal kapcsolatban kritikával élni. Amit számos ipari szereplő, vállalkozó és magánszemély meg is tett. Ennek okairól a későbbiekben lesz szó. A pilóta nélküli légi jármű-rendszer távoli azonosítása (UAS RID, Unmanned Aircraft System Remote Identification) az FAA definíciója alapján az UAS egy olyan funkciója, amely a saját, egyedi azonosításához szükséges információ sugárzására képessé teszi a pilóta nélküli légi járművet repülése során, mások által érzékelhető módon. Anélkül, hogy ennek vételéhez speciális eszközre lenne szükség. Az FAA törvényjavaslatában a következő követelményeket fogalmazta meg a távoli pilóta nélküli rendszer azonosításával kapcsolatban:

- szükséges az azonosítás a felszállástól egészen a leszállás pillanatáig;
- sugározni kell az UAS egyedi azonosítóját;
- a drón helyzetének hosszúsági és szélességi koordinátáit, barometrikus magasságát;
- a földi állomás koordinátáit és barometrikus magasságát;
- az adatokhoz tartozó időbélyeget;
- valamint egy vészhelyzeti státuszskódot, ha azt a körülmények megkívánják.

Ezenkívül az FAA megkülönbözteti a távoli azonosítás két eltérő formáját is, amelyek az általános távoli azonosítás (Standard UAS RID) és a korlátozott távoli azonosítás (Limited Remote Identification).

Az általános távoli azonosítás két részből tevődik össze. Az azonosításra szánt üzeneteket, ha van arra lehetőség, az interneten keresztül továbbítani kell egy arra megbízott szolgáltató számára (USS, UAS Service Supplier), aki ezeket az adatokat továbbítja a hatóságok és további felhasználók felé, elérhetővé teszi és kezelni fogja. Az általános azonosítás másik részeként ugyanezeket az üzeneteket a drónnak ki is kell sugároznia, hogy azt a közvetlen közelében internetkapcsolat nélkül is venni tudják. Tehát egyszerre két módon kell elérhetővé tenni az azonosításra szánt adatokat. Ennek a BVLOS-repülések esetén van nagy jelentősége.

A korlátozott távoli azonosítás kifejezetten olyan UAS-ek számára lett definiálva, amelyek maximum 400 láb, azaz 122 m távolra képesek csak elrepülni az operátortól, tehát

⁶ ANSI/CTA-2063-A: *Small Unmanned Aerial Systems Serial Numbers*. 2019.

⁷ EU 2019/945: *A pilóta nélküli légi jármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartásáról*. Melléklet 6. rész, 2019.

⁸ FAA 2019-1100: *Remote Identification of Unmanned Aircraft Systems*. Proposed Rule, 2019.

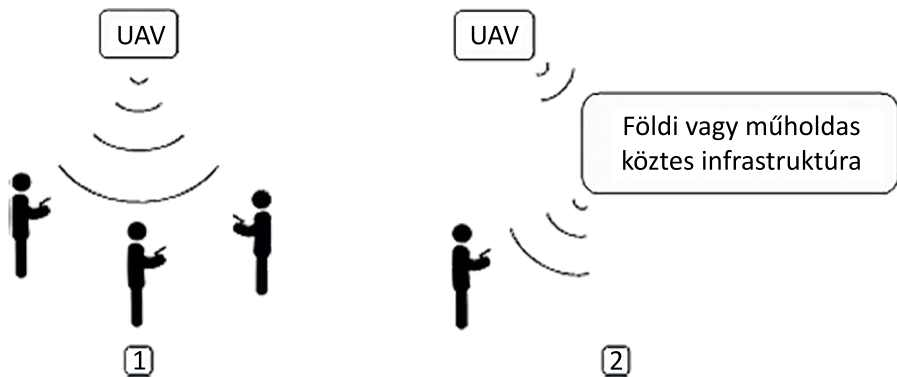
látóhatáron belül (VLOS, Visual Line of Sight) maradnak. Az azonosítóüzenet kisugárzását azonban kifejezetten tiltja ez esetben. Helyette azt a földi állomásnak az interneten keresztül kell küldenie folyamatosan a már korábban említett USS-nek.⁹

3.3. Nemzetközi szabványosítás

Az ASTM¹⁰ is elkészítette a drónok távoli azonosítására vonatkozó szabvány javaslatát, amely az ASTM F3411-19 azonosítót viseli.¹¹ Alapvetően ez is két formáját különbözteti meg a távoli drónazonosításnak, ezek pedig a kisugárzott RID és hálózatos RID.

A kisugárzott RID, amikor a drón folyamatosan sugározza a saját azonosítóját, anélkül, hogy lenne egy kitüntetett címzettje, és azt a közvetlen közelében egy alkalmas eszközzel bárki érzékelni képes. Internetkapcsolat vagy bármilyen más kiegészítő földi infrastruktúra nélkül is működik. Elméletben bárhol, bármilyen körülmények között elérhetőnek kell lennie. Fontos, hogy a szabvány szerint a kisugárzott RID hálózatosá változtatható kell hogy legyen egy földi kiszolgáló infrastruktúra-réteg kialakításával.

A hálózatos (networked) RID az azonosítás egy olyan formája, amely egy köztes infrastruktúrális és szolgáltatási réteget használ az azonosításhoz. Ilyen lehet például a mobilkommunikációra használt hálózat vagy egy műholdas kapcsolat, de az azonosítás csak ezeken keresztül, egy köztes réteg segítségével történhet meg a kisugárzott RID-től eltérően.¹²



1. ábra

Távolsági drónazonosítási módok az ASTM F3411-19 szerint. 1. Kisugárzott RID, 2. Hálózatos RID. Forrás: Ramsey (2019) i. m.

A szabvány és az FAA javaslata között számos hasonlóság van, mivel ezt az ajánlást vették részben alapul, azonban több különbség is fellelhető. Például az FAA általános UAS RID a szabványban szereplő két módszer, a kisugárzott és a hálózatos kombinációját írja elő egyidejűleg. Ennek a BVLOS-repülések során az akadályérzékelés és -elkerülés (SAA, Sense and Avoid) megvalósításánál van jelentősége. Az itt szereplő köztes infrastruktúra sem

⁹ FAA 2019-1100 (2019) i. m.

¹⁰ ASTM: American Society for Testing and Materials.

¹¹ ASTM F3411-19: *Standard Specification for Remote ID and Tracking*. 2019.

¹² Christian Ramsey: *Why Bluetooth is a Bad Idea for Drone Remote Identification*. 2019.

egyezik meg az előbbi FAA-definíció szerinti USS-sel, ugyanis itt a köztes réteg csak továbbítja az információt, amelynek a címzettje lehet akár egy USS, valamilyen hatóság vagy akár egy magánszemély is.

3.4. A piaci szereplők és a felhasználók

Ezen a ponton fontos a felhasználók és az ipar elképzeléseit megemlíteni és összehasonlítani az eddigiekkel. Az előzőekhez nagyon hasonló módon, ám jóval általánosabban definiálja a drón távoli azonosítását a szegmens egyik jelentős ipari szereplője is, a Kittyhawk. Meghatározásuk szerint az egy olyan rendszerkonceptió, amelynek segítségével lehetőség nyílik a légteret használó drónok azonosítására. Egyfajta digitális rendszámként tekinthetünk a technológiára.¹³ Tehát a lehető legolcsóbbnak és legegyszerűbbnek kell lennie, pont úgy, mint egy rendszámtáblának, amely egyszerre biztosítja az azonosíthatóságot és a személyes adatok bizalmasságát is. A dróngyártók és az UAV-szolgáltatásokat nyújtani kívánó vállalkozások egyáltalán nem zárkóznak el egy hatékony módszer kialakításától. Számukra ez létfontosságú, hiszen számos új lehetőséggel kecsegtet. Az FAA törvényjavaslatával a felhasználók és a meghatározó ipari szereplők sem értenek egyet maradéktalanul. A DJI szerint a megvalósítás indokolatlanul költséges a felhasználókra és a gyártókra nézve egyaránt és szükségtelenül komplex is. A köztes adatszolgáltatási réteg, a USS pedig újabb adatvédelmi problémákat vet fel, csak ezeket éppen a drónoperátorok szemszögéből. Ezeknek a szolgáltatóknak ugyanis minden egyes drón összes repülését tárolnia kellene akár fél éven keresztül. A szolgáltatás költségeit pedig az operátoroknak kellene állniuk, amelyet a DJI úgy becsült, hogy az éves díj egy drón árának 20%-át is elérheti. A díjért cserébe pedig a felhasználók közvetlenül semmilyen plusz vagy új szolgáltatást nem kapnak, az pusztán a hatóságok munkáját segíti.¹⁴ Számos felhasználót aggaszt, hogy a jelenlegi javaslat alapján az UAS-nek valamely részegységén (UAV vagy földi szegmens) keresztül folyamatosan elérhetőnek kell lennie az interneten keresztül, ami így lehetővé teszi akár a drónok valós idejű, folyamatos nyomon követését is, és egy új, eddig ismeretlen kiberbiztonsági kockázatot rejt magában.

A felhasználók minél rugalmasabb szabályokat szeretnének a legalacsonyabb költségek mellett. A hatóságok számára pedig érthető módon a biztonság foglalja el a legmagasabb prioritást. A két oldal igényei így csak erős kompromisszumok árán egyeztethetők össze.

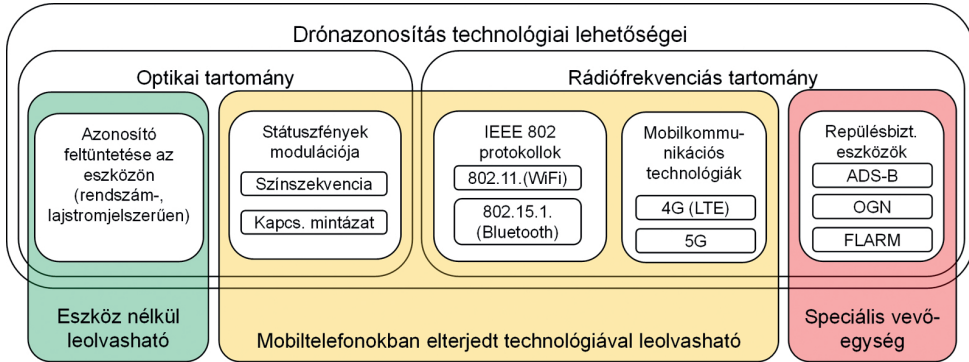
4. A drónazonosítás lehetséges technológiái

Az utóbbi években mérnökök és kutatók a drónazonosításra több különböző megoldást kifejlesztettek. Az előzőekben részletesen bemutatott igényeknek és követelményeknek ezek közül nem mind felel meg. Van, amelyek a felhasználók számára tökéletes lenne, mert diszkrét, olcsó és akár egy egyszerű szoftverfrissítéssel arra alkalmassá tehető egy drón, ugyanakkor nem teljesíti a hatóságok igényeit. Más megoldások pedig épp ellenkezőleg működnek.

¹³ *Remote ID & Commercial Drones*. Kittyhawk White Paper, Kittyhawk, 2019.

¹⁴ Brendan Schulman: *We Strongly Support Drone Remote ID. But Not Like This*. 2019.

A továbbiakban ezeket mutatom be. Az egyes módszereket és azok egy lehetséges felosztását a 2. ábra szemlélteti. A rövidítéseket később oldom fel.



2. ábra

Drónazonosítás lehetőségeinek felosztása. Forrás: a szerző szerkesztése

4.1. Optikai tartomány

Ide olyan megoldások tartoznak, amelyek optikai úton leolvashatók, például a lehető legegyszerűbb módszer is, amely a drónon történő egyedi azonosító elhelyezése. Leggyakrabban azonban a drón saját helyzetjelző fényeinek modulációjáról van szó, amelyet egy speciális mobiltelefonos képfeldolgozó algoritmus segítségével lehet leolvasni. Ezek hatékonyságát jelentősen befolyásolják az aktuális fényviszonyok. Használatuk kedvezőbb a sötétebb napszakokban. A hatótávolságot illetően elmondható, hogy nagyjából pár tíz, esetleg száz méter távolságból, ideális körülmények között könnyedén leolvashatók, ám ez a hatótávolság igen csekély. Előnyük, hogy olcsók, sőt a legtöbbször egy szoftverfrissítéssel implementálhatók a drón fedélzeti szoftverében, és a leolvasáshoz szükséges eszköz, a mobiltelefon manapság már mindenki zsebében ott lapul folyamatosan.

4.1.1. Azonosító feltüntetése a drónon

Az Egyesült Államokban az FAA előírja a tulajdonosok számára, hogy a saját regisztrációs számukat fel kell tüntetniük a drónjaikon. Azonban ezek csak közvetlen közelről olvashatók méretükből adódóan. Ez az egyedi drónoperátor-azonosító összesen tíz karakterből áll. Az első kettő minden esetben az „FA” betűk, ezeket pedig további nyolc számjegy követ. A drónon való feltüntetéséről az operátornak kell gondoskodnia. Használhat matricát, de akár filctollal is ráírhatja az eszközre.¹⁵ Probléma viszont, hogy a jelenlegi szabályok alapján ezt nem kötelező jól látható, külső felületen feltüntetni. Akár belső felületekre, mint például az akkumulátorrekeszre is felkerülhet abban az esetben, ha sorszámok nélkül hozzáférhető,

¹⁵ How to Label Your Drone. FAA, 2020.

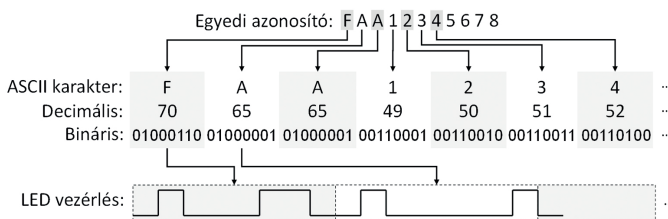
ezzel lehetetlenné téve a leolvasását minimális távolságból is. Ennek az azonosítónak leginkább akkor van jelentősége, ha a drón használata során lezuhan egy repülés előtt elzárt területen, és ezzel az operátor kárt okoz. Ilyen esetben lehetőség nyílik az operátor felelősségre vonására. Ez a módszer a távoli azonosítás kritériumait egyáltalán nem teljesíti.

4.1.2. Azonosítás színszekvencia alapján

A LightCense megoldása¹⁶ a látható fény tartományában működik. A kutatók által kifejlesztett koncepció lényege, hogy a drónok helyzetjelző fényeinek színe folyamatosan változik. Az egymást követő színek kombinációja pedig dekódolható egy-egy alfanumerikus karakterként. Mivel a fények színei viszonylag lassan, szabad szemmel is jól követhető módon váltakoznak, a módszer kidolgozói szerint így nincs szükség okostelefonra sem. Az azonosító egy egyszerűen leolvasható és megjegyezhető színsor. Később pedig egy alkalmazás vagy egy egyszerű táblázat segítségével bárki által visszafejthető az UAS üzembentartójának azonosítója. Ezzel megvalósít egy olyan azonosítási eljárást, amely egészen közel áll a napjainkban ismert közúti járművek rendszámához. Jelenlegi formájában ez a megoldás a broadcastcsoportba sorolható. Tehát a drón közvetlen közelében képes minimális információt szolgáltatni, de egyelőre ez jóval kevesebb, mint amennyit a fenti követelmények előírnak.

4.1.3. Kapcsolási mintázat alapján történő azonosítás

Egy nagy autóiipari szereplő, a Ford is előállt egy, a látható fény tartományában működő azonosítási technológiai megoldással. A Ford mint klasszikus autóiipari szereplő létrehozott egy kutatóintézetet, amely a pilóta nélküli repülés technológiájával foglalkozik, ezzel is alátámasztva a szektorban rejlő lehetőségeket. Egy tanulmányukban¹⁷ pedig az azonosításra kifejlesztett megoldásukat mutatják be kutatóik. Szintén kihasználja a drónok gyári helyzetjelző fényeit.



3. ábra

Drónhelyzetjelző fények modulációja egyedi UAS-azonosító alapján. Forrás: Adi Singh et al. (2018) i. m.

Ennek köszönhetően nincs szükség hardveres módosításra. Elegendő egy szoftverfrissítés, amely így lényegében egy ingyenes és könnyen hozzáférhető módosításnak tekinthető. Az implementált szoftver lehetővé teszi a helyzetjelző fények előre meghatározott baudráta

¹⁶ LightCense DroneVisual ID.

¹⁷ Adi Singh et al.: A Zero-Cost Solution for Remote Identification and Tracking of sUAS in Low Altitude Flights. 2018.

alapján történő modulációját. Ezzel a drón képessé válik az operátor egyedi azonosítójának folyamatos sugárzására. Az egyedi azonosító ez esetben is lehet egy ASCII¹⁸ karaktersorozat, amelyet az operátornak felszállás előtt meg kell adnia a repüléstervező és konfigurációs szoftver segítségével a drón számára. Ezt egy bináris kódsorozattá alakítja az általuk implementált szoftver, és ez alapján vezérli a helyzetjelző fények ki-be kapcsolását. A kapcsolási frekvencia olyan magas, hogy azt szabad szemmel nem lehet látni, de egy speciálisan erre a célra fejlesztett, gépi látáson alapuló mobilalkalmazás segítségével dekódolni lehet. A tanulmány szerint egy átlagos mobiltelefon kamerájával elérhető 80 láb (24,4 m) hatótávolság is. Speciális objektívvel pedig akár a tíz-húszszorosát is elérheti.

4.2. Rádiófrekvenciás tartomány

Ebben a kategóriában részben repülésbiztonsági eszközök és azok UAS-változatai szerepelnek, részben pedig mobiltelefonokban elérhető vezeték nélküli kommunikációs technológiák. Összességében elmondható mindről, hogy nagyobb hatótávolsággal rendelkeznek, mint az optikai megoldások, azonban nem mindegyik érhető el régebbi vagy jelenlegi drónokon, így azoknak esetleges használatát hardveres módosítás kell hogy megelőzze. Költségesebbek és némelyikhez speciális vevőberendezés szükséges.

4.2.1. Repülésbiztonsági eszközök

Az általános, pilótás légi forgalomban elterjedten használnak olyan technológiákat, amelyek különböző módosításokkal vagy akár módosítás nélkül a pilóta nélküli repülés során is felhasználhatók lennének UAS-azonosításra. Ilyen például az ADSB,¹⁹ FLARM²⁰ és az OGN.²¹

- **ADSB:** Az ADSB lehetővé teszi repülőgépek helyzetének és azonosítójának meghatározását, de egyéb, például repülési útvonallal kapcsolatos információkat is sugároz. Két különböző ADSB-berendezés érhető el. Ezek az ADSBOut adó és az ADSBIn vevőegység. Az adó 1090 MHz-en folyamatosan, meghatározott időközönként sugározza saját adatcsomagjait, amelyet a hatótávolságon belüli vevőegységek képesek venni, dekódolni és megjeleníteni. A vevőberendezéssel ellátott légi járművek ezt az információt akár ütközés elkerülésére is felhasználhatják.²² Kezdetben az ADSB-adók és -vevők relatív nagy tömegük és energiaigényük miatt nem lettek volna alkalmasak a kis méretű pilóta nélküli repülőgépek számára. Az utóbbi években azonban ezen a téren is folyamatos fejlődés tapasztalható. Egyre kisebb méretű, tömegű és energiaigényű adók, illetve vevők válnak elérhetővé a piacon. Ennek hatására a DJI bejelentette, hogy 2020 januárjától minden általa gyártott 250 g felszálló tömeg feletti drónjában implementálja az úgynevezett AirSense

¹⁸ ASCII: American Standard Code for Information Interchange – szabványos amerikai kód információcseréhez.

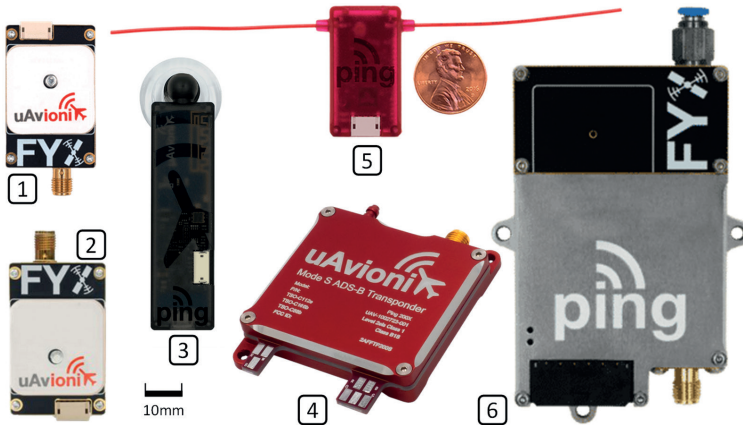
¹⁹ ADS-B: Automatic Dependent Surveillance – Broadcast – légi járművek nyomon követésére szolgáló technológia.

²⁰ FLARM: Flight Alarm – ütközések elkerülésére használt repülésbiztonsági eszköz.

²¹ OGN: Open Glider Network – vitorlázógépek nyomon követésére létrehozott nyílt forrású hálózat.

²² Makkay Imre: Ütközések elkerülése a kispépes és a pilóta nélküli repülésben. *Repüléstudományi Közlemények*, 29. (2017), 1. 59–66.; Makkay Imre: ADS-B és a drónok. *Repüléstudományi Közlemények*, 37. (2015), 2. 272–278.

technológiáját, amelynek lényege, hogy ADSB-vevőkkel látják el az eszközöket, hogy azok észlelni tudják a közelükben lévő más ADSB-adóval ellátott légi járműveket, és ezáltal figyelmeztetni tudják a drónoperátort az esetleges veszélyekre.²³ Ennek hatására több cég is drónkompatibilis ADSB-eszközöket fejlesztett. Az uAvionix termékei²⁴ között néhány tíz gramm tömegű, nagy kimeneti teljesítményű, plug-and-play ADSB-adóvevőket is lehet találni, amelyek kompatibilisek a legelterjedtebb drónfedélzeti számítógépekkel. Ezek ára viszont még mindig összemérhető, vagy meg is haladja a legtöbb kereskedelmi forgalomban szabadon hozzáférhető drón árát.



4. ábra

UAS-felhasználásra készült S módusú ADS-B eszközök.²⁵ Forrás: uAvionix

Az ADSB felhasználását drónazonosítási célra viszont az FAA expliciten ki is zárja a törvényjavaslatával. Ezt azzal magyarázzák, hogy véleményük szerint az ADSB protokollja, definiált üzenetei és a szükséges vevő infrastruktúra nem felel meg az általuk támogatott UAS RID-követelményeknek. Nem szolgáltat információt a földi állomás helyzetéről, csak a drónról. Földfelszín közelében nem biztosít az ADSB megfelelő lefedettséget. Az FAA UTM törekvéseivel nem hozható összhangba. Végül úgy ítélték meg, hogy az UAS-ek ADSB-adókkal történő tömeges ellátása szükségtelen kockázatot jelentene a hagyományos pilótás légi közlekedés számára. Azzal, hogy az ő esetükben a jól bevált ADSB-adások frekvenciasávjain számos másik UAS-adó működne egy időben, egymáshoz viszonylag közel, telítődhetnek a használt sávok.²⁶ Az (EU) 2019/945 és (EU) 2019/947 rendeletek nem érintik a közvetlen távoli drónazonosítás technikai részleteit, így az ADSB-t sem vagy az azzal kapcsolatos esetleges aggályait. Viszont az egyértelműen megtalálható a követelmények között, hogy azt a hatótávolságon

²³ DJI Adds Airplane And Helicopter Detectors To New Consumer Drones. DJI News, 2019.

²⁴ PING-200SR MODE S ADS-B Transponder datasheet. uAvioni, 2018.; PING-20SI MODE S ADS-B Transponder datasheet. uAvioni, 2019.; PING-200X Certified MODE S ADS-B Transponder datasheet. uAvioni, UAV-1002852-001 Rev B, 2019.

²⁵ 1. ping20Si ADS-B transzponder, 2. ping1090i ADS-B adó, 3. pingUSB ADS-B vevő, 4. ping200X ADS-B adó és transzponder, 5. pingRX UAS fedélzeti ADS-B vevő, 6. ping200Sr ADS-B-Out transzponder.

²⁶ FAA 2019-1100 (2019) i. m.

belüli mobil eszközökkel venni lehessen. Egyelőre az ADSB nem sorolható ide. A drónok ADSB-vevővel való ellátása, azonban egy kifejezetten jó ötlet, amelynek segítségével elkerülhetők a pilótás repülőgépek és a drónok közötti konfliktusok. A drónokban automatikus elkerülő manővereket lehet implementálni ilyen szituációkra, de ez inkább már egy másik fontos területhez, az SAA-hoz tartozik.

- **FLARM:** A FLARM is egy elterjedt kisgépes repülésbiztonsági eszköz, amelyet kifejezetten azért fejlesztettek, hogy segítségével elkerülhetők legyenek a kisgépes ütközések. Működési elve szintén azon alapul, hogy a fedélzeten elhelyezett adóberendezés sugározza a légi jármű koordinátáit, sebességvektorát, egyedi azonosítóját és egyéb információkat. A környezetében lévő, FLARM-vevővel ellátott többi légi jármű ezt képes venni és a pilóta számára előre jelezni egy esetleges konfliktust, ütközőpályát más környező repülővel. A FLARM 868 MHz-es frekvenciasávban működik.²⁷ Létezik már ebből is UAS-kompatibilis adó- és vevőeszköz is. Ehhez fejlesztői készleteket lehet kapni, amelyek szintén pár tíz grammnyi tömegűek, és a kis méretű pilóta nélküli repülőkhöz is használhatók. Ilyen például a PowerFLARM UAV DevKit is.²⁸ A problémák itt is hasonlóak, mint az ADSB esetén. Vételéhez speciális vevőre és infrastruktúrára van szükség annak ellenére, hogy ISM-sávban²⁹ működik. Az adatcsomagok más információkat tartalmaznak, mint amelyek a követelményekben szerepelnek, és ráadásul teljesen zárt ökoszisztéma. Ez is inkább drónok és repülőek közötti konfliktusok elkerülésére, automatikus kitérőmanőverek végrehajtására lehet hasznos, és így az SAA-hoz tartozó eszköz.
- **OGN:** Az OGN a FLARM-hoz nagyon hasonló, de nyílt forrású szoftveren és hardveren alapuló repülésbiztonsági eszköz. A közösségi fejlesztésnek és a hobbisták köreiben népszerű alkatrészek felhasználásának köszönhetően jóval olcsóbb, mint a FLARM. A fedélzeti eszköz, az OGNTRACKER szintén helyzetadatokat sugároz, de saját, nyílt forrású protokollt használ. A szomszédos, hatótávolságon belüli más eszközök adását veszi, és képes azt tovább relézni is. Fontos elemei a rendszernek a földi OGN-vevők, amelyek segítségével jelenítik meg a vevő hálózat által érzékelt légi járművek adatait.³⁰ ISM-sávban működik, és szintén speciális vevőt igényel. A publikáció alapján a titkosítatlanság, a gyenge hitelesítés és gyenge engedélyezés miatt könnyen hamis információk juttathatók az OGN-hálózatba, amelyet a szerzők szemléltettek is.³¹

4.2.2. IEEE 802 protokollok

Szinte mindegyik, manapság eladott mobiltelefonban megtalálható az ebbe a kategóriába tartozó vezeték nélküli kommunikációs megoldások közül kettő. Az IEEE 802.15.1. (Bluetooth) és az IEEE 802.11. (wifi). A legtöbb ember számára ezért könnyen hozzáférhető és olcsó

²⁷ Makkay (2017) i. m.

²⁸ *Solutions for UAS operators*. FLARM.

²⁹ ISM: Industrial, Scientific and Medical – ipari, tudományos és egészségügyi berendezések számára kijelölt frekvenciasávok.

³⁰ Makkay Imre: Másodlagos információforrások a légtérben. *Repüléstudományi Közlemények*, 31. (2019), 1. 103–112.; Makkay (2017) i. m.

³¹ Vránics Dávid – Palik Mátyás – Bottyán Zsolt: Esettanulmány egy nyílt repüléstámogató rendszer biztonságáról. *Repüléstudományi Közlemények*, 30. (2018), 1. 185–194.

technológiák. A mobiltelefonok továbbá ideális platformot jelentenek az azonosítót leolvasni képes alkalmazások számára is. Segítségükkel azok könnyen terjeszthetők és eljuttathatók bárki számára interneten keresztül. Bár ezek is ISM-sávban működnek, így kevésbé zavarvédett frekvenciatartományokról van szó, mint például az ADSB esetén, amely engedélyköteles tartományban működik, mégis ezek azok, amelyek a legjobban megfelelnek mind a felhasználók, mind pedig a hatóságok követelményeinek. Hatótávolságuk kisebb, mint a korábban bemutatott repülésbiztonsági eszközöké, viszont jóval nagyobb, mint az optikai kategóriába sorolható módszereké. Az azonosíthatóság hatékonysága nem függ az aktuális fényviszonyoktól, és sokkal kevésbé kitétt a környezeti körülményeknek.

- *IEEE 802.15.1 – Bluetooth*: A Bluetooth esetében annak negyedik és ötödik generációs változatai jöhetnek szóba. A Bluetooth 5. generáció nagy sebességű működési módjának (High Speed Mode) segítségével kétszer akkora adatmennyiséget lehet továbbítani, mint a Bluetooth 4.2-vel. A nagy hatótávolsági módban (Long Range Mode) történő használat során a korábbi 200–300 m helyett elérhető akár 1000 m körüli hatótávolság is drónos alkalmazások esetén, ahol gyakran biztosított a zavartalan optikai rálátás adó és vevő között. Ez a Bluetooth-vevők megnövelt érzékenységének és egy, a korábbinál hatékonyabb hibajavító kódolásnak köszönhető. A megnövekedett hatótávolság hatására kevesebb csomag újraküldésére van szükség, így a vezeték nélküli kapcsolat sokkal robosztusabbá és megbízhatóbbá válik. Az 5. generáció úgynevezett marketingjeladó vagy más néven hirdetési módja (Advertising Extension) segítségével átvihető eddigi minimális adatmennyiség és broadcastkapacitás is növekedett. Fontos, hogy ennek a működési módnak a segítségével kezdeményezni lehet egy eszköz számára a nagy hatótávolságú módban történő kapcsolatlétrehozást.³² Pontosan ezt használja ki az Intel Open Drone ID projektje is, amelynek célja, hogy létrehozzanak egy olcsó, mindenki számára elérhető és megbízható drónazonosítási módszert, és olyan technológián alapuljon, amelyet a lehető legtöbben fogni tudnak a drón közelében. A projekt keretein belül kidolgozott eljárás ezért esetleg wifin, de főként a Bluetooth 5. generációján alapulna. Lényege, hogy előzetes eszközpárosítást nem igénylő módon kisugározza a drón az azonosításra szánt adatcsomagokat. Erre nyújt kézenfekvő megoldást az advertising extension szolgáltatás, amelyet többek között arra találtak ki, hogy bizonyos helyeken (például üzletekben) telepített Bluetooth-adók (proximity marketing beacon) közvetlen közelükben különböző, az adott helyszínhez kapcsolódó információkat automatikusan és kérés nélkül elküldhessen a hatótávolságon belülré került mobiltelefonok számára. Az Open Drone ID specifikációi szolgáltak alapul a korábban részletezett ASTM-szabványnak is. Kisugárzott azonosítási célra a Bluetooth és annak is kifejezetten az ötödik generációja az FAA és az ASTM-szabvány által a leginkább preferált technológia.
- *IEEE 802.11 – wifi*: A wifi segítségével megvalósított távoli drónazonosításra jó példa a DJI által implementált technológia, az úgynevezett Direct Drone-To-Phone Remote Identification, vagyis a közvetlen távoli telefonos drónazonosítás. 2019 végén jelentették be az újításukat, amely hardveres beavatkozás nélkül, pusztán szoftverfrissítést követően minden DJI-drón képessé válhat saját azonosítójának sugárzására ennek

³² *Bluetooth 5*. Texas Instruments, 2020.

a technológiának köszönhetően.³³ Egy telefonos alkalmazás segítségével pedig bárki észlelni tudja a környezetében lévő drónokat és azok azonosítóit. A sugárzott azonosító adatcsomagok a drón egyedi azonosítóján felül annak helyzetét, magasságát, sebességét, irányvektorát és az operátor helyzetét is tartalmazzák, tehát a korábbi azonosítási információkkal kapcsolatos követelményeknek megfelel, olcsó, és széles körben elérhető. A módszert a WiFi Aware protokoll használata teszi lehetővé. Segítségével kettő vagy több eszköz képes adatokat küldeni egymásnak automatikusan anélkül, hogy azok tulajdonosai kezdeményezték volna az ehhez szükséges kapcsolat létrehozását. Hasonlóan, mint a korábban ismertetett Bluetooth 5 Advertising Extension esetében. A WiFi Aware már elérhető, viszont kevésbé elterjedt. Az IoT-alkalmazások³⁴ szempontjából nagy jelentősége lesz. A DJI erre épülő azonosítója még nem érhető el a felhasználók számára, csak demonstrációs célra hozták létre.

4.2.3. Mobilkommunikációs technológiák

Az előzőleg bemutatott módszerek a távoli azonosítás kisugárzott kategóriájába sorolhatók. Azonban jól látszik, hogy a jövőbeni pilóta nélküli repülőekkel elvégezhető műveletek során az eddigieknél sokkal nagyobb hatótávolságra lesz szükség. Erre nyújtanak megoldást a távoli drónazonosítás hálózatos kategóriájába sorolható mobilkommunikációs technológiák negyedik és a legújabb ötödik generációja. A 4G LTE³⁵ segítségével már ma is lehetőség van egy drón monitorozására interneten keresztül. A küszöbön lévő 5G azonban a jóval nagyobb adatátviteli sebesség, a közel valós idejű, pár milliszekundumos késleltetésű és magas rendelkezésre állású M2M³⁶-kommunikációnak, valamint az IoT-ra optimalizált szolgáltatásainak köszönhetően a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek számára is ideális megoldás lesz. A drónazonosítás hálózatos formája ugyan kiterjedt földi infrastruktúrát igényel, azonban a mobilszolgáltatók számára ez nem jelent problémát, mivel szolgáltatásaikkal már most is óriási területeket fednek le. A mobilhálózatokhoz használt engedélyköteles frekvenciasávok és a tudatosan menedzselte hálózati kialakításnak köszönhetően jóval megbízhatóbb és robosztusabb alapokra helyezhető a drón és földi szegmensé közötti kommunikáció mellett a távoli drónazonosítás is az ISM-sávokhoz képest. Ebből fakadóan ez egy magasabb költségű és szolgáltatófüggő megoldás.

5. Összegzés

A publikációban bemutattam a drónszegmens egyik kulcsfontosságú problémáját. Megvizsgáltam, hogy pontosan mit is értünk jelenleg egy drón azonosítása alatt, és rávilágítottam arra, hogy eltérő értelemmel bír egy drón azonosítottasága a drónok elleni védekezés és a távoli drónazonosítás kontextusában. A drónok elleni védekezés esetében ez a fogalom inkább a drón aktuális koordinátáira, sebességvektorára, fizikai jellemzőire, esetleg a gyártóra

³³ *DJI Demonstrates Direct Drone-To-Phone Remote Identification*. DJI, 2019.

³⁴ IoT: Internet of Things – dolgok internete.

³⁵ LTE: Long Term Evolution – negyedik generációs vezeték nélküli adatátviteli szabvány.

³⁶ M2M: Machine-to-Machine Communication – gép-gép kommunikáció, azaz emberi közreműködést nem igénylő adatáramlás olyan gépek között, amelyek képesek azt feldolgozni, tárolni és továbbítani.

és típusra korlátozódik, azonban a távoli drónazonosítás esetében ez nem elegendő. Ezeknek az információknak ki kell egészülniük olyan egyedi azonosítókkal, amelyek segítségével nemcsak a drón, hanem annak operátora, üzemeltetője is azonosítható.

Ezt követően ismertettem a drónazonosítás követelményeit és a pontos definícióit különböző érdekeltségi körök szemszögéből, mint például az európai és az egyesült államokbeli jogalkotás, a nemzetközi szabványosítás, az ipar és a felhasználók. Jól megfigyelhetők az egyes szereplők által támasztott igények közötti eltérések, annak ellenére, hogy abban láthatóan mindenki egyetért, hogy azonosításra szükség van. A hatóságok a maximális biztonságra és felelősségre vonatosságra törekednek, akár a drónok folyamatos valós idejű követése árán is, de a felhasználók érthető módon a lehető legrugalmasabb és legolcsóbb megoldást preferálják. Az ipari szereplők pedig valahol a két tábor között próbálják érvényesíteni érdekeiket. Számukra kulcsfontosságú, hogy minél hamarabb megoldással álljanak elő az azonosítás problémájára. A termékeiket és azok felhasználását nem bonyolíthatja és drágíthatja meg annyira, hogy az már kontraproduktívá váljon, emiatt pedig csökkenjenek az eladások.

A publikációban kitértem a távoli drónazonosítás lehetséges formáira is, majd bemutattam azokat a legfontosabb technológiai megoldásokat, amelyek segítségével megvalósítható az ismertetett követelményeknek megfelelő távoli drónazonosítás. Megvizsgáltam ezek előnyeit és hátrányait egyaránt. Megállapítható, hogy jelenleg leginkább mobiltelefonokban és az IoT területén elterjedten használt vezeték nélküli kommunikációs technológiák a leginkább preferáltak erre a célra. Hosszú távon pedig ki fogják ezeket egészíteni a mobilkommunikációs hálózatok negyedik, de főként az ötödik generációja által nyújtott szolgáltatások, amelyekre szükség is lesz a látóhatáron túli repülések elterjedése esetén. A klasszikus repülésbiztonsági eszközök, mint az ADSB, FLARM és az OGN a drónok esetében is inkább az ütközésselkerülésre alkalmasabbak. Az azonosítás több, fontos kritériumának viszont nem felelnek meg.

A drónszegmens fejlődésének és drónok további elterjedésének jelenleg az egyik legnagyobb akadálya az azonosíthatatlanságukban rejlik. Az egyre fejlettebb és olcsóbb drónok így növekvő kockázatot jelentenek.³⁷ Hiába szabályozza a jogalkotás a területet, ha azok betartására és ellenőrzésére nincs eszköze. Hiába fejlesztenek egyre jobb és hatékonyabb CUAV-eszközöket, amíg azok képtelenek nagy hatékonysággal beazonosítani az operátort.

Ha az azonosítás kérdésére sikerül találni egy olyan megoldást, amely mind a hatóságok, mind pedig a felhasználók számára is elfogadható, valamint széles körben elterjed, akkor az újabb lendületet fog adni a szektornak. Lehetővé téve a pilóta nélküli repülőket további, széles körű állami, üzleti és magáncélú biztonságos felhasználását.

Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-3-1-NKE-69 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.



³⁷ Huszár Péter: Ukrajna közösségi finanszírozású, katonai célokat szolgáló oktokoptereinek elemzése. *Hadmérnök*, 14. (2019), 2. 34–43.

Felhasznált irodalom

- ANSI/CTA-2063-A: *Small Unmanned Aerial Systems Serial Numbers*. 2019. Elérhető: <https://shop.cta.tech/products/small-unmanned-aerial-systems-serial-numbers> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 22.)
- ASTM F3411-19: *Standard Specification for Remote ID and Tracking*. 2019. Elérhető: www.astm.org/Standards/F3411.htm (A letöltés dátuma: 2020. 03. 28.)
- Bluetooth 5*. Texas Instruments, 2020. Elérhető: www.ti.com/wireless-connectivity/simplelink-solutions/bluetooth-low-energy/overview/bluetooth-5.html (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)
- Bódi Antal – Szabó Tivadar – Wühl Tibor: Drónok követése közhiteles módon. *Repüléstudományi Közlemények*, 28. (2017), 2. 111–118. Elérhető: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-10-0374_Bodi_A-Szabo_T-Wuhrl_T.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)
- Crenshaw, Michael: License Plates for Drones: Resolving Privacy Concerns Using Remote Identification Technology. *Journal of Engineering and Public Policy*, 20. (2016), 8. Elérhető: www.researchgate.net/publication/306091407_License_Plates_for_Drones_Resolving_Privacy_Concerns_Using_Remote_Identification_Technology (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- DJI Adds Airplane And Helicopter Detectors To New Consumer Drones*. DJI, 2019. Elérhető: www.dji.com/newsroom/news/dji-adds-airplane-and-helicopter-detectors-to-new-consumer-drones (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- DJI Demonstrates Direct Drone-To-Phone Remote Identification*. DJI, 2019. Elérhető: www.dji.com/newsroom/news/dji-demonstrates-direct-drone-to-phone-remote-identification, (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)
- Dobi Sándor Gábor – Fekete Róbert Tamás – Rohács Dániel: Az európai UTM helyzete és jövője. *Repüléstudományi Közlemények*, 30. (2018), 2. 189–204. Elérhető: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-17-0467_Dobi_Sandor_Gabor_et_al.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)
- EU 2019/945: *A pilóta nélküli légi jármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról*. Melléklet 6. rész, 2019. Elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0945&from=EN> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- EU 2019/947: *Az Európai Bizottság végrehajtási rendelete a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról*. 2019. Elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN> (A letöltés dátuma: 2020. 02. 24.)
- FAA 2019-1100: *Remote Identification of Unmanned Aircraft Systems*. Proposed Rule, 2019. Elérhető: www.federalregister.gov/documents/2019/12/31/2019-28100/remote-identification-of-unmanned-aircraft-systems (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- How to Label Your Drone*. FAA, 2020. Elérhető: www.faa.gov/uas/getting_started/register_drone/media/UAS_how_to_label_infographic.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- Huszár Péter: Ukrajna közösségi finanszírozású, katonai célokat szolgáló oktokoptereinek elemzése. *Hadmérnök*, 14. (2019), 2. 34–43. Elérhető: www.hadmernok.hu/192_03_huszar.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)

- LightCense DroneVisual ID*. Elérhető: www.lightcense.co/ (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- Makkay Imre: ADS-B és a drónok. *Repüléstudományi Közlemények*, 37. (2015), 2. 272–278. Elérhető: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_2/2015-2-20-0221_Makkay_Imre.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- Makkay Imre: Másodlagos információforrások a légtérben. *Repüléstudományi Közlemények*, 31. (2019), 1. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.32560/rk.2019.1.9>
- Makkay Imre: Ütközések elkerülése a kisgépes és a pilóta nélküli repülésben. *Repüléstudományi Közlemények*, 29. (2017), 1. 59–66. Elérhető: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_1/2017-1-04-0378_Makkay_Imre.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- PING-200SR MODE S ADS-B Transponder datasheet*. uAvioni, 2018. Elérhető: <https://uavionix.com/downloads/ping200s/Ping200Sr-Data-Sheet-AP1.pdf> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- PING-200X Certified MODE S ADS-B Transponder datasheet*. uAvioni, UAV-1002852-001 Rev B, 2019. Elérhető: <https://uavionix.com/downloads/ping200X/Ping200XDataSheet.pdf> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- PING-20SI MODE S ADS-B Transponder datasheet*. uAvioni, 2019. Elérhető: <https://uavionix.com/downloads/ping20s/Ping20Si-DataSheet.pdf> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- Ramsey, Christian: *Why Bluetooth is a Bad Idea for Drone Remote Identification*. 2019. Elérhető: <https://uavionix.com/drone-remote-identification/> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)
- Remote ID & Commercial Drones*. Kittyhawk White Paper, Kittyhawk, 2019. Elérhető: <https://kittyhawk.io/resources/Remote-ID-White-Paper.pdf?dl=1> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)
- Schulman, Brendan: *We Strongly Support Drone Remote ID. But Not Like This*. 2019. Elérhető: <https://content.dji.com/we-strongly-support-drone-remote-id-but-not-like-this/> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)
- Singh, Adi et al.: *A Zero-Cost Solution for Remote Identification and Tracking of sUAS in Low Altitude Flights*. 2018. Elérhető: <https://media.ford.com/content/dam/fordmedia/North%20America/US/2018/03/07/Ford-A-Zero-Cost-Solution-for-Remote-Identification.pdf> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 10.)
- Solutions for UAS operators*. FLARM. Elérhető: <https://flarm.com/solutions/for-organizations/uav-drone-operators/> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 20.)
- uAvionx. Elérhető: <https://uavionix.com/uas/> (A letöltés dátuma: 2020. 03. 22.)
- Vránics Dávid – Palik Mátyás – Bottyán Zsolt: Esettanulmány egy nyílt repüléstámogató rendszer biztonságáról. *Repüléstudományi Közlemények*, 30. (2018), 1. 185–194. Elérhető: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-13-0460_Vranics_D_F-Palik_M-Bottyany_Zs.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 03. 15.)



Mies Gerald,¹ Zentay Péter²

Machine Tools and Industrial Robots as Key Technologies to Enable Industry 4.0

The industrial environment has been changing rapidly over the past few years. Today, the Internet of Things (IoT) is finding its way into the global industry sectors. This ongoing industrial digitisation raises new challenges for the whole manufacturing industry. Smart factories are on the rise and promise higher efficiency and productivity. New technological developments in the field of hardware and software significantly extend today's possibilities. Cutting-edge digital manufacturing solutions, especially new smart machines and collaborative robots are being promoted as key enabling technologies in this fourth industrial revolution. However, in the era of Industry 4.0 the holistic integration is a matter of great importance. Taking a step towards Industry 4.0, it is crucial to give equal consideration to products, production processes and business activities.

Keywords: automation, robots, industrial revolution, Industry 4.0, collaborative robots, smart factory

A szerszámgépek és ipari robotok kulcsfontosságú elemei az Ipar 4.0-nak

Az ipari környezet jelentősen változott az elmúlt években. Napjainkban az IoT-ok (Internet of Things) egyre nagyobb részben jelennek meg a globális ipari szektorban. Az ipari digitalizáció egyre nagyobb kihívásokkal szembesíti az ipari vállalatokat. Az intelligens gyárak száma egyre nő, mert jobb hatékonyságot és termelékenységet ígérnek. Korszerű digitális gyártási megoldások és a kollaboratív robotok alkalmazása fontos szerepet játszanak a negyedik ipari forradalom megvalósításában. Azonban az Ipar 4.0 korszakában a holisztikus integrációnak egyre fontosabb szerep jut. A cikkben azt próbáljuk megmutatni, hogy milyen lényeges, hogy a terméket, termelői környezetet és az üzleti tevékenységeket egyszerre és egyenlő súllyal vegyük figyelembe, mert ez a lényeg az Ipar 4.0 felé vezető úton.

Kulcsszavak: Ipar 4.0, együttműködő robotok, intelligens digitális gyár, negyedik ipari forradalom

¹ President, FFG MAG, Salacher Strasse 93, Eisingen, Germany, e-mail: gerald.mies@icloud.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6332-995X>

² Associate Professor at Budapest University of Technology and Economics Department of Manufacturing Science and Engineering, and University of Public Service Department of Military Technology, e-mail: zentay@manuf.bme.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3161-8829>

1. Introduction

The aim of the paper is to introduce and explain the main technologies and principles that are required to design and operate production systems in the concept of industry 4.0. The paper collects the enabling technologies and details methods of collaborative robotics operations necessary for industry 4.0

The Internet is fundamentally changing the way in which organisations operate. This development is mainly facilitated through the advances of digital technologies. When in the early twenty-first century, the B2C (Business-to-Customer) sector was confronted with the challenges of the digital transformation, many established companies failed to catch up with new competitors entering the market. Disruptive business models and new disruptive technologies pressurized the once successful companies. Traditional processes had been replaced, supply chains had been dramatically changed, and the innovation cycles have become shorter.³ Today, similar developments can be observed in the industrial sector, where digital technologies are on the rise. This is evoking a fourth industrial revolution and brings up new challenges for large companies and SMEs on both supply and demand sides.

It is highly important to underline that manufacturing industry is one of the most important industrial sectors in many of the world's leading economies.⁴ Around the globe, popular political initiatives such as the German Industry 4.0 try to foster innovations in the field of digital machining solutions and have gained high interest.⁵ This kind of automation is present in all other fields outside of industrial automation. Modern control engineering theoretical issues and control applications useful in solution of Industry 4.0 challenges are presented by R. Szabolcsi.⁶ As examples of system automation, UAV emergency landing procedures,⁷ or the example of the controller design for small UAV closed loop automatic flight control system leaning on the pole placement method,⁸ are elaborated in other studies by Szabolcsi. However, there is still much to be done to match theory and practice. Looking at the depth of industrial digitalisation, a field of major importance is the so called enabling technologies.⁹ To realise the vision of automatically controlled shop floors and fully connected enterprises, the carpeted and non-carpeted areas need to be centrally and intelligently managed. In this regard software and digital operational technologies in combination with smart machinery and equipment constitute the basis of every smart factory. This paper primarily focuses on the key enabling technologies for Industry 4.0. Although, there is a need to consider many different enablers, the focus will be placed on robots and digital machine tools as key enabling technologies for Industry 4.0. Regarding aircraft manufacturing, application of lean production principles and

³ Acatech 2013, Umsetzungsempfehlungen für das zukunftsprojekt industrie 4.0. abschlussbericht des arbeitskreises industrie 4.0, April 8, 2013.

⁴ *Erschließen der Potenziale der Anwendung von 'Industrie 4.0' im Mittelstand*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2015.

⁵ Mohd Aiman Kamarul Bahrin, Mohd Fauzi Othman, Nor Hayati Nor Azli and Muhamad Farihin Talib: 'Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic.' *Jurnal Teknologi* 78, no 6–13 (2016).

⁶ R. Szabolcsi, *Szabályozásmélet* (Budapest: Óbudai Egyetem, 2019).

⁷ R. Szabolcsi, 'Controlled Emergency Landing of the Unmanned Aerial Vehicles,' *Land Forces Academy Review* 84, no 4(2016), 364–371.

⁸ R. Szabolcsi, 'Pole Placement Technique Applied in Unmanned Aerial Vehicles Automatic Flight Control System Design,' *Land Forces Academy Review* 89, no 1 (2018), 88–98.

⁹ R. Szabolcsi, 'A New Emergency Landing Concept for Unmanned Aerial Vehicles,' *Review of the Air Force Academy* 32, no 2 (2016), 5–12.

procedures are proposed.¹⁰ One of the latest initiatives in aerospace manufacturing is the idea of the introduction of 'Aerospace 4.0'. The concept of 'Aerospace 4.0' is an adaptation of those principles into Industry 4.0, but through the lens of the aviation and aerospace sector of industry. New technologies planned to be involved into 'Aerospace 4.0' are, but not limited to, Big Data, 3D printing techniques, mobile computing, use of augmented reality, soft computing (that is, machine learning), and Internet-of-Things (IoT).¹¹

2. Sharpening the picture of industry 4.0

The digitisation has been influencing the world, the people and the way of doing business. One major development in recent years has been the 'Internet of Things' (IoT). In the IoT everything is connected to the internet, shares data and interacts with its environment.¹² Now, the digitisation is taking its course in the industrial sector. The Internet of Things is growing wider.

The digital transformation and the rise of smart machinery and new digital technologies influence the industrial production. Changing customer needs, shortening innovation cycles and applying cutting-edge technologies set new challenges in the global competition.¹³ In the industrial sector this development is widely referred to as the fourth industrial revolution and promises enormous gains in efficiency and productivity for economies worldwide.¹⁴

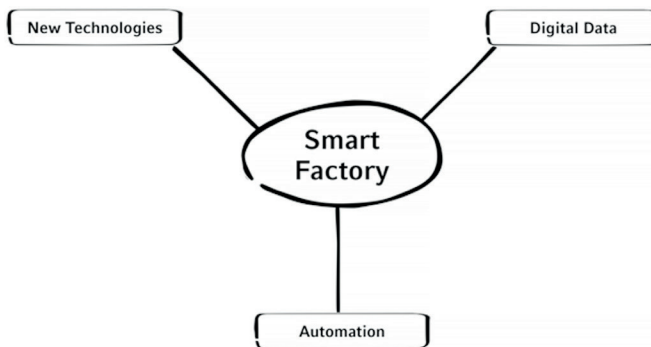


Figure 1

Smart Factory Technologies. Source: edited by the authors

In detail, the concept of Industry 4.0 describes the vision of fully connected and smart factories, which are vertically connected to the office floor and horizontally connected to dispersed value networks. Industry 4.0 aims to connect the digital and virtual world of

¹⁰ Hsien-Ming Chang, Chikong Huang and Chau-Chen Torng, 'Lean Production Implement Model for Aerospace Manufacturing Suppliers,' *International Journal of Innovation, Management and Technology* 4, no 2 (2013).

¹¹ Dan Lewis, 'Aerospace 4.0 – why we need it,' *Aerospace manufacturing*, 10. 06. 2019.

¹² P. Mills, 'Smarter, Smaller, Safer Robots,' *Harvard Business Review* 11 (2015), 28–30.

¹³ Günther Schuh, Till Potente, Cathrin Wesch-Potente, Anja Ruth Weber and Jan-Philipp Prote, 'Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0,' *Procedia CIRP* 19 (2014), 51–56.

¹⁴ 'Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017,' Gartner.

computer technology with the world of industrial production. Every asset is connected to higher level systems and shares data in real-time. Often this is referred to as a Cyber-Physical System for digital factory solutions.¹⁵ One point frequently referred to in terms of Industry 4.0 is the economical production of batch sizes starting from one.¹⁶ Figure 1 depicts three main elements in the smart factory.

Automation, and in this regard, continuous smooth-running processes are the most critical part in Industry 4.0, as they are enabling machines to adapt to changes in real time. These continuous processes require a stronger convergence of IT, OT and machinery and equipment.¹⁷ As a result, the only way of realising holistic Industry 4.0 solutions is to implement every machine, robot and worker into a company-wide digital infrastructure.¹⁸ Higher level systems then perform actions and control the processes intelligently – the collected digital data can be used for predictive solutions and databased decision-making.¹⁹ A 'digital twin' of the factory and all its assets allows simulation processes for adaptive control and management, and also on-line diagnostics, simulation and testing without interfering with the production. Central to the entire discipline of Industry 4.0 is the application of various technologies. Thus, the field of industrial digitisation requires a holistic and comprehensive digital realignment of the entire corporation. Factories are already working on the integration of different new technologies, but the interdisciplinary character brings additional issues. Manufacturers across various industries need to redefine their production processes and holistically integrate new technologies in order to enable smart manufacturing and digital factory solutions.

3. Key enabling technologies

Due to the different sectors and domain specific requirements, Industry 4.0 incorporates a great number of technologies. Despite this great variety, an indispensable component of Industry 4.0 is basic enabling technologies. The technologies can be categorised in new developments in the field of information and operational technology for future factories and the appropriate hardware needed to enable the new solutions. When it comes to IT and OT in terms of Industry 4.0, different areas are needed to be taken into account. The most important ones are as they listed below:

- IoT-infrastructure;
- digital data and processes;
- Manufacturing Execution systems (MES);
- Enterprise Resource Planning (ERP);
- Big Data and Analytics.

¹⁵ M. Luckenhaus, 'Machine vision in IoT: how machine vision technologies help to overcome new challenges related to connected and automated production,' *Quality* 55, no 5 (2016), 18–20.

¹⁶ Georg Weichhart, Arturo Molina, David Chen, Lawrence E. Whitman and François Vernadat, 'Challenges and Current Developments for Sensing, Smart and Sustainable Enterprise Systems,' *Computers in Industry* 79 (June 2016), 34–46.

¹⁷ L. Pickett, 'Smart Manufacturing: A Digital Leap Forward,' *Quality* 55, no 6 (2016), 36–39.

¹⁸ Weichhart et al., 'Challenges'.

¹⁹ D. Zuehlke, 'Smart Factory – Towards a Factory-of-Things,' *Annual Reviews in Control* 34, no 1 (Apr. 2010), 129–138.

Overall, a basic IoT-infrastructure is necessary to enable digitization and benefit from the possibilities. Central to the entire discipline is the flow of data in the organisation to digitally map the business and production processes for extended control and optimisation possibilities. In this regard, MES and ERP systems are two building blocks for the realisation of continuous processes. Additionally, there is an increasing demand for new tools to connect the different organisational levels, especially business processes on the office floor and production processes on the shop floor.²⁰ As Shariatzadeh et al. stated, a 'common language' is required.²¹ This imposes tough requirements on the interface compatibility of IT and OT. However, using dedicated software tools and digital technologies to support the production processes, factories become more resilient and smart. Implementing those interconnected software tools is an important step to enable Industry 4.0 and realise cost reductions and productivity increases.²² In such fully connected factories, the collected data, in combination with the previously mentioned cloud technology and IT-tools, can be used for detailed analysis.²³

Although software is becoming increasingly important, it is only half of the job. In Industry 4.0, there is a wide range of new solutions in the field of industrial hardware products. The holistic integration of both hardware and software in the factory is essential. As Zuehlke describes in his article: 'Everything, down to the smallest piece of equipment, must have a certain degree of built-in intelligence. In respect thereof, the holistic integration of all machines, workpieces, tools, other assets and human workers into a company-wide digital infrastructure is a crucial step towards smart manufacturing and digital factories.'²⁴ Looking at the shop floor integration, many important innovations that come from the fields of manufacturing and automation effectively transform a factory into a smart factory.²⁵ In the near future shop floors will be characterised by the application of highly automated machine tools and robots.²⁶ Therefore, those two technological fields can be described as the major transformational forces.

4. Machines, robots and human workers working hand in hand

The industrial digitisation represents a major shift in how manufacturers operate. This fourth industrial revolution fundamentally transformed, and will continue to transform, the industrial sector. Integrated in a digital infrastructure, future factories will be able to produce in high quality at low costs and on demand. This directly affects the competitive landscape of the whole industry. In respect thereof, the holistic integration of all machines, workpieces, tools, other assets and human workers into a company-wide digital infrastructure is a crucial

²⁰ Matthias M. Herterich, Falk Uebernickel and Walter Brenner, 'The Impact of Cyber-physical Systems on Industrial Services in Manufacturing,' *Procedia CIRP* 30 (2015), 323–328.

²¹ Navid Shariatzadeh, Thomas Lundholm, Lars Lindberg and Gunilla Sivard, 'Integration of Digital Factory with Smart Factory Based on Internet of Things,' *Procedia CIRP* 50 (2016), 512–517.

²² Petri Helo, Mikko Suorsa, Yuqiuge Hao and Pornthep Anussornnitisarn, 'Toward a cloud-based manufacturing execution system for distributed manufacturing,' *Computers in Industry* 65, no 4 (May 2014), 646–656.

²³ O. Sauer, 'Information Technology for the Factory of the Future – State of the Art and Need for Action,' *Procedia CIRP* 25 (2014), 293–296.

²⁴ Zuehlke, 'Smart Factory,' 21.

²⁵ H. Weiss, "'Predictive Maintenance": Vorhersagemodelle krempeln die Wartung um,' *ingenieur.de*, 2012.

²⁶ L. Thames and D. Schaefer, 'Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0,' *Procedia CIRP* 52 (2016), 12–17.

step towards smart manufacturing and digital factories for every industrial company. Robot applications emerge from knowledge of the loads affecting its technical status.²⁷ Segmentation and classification of loads of the UGV of general use were discussed, and the investigation of importance of the UGV maintenance was presented by Szabolcsi and Menyhárt.²⁸ The UGV is a vehicle activated by electrical energy.²⁹ The accessibility of the UGV mostly depends on electrical energy available aboard. In SVM and Fuzzy logic were introduced to evaluate technical status of the batteries applied by the UGV.³⁰

4.1. Smart machinery and equipment

The ongoing changes influence the shop floor management, and the success of the industrial digitisation is highly affected by the widespread integration of smart machining solutions. Due to the advent of smart manufacturing technologies in particular, connected machinery and equipment are in the position to produce with higher efficiency.³¹ Smart machine tools are equipped with sensors and embedded systems and connected to the higher-level systems to collect process data in real time.³² A variable number of sensors measures the machining data (for example spindle speed, temperature, accelerations, forces, vibrations, sound). The data of the machines enables predictive service solutions and increase the machine run time through continuous condition monitoring.³³ Targeting existing machines, retro-fit solutions allow manufacturers to integrate those into the smart manufacturing environment in a comfortable way at low cost.³⁴

Dealing with the interface between human workers and machines, a central issue in Industry 4.0 is the interaction between human workers and the software and hardware systems. New human machine interfaces (HMI) are needed.³⁵ Machines provide in-built assistance software and control panels. These solutions aim to simplify the machining process and reduce complexity for the workers. Employees in the smart factory will use a wide set of mobile devices. Weichhart et al. indicated that 'the increasing use of smartphones, tablets, mobile devices and sensor networks demonstrates the connectivity between people and people, people and machines, machines and machines'.³⁶ For example, industrial tablet computers can be used for different applications and allow advanced, location-independent process management and monitoring of the assets. Sauer et al. point out that

²⁷ R. Szabolcsi and J. Menyhárt, 'Loads Affecting UGV's Technical Status,' *Review of the Air Force Academy* 30, no 3 (2015), 15–20.

²⁸ R. Szabolcsi and J. Menyhárt, 'The Importance of Maintenance During UGV Use,' *Land Forces Academy Review* 80, no 4 (2015), 486–492.

²⁹ Thames and Schaefer, 'Software-defined', 12–17.

³⁰ J. Menyhárt and R. Szabolcsi, 'Support Vector Machine and Fuzzy Logic,' *Acta Polytechnica Hungarica* 13, no 5 (2016), 205–220.

³¹ Weiss, "Predictive Maintenance".

³² Picket, 'Smart Manufacturing', 36–39.

³³ 'Standardization'. International Federation of Robotics, 2017.

³⁴ G. Gorbach and C. Polsonetti, 'Realizing value from the Industrial Internet of Things,' *InTech* 62, no 4 (2015), 12–18.

³⁵ Jay Lee, Hung-An Kao and Shanhu Yang, 'Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment,' *Procedia CIRP* 16 (2014), 3–8.

³⁶ Weichhart et al., 'Challenges'.

an information-overload must be prevented, which requires a role based distribution of information – users, for example machine workers receive exactly the information they need at a certain time to complete their tasks.

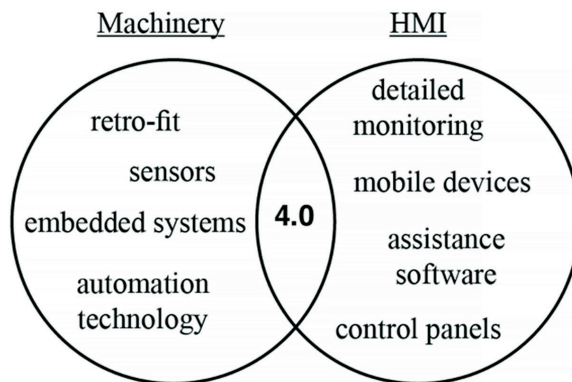


Figure 2
Machinery and HMI in Industry 4.0. Source: edited by the authors

Smart machinery and equipment is important to produce more efficiently and with higher reliability. The new technologies on the shop floor level of companies are enabling the digital transformation of factories.

4.2. Smart collaborative robots

An integral part of a smart factory is such an automation that ensures high process reliability and manages increased complexity in the era of mass customisation. The market for industrial robots has been growing rapidly over the past few years. The statistics below show the growing interest in robot technology and the estimated market growth in the next years.

Together with the higher level and embedded systems, next-level automation technology is the key to adaptive production processes in the smart factory. In the history of factory automation, robots have always played a vital role. The IFR defines a robot as 'an automatically controlled, reprogrammable multipurpose manipulator programmable in three or more axes which may be either fixed in place or mobile for use in industrial applications'.³⁷ The new, smart and collaborative robots are characterised by visual systems and sensors to be aware of the environment and guarantee the safety of workers.³⁸

However, the maturity of the collaborative robots is at a fast developing, but early stage. Looking at the recent Hype Cycle of emerging technologies, the collaborative robots are moving to the peak of inflated expectations. The time until the technology can be used in terms of productivity is estimated to five to ten years.

³⁷ J. Lawton, *Collaborative Robots and the Future of Work*, Boston, MA, 2015.

³⁸ J. A. Corrales, G. J. García Gómez, F. Torres and V. Perdereau, 'Cooperative Tasks between Humans and Robots in Industrial Environments,' *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9, no 3 (2012), 94.

Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017

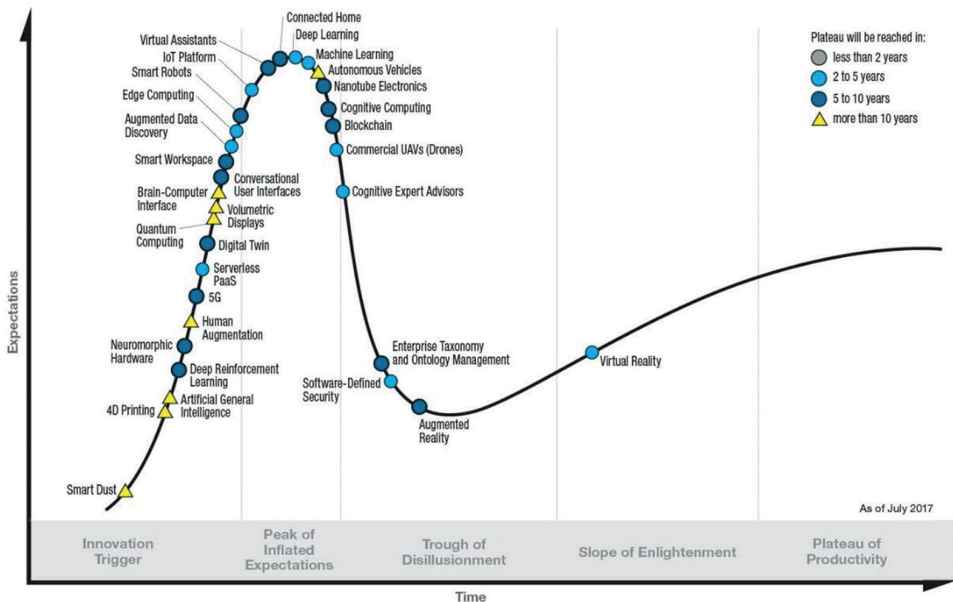


Figure 3

Hype Cycle Emerging Technologies. Source: I. Veza, M. Mladineo and N. Gjeldum, 'Managing Innovative Production Network of Smart Factories,' *IFAC-PapersOnline* 48, no 3 (2015), 555–560.

Until this plateau of productivity is reached, there will be some kind of uncertainty about the risks and chances. Nonetheless, after the hype there will be the 'Slope of Enlightenment' where the real potential of the technology becomes clear and the first practical implementations have been successful.³⁹

Figure 4 shows a robot at a manual workplace that assist the worker. For example assembly tasks can be done with support of collaborative robots. Furthermore, the robot is instructed to perform an assembly operation, that is, it is not programmed in the classical way.⁴⁰

Furthermore, robots will support the workers in many more scenarios. In a smart factory, robots are able to collaborate with their human colleagues and automate processes. In this regard, collaborating with robot manipulators on the shop floor means that robots perform monotonous tasks and reduce the workload of employees. Industrial robots will become smarter, lighter and more compact. On a shop floor, where robots interact with their environment (machine tools, workers, transportation equipment), this enormously boosts competitiveness. As Mills states, 'adaptive robots increasingly gain the capacity to be trained by people and to be programmed on the fly to do whatever needs doing, their efficiency and

³⁹ Veza, Mladineo and Gjeldum, 'Managing.'

⁴⁰ T. Stock and G. Seliger, 'Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0,' *Procedia CIRP* 40 (2016), 536–541.

flexibility will skyrocket'.⁴¹ The evolution of the robot technology and the increase in flexibility highly influences the potential use cases. Especially due to their various application purposes, smart robots, which collaborate with human and automated machining processes, are a key technology to enable Industry 4.0. If there are flexible robots that can be moved easily from machine to machine and perform their tasks, this affects the whole factory organisation. Collaborative robots can assist workers, for example, by holding the heavy part while the worker performs the necessary tasks (for example assembling an additional part) on it.

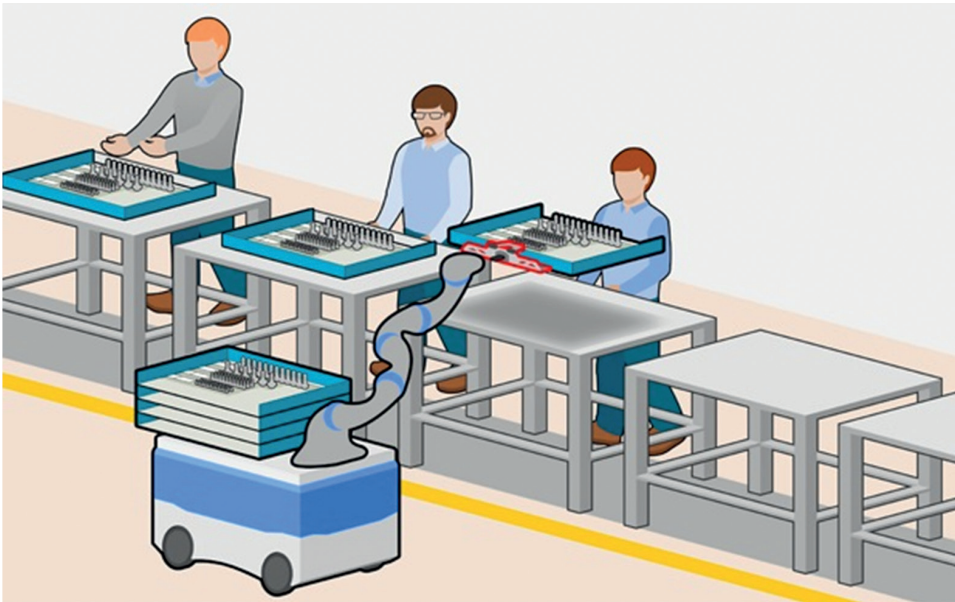


Figure 4

Collaborative robot assisting manual workers. Source: 'Robots: Humans' Dependable Helpers,' Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung IFF.

4.3. Smart Factory organisation

New machine tools, innovative robot and machining technology or smart mobile devices play a vital role in Industry 4.0. In such a smart environment, the products and raw materials are uniquely identifiable, can be localised at all times and know their own history, current status and alternative routes to achieve their target state. This will leverage transparency and also increase productivity in the manufacturing sector. This transparency is seen as one of the key advantages of industrial digitisation. It enables a completely new way of companies working together. In terms of the supply chain management, the higher connectivity also allows a demand-oriented production.

⁴¹ R. Neubert, 'Powering the Industrial Internet of Things,' *Plant Engineering* 70, no 2 (2016), 32–34.

Transport equipment will be interchanging data with the machines to realise the coordination of supply and products. Additionally, the next-level industrial robots and machine tools create new efficiencies. Moreover, it enables a whole new way of producing goods – individually, fast and on-demand. The interconnection and continuous data exchange can be used for decentralised decision making and smart shop floor organisation, as the assets share information about their condition and the products manage their own production. Scenarios like an autonomous production plant may become possible in future factories. Nonetheless, humans will always play a significant role in the future. In the mid-term, robots and smart machines and Industry 4.0 solutions are not aiming to replace workers. Manufacturers mainly benefit from the ability to manage the production in real time, which is important to react to changes in the environment quickly and is particularly useful in the manufacturing environments of today, with an increasing number of customised products. Indeed, robots can perform tasks like part- and tool-handling, cleaning and maintaining autonomously – therefore, these tasks in manufacturing will certainly be automated. Eventually, a future is possible where tasks of human workers will be limited to the monitoring of the automated equipment. However, a factory is more likely where robots and humans will work hand-in-hand together.⁴²

5. Conclusions

In conclusion, the Internet of Things is no longer relevant just to private users. Instead, it represents an effective way to take production to a new level of effectiveness. Even though it is a relatively new concept, many outstanding opportunities had been identified by different institutions worldwide. Furthermore, the first practical implementations show the potential in the individual mass production of goods. The increasing degree of automation brings the chance to produce individual products on demand, in high quality and at low cost. Nonetheless, the chance to adapt to environmental changes and produce with outstanding efficiency and productivity can only be put into practice when all the hardware and equipment is interlinked and connected. What are especially important enablers to meet the vision of mass customisation are smart machines in combination with robots that fully automate the processes. As a result, manufacturers are forced to develop comprehensive strategies in order to undertake these chances. In the future, we plan to exploit the research further in the field of collaborative robotics.

Bibliography

- Acatech 2013. Umsetzungsempfehlungen für das zukunftsprojekt industrie 4.0. abschlussbericht des arbeitskreises industrie 4.0, April 8, 2013. Available: www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/ (25. 01. 2021.)
- Erschließen der Potenziale der Anwendung von 'Industrie 4.0' im Mittelstand.* Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2015. Available: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-

⁴² Ibid.

[anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D5](#) (06. 11. 2020.)

- Bahrin, Mohd Aiman Kamarul – Othman, Mohd Fauzi – Azli, Nor Hayati Nor – Talib, Muhamad Farihin: 'Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic.' *Jurnal Teknologi* 78, no 6–13 (2016). DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
- Chang, Hsien-Ming – Huang, Chikong – Torng, Chau-Chen: 'Lean Production Implement Model for Aerospace Manufacturing Suppliers.' *International Journal of Innovation, Management and Technology* 4, no 2 (2013). DOI: <https://doi.org/10.7763/ijimt.2013.v4.400>
- Corrales, J. A. – García Gómez, G. J. – Torres, F. – Perdereau, V.: 'Cooperative Tasks between Humans and Robots in Industrial Environments.' *International Journal of Advanced Robotic Systems* 9, no 3 (2012), 94. DOI: <https://doi.org/10.5772/50988>
- Gorbach, G. – Polsonetti, C. 'Realizing value from the Industrial Internet of Things.' *InTech* 62, no 4 (2015), 12–18.
- Helo, Petri – Suorsa, Mikko – Hao, Yuqiuge – Anussornnitisarn, Pornthep: 'Toward a cloud-based manufacturing execution system for distributed manufacturing.' *Computers in Industry* 65, no 4 (May 2014), 646–656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.01.015>
- Herterich, Matthias M. – Uebernickel, Falk – Brenner, Walter: 'The Impact of Cyber-physical Systems on Industrial Services in Manufacturing.' *Procedia CIRP* 30 (2015), 323–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.110>
- Lawton, J.: *Collaborative Robots and the Future of Work*. Boston, MA, 2015. Available: www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/06-CollaborativeRobotTechnologyandCustomerApplications-Lawton.pdf (07. 01. 2020.)
- Lee, Jay – Kao, Hung-An – Yang, Shanhu: 'Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment.' *Procedia CIRP* 16 (2014), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- Luckenhaus, M.: 'Machine vision in IoT: how machine vision technologies help to overcome new challenges related to connected and automated production.' *Quality* 55, no 5 (2016), 18–20.
- Lewis, Dan: 'Aerospace 4.0 – why we need it.' *Aerospace manufacturing*, 10. 06. 2019 Available: www.aero-mag.com/aerospace-4-0-why-we-need-it/ (07. 01. 2020.)
- Menyhárt, J. – Szabolcsi, R.: 'Support Vector Machine and Fuzzy Logic.' *Acta Polytechnica Hungarica* 13, no 5 (2016), 205–220. DOI: <https://doi.org/10.12700/aph.13.5.2016.5.12>
- Mills, P.: 'Smarter, Smaller, Safer Robots.' *Harvard Business Review* 11 (2015), 28–30.
- Neubert, R.: 'Powering the Industrial Internet of Things.' *Plant Engineering* 70, no 2 (2016), 32–34.
- Picket, L.: 'Smart Manufacturing: A Digital Leap Forward.' *Quality* 55, no 6 (2016), 36–39.
- 'Robots: Humans' Dependable Helpers.' Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung IFF. Available: www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/robotic-systems/colrobot.html (09. 11. 2020.)
- Sauer, O.: 'Information Technology for the Factory of the Future – State of the Art and Need for Action.' *Procedia CIRP* 25 (2014), 293–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.041>
- Schuh, Günther – Potente, Till – Wesch – Potente, Cathrin – Weber, Anja Ruth – Prote, Jan-Philipp: 'Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0.' *Procedia CIRP* 19 (2014), 51–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.016>
- Shariatzadeh, Navid – Lundholm, Thomas – Lindberg, Lars – Sivard, Gunilla: 'Integration of Digital Factory with Smart Factory Based on Internet of Things.' *Procedia CIRP* 50 (2016), 512–517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.050>

- 'Standardization'. International Federation of Robotics, 2017. Available: www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en (25. 01. 2021.)
- Szabolcsi, R.: 'Pole Placement Technique Applied in Unmanned Aerial Vehicles Automatic Flight Control System Design.' *Land Forces Academy Review* 89, no 1 (2018), 88–98. DOI: <https://doi.org/10.2478/raft-2018-0011>
- Szabolcsi, R.: 'Controlled Emergency Landing of the Unmanned Aerial Vehicles.' *Land Forces Academy Review* 84, no 4 (2016), 364–371.
- Szabolcsi, R.: 'A New Emergency Landing Concept for Unmanned Aerial Vehicles.' *Review of the Air Force Academy* 32, no 2 (2016), 5–12. DOI: <https://doi.org/10.19062/1842-9238.2016.14.2.1>
- Szabolcsi, R. – Menyhárt, J.: 'Diagnostics of the Batteries Technical Status Using SVM Method.' *Land Forces Academy Review* 82, no 2 (2016), 190–197.
- Szabolcsi, R. – Menyhárt, J.: 'The Importance of Maintenance During UGV Use.' *Land Forces Academy Review* 80, no 4 (2015), 486–492.
- Szabolcsi, R. – Menyhárt, J.: 'Loads Affecting UGV's Technical Status.' *Review of the Air Force Academy* 30, no 3 (2015), 15–20. DOI: <https://doi.org/10.19062/1842-9238.2015.13.3.2>
- Szabolcsi, R.: *Szabályozásmélet*. Budapest, Óbudai Egyetem, 2019. p. 470.
- Stock, T. – Seliger, G.: 'Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0.' *Procedia CIRP* 40 (2016), 536–541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Thames, L. – Schaefer, D.: 'Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0.' *Procedia CIRP* 52 (2016), 12–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041>
- 'Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2017.' Gartner. Available: www.gartner.com/smarterwithgartner/top-trends-in-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017/ (09. 01. 2018.)
- Veza, I. – Mladineo, M. – Gjeldum, N.: 'Managing Innovative Production Network of Smart Factories.' *IFAC-PapersOnline* 48, no 3 (2015), 555–560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.139>
- Weichhart, Georg – Molina, Arturo – Chen, David – Whitman, Lawrence E. – Vernadat, François: 'Challenges and Current Developments for Sensing, Smart and Sustainable Enterprise Systems.' *Computers in Industry* 79 (June 2016), 34–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.07.002>
- Weiss, H.: "'Predictive Maintenance": Vorhersagemodelle krepeln die Wartung um.' *ingenieur.de*, 2012. Available: www.ingenieur.de/technik/forschung/predictive-maintenance-vorhersagemodelle-krepeln-wartung-um/ (06. 11. 2020.)
- Zuehlke, D.: 'Smart Factory – Towards a Factory-of-Things.' *Annual Reviews in Control* 34, no 1 (Apr. 2010), 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.008>

Ahmad Alhosban¹

Assessment of the GIS-Aided Precise Approach Using the GNSS-GBAS Landing Systems

The radio navigational Instrument Landing Systems (ILSs) are currently intended to guide the aircrafts in lateral and vertical dimensions to the runway surface safely and precisely. Therefore, they are strongly related to the geographic location of an airport and its runway(s). The ILS systems use the aids of the radio frequency radiation to achieve this purpose, depending on the ground emitting stations, and providing the guidance to the runway centreline location along with the glide slope guidance during the Final Approach Segment (FAS). Furthermore, the new ILS systems are fully aided by the coordinates of the Global Positioning System (GPS) instead of the ground radiations, they use the waypoint fixes during the landing phase of flight by means of transmitting their corrections to the on-board receivers. Those new invented Ground Based Augmentation Systems (GBAS) are more precise and trustable, they also increase the capacity of the huge air traffic demands nowadays by multiple and non-straight approaches. As a result, the Geographic Information System (GIS) of any airport supported by the GBAS system is intended to be fully used and implemented in both instrumental and procedural aids. Many previous studies had indicated that the old procedural approaches should be changed to the new GIS aided ones, but without pointing out when and how to implement such important transfer. The purpose of this study is to assess the performance of the GIS aided precision procedures using the GBAS stations, and to identify to what extent they can enhance the navigational aviation in the air traffic management domain. A special focus will be put on the Hungarian Budapest international airport in terms of both capability motivating factors and the current GIS infrastructure aiding. Results showed a promising chance for more investment in installing the GBAS stations in the airport. That will enable more capacity and easier approaches in all weather conditions.

Keywords: *Instrument Landing System (ILS), Final Approach Segment (FAS), Ground Based Augmentation System (GBAS), Global Positioning System (GPS), Geographic Information System (GIS).*

¹ University of Public Service Doctoral School of Military Engineering, Eng., PhD Candidate, e-mail: Ahmad_alhosban@yahoo.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7494-6067>

A térinformatika által támogatott pontos megközelítés értékelése a GNSS-GBAS leszállórendszerek használatával

A rádió navigációs műszeres leszállórendszerek (ILS) célja jelenleg a repülőgépek oldalirányú és függőleges méretben történő biztonságos és pontos irányítása a kifutópálya felszínéhez. Ezért szorosan kapcsolódnak a repülőtér és a kifutópálya(k) földrajzi elhelyezkedéséhez. Az ILS-rendszerek a rádiófrekvenciás sugárzás segédeszközeit használják a cél elérésére, a földet sugárzó állomásoktól függően és a végső megközelítési szakasz (FAS) során a kifutópálya középvonalának irányításához, valamint a csúszási lejtés vezetéséhez nyújtanak útmutatást. Ezenkívül az új ILS-rendszereket a földi sugárzások helyett teljes mértékben a globális helymeghatározó rendszer (GPS) koordinátái segítik, a repülés leszállási szakaszában az útpontpont-javításokat használják a korrekcióik továbbításával a fedélzeti vevőkészülékeken. Ezek az új feltalált földi alapú kiterjesztési rendszerek (GBAS) pontosabbak és megbízhatóbbak, és több és nem egyenes megközelítéssel növelik a manapság rendkívüli légiforgalmi igények kapacitását is. Ennek eredményeként a GBAS-rendszer által támogatott bármely repülőtér földrajzi információs rendszerét (GIS) teljes mértékben használni és megvalósítani kívánják mind az instrumentális, mind az eljárási segédletek terén. Számos korábbi tanulmány jelezte, hogy a régi eljárási megközelítéseket át kell változtatni az új térinformatikai eszközökkel támogatottakra, anélkül azonban, hogy rámutatnának arra, hogy mikor és hogyan kell végrehajtani egy ilyen fontos transzferet. A tanulmány célja a térinformatikai eszközökkel támogatott precíziós eljárások teljesítményének felmérése a GBAS-állomások segítségével, valamint annak meghatározása, hogy ezek mennyiben javíthatják a navigációs repülést a légiforgalom-irányítási területen. Különös hangsúlyt kap a magyar budapesti nemzetközi repülőtér mind a képességeket motiváló tényezők, mind a jelenlegi térinformatikai infrastruktúra-támogatás szempontjából. Az eredmények ígéretes esélyt mutattak a beruházásokra a GBAS-állomások repülőtéren történő telepítése érdekében. Ez nagyobb kapacitást és könnyebb megközelítést tesz lehetővé minden időjárási körülmények között.

Kulcsszavak: műszeres leszálló rendszerek (ILS), végső megközelítési szegmens (FAS), földi alapú augmentációs rendszer (GBAS), globális helymeghatározó rendszer (GPS), földrajzi információs rendszer (GIS)

1. Introduction and Background

Historically, the navigational landing systems era has passed through a long way of developments and enhancements since the early 1970s; the major milestones in this development roadmap are the Instrument Landing System (ILS), the Microwave Landing System (MLS) and the GBAS Landing System (GLS). In the following paragraphs, light will be shed on their advantages and drawbacks.

The ILS has been safely guiding aircraft on the final approach for about 70 years; it was chosen by the International Civil Aviation Organisation (ICAO) as the international standard for navigation aids, and has been operated in most airports since the 1950s. Basically, it consists of two VHF transmitters, of which one provides the lateral guidance and the other the vertical guidance; The first VHF transmitter supports the precision approach and landing

of flights by providing information on the lateral deviation (flight landing around the centre of the runway) using the difference in the depth of modulation (DDM) of the directional radio wave radiated from the ground, while the second transmitter supports the vertical deviation (flight landing above and below the Glide Path Angle (GPA), and provides also the distance between the runway threshold and the location of the approaching flight.² However, the most noticeable shortages in the ILS systems are: (1) both transmitters are necessary for each runway end to which the precision approach is provided, and this makes the system expensive, because multiple installations are necessary at one airport, depending on how many runways it operates; (2) since the air traffic is continuously increasing, the existing ILS is shortened to fulfil the capacity needs; (3) the ILS design only allows the definition of straight-in approach trajectories to a fixed point, which makes operations inflexible. Therefore, there was a need for research on a new technology to overcome those shortages within the limited airspace.

Then the MLS was developed in the 1980s. It allowed more flexibility, mainly by allowing the definition of multiple approach tracks to one runway threshold. The only installed system was in London Heathrow airport, although it was certified by ICAO as Category CAT III performance during all kinds of bad weather, especially fog.³ Unfortunately, the development of the MLSs was ceased when the GNSS/GBAS systems had been started to be developed since 1990s in the USA and Europe,⁴ the MLS system was the victim of the GNSS system in its early stages. Nonetheless, when MLS was about to be widely used, many of the on-board fleets' equipment had to be modified, if not been changed accordingly; this change was because of the difference of frequencies used in MLSs over the ILSs. Therefore, London MLS System was decommissioned in May 2017 and replaced by a GNSS/GBAS system.

On the contrary, the newly developed GNSS/GBAS systems are more capable of providing safe and reliable guidance than the MLS systems, with a greatly improved flexibility in the definition of approach tracks. For example, the GBAS system supports flights (within a 23 NM radius from an airport location) with a precision approach service like ILS by using the concept of Differential GPS (DGPS). A curved approach and the control of glide path angle are possible for the GBAS, unlike for the ILS. Therefore, the efficient and flexible handling of landings is possible. Also, unlike the ILS that needs to be installed at each runway along the entering direction of flights, the GBAS system can offer information of approach guidance for several runways, using just one piece of equipment. Hence, it has economic benefits compared to the ILS. Moreover, within the past two decades, the aviation navigation has been gradually transitioning from the ground-based infrastructure to rely increasingly on the global navigation satellite systems (GNSSs). This has led the ICAO to standardise a navigation performance concept called the Performance-Based Navigation (PBN) (ICAO, Annex 10, 2012). Within the PBN, the system performance requirements for navigation equipment are specified as Required Navigation Performance (RNP) with a high level of accuracy, integrity and availability.

However, in order to provide precision instrument approaches that utilise three-dimensional angular guidance to a dedicated runway, two possibilities exist: (1) On the one hand, the so

² M. Jeong, J. Bae, H. Jun and Y. Lee, 'Flight test evaluation of ILS and GBAS performance at Gimpo International Airport,' *GPS Solution* 20 (2016), 473–483.

³ T. Dautermann, M. Felix and A. Grosch, 'Approach service type D evaluation of the DLR GBAS testbed,' *GPS Solution* 16 2012, 375–387.

⁴ Ibid.

called the satellite-based augmentation system (SBAS), in which the GNSS reference stations are distributed over a wide area at precisely known locations. They measure the GNSS signals and send the data to a master control station. The master control station computes correction and integrity information, which is broadcasted to the flights via a geostationary satellite. (2) On the other hand, in the so called ground-based augmentation system (GBAS), which is used to achieve GNSS augmentation at an airport only, it is sufficient to place two to four reference stations at the airport and have a local processing facility. The correction and integrity information are transmitted to the flights via a (VHF) radio data link. In both cases, the user applies those corrections to its own GNSS measurements and computes a more precise position. Furthermore, by using the Final Approach Segment (FAS) data block which is supported by the Geographical Information System (GIS) of a specific airport terrain and space, the aircraft's computer can then calculate the angular deviations with respect to the GIS aided reference trajectory, and the final result will be a guidance signal looking like the conventional one (ILS).⁵

In this article, the GIS aided precise approach trajectory, which uses the signals of the GBAS Landing System (GLS), is examined through a comparison with the Non-GIS aided approach trajectories used in the current conventional ILSs. Furthermore, the available GIS infrastructure of the Budapest Airport (BUD) is detailed, showing the future investment in GBAS landing system to optimise the accuracy, integrity, availability performance, as well as to increase the capacity of the air traffic and the airport handling. Special technical focus will be on the differences between the GLS and ILS systems in terms of precise approach.

2. Geographic Information System (GIS) implementation in the Aviation domain

From a software perspective, a GIS consists of a special type of computer program capable of storing, editing, processing, and presenting geographic data and information as maps. There are several GIS software providers, such as Environmental Systems Research Institute Inc.,⁶ which distributes ArcGIS, and Pitney Bowes,⁷ which distributes MapInfo GIS. Though online mapping services and interfaces are provided by companies like Google, Yahoo, and Microsoft, such services are not (yet) considered fully fledged GIS platforms.⁸ There are also open-source GIS options, such as GRASS,⁹ which is freely distributed and maintained by the open source community.¹⁰

All GIS software, regardless of vendor, consists of a database management system that is capable of handling and integrating two types of data: spatial data and attribute data. Spatial data refer to the real-world geographic objects of interest, such as streets, buildings, lakes and countries, and their respective locations. In addition to location, each of these objects also

⁵ T. Dautermann, T. Ludwig, R. Geister and L. Ehmke, 'Extending access to localizer performance with vertical guidance approaches by means of an SBAS to GBAS converter,' *GPS Solution* 24 (2020), Article No.37.

⁶ www.esri.com

⁷ www.pbinsight.com

⁸ J. Campbell and M. Shin, *Essentials of Geographic Information System* (Saylor Foundation, 2011).

⁹ <http://grass.itc.it>

¹⁰ Campbell and Shin, *Essentials*.

possesses certain traits of interest, or attributes, such as a name, number of stories, depth, or population. GIS software keeps track of both the spatial and attribute data and permits us to link the two types of data together to create information and facilitate analysis. One popular way to describe and visualise a GIS is picturing it as a cake with many layers. Each layer of the cake represents a different geographic theme, such as water features, buildings, and roads, and each layer is stacked one on top of another.¹¹

'As hardware, a GIS consists of a computer, memory, storage devices, scanners, printers, GPS units, and other physical components. If the computer is situated on a network, the network can also be considered an integral component of the GIS because it enables users to share data and information that the GIS uses as inputs and creates as outputs. As a tool, a GIS permits users to maintain, analyse, and share a wealth of data and information. From the relatively simple task of mapping the path of a hurricane to the more complex task of determining the most efficient garbage collection routes in a city, a GIS is used across the public and private sectors. Online and mobile mapping, navigation, and location-based services are also personalizing and democratizing GISs by bringing maps and mapping to the masses.'¹²

Basically, the GIS provides an important support for the planning and implementation of aeronautical needs; it supports the aeronautical data production, the management, and the visualisation.¹³ In addition, it ensures the automation, the quality assurance, and the task assistant for workflow management in creating efficient and accurate data production. That makes the data interoperability meet the ICAO standards.



Figure 1

On the left: Aerial Photo of BUD airport. On the right: visual approach chart for BUD. Source: 'Airport Information / Visual Approach Chart.'

By the GIS aided, especially the Visual Flight Rules (VFR) procedures can be issued easily and used efficiently, however, the Instrumental Flight Rules (IFR) procedures can be used in case of bad weather, using the signals of the Landing systems more efficiently. Furthermore, both the VFR and the IFR procedures should be certified and published for open use for the

¹¹ Campbell and Shin, *Essentials*.

¹² 'Geographic Information Systems for Today and Beyond,' Saylor.org.

¹³ 'Modernizing Nautical Chart Production: Next-Generation Charting System Based on Commercial Off-the-Shelf Solution.' In: *GIS Use in Map, Chart and Data Production*. ESRI.

sake of the safety of flights, for example, the VFR view of Budapest in terms of digital maps is published in the Hungarian Airports official website,¹⁴ as seen in Figure 1 below. An added layer in the electronic map shows the coordinates of the entrance and hold-on fixes.

Globally, the Eleventh Air Navigation Conference (AN-Conf/11) in 2003 recommended that ICAO had to develop a database web that is containing all tabular material from ICAO regional air navigation plans, together with major traffic flows' charts and other regional data. Later, the ESRI's ArcGIS Server, a server-based GIS solution with client access via the Web, was chosen to meet ICAO's needs. Therefore, the first phase of the electronic Air Navigation Planning (eANP) was deployed in 2008; it makes the ICAO Global Air Navigation Plan (GANP) database available to many users.

The ICAO (eANP) GIS portal is a gateway combining a database and Internet based GIS technology, allowing authorised users to submit, store, update, manipulate, analyse, and chart the global air navigation planning data from a centralised ICAO server. Essentially, the eANP displays dynamic, interactive charts. Users are now able to perform many different functions besides viewing the data. They can create and view what-if scenarios of new routes, chart traffic flow information with other user-selected criteria, and update the data. Users can also fly the 3D electronic Terrain and Obstacle Databases (eTOD) in ArcGIS Explorer. In addition, the users can access the GIS portal via the Internet to browse the data directly using a variety of clients. It includes the Microsoft Internet Explorer, the ESRI ArcGIS Explorer, or the ArcGIS desktop clients depending on the use of the application. The GIS portal can be accessed online at 192.206.28.81/eganp.

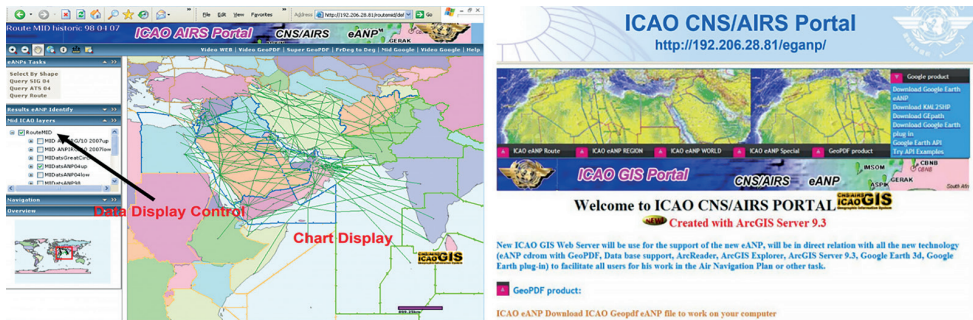


Figure 2

The ArcGIS aided EGANP Portal operating in ICAO for authorised users. Source: Nagle, 'Global Air Navigation.'

The global air navigation plans are available at the GIS portal, they include the Air Traffic Safety (ATSANP) charts, the Flight Information Region (FIRANP) charts, the Air Traffic Management (ATM) charts, the Aerodrome Operational Planning (AOP) satellite images, the regional charts, and many other thematic maps. However, the GIS portal's interactive maps are gradually replacing the air navigation plans that are delivered on paper. This is beneficial to ICAO, as the data accessed via eANP is up to date and accurate, making it a more reliable means of navigation. Through eANP, shown in Figure 2 below, the air navigation systems are being implemented more efficiently at the national, the regional, the interregional, and the global

¹⁴ www.hungaryairport.hu

levels. Hence, the Planning and implementation groups are able to take the information and expedited plans according to ICAO priorities. Having this information available online greatly facilitates updating and accessing the latest information for states, the ICAO regional offices, and other authorised users.¹⁵

3. The technical differences between the GLS and the ILS insight of the GIS aiding

In terms of technical differences, the GLS system uses the GIS aided precision approach in the FAS, unlike the ILS system. It is important firstly to examine the approach path differences and developments having taken place during the transition period from ILSs to GLSs systems. Basically, when designing the approach path, many factors should be taken into consideration to ensure a safe path in the last landing phase of a flight, the most important factor being to avoid obstacles, especially the natural non-lighted terrain; it is usually being performed by surveying the space volume within the guidance path in 3D domain. Therefore, it is essential to use the GIS tools due to its flexibility and feasibility of exploring vertical terrain around any approached runway(s).

The VFR procedures and the IFR procedures can be issued easily and used efficiently if the GIS is aided, and they can also be used in case of bad weather using the signals of the existing landing systems. Whatever the type of the used landing system was, either the ILS or the GLS, there are differences in the used signals, but both systems should be capable to support a certain level of performance, which must meet the minimum aeronautical standard requirements contained in the ICAO/FAA documents in such hard Instrument Meteorological Circumstances (IMC). In case of system failure during the FAS, if it is not possible to meet the required performance in such critical moments of bad weather, then a divergence to another airport with better conditions is necessary, and this will cause more expenses and delays in flights.

Actually, there are three modes of phases of flight: the terminal phase mode (both departure and arrival), the enroute phase mode, and the final approach phase mode, as shown in Figure 3 below. Each phase has the operational requirements of navigation that are supported by a certain type of equipment, as said before: the radio navigation equipment (such as VOR, DME, ILS) were and still supporting the current flights, they are gradually replaced by the GNSS technical solutions such as ABAS, GBAS, SBAS systems.

¹⁵ Jim Nagle, 'Global Air Navigation System Performance Based eANP Framework,' SIP/WP/10 eANP Framework. Presentation at the Workshop on the Development of National Performance Framework (Lima, 13–17 April 2009).

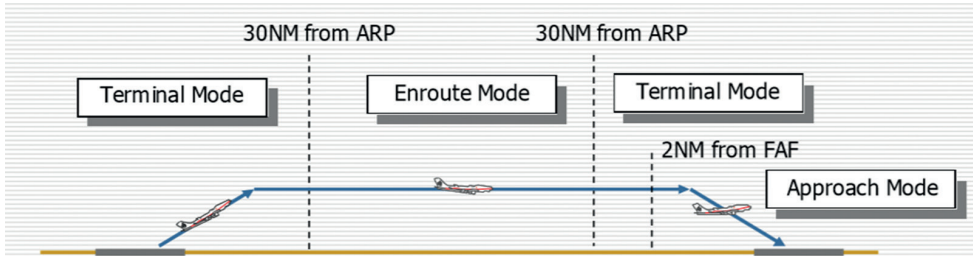


Figure 3
The flight phases modes. Source: edited by the author

However, in terms of both the enroute flight phase and the terminal flight phase modes, the main difference between the Conventional Radio-Navigation, that uses the Radio signal, and the new GNSS navigation, that uses the Satellite signals, can be illustrated in Figure 4 below. The main benefits are the shorter route distance, the improved navigation performance, the avoidance of obstacles, the noise abatement, and the more effective route structure. This will increase the capacity of traffic and decrease the expenses and the delays.

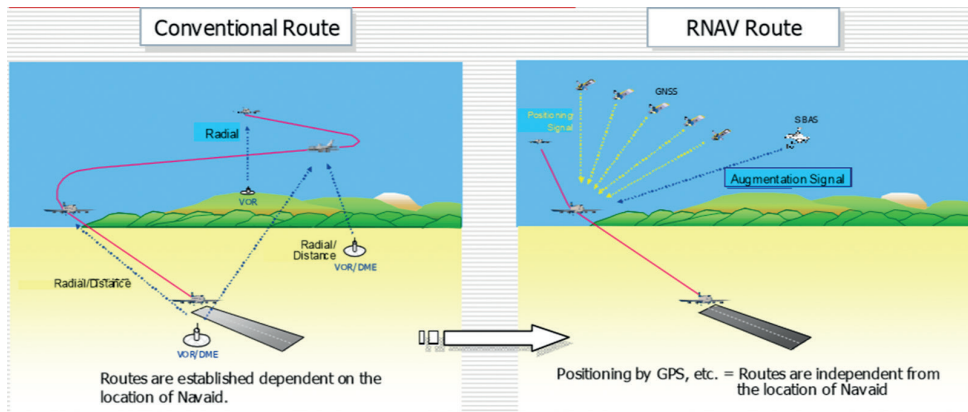


Figure 4
The conceptual difference between the Radio Navigation and The GNSS Navigation. Source: edited by the author

On the other hand, most critical is the last segment of flight, which is the landing phase. In this phase, the obstacle-free path is supported either by Radio-Navigational ILS system, or/and the GNSS Navigational GLS systems using the GIS aiding maps for approach. In the following paragraphs the two systems are illustrated, showing the degree of accuracy in both, assuming that both have advantages and disadvantages that should be taken into consideration.

Firstly, and in brief, the ILS system uses the radio propagation of two low frequency signals (150 Hz and 90 Hz) modulated over the main VHF channel. Those two lobes are tightly and geographically linked to the main lateral path of the centre line of a given runway and also to the main vertical slope of the gliding angle (nominal 3 degrees). The approaching aircraft deviates from one side to the another side of two lobes until the Difference of Depth

of Modulation (DDM) for both equals to 0, the DDM value of 0 meaning that the electronic path is totally aligned with the geographical centre line of the approached runway. Therefore, it is most important that those types of equipment that are subjected to periodical flight checks for calibration processing ensure their accuracy every time they are used. Many types of flight checks can be performed, such as the initial commissioning flight check, the periodic ones, and the maintenance flight checks whenever an amplifier or antennas change. The total ILS system cannot be certified to be safely-used without those flight checks, and it should be done every year at least by a certified flight-checking agency, such as the Federal Aviation Agency (FAA).

In such a system the use of GIS aiding is not so critical, due to the fact that the radiation is well aligned with the needed safely approaching path, that is free of obstacles and clear to land. However, it uses the GIS data in the approach paper plates only, they are not so much linked together. In other words, the ILS system can still be used if there are no certified approach plates in place, because of its independence of the GIS coordinates, since it uses a separate radio propagation method in the landing process. Figure 5 below shows the main idea of the principle of operation and design of the ILS system.

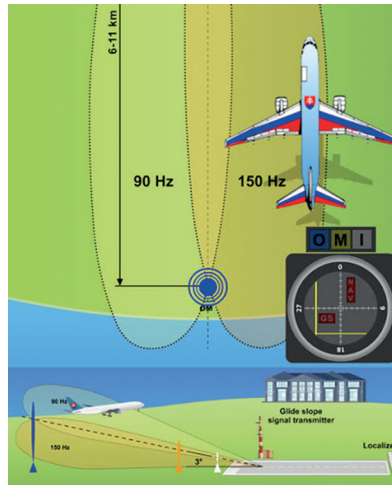


Figure 5

The conceptual landing path profile by the Radio Navigation ILS systems. Source: edited by the author

Furthermore, when the approach plates are in place and ready to be used, they must also be flight checked periodically to ensure their compliance with the signals radiated by the ILS system. Hence, it can be concluded that the ILS systems are not strongly dependent on the GIS system, that is supported by the coordinates of the satellite sensors, but they aid and ease the use of the path data in the VFR flights only. Consequently, it can better describe the idea of the recommended convergence to the new GLS systems, that use the same WGS-84 coordinates in the Approach Plates, in order to optimise the performance of the landing process and to unify the accuracy factors between both the GLS systems and the GIS-aided Approach Plates, not only in the landing phase, but also in the terminal phase of flight, which comes prior the final approach phase.

On the other hand, the GLS systems are contrary to the ILS systems. They basically use another conceptual path data of landing, which is basically dependent of the Lat/Long coordinates, and it is fully compliant with the GIS-aided approach plates. Figure 6 below shows the conceptual navigational definition of the final path using both the ILS and the GLS systems, but it is handled differently by the GLS system¹⁶.

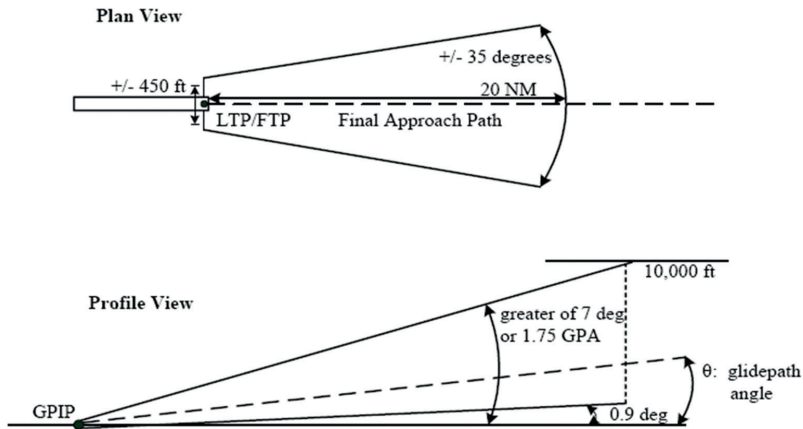


Figure 6
The conceptual landing path profile. Source: 'Minimum Aviation'

By principle, the GLS requires that both the ground and aircraft subsystems use exactly the same ephemeris and satellite clock corrections. Moreover, since the differential principle removes all the ranging errors that are common to the ground and the aircraft subsystems, ionospheric, Tropospheric or SBAS corrections are not applied by the two subsystems. The main functions of the GBAS Ground Subsystem are summarised as follows:¹⁷

- provide locally relevant pseudorange corrections;
- provide GBAS related data;
- provide FAS data;
- provide ranging source availability data;
- provide integrity monitoring for ranging source.

Most importantly and related to this article, the GBAS ground subsystem stores data related to the runway end(s), in the form of FAS path construction data blocks. It broadcasts this data continuously for reception by the approaching aircraft. One ground subsystem can support an unlimited number of aircraft subsystems within its service volume. However, each GBAS Station has Data Processing and Integrity Units that are responsible for:

- satellite signal monitoring;
- code carrier smoothing and differential corrections calculation;

¹⁶ 'Minimum Aviation System Performance Standards for The Local Area Augmentation System (LAAS)/ RTCA DO-245A,' RTCA 2004, 113.

¹⁷ A. Alhosban, 'Impact of Multipath Error On the availability of Integrity In GBAS Application,' Presentation at ICG Expert meetings' proceedings, 2015, Vienna, Austria.

- integrity monitoring functions;
- GBAS messages elaboration (MT1, MT2, MT4), detailed in Table 1 below.

The aircraft subsystem then corrects its own pseudorange measurements for each satellite with the differential correction data received from the ground subsystem. The corrected pseudorange measurements are then used to more accurately determine the aircraft's position relative to the selected Final Approach Segment or Final Approach Path.

Table 1
GBAS Messages. Source: 'Minimum Aviation'

Message Name	Message Type Identifier
Spare	0
Pseudo-range corrections	1
GBAS-related data	2
Reserved for ground-based ranging source	3
Final Approach Segment (FAS) data	4
Predicted ranging source availability	5
Reserved	6
Reserved for national applications	7
Reserved for test applications	8
Spare	9 – 255

The Type 4 message contains one or more sets of FAS data, each defining a single precision approach. It includes the following data, among which the most important is the coordinates of the Landing Threshold Point/Fictitious Threshold Point (LTP/FTP):

- operation type: 0 to 15;
- SBAS provider ID: 0 to 15;
- airport ID;
- runway number: 0 to 36;
- runway letter;
- approach performance designator: 0 to 7;
- route indicator;
- reference path data selector: 0 to 48;
- reference path identifier;
- *LTP/FTP latitude*: $\pm 90.0^\circ$;
- *LTP/FTP longitude*: $\pm 180.0^\circ$;
- *LTP/FTP height*: -512.0 to $6,041.5$ m;
- *FPAP latitude*: $\pm 1.0^\circ$;
- *FPAP longitude*: $\pm 1.0^\circ$;
- approach TCH (Note): 0 to 1,638.35 m (0 to 3,276.7 ft.);
- approach TCH units' selector;
- GPA: 0 to 90.0° ;
- course width: 80 to 143.75 m;
- length offset: 0 to 2,032 m;
- final approach segment CRC.

Based on the above description, it is clear that the GLS/GBAS system is fully capable of more suitable operation by the GIS-aided precision approach procedures than the conventional ILS systems. With that said, the following section will show more about how precise the landing process is, using both systems based on experimental real flight results.

4. Assessment of the future performance of the GBAS Landing System (GLS)

In this section, the assumption of the better CAT I (GAST-C) performance of GLS systems over the ILS systems in the GIS-aided FAS segment is conducted. The rationale behind this assumption is justified by the evidence of the global and domestic practices of the authorised civil aviation controls. Many airports are currently using the GLS systems along with the ILS systems specifically in the transition period until 2030.¹⁸ The local civil Aviation authorities differ in the level of degree of their usages' dependent, some of them are using GLSs as main system with ILSs as alternative systems during such transition period, others do the opposite. However, many researches were performed on CAT II/III (GAST-D) performance level, but they still under certification process. Up to date, the ILS systems showed better accuracy and availability performance level than GLSs in CAT II/III requirements, although they are not using the GIS aided precision approach techniques. When the GIS aided approach paths are to be used in CAT II/III performance, then the ILSs are assumed not to be fully compliant with them, due to the fact that they are using the RF radiations other than the Satellite Coordinates supported by the GIS. Hence the GLS systems would be of a better performance instead if they were able to be certified. Their certification is a matter of the dual satellite constellation and dual frequency dependent, and other factors.



Figure 7
The GBAS Landing Systems Installation Map worldwide. Source: 'GBAS installations'

¹⁸ 'GBAS installations,' Google Maps.

Globally, many GBAS landing systems had been installed and operated since it was fully certified in 2012 as CAT I performance. To date, more than 130 stations were deployed all over the world, some are working properly as CAT I (GAST-C) and are fully operational. Specifically, in March 2012, the first GBAS Approach Service Type C (GAST-C) ground station achieved full certification. This service type supports operations equivalent to a CAT-I instrument landing system (ILS) with a minimum decision height of 200 ft. and a runway visual range of at least 550 m. It is located in Bremen (ICAO identifier EDDW) in northern Germany, and since then is regularly used by Air Berlin, which has equipped a large portion of their B737-NG fleet. Other airports like Zurich and Frankfurt am Main are currently installing the systems. A number of trial GBAS stations with different levels of progress toward certification have been set up in several countries including Spain, France, Australia, Germany and Russia.¹⁹ Furthermore, Figure 7 below shows how much the installations have spread worldwide.

As for the local perspective, a study²⁰ has recently indicated that there are differences in the ways the ILS and GBAS offer approach guidance, and in their principles and methods. In that study, a comparative analysis was performed on the accuracy of deviation between the GBAS Landing System (GLS) and ILS by means of flight tests, using the flight inspection aircraft at Gimpo International Airport in South Korea. The results of the study showed that the ILS deviation error increases as the distance between the threshold of runway and the aircraft increases; on the other hand, the GLS deviation error is stable, within the range of ± 0.5 to ± 2 m lateral and vertical deviation, respectively. The results are shown in Figure 8 below. Furthermore, many other studies in the USA, Germany, France and other countries had showed the same results, or even better results from the same aspect. This approves the assumption that we started with above, that is, the GLS would be better in terms of accuracy if it was aided by the GIS.

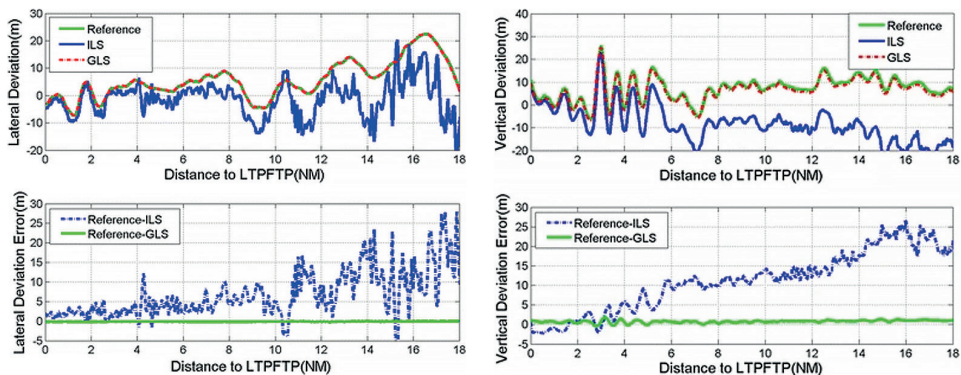


Figure 8

The deviation and the errors of the GLS and ILS systems, referenced to Lateral and Vertical guidance. Source: Jeong, Bae, Jun and Lee, 'Flight test evaluation.'

¹⁹ 'GBAS installations,' Google Maps.

²⁰ Jeong, Bae, Jun and Lee, 'Flight test evaluation.'

either the SBAS or GPS on-board systems in the approaching aircraft. The holding areas are used in case of heavy traffic, to delay the coming aircrafts until the runway is clear to land.

Figure 10 below shows the final approach segment data. It contains four (4) Way Points (WP); the three Initial Approach Final (IAF) WPs correspond to the three potential coming directions: the straightforward WP is named NARUT, the left one GIGAN, and the right one KESID. All the three WPs lead the approaching aircraft to the Initial Final (IF) WP, which is the start point to the FAS descending glide path, where the ILS and the GLS are used in bad weather of low visibility. All those four points are designed obstacle-free for the east direction of the runway called 13 (130 degrees to the east), as are the west approach end, 31L/R (310 degrees to the west), in order to cover both ends of the runway. For sake of simplicity and due to the similarity, the west end part of the runway was not intended to be mentioned in this article.

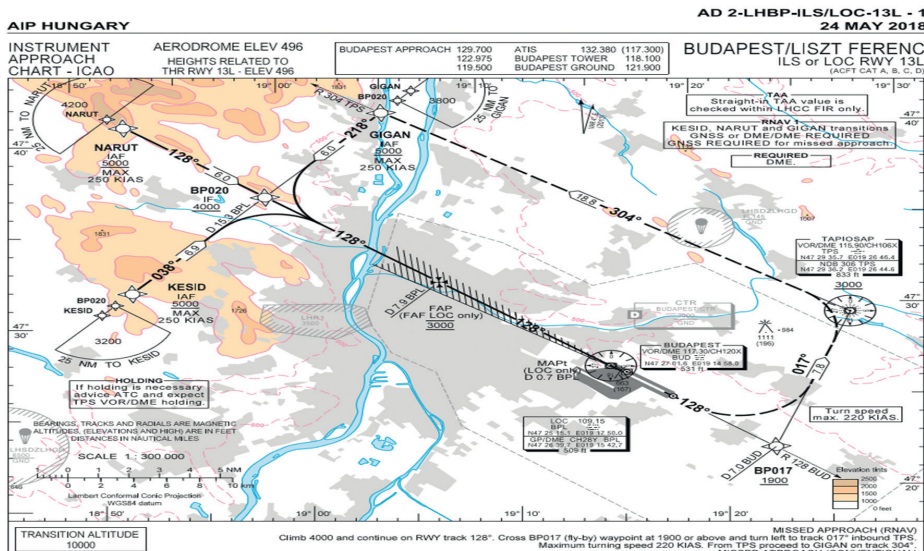


Figure 10

The start of the Final Approach Segment Instrument RNAV Data for BUD airport 13L. Source: https://ais.hungarocontrol.hu/aip/2018-05-24/2018-05-24-AIRAC/graphics/eAIP/LH_AD_2_LHBP_ILS_OR_LOC_13L_en.pdf (23. 04. 2020.)

Finally, as shown in Figure 11 below, the final approach fix (FAF) started to be used in the final segment, extended to the 13R Runway's Touch Height (TCH) point called MAPT, which is supposed to be 200 ft. above the runway threshold point as per CAT I performance in IFR flights. The direction of landing is 128 degrees, almost 130 degrees, the slope between the two point from the IF WP to the RWY13 R/L would be 3 degrees. In this final segment, the use of ILS or GLS is linked to the availability of integrity, accuracy and continuity of the system, especially in bad weather or night flights. From this, the GLS system performance was approved to be better than the ILS systems.

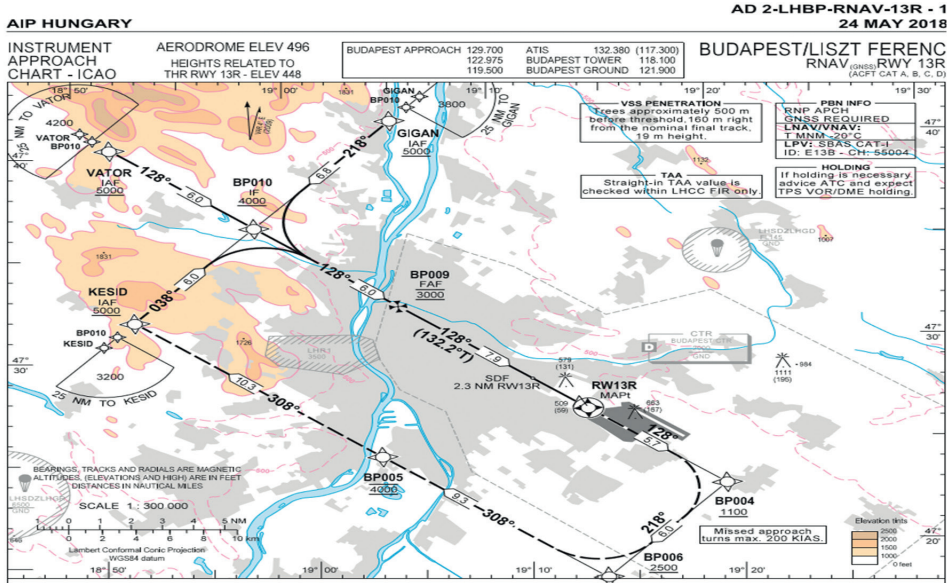


Figure 11

The Final Approach Segment Instrument RNAV Data for BUD airport 13L. Source: https://ais.hungarocontrol.hu/aip/2018-05-24/2018-05-24-AIRAC/graphics/eAIP/LH_AD_2_LHBP_RNAV_13R_en.pdf (23. 04. 2020.)

5. Conclusions and Recommendations

In conclusion, according to the analysis done on the availability of the GIS aiding maps for the Terminal and Final Approach modes of flights in BUD airport, using the GLS system is feasible and more accurate, not even in CAT I performance, but also in CAT II as well. This feasibility leads to the chance of more investment in installing a GBAS Landing System (GLS) station in Budapest international Airport (BUD), for the sake of having more accurate approaches and enhanced capacity of its air traffic management. Furthermore, it can be recommended that those GLS systems can be applied in military airports for night flights as well. However, the final recommendation would be – as many civil aviation authorities adopted – an alternative usage of the GLS system side by side with the existing ILS system, in order to make easier the gradual transition to the potentially coming GLS systems. As it can be seen and proved, many benefits can be achieved in terms of cost effectiveness, capacity increase, and enhanced performance.

Bibliography

- 'Airport Information / Visual Approach Chart.' Hungary Airport. Available: www.hungaryairport.hu/airport_data.php?id=6 (23. 04. 2020.)
- Alhosban, A.: 'Electronic Warfare in NAVWAR: Impact of Electronic Attacks on GNSS/GBAS Approach Service Types C and D Landing systems and their proposed Electronic Protection Measures (EPM).' *Hadmérnök* 14, no 2 (2019), 238–255. Available: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/hadmernok/article/view/351/54> (09. 11. 2020.)
- Alhosban, A.: 'Impact of Multipath Error On the availability of Integrity In GBAS Application.' Presentation at ICG Expert meetings' proceedings, 2015, Vienna, Austria, Available: <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2015/presentations/19.pdf> (03. 05. 2020.)
- Campbell, J. – Shin, M.: *Essentials of Geographic Information System*. Saylor Foundation, 2011.
- Dautermann, T. – Felix, M. – Grosch, A.: 'Approach service type D evaluation of the DLR GBAS testbed.' *GPS Solution* 16 2012, 375–387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0239-3>
- Dautermann, T. – Ludwig, T. – Geister, R. – Ehmke, L.: 'Extending access to localizer performance with vertical guidance approaches by means of an SBAS to GBAS converter.' *GPS Solution* 24 (2020), Article No. 37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0947-7>
- 'GBAS installations.' Google Maps. Available: www.google.com/maps/d/viewer?mid=14gN6lo-wjgVLLkjwgKKIUyJz6OXQ&ll=2.874751533561095%2C0.6307027981077908&z=2 (04. 05. 2020.)
- 'Geographic Information Systems for Today and Beyond.' Saylor.org. Available: https://saylordotorg.github.io/text_essentials-of-geographic-information-systems/s05-03-geographic-information-systems.html (09. 11. 2020.)
- Jeong, M. – Bae, J. – Jun, H. – Lee, Y.: 'Flight test evaluation of ILS and GBAS performance at Gimpo International Airport.' *GPS Solution* 20 (2016), 473–483. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0457-1>
- 'Minimum Aviation System Performance Standards for The Local Area Augmentation System (LAAS)/ RTCA DO-245A.' RTCA 2004, p. 113. Available: https://my.rtca.org/NC__Product?id=a1B36000001lcjtEAC (Purchased on 30. 04. 2020.)
- 'Modernizing Nautical Chart Production: Next-Generation Charting System Based on Commercial Off-the-Shelf Solution.' In: *GIS Use in Map, Chart and Data Production*. ESRI. Available: www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/brochures/pdfs/gis-use-in-map-chart.pdf (18. 04. 2020.)
- Nagle, Jim: 'Global Air Navigation System Performance Based eANP Framework.' SIP/WP/10 eANP Framework. Presentation at the Workshop on the Development of National Performance Framework (Lima, 13–17 April 2009). Available: www.icao.int/SAM/Documents/2009/SIPATM2009/SIP2009ATMWP10.pdf (25. 04. 2020.)



Faltin Zsolt,¹ Beneda Károly²

Centrifugálkompresszor-karakterisztika regressziója a teljes működési tartományban nem lineáris matematikai modellhez

Gázturbinás berendezésekben – legyenek azok hajtóművek vagy ipari alkalmazásban tengelyteljesítményt leadó eszközök – a centrifugális kompresszorok széles körben elterjedtek. Jellemzőjük az egy fokozatban elérhető jelentős nyomásviszony, valamint a relatíve széles tömegáram-tartományban való stabil üzemelés. Ez utóbbi ellenére kis szállítás esetén – az axiális kompresszorokhoz hasonlóan – különféle instabil jelenségeket mutatnak (forgó leválás, pompázs), amelyek nyomás- és tömegáramlengések formájában jelentkeznek. Ezek elkerülése elsődleges fontosságú a berendezés és a kapcsolódó rendszerek megóvása érdekében, mert a lengésekben tárolt energia akár a lapátok kiszakításához is elegendő. A kompresszor matematikai modellezése kiemelkedő jelentőségű abból a szempontból, hogy egyrészt a különböző üzemi állapotokban előre jelezhetővé válik a berendezés viselkedése, továbbá azon tartományokban, ahol az instabilitások fellépése várható, ott egy aktív beavatkozást biztosító rendszer a megfelelő reakciót kiváltva elháríthatja a szabályozás nélküli esetben bekövetkező rendellenes működést. Cikkünk célja, hogy egy centrifugális kompresszor teljes üzemi tartományában történő mérése alapján polinomos regresszióval közelítse a berendezés tömegáram-nyomásviszony, valamint tömegáram-hatásfok jelleggörbéit. Az eljárással megalkotott összefüggés a teljes üzemmódtartományt lefedi, előnyeit egy összehasonlítás mutatja be a korábban alkalmazott lineáris (például átszámított fordulatszám és dimenziótlan tömegáram szerint bilineáris) módszerek eredményeivel szemben. A kompresszor matematikai modelljét dinamikus szimulációnak vetettük alá, amelyet MATLAB Simulink környezetben hajtottunk végre, és az összehasonlítás érdekében tranziens mérések eredményeit használtuk fel. Az így megalkotott dinamikus modell pedig korszerű, aktív pompázsszabályozó rendszerek fejlesztését teszi lehetővé a későbbiekben.

Kulcsszavak: *pompázs, regresszióanalízis, centrifugáliskompresszor-karakterisztika*

¹ Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés és Járműmérnöki Kar Vasúti járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, doktori hallgató, e-mail: zfaltin@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8361-1397>

² Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés és Járműmérnöki Kar Vasúti járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, adjunktus, e-mail: kbeneda@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1900-7934>

Regression Analysis of Centrifugal Compressor Characteristics in the Entire Operating Range for Non-Linear Mathematical Model

Centrifugal compressors are widespread in gas turbines – for example in thrust or turboshaft engines in the field of aviation, or in power generation. The main features of centrifugal compressors are high pressure ratio per each stage and stable operation at a relatively wide range of the fluid flow. Despite these advantages at low mass flow rates, some kind of instabilities appear (like rotating stall and surge), which are the same in axial compressors and which may occur in the form of total pressure and mass flow rate fluctuation. It is very important to avoid these instabilities to protect the equipment and the connected systems, because the energy stored in the fluctuations is enough for the disintegration of impeller blades as well. Creating a mathematical model of the centrifugal compressor is very important regarding the prediction of the system behavior in different operational modes, and in the unstable operational ranges an active surge suppression system could avert the undesired regimes which could occur in the lack of any active surge avoidance system. The objective of our paper is to describe the mass flow rate – pressure ratio and mass flow rate – efficiency characteristic of the equipment by polynomial regression approximation method based on the result of earlier measurement. The equation created by this method covers the whole operational range, its advantages are shown by a comparison method instead of the result of earlier linear methods (for example bilinear equation by relative physical revolution and dimensionless mass flow rate). The mathematical model of the compressor was tested by dynamic simulations in MATLAB Simulink environment, and the solution was validated by the result of transient measurements. The created dynamic model opens the way to the development process of a state-of-the-art, active surge suppression control system.

Keywords: surge, regression analysis, centrifugal compressor characteristics

1. Bevezetés

A centrifugális kompresszorok az ipar számos területén megtalálhatók, mint például a légi közlekedésben gázturbinás sugárhajtóművekben, a légkondicionáló rendszer elemeként vagy dugattyús repülőgépmotorok mechanikus, illetve turbófeltöltőiben, de itt meg lehet említeni a gépjárművek motorjainak hasonló berendezéseit is. A járműipar mellett az energiaipar egyes szektoraiban is széles körben alkalmazzák azokat, például a földgázszállításban vagy erőművek különböző részegységeiben. Legfőbb üzemi jellemzőjük az axiális berendezésekhez képest a fokozatonként elérhető nagyobb nyomásviszony és szélesebb tömegáram-tartomány,³ amelyben stabilan tudnak működni, de adott esetben előfordulhat ezek drasztikus csökkenése, például földgázszállítás esetén csővezeték repedése vagy repülőgépek esetében a hajtóműbe beszívott idegen tárgy következtében, ami miatt instabilitások keletkezhetnek forgó leválás vagy pompázs formájában. Ezen instabil üzemi viszonyok kiküszöbölésére régebben csak passzív módszerek léteztek, azonban a számítástechnika fejlődésével lehetőség nyílt nemcsak

³ Beneda Károly – Simongáti Győző – Veress Árpád: *Járművek hő- és áramlástechnikai berendezései*. Budapest, 2010.

az üzemi paraméterek pontosabb mérésére, de az ezekből alkotott pontosabb üzemállapot meghatározására és az ezekre alapozott szabályozási algoritmus megalkotására is.

2. Centrifugális kompresszorokban jelentkező instabilitások

A centrifugális kompresszorokban lejátszódó instabil folyamatok összetett jelenségek, amelyek pontos megértésére és feltérképezésére többféle vizsgálat is történt az elmúlt évtizedekben.

A *pompázs* lényegében egy egydimenziós jelenség, amely a tömegáram és a nyomás ingadozásában jelentkezik az egész kompressziós rendszerre nézve, amely során közegvisszaáramlás is jelentkezik jelentős teljesítménycsökkenést kiváltva. A *forgó leválás* egy lokális instabilitás, amely kisebb sebesség-ingadozással kezdődik a kompresszor egy meghatározott részénél és kerületi irányban terjed az egész kerület mentén.⁴

Kísérletek megmutatták, hogy a kompresszorpompázs jelenségét kiválthatják a járókerék bemenetén jelentkező leválások,⁵ de idesorolhatók az alacsony frekvenciájú lengések a diffúzorban, ahol a diffúzor lapátjain szintén jelentkezhet forgó leválás.⁶ A pompázsjelenség kiváltója lehet még a nyomáslengések következtében jelentkező ingadozások a járókerék forgási sebességében.

Számos *numerikus szimuláció* is született a centrifugális kompresszorban fellépő instabilitások vizsgálatára,⁷ azonban ezek pontos végrehajtását nagymértékben befolyásolja a mérések nagy számításigénye egy teljes kompresszor-fokozat és nagy munkaközeg modellezése esetén. Továbbá a pontatlanság oka lehet, hogy a szimuláció peremfeltételeinek beállítása okozza az instabil áramlási jelenségek kialakulását, ami valós esetben az adott körülmények között nem valósulna meg. Többször valós esetben mély pompázs esetén a folyamatosan áramló közegben a keresztmetszet bizonyos részein visszaáramlás tapasztalható, ezért a szimulációk során figyelni kell, hogy az előre megadott peremfeltételek ne akadályozzák ezt a valóságban kialakuló áramlást, mert az a szimulációk eredményeit befolyásolhatja.

Az áramlás iránya alapján a pompázsjelenség három részre bontható.⁸ A *pompázs kezdetének* nevezhetjük azt a pontot, ahol a tömegáram csökkenésével a közegre felírt Greitzer-féle dinamikai rendszermodell szerint a pillanatnyi megzavarások hatására keletkező örvénylések nem szűnnek meg, hanem tovább erősödve a teljes rendszerben érzékelhető nyomáslengéseket okoznak. Ezért is alkalmaznak pompázsvédelem céljából olyan passzív pompázsvédelmi kialakításokat, amelyek a kompresszorban áramló közeg csillapító hatását vagy inkább képességét növelik. Ilyen például a pompázskamra, amelynek nyílásai általában a járókerék-lapátok húr hosszának első harmadánál vannak elhelyezve.

A következő az *oszcillációs rész*, amely során a nyomáslengés már nagy amplitúdóval rendelkezik, és a statikus nyomás nem tud tovább növekedni. Ezt az instabil állapotot követi

⁴ James D. Paduano et al.: Modeling For Control of Rotating Stall. *Automatica*, 30. (1994), 9. 1357–1373.

⁵ Deb. Banerjee et al.: Investigation of Flow Field at the Inlet of a Turbocharger Compressor Using Digital Particle Image Velocimetry. *Journal of Turbomachinery*, 141. (2019), 12.

⁶ Xiang Xue – Tong Wang: Experimental Study on Inducement and Development of Flow Instabilities in a Centrifugal Compressor with Different Diffuser Types. *Journal of Thermal Science*, 29. (2020), 434–444.

⁷ Zhao Yang et al.: Numerical investigation of deep surge in a centrifugal compressor with vaned diffuser and large plenum. *Journal of Power and Energy*, 234. (2019), 2. 143–155.

⁸ Xinquian Zheng et al.: Experimental investigation of surge and stall in a turbocharger centrifugal compressor with a vaned diffuser. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82. (2017), 493–506.

egy bizonyos ponton egy villanásszerű markáns nyomáslökés, amelyet követően az egész berendezésben a nyomás alacsonyabb szintre esik, és mind a járókerék, mind a diffúzor bemenetén közel állandó értéken marad, de továbbra is folyamatosan ingadozik. Ez a kompresszorban haladó áramlás összeomlásának szakasza, amely a közeg áramlásának iránya alapján két részből tevődik össze; az áramlás visszafordulása, amely során a periférián már korábban megjelenő kúszó-visszáramlás mértéke gyorsan csökkenni fog, amint a nyomáskiegyenlítetlenségek megszűnnek, tehát ez nem tévesztendő össze a már normál üzem során keletkező kúszóáramlással. A másik rész a pozitív gyorsulási mező, amely akkor jön létre, amikor a diffúzorban addig jelen lévő nagy ellennyomás megszűnik. Ezek nagyfrekvenciás váltakozása és az ebből adódó ütésszerű terhelések jelentik a legnagyobb veszélyt az egész berendezésre nézve.

Az oszcillációs részt követi az *áramlás helyreállásának szakasza*. Ez a mély pompázsciklus végén található, amely során a nyomásingadozásnak minimális az amplitúdója és a statikus nyomás a diffúzorkimeneten gyorsan magas szintre emelkedik.

A centrifugális kompresszorokban létrejövő instabilitások minél részletesebb feltérképezésére *akusztikai vizsgálatok* is történtek.⁹ Ezek két fő csoportra oszthatók, az egyik a belső, amelyet a berendezés belsejében elhelyezett dinamikus nyomásszenzorokkal mérnek, és így közvetlen kapcsolatban vannak a munkaközeggel, a másik a külső, a kisugárzott jeleket mérő, amelynek mérése mikrofonokkal történik a szívócsatorna belépőnyílásának közelében. A hangnyomásszint méréséhez elegendő egy szenzor, bár ez érzékeny a visszatükröződésből és a geometriából adódó hibákra. A hang intenzitásának meghatározására két vagy több szenzor szükséges, és az erős irányítottági tulajdonságának köszönhetően a geometriától függetlenül konzisztensnek tekinthető. A vizsgálat eredményei megmutatták, hogy a lapátfelületeken történő közegáthelyeződésből származó súrlódás kevésbé felelős a keletkező zajokért, mint inkább a nyomáslengésből fakadó zaj, amelyet legfőképpen a lapátvégeken történő áramlásleválások generálnak. Ezeknek az instabilitásoknak a járókerék által indukált örvényszerű struktúrája alkotja a forgóleválást. Ezek az áramlások hatással vannak az érkező közegnek a lapátgeometriához viszonyított állásszögére, amelyek állandóan váltakozó lapátterhelést generálnak. A forgóleválás még a kompresszor pompázsolása előtt megjelenik a diffúzorban is, ahol a kerületi terjedési sebességére hatással van az aszimmetrikus csigaház által keltett aszimmetrikus kerület menti nyomásmegoszlás is, amely szerint az alacsonyabb nyomású zónában, például a csigaház kiindulási pontjánál a forgó leválási zóna lokális gyorsulása figyelhető meg, míg a kerület mentén nagyobb nyomású részben annak lassulása. Megfigyelték továbbá, hogy a forgóleválási zónák a pompázsjelenség kialakulásával egyidejűleg is megmaradnak, csak tágabb frekvenciaintervallumban.

Az áramlásleválások jelentkezhetnek a járókeréklapátokon és a diffúzorban is. A leválási cellák a járókeréklapátok esetében a szívott oldalon jelennek meg először, de a diffúzorban jelentősebb a hatásuk a nagyobb nyomás miatt. Szubszónikus áramlás esetén a diffúzorlapátokon keletkező leválások az áramlás irányával ellentétesen is terjednek, és a járókerék-csatornában áramló közegre visszahatva okozzák a nyomásviszony csökkenését. Bár a legújabb vizsgálatok kimutatták,¹⁰ hogy a diffúzor geometriája nagymértékben befolyásolja az instabil viszonyok kialakulását, ha ugyanis a lapát nélküli diffúzor be-, illetve kimeneti sugarának aránya úgy van

⁹ Elias Sundström – Bernhard Semlitsch – Mihai Mihăescu: Acoustic signature of flow instabilities in radial compressors. *Journal of Sound and Vibration*, 434. (2018), 221–236.

¹⁰ Lei Zhang et al.: A Review of Rotating Stall in Vaneless Diffuser of Centrifugal Compressor. *Journal of Thermal Science*, 29. (2020), 323–342.

megválasztva, hogy a járókeréklapát-kimenettől induló határrétegek találkozási pontja, azaz az instabilitások kiindulópontja kívül esik ezen, akkor megelőzhető a diffúzorban kialakuló instabilitások, amelyek a már említett határrétegben elinduló visszaáramlással kezdődnek. Tehát lapát nélküli diffúzorok esetében a keskeny csatornában a turbulens határrétegek keveredése okozza a forgóleválás kialakulását. Vastagabb diffúzor esetében a turbulens határrétegek nem érnek össze, így a főáramlás zavartalanul haladhat tovább, ezáltal az ebből fakadó instabilitások nem alakulnak ki. Ezt igazolta az is, hogy keskeny diffúzorok esetében a leválások kezdetekor az energiaveszteség is nagyobb, mint vastagabb diffúzorok esetében. Külön megvizsgálták azt is, hogy hogyan befolyásolja a diffúzor be- és kilépési átmérőjének aránya, egyszerűbben a diffúzor hossza a leválások kialakulását. Azt találták, hogy a hosszú diffúzorok esetében a járókerék-kimenetnek kevésbé van hatása a leválások kialakulására és kerületirányú terjedési sebessége is kisebb, mint rövid diffúzorok esetében, ahol a járókerék kimenetének hatása jóval erősebb a leválások kialakulására nézve, amelyek kerületirányú sebessége is nagyobb lesz.

Egy másik tanulmányban¹¹ egy turbófeltöltő kompresszorának bemeneti keresztmetszetét vizsgálták újfajta, fejlett mérési módszerrel, az úgynevezett sztereoszkopikus részecskekép sebességmérés (SPIV, *Stereoscopic Particle Image Velocimetry*) eljárással különböző működési tartományokban, amely megmutatta, hogy nagy közegszállítás esetén az áramlási mező egységes képet mutat, de a tömegáram folyamatos csökkentésével körgyűrűalakú visszaáramlást lehet megfigyelni a szívócsatorna fala mentén. A visszaáramlás kezdeti pontja a mérések szerint közepes tömegáramoknál kezdődik, tehát még messze a pompázshatártól és a közepes tömegáramok esetében a legnagyobb hatások közelében, ami 15,5 fokos állásszögnek felel meg a járókeréklapátok belépő élének külső pereménél minden egyes vizsgált sebesség esetében. Nagy tangenciális sebességek és gyors lengések jelölik a közeg-visszáramlás régióját. Ez a jelenség a tömegáram folyamatos csökkenésével erősen növekszik, és folyamatosan keveredik az érkező közeggel, aminek során mozgási energiáját átadja. A visszaáramlás nagysága a járókerék bemeneti síkjához képest négyzetesen változik a tömegáram csökkenésével, és mindig a külső periferián jelenik meg közel a maximális hatásfokú görbéhez, míg az áramlás a járókerék belső-középső részén mindig továbbtődik a diffúzor felé, csak egy kis kerületi irányú komponense van. A periferián visszafelé érkező áramlásnak jelentős tangenciális komponense is van, amely keveredve a folyamatosan érkező közeggel markáns turbulens képet mutat, főleg a járókerék belépési keresztmetszeténél. A visszaáramló közeg ezentúl csökkenti a hatásos járókerék-lapátcsatorna belépő keresztmetszetét, ezáltal a közegnek átadható energiát, tehát rontja a hatásfokot is. Ezenfelül a fő közegáram csökkenésével ez a visszaáramlás növekedést mutat, amely a már említett turbulenciakeltési tulajdonsága miatt az elsődleges oka a járókeréklapátok belépőélén keletkező leválásoknak, ellentétben a sebességi háromszögekből adódó optimálistól eltérő áramlási szögekkel.

Különböző kialakítású diffúzorokban létrejövő instabilitások vizsgálatánál igazolták,¹² hogy az instabilitások megjelenésének kétféle típusa, a hirtelen *lökésszerű* és az enyhe vagy más néven *modális* (nyomás)hullám a diffúzorban is előfordul. A forgóleválás gyakrabban jelentkezett, amikor szándékosan elrontott áramlási viszonyok között kellett a munkaközegnek haladnia,

¹¹ Banerjee et al. (2019) i. m.

¹² Xiang–Tong (2020) i. m.

de a pompázsjelenség optimális áramlási körülmények között is kialakult.¹³ Ezt támasztja alá a Greitzer-féle modell is,¹⁴ amely szerint optimális, azaz tervezési körülmények esetén kisebb lesz a hőmérséklet, ezáltal a lokális hangsebesség, így egy bizonyos határig a leválási instabilitások nem alakulnak ki, tehát a rendszer előzetes leválások nélkül lép pompázsba. Egyéb, nem tervezett üzemi körülmények között, a rendszerben csak előzetes instabilitások, például forgóleválás után alakul ki a pompázsjelenség.

Lapátos diffúzorral éppen ezért kizárólag az állandó fordulatszámú kompresszorokat érdemes felszerelni, mivel az adott fordulatszámhoz tartozó tervezett szállítás esetén lehetnek csak optimálishoz közeli áramlási viszonyok, amelyek még a környezeti paraméterek állandó változása esetén sem biztosítottak.

3. A kompresszorkarakterisztikát leíró függvény meghatározása

A cikkben bemutatjuk, hogy egy tipikus centrifugális kompresszor esetében mérések alapján meghatározott karakterisztikát miképpen lehet különböző célokra egyszerűbb függvényekkel közelíteni. A kompresszor karakterisztikájának meghatározása egy nagyobb munka része, amely egy komplett pompázsszabályozó rendszer elkészítésére irányul. A karakterisztikát leíró függvényeket mérési eredmények alapján regresszióanalízissel határoztuk meg, amelyek közül kiemelkedik a fordított regresszió, mivel a kompresszor a többi gépegységgel történő együttműködés során ellennyomás ellenében továbbítja a munkaközeget, ami azt jelenti, hogy a kompresszor utáni nyomás (és ezáltal a kompresszor nyomásviszonya) a többi gépegységtől dinamikusan függ, és a karakterisztika alapján a tömegáram adódik. Cél volt tehát egy olyan függvény létrehozása, amely a nyomásviszony és átszámított fordulatszám bemenő paraméterek alapján adja meg, hogy mekkora szállítást képes a kompresszor ilyen feltételek mellett létrehozni.

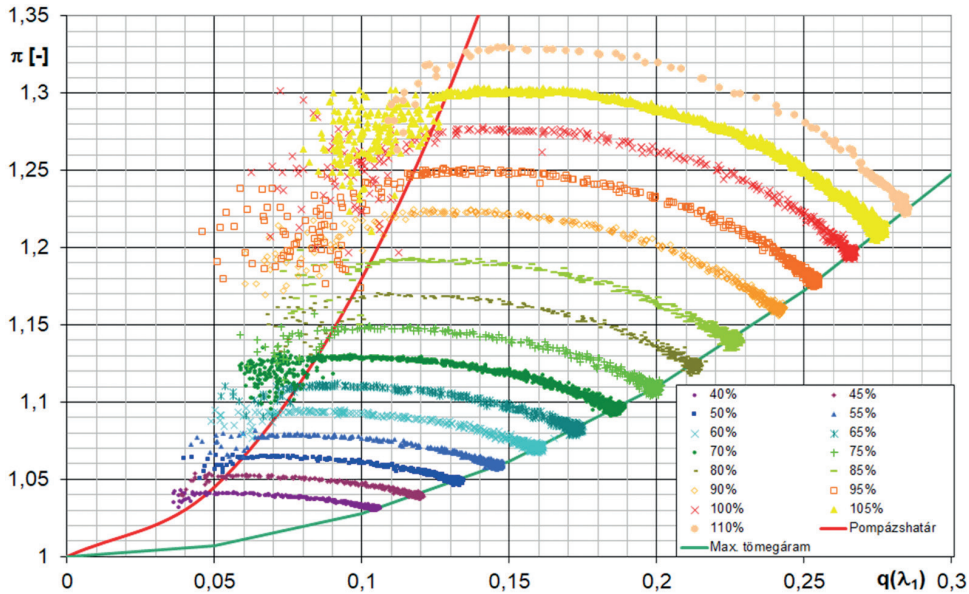
3.1. Mérések végrehajtása, kompresszorkarakterisztika felvétele

A karakterisztika felvételéhez használt centrifugális kompresszor a tanszék laborjában található. Meghajtása egy háromfázisú aszinkron gépről történik, amely egy frekvenciaváltón keresztül kapja a meghajtásához szükséges váltóáramot 0–100 Hz-ig terjedő tartományban, azonban az 50 Hz-es tervezési frekvencia fölé a túlmelegedés kockázata miatt csak kismértékben érdemes menni a maximum 55 Hz-es értékig. A motor és a kompresszor között egy 3,1-es áttételű gyorsító hajtómű gondoskodik arról, hogy a kompresszor elérje a névleges fordulatszámát, ami ha a meghajtó motor 50 Hz-et kap, akkor a fordulatszáma 3000 1/min alatt lesz kicsivel, így a gyorsító áttételen keresztül pedig a kompresszor körülbelül 18 000 1/min ér el. A minél teljesebb karakterisztika felvételéhez 55 Hz-es megváplálás esetén még 10%-kal a tervezési fordulatszám feletti érték is ki lett mérve. A kompresszor előtt és után mért torlóponti nyomások

¹³ Zheng et al. (2017) i. m.

¹⁴ Edward M. Greitzer: Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors – Part II: Experimental Results and Comparison With Theory. *Journal of Engineering for Power*, 98. (1976), 2. 199–211.

digitális adatgyűjtő rendszer segítségével lettek rögzítve.¹⁵ A karakterisztika felvételéhez szükség volt továbbá egy fojtószelepre, amivel az egyes fordulatszámokon még a pompázhatáron túli állapot is be lett állítva, de mivel a stabilitás határán túl a kompresszor kilépő nyomása ugrál, és emiatt nem egy görbére esnek a mért pontok, hanem bizonyos mértékű szórás mutatnak, ezért ezek az értékek nem kerültek bele a regresszióba, mert csupán pontatlanabbá tennék a közelítő görbéket. Az így kapott karakterisztikát az 1. ábra mutatja be.



1. ábra
Kompresszorkarakterisztika. Forrás: Beneda (2013) i. m.

3.2. Regresszióanalízis elvégzése

Mint korábban említettük, a kompresszorkarakterisztikát leíró függvényre azért van szükség, hogy egy minden körülmények között működő szabályozórendszer része legyen, és mivel a környezeti paraméterek, mint a nyomás és a hőmérséklet, mindig befolyásolják az adott fordulatszámhoz tartozó nyomásviszonyt és szállított közeget, ezért a mért bemenő paramétereket át kell számolni hasonlósági számokká, továbbá a könnyebb kezelhetőség érdekében dimenziótlan számokká.

A kompresszorkarakteristikára felírható összefüggés, amelyben a nyomásviszony a definíciójából adódóan dimenziómentes, ezért a vízszintes tengelyen feltüntetett, a munkaközeg

¹⁵ Beneda Károly: *Development of Active Surge Control Devices for Centrifugal Compressors*. PhD dissertation, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles, Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2013.

tömegárama is dimenziótlanná lett. Ebben az esetben a mért tömegáramot a keresztmetszetre felírható kritikus tömegárammal osztottuk, de a tengelyen felvett értékekről jól kivehető, hogy a tömegáram messze elmarad a vizsgált keresztmetszetben jelen lévő hőmérsékleten vett kritikustól. Az n_a átszámított fordulatszám pedig a berendezés fordulatszámának a kompresszor előtti torlóponthoz viszonyított hőmérséklettel korrigált értéke.

$$\bar{n}_a = n * \sqrt{\frac{T_0}{T_1^*}}$$

Mivel ez még mindig nem dimenziómentes hasonlósági szám, ezért az egyes fizikai fordulatszámokhoz tartozó n_a átszámított fordulatszámokat osztottuk a névleges fordulatszámhoz tartozó átszámított fordulatszámokkal és az ebből kapott relatív átszámított fordulatszámot használtuk.

$$\bar{n}_a = \frac{n}{n_{a,opt}} * \sqrt{\frac{T_0}{T_1^*}}$$

A regresszióanalízisnél használt feltételezett összefüggés:

$$\pi_k^* = \sum_{i=0}^{p_1} \left(\sum_{j=0}^{p_2} a_{i,j} \bar{n}_a^j \right) q(\lambda_1)^i,$$

ahol $p_1 = 3$ és $p_2 = 2$, vagyis az egyes átszámított fordulatszám-görbéket $q(\lambda_1)$ harmadfokú polinomként közelítjük, míg azon harmadfokú görbékben belül pedig a relatív átszámított fordulatszámától másodfokú függést feltételezünk.

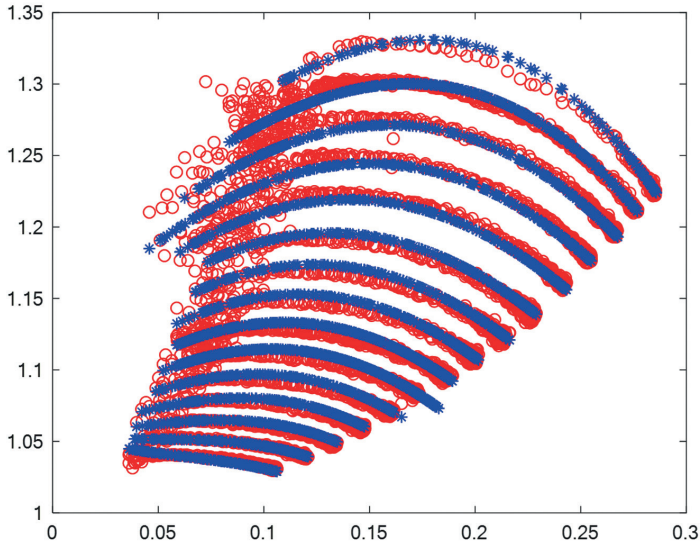
A regresszió a MATLAB-program *lscov* parancsával lett végrehajtva, amely a kompresszor-karakterisztikát leíró feltételezett összefüggésbe behelyettesítve a mért adatokat a legkisebb négyzetek módszerével határozza meg az együttható mátrixot. Ez a következő eredményeket adta az $a_{i,j}$ együtthatókra.

1. táblázat
Az együtthatómátrix. Forrás: a szerzők összeállítása a MATLAB *lscov* parancsának végeredményeiből

i / j	0		1		2	
	a_{ij}	σ_{ij}	a_{ij}	σ_{ij}	a_{ij}	σ_{ij}
0	-203,886	9,7542	335,814	15,864	138,158	7,9742
1	-80,1512	5,2118	-128,936	7,2740	45,7251	2,7085
2	-9,4025	0,8596	16,6184	1,1650	-5,7646	0,3672
3	0,43814	0,04312	-0,47485	0,05816	1,17978	0,01757

A regresszió pontosságáról egyik oldalról a négyzetes középhiba (angolul Mean Square Error) ad képet, amely $MSE = 4,8402 \cdot 10^{-5}$ értékre adódott. Az egyenletrendszer $a_{i,j}$ együtthatóinak értéke mellett fel van tüntetve mindenütt a MATLAB által kiadott szórás is, amely így összevethető a regresszióanalízis során kapott relatív szórással. Bár a relatív szórások egész magasak, 4,5% körüli értékűek, ettől függetlenül azért elfogadható a regresszió. Esetleg a mérőrendszer

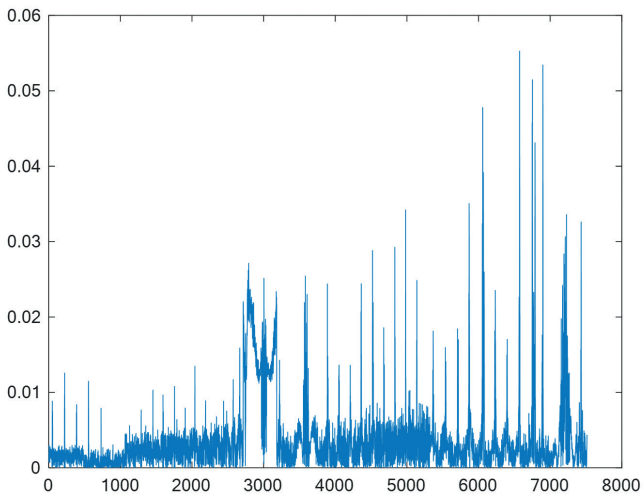
fejlesztésével a mért adatok kisebb szórással lehetnének rögzíthetőek. A mért és az elméleti összefüggésből kapott karakterisztika ábrázolása a 2. ábrán található.



2. ábra

A mért és az egyenletből kapott karakterisztika. Forrás: a szerzők saját mérése és számítása a MATLAB alapján

A regresszió megfelelőségére az egyes mért adatpárok és regressziós adatok összehasonlításából a relatív hiba alapján következtethetünk, amelynek eredményeit a 3. ábra mutatja.



3. ábra

A relatív hibákról. Forrás: a szerzők saját számításainak eredménye

A 3. ábra az összes vizsgált fordulatszámhoz tartozó teljes adatsort tartalmazza az 1. ábrának megfelelően növekvő fordulatszám szerint. A teljes adatsorra vonatkozó átlagérték 0,37%, ami a 32,5 Hz-es fordulatszámhoz tartozó 3000-es értékek környékén lévő kiemelkedést és az ennél nagyobb fordulatszámokhoz tartozó kiugró csúcsokat is figyelembe véve megfelelőnek mondható. A legnagyobb csúcs 5,53%, de ha a mérési adatok statisztikai értékelése során nem vesszük figyelembe az 1% feletti értékeket, akkor is 0,24% marad az átlag, vagyis nincs olyan nagy hatása ezeknek a pontoknak a teljes adatsorra.

3.3. A fordított regresszió elvégzése

A pompászjelenség szabályozása során előfordulhat olyan feladat, amikor a tömegáramot kell a másik két paraméterből meghatározni. Ezt egy újabb regresszióval lehet meghatározni. Az egyenes regressziónál harmadfokú összefüggést alkalmaztunk, ezért a fordított regressziónál valamilyen köbgyökös kifejezés adhat megfelelő karakterisztikát. Az egyes fordulatszámokhoz tartozó görbék közelítő egyenletének a következő összefüggést feltételezve, a CurveExpert-programmal a kitevőre 0,33-as érték jött ki, tehát köbgyökös kifejezés lesz.

$$b \cdot \left| \pi_{k,akt}^* - \pi_{k,opt}^* \right|^a$$

Az így kapott feltételezett összefüggésben a b paramétert kellett meghatározni a regresszióval, amelyben a $q(\lambda)_{opt}$ és $\pi_{k,opt}$ paraméterek a mért karakterisztikáról lettek leolvasva. Az alkalmazott képlet:

$$q(\lambda_1) = q(\lambda_{1,opt}) + b \sqrt[3]{\left| \pi_{k,akt}^* - \pi_{k,opt}^* \right|},$$

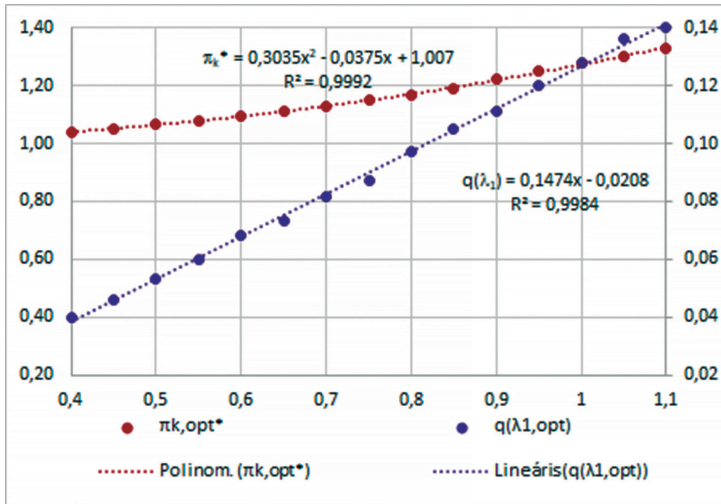
ahol b értékére 0,35 adódott.

Mivel a kompresszorkarakterisztikában a $q(\lambda)_{opt}$ és $\pi_{k,opt}$ diszkrét pontok az egyes fordulatszámgörbéken, ezért ezekre a paraméterekre folytonos függvényt kellett illeszteni.

A kapott összefüggéssel a teljes üzemi tartományban meghatároztuk a nyomásviszony és fordulatszám alapján a dimenziótlan tömegáramot, amelyet a 4. ábra mutat. Megfigyelhető, hogy minden folytonos görbe megfelelően illeszkedik a pontokkal jelzett mért adatokra, vagyis a regresszió sikeres volt, az egyszerűsített kifejezés segítségével meg lehet állapítani a kompresszor-nyomásviszony és a fordulatszám mint bemenő adatok alapján a kimenetet, vagyis a dimenziótlan tömegáramot.

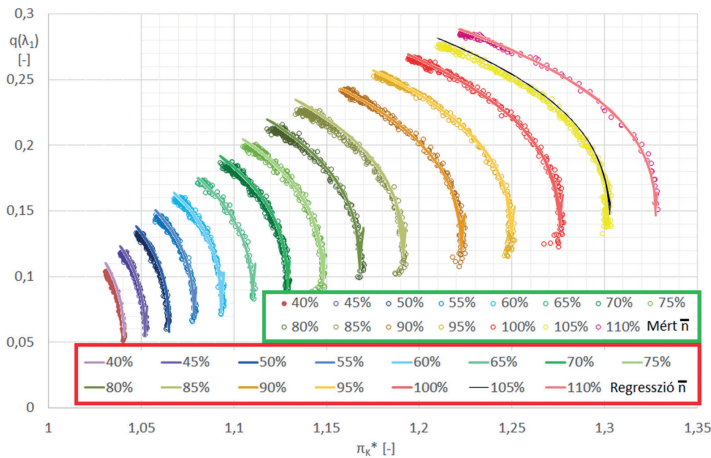
A közelítésnek csupán kettő gyenge pontja akad. Egyrészt, azon mérési pontoknál, amikor a mért nyomásviszony valamilyen hiba miatt az optimális fölé esik, az abszolútérték-függvény szimmetrikus mivoltából fakadóan tévesen egy a valóságban nem létező karakterisztikaágot hoz létre, amely a jelleggörbe optimális nyomásviszonyra vett függőleges tükörképe. Ez megfigyelhető a 80, 90 és 100% fordulatszámok esetében (lásd 5. ábra). A másik probléma abban rejlik, hogy a kompresszorinstabilitás nem pontosan az optimális nyomásviszonynál kezdődik, hanem kicsit kisebb dimenziótlan tömegáramnál, amihez a fokozatosan növekvő veszteségek miatt az optimálisnál csekélyebb nyomásviszony tartozik. A köbgyök- és abszolútérték-függvények együttesen ezt az állapotot tévesen az optimális nyomásviszonynál kisebb, az ahhoz tartozó dimenziótlan tömegáramnál viszont nagyobb értékre képezik le. Ezáltal, bár

a nyomásviszony csökken az optimálison túl növekvő fojtás esetén, ez nem azért következik be, mert a levegőátfutás megnőtt volna, hanem azért, mert az áramlási veszteségek növekednek. Így az a téves következtetés vonható le, hogy a kisebb nyomásviszony miatt kellő távolságra került az üzemi pont a leválástól, és a szabályozó rendszer esetleg megszünteti a pompázás elleni beavatkozást, azonban a tényleges szituációban ez éppen az instabilitás kialakulását segítheti elő. Ennek eldöntésére, hogy ez valóban problémát jelent-e, mindenképpen részletes vizsgálatokat kell végezni a tényleges kompresszor és szabályozórendszer együttesével.



4. ábra

$q(\lambda)_{opt}$ és $\pi_{k,opt}$ polinomos alakban a relatív átszámított fordulatszám függvényében. Forrás: a szerzők saját számításainak eredménye



5. ábra

A mért és a fordított regresszióból kapott karakterisztika. Forrás: a szerzők saját számításainak eredménye

3.4. A kapott összefüggés alkalmazhatósága mikrokontrollerbe programozás esetén

Az aktív szabályozó rendszer alapját egy 8 bites architektúrájú, MC9S08DZ60 típusú mikrokontroller képezi, mivel a korábbi szabályozórendszerek¹⁶ erre a típusra lettek alapozva,¹⁷ amelyek gázturbinás hajtóművek tolóerő-szabályozásában megfelelő teljesítményt mutattak, így kézenfekvő, hogy a már bevált platformra alapozva szülessen meg a pompázs szabályozása is. Ennek működéséhez szükséges valamilyen törvényszerűség, amely a rendszer aktuális állapotát meghatározó, mért paraméterek alapján vezérlő jelet küld ki. A kompresszorkarakterisztikát meghatározó analitikus összefüggések számításának igénye nagyon bonyolulttá tenné a működtető algoritmust. A mért karakterisztika regresszióanalízisének elsődleges célja volt egy olyan összefüggés meghatározása, amellyel jelentősen csökken a szabályozórendszer kapacitásigénye. Az egyenes regresszióból kapott összefüggést ezért meg kellett vizsgálni, hogy a karakterisztikát számító rutint, ha mikrokontrollerbe programozzuk, akkor az mennyi idő alatt lesz képes a számítást elvégezni. A vezérlő rutin lebegőpontos számábrázolást alkalmazva 59 907 ciklust jelent, ami egy 8 bites architektúrájú, MC9S08DZ60 típusú mikrokontrolleren 20 MHz-es órajellel 5,991 ms időt igényel. Ez megfelelő sebesség egy áramlástanai gép esetében.

A fordított regresszió esetében, tehát amikor a nyomásviszonyból és a relatív átszámított fordulatszámából kell szabályozni az aktuális tömegáramot, a mikrokontrollerben való működés időszükséglete 114 078 ciklus volt, ami a fent említett beállítások esetén már 11,41 ms alatt zajlik le. Ez még bőven belül esik az előzetesen becsült 20 ms-on, azonban ha számításba vesszük az optimális pont paramétereit, amelyek első-, illetve másodfokú egyenlettel vannak meghatározva és a beavatkozó jel kiszámításához szükséges időt, akkor már szükségessé válhat nagyobb kapacitású kontroller alkalmazása.

4. Összefoglalás, konklúzió

A pompázsjelenség szabályozási feladatának elvégzéséhez szükséges valamilyen szabályozó algoritmus létrehozása. Erre a legkézenfekvőbb megoldás a kompresszor működését a teljes üzemi tartományban leíró karakterisztika felhasználása, azonban ennek analitikus úton történő meghatározása időigényes feladatot jelentene egy mikrokontroller számára. Ezért került sor korábbi mérési eredmények alapján meghatározott karakterisztikát leíró összefüggés meghatározására, amelynek első lépése volt a karakterisztikát leíró közelítő függvények meghatározása, majd az ezekben szereplő együtthatók pontos kiszámítása regresszióanalízissel.

Ezt a műveletet elvégeztük a nyomásviszonyra és a dimenziótlan tömegáramra is. Miután a kapott összefüggésekből alkotott görbék rávetítve a mért adatsorból származó görbékre jó közelítést adtak, az egyes pontokhoz tartozó eltéréseket is meghatároztuk az elméleti értékekhez viszonyítva, amelyekre közel a teljes tartományban 1% alatti értékek jöttek ki. Végül mivel a cél az összefüggések alkalmazása egy szabályozórendszer részeként, az ezeket számító algoritmus időszükségletének meghatározása is megtörtént, amely szerint az egyenes

¹⁶ Beneda Károly: Modular Electronic Turbojet Control System Based on TPR. *Acta Avionica*, 17. (2015), 1. 14.

¹⁷ Beneda Károly: Development of a modular FADEC for small scale turbojet engine. In Szakál Anikó (szerk.): *SAMI 2016, IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*. New York, IEEE, 2016. 51–56. 6.

regresszió gond nélkül elvégezhető egy 8 bites mikrokontrollerrel, míg a fordított regresszió végrehajtásához már egy újabb 32 bites típus válhat szükségessé.

Felhasznált irodalom

- Banerjee, Deb. et al.: Investigation of Flow Field at the Inlet of a Turbocharger Compressor Using Digital Particle Image Velocimetry. *Journal of Turbomachinery*, 141. (2019), 12. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044608>
- Beneda, Károly: *Development of Active Surge Control Devices for Centrifugal Compressors*. PhD dissertation, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles, Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Budapest, Budapest University of Technology and Economics, 2013.
- Beneda, Károly: Development of a modular FADEC for small scale turbojet engine. In Szakál Anikó (szerk.): *SAMI 2016, IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*. New York, IEEE, 2016. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAMI.2016.7422981>
- Beneda, Károly: Modular Electronic Turbojet Control System Based on TPR. *Acta Avionica*, 17. (2015), 1. 14. Elérhető: <https://acta-avionica.tuke.sk/ojs/index.php/aavionica/article/view/893/891> (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Beneda Károly – Simongáti Győző – Veress Árpád: *Járművek hő- és áramlástechnikai berendezései*. Budapest, 2010. Elérhető: www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Tantargyak_anyagai/Jarmuvek_Ho_es_Aramlastechnikai_Berendezesei/1/Jh%C5%91%C3%A1g1_SGY_A4%209.0.pdf (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Greitzer, Edward M.: Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors – Part II: Experimental Results and Comparison With Theory. *Journal of Engineering for Power*, 98. (1976), 2. 199–211. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3446139>
- Paduano, James D. et al.: Modeling For Control of Rotating Stall. *Automatica*, 30. (1994), 9. 1357–1373. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0005-1098(94)90001-9)
- Sundström, Elias – Bernhard Semlitsch – Mihai Mihăescua: Acoustic signature of flow instabilities in radial compressors. *Journal of Sound and Vibration*, 434. (2018), 221–236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.07.040>
- Xue, Xiang – Tong Wang: Experimental Study on Inducement and Development of Flow Instabilities in a Centrifugal Compressor with Different Diffuser Types. *Journal of Thermal Science*, 29. (2020), 434–444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1223-4>
- Yang, Zhao – Xi Guang – Wang Zhiheng – Zhang Pengfei: Numerical investigation of deep surge in a centrifugal compressor with vaned diffuser and large plenum. *Journal of Power and Energy*, 234. (2019), 2. 143–155. DOI: <https://doi.org/10.1177/0957650919854571>
- Zhang, Lei – Ruiyang He – Songling Wang – Qian Zhang: A Review of Rotating Stall in Vaneless Diffuser of Centrifugal Compressor. *Journal of Thermal Science*, 29. (2020), 323–342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11630-020-1261-y>
- Zheng, Xinqian – Zhenzhong Sun – Tomoki Kawakubo – Hideaki Tamaki: Experimental investigation of surge and stall in a turbocharger centrifugal compressor with a vaned diffuser. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 82. (2017), 493–506. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.11.036>



Reizinger Patrik,¹ Huszár Péter,² Milánkovich Dorottya,³
Széll Alexandra⁴

Kisműholdak fejlesztése a sokoldalúság és a könnyű reprodukálhatóság tükrében

A világűr mára már nem csak a gazdasági nagyhatalmak kiváltsága. A társuló technológia fejlődésének hatására bekövetkező költségcsökkenés eredményeképpen napjainkban akár egy kis cég, alacsony költségvetéssel is megmérettetheti magát a 21. század űrversenyében. Ehhez biztosítanak tökéletes platformot a nano- és mikroműholdak, amelyek alkalmazási lehetőségei folyamatosan bővülnek. Az egyre változatosabb hasznos terhek azonban értéktelenek a sokoldalú platformok és azok alapvető alrendszerei nélkül, mint például a fedélzeti számítógép, tápegység, kommunikációs egység vagy a műhold térbeli orientációjáért felelős alrendszer (Attitude Determination and Control System – ADCS). Így felmerül az igény egy olyan univerzális műholdplatform fejlesztésére, amelyben a létfontosságú alrendszerek biztosítva vannak különböző, harmadik fél által fejlesztett hasznos terhek, illetve tudományos kísérleti eszközök számára. Ezzel létrehozhatunk egy standardizált, költséghatékony és rugalmasan bővíthető, ezáltal még szélesebb körben elérhető kisműholdas platformot. A cikkben részletesen bemutatunk egy, a fentiekben leírt követelményeknek megfelelő univerzális CubeSat-platformot, kitérünk az egyedi mérnöki módszereket és megoldásokat igénylő fejlesztési folyamatokra, a nagy megbízhatóságú szoftvertechnológia előnyeire és a platform nyújtotta új lehetőségekre.

Kulcsszavak: CubeSat, kisműhold, műholdfejlesztés, univerzális műholdplatform, ADCS

Cubesat Development from the Perspective of Versatility and Easy Reproducibility

Space is not a privilege of the greatest economic powers anymore. As a result of constantly decreasing costs and technological advancements, even small companies with small budgets can

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kar Irányítástechnika és Informatika Tanszék, Fejlesztőmérnök, Villamosmérnök MSc, C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., e-mail: patrik.reizinger@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9861-0293>

² C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., beágyazott hardver-/szoftverfejlesztő, e-mail: peter.huszar@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6169-3777>

³ C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., projektmenedzser, e-mail: dorottya.milankovich@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8127-0242>

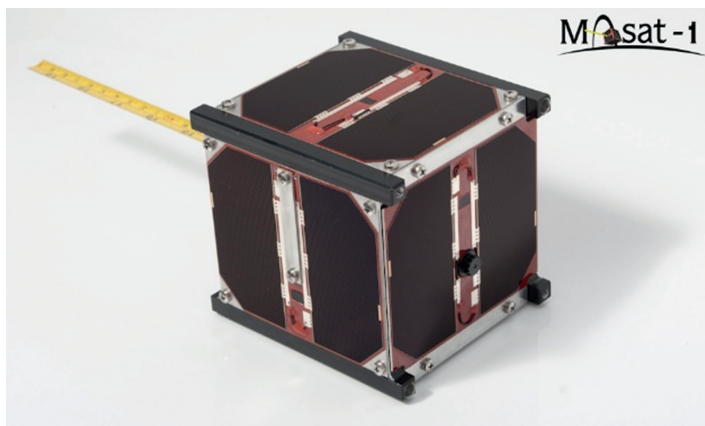
⁴ C3S Elektronikai Fejlesztő Kft., üzletfejlesztési vezető, e-mail: alexandra.szell@c3s.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5312-0394>

take part in the Space Race of 21st century. Small and microsatellites are the perfect platforms for this and their use cases are constantly expanding. However, the more and more diverse payloads are worthless without the fundamental subsystems such as the onboard computer, power supplies, wireless communication unit or the subsystem which is responsible for the orientation of the satellite. Therefore, a need arises for the development of a universal satellite platform that provides the essentials for different payloads and scientific research equipment designed by third parties. Thus, for creating a standardised, cost-effective and flexibly expandable, therefore more accessible small satellite platform. The authors describe a universal CubeSat platform that meets the above requirements, elaborating in detail the challenging development process which demands unique solutions, the advantages of highly reliable software technologies and the potential provided by such a platform.

Keywords: CubeSat, small satellite, satellite development, universal satellite platform, ADCS

1. Kisműholdak

A világűr széles körű felhasználási lehetőségeinek kiaknázásához nagymértékben hozzájárult az úgynevezett CubeSat szabvány,⁵ amelynek megjelenése óta már 1000 fölötti CubeSat állt földközeli (Low Earth Orbit – LEO) pályára, 500 km körüli magasságban. A műholdak felszereltségéről, a küldetést koordináló szervezetről, valamint a felhasználás céljáról is a részletekig kiterjedő adatbázisok állnak rendelkezésre.⁶ Hazánk esetében az első, CubeSat szabványnak megfelelő műhold az 1 U-s (unit, azaz egy 10 cm élhosszúságú kocka méretével megegyező) Masat-1⁷ volt.



1. ábra

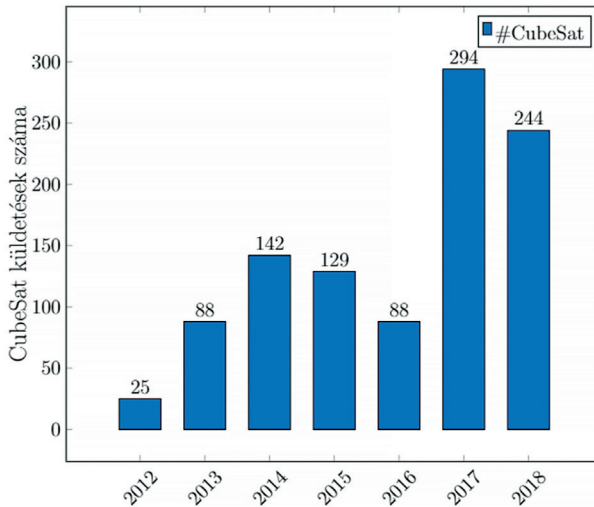
Masat-1, az első magyar CubeSat. Forrás: Dudás-Pápay–Seller (2014) i. m. 1.

⁵ *CubeSat Design Specification*. Revision 12, California Polytechnic.

⁶ Michael Swartwout: *CubeSat Database*.; Erik Kulu: *Nanosatellite & CubeSat Database*.; Jasper Bouwmeester – Jian Guo: Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, 67. (2010), 7–8. 854–862.

⁷ Dudás Levente – Pápay Levente – Seller Rudolf: Automated and remote controlled ground station of Masat-1, the first Hungarian satellite. In *24th International Conference Radioelektronika*. 2014. 1–4.

Ahogy azt a 2. ábra is mutatja, a CubeSat-ok piaci szegmense jelentős bővülést mutat. A Masat-1 felbocsátásának évében, 2012-ben mindösszesen 25 CubeSat állt pályára, míg 2018-ban ez a szám már 244 volt. Ennek oka elsősorban az, hogy a kezdeti, demonstrációs (In-Orbit Demonstration – IOD) célú kísérleteket fokozatosan – az iparági tudásbázis kialakulásával egyidejűleg – felváltották a jóval magasabb követelményeket támaztó missziók, beleértve tudományos kísérleteket, valamint ipari felhasználást (például telekommunikáció, távérzékelés) is.



2. ábra

CubeSat-küldetések száma (2012–2018). Forrás: Kulu (é. n.) i. m.

A komplex küldetések követelményeinek megbízható teljesítése számos mérnöki kihívást jelent, kiváltképp, amennyiben a fent említett szabvány által meghatározott, tömegre, térfogatra, energiafogyasztásra, valamint ezáltal számítási kapacitásra is vonatkozó szigorú korlátozásokat is figyelembe vesszük. Ezek alapján belátható, hogy egy, a korlátok betartása mellett is bizonyos fokú rugalmasságot, konfigurálhatóságot biztosító CubeSat-platform jelentős mértékben képes hozzájárulni a világűr rejtette lehetőségek kiaknázásához. Így ugyanis adott misszió esetében jelentős mértékben csökkenthető az idő és ezáltal a pénzügyi ráfordítás a világűr eléréséhez. Ezen irányelveket követve, a Masat-1⁸ szakmai hagyatékára alapozva, a C3S Elektronikai Fejlesztő Kft. az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) égisze alatt egy sorozatgyártható CubeSat-platform fejlesztésén dolgozik.

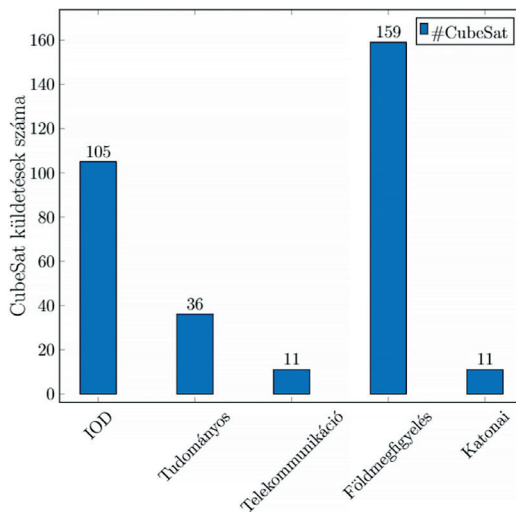
Az alábbiakban egy, a CubeSat szabványnak megfelelő általános műholdplatformot ismertetünk, külön kitérve az egyes alrendszerekre, a fejlesztés során felmerülő mérnöki kihívásokra, valamint nem megfelelően a sikeres misszióhoz elengedhetetlen támogató rendszerek, mint a földi állomás vagy a MOC/SOC (műveleti/tudományos operatív központ, Mission/Scientific Operation Center), ismertetéséről sem. Ennek érdekében, hogy a felmerülő

⁸ Dudás–Pápay–Seller (2014) i. m.

kérdéseket azok kontextusába helyezve vizsgálhassuk meg, először mindenképpen érdemes röviden áttekinteni a CubeSat-okra szabott küldetéstípusokat.

1.1. Küldetések

Az egyik legfontosabb előnye a CubeSat-műholdaknak azok űripari mértékkel nézve alacsony költsége, ami alkalmassá teszi őket többek között arra, hogy több műholdból álló konstellációk kötelékében minden eddiginél nagyobb lefedettséget érhesen el az emberiség a világűrben. Legyen szó űridőjárás-monitorozásról (amilyen a magyar kutatók által tervezett, a közeljövőben megvalósítandó CROSS rendszer) vagy földi időjárás, tengerhajózás és repülőgép-forgalom monitorozásáról (például Lemur/Spire) vagy földmegfigyelésről (például Flock és Dove/Planet), mint ahogy azt az elkészített kimutatás (3. ábra) is mutatja. Az egyik legfontosabb alkalmazási területet egyértelműen a különböző távérzékelési feladatok alkotják. Találunk számos, a látható fény tartományában működő képalkotó berendezés mellett speciális igényeket kielégítő megoldásokat is, legyen szó közeli infra-, röntgen- vagy gamma-tartományról – mindezt a CubeSatok által képviselt kompakt méretben.⁹



3. ábra

CubeSat-küldetések megoszlása típus alapján (2016-ig bezárólag). Forrás: Josep Virgili-Llop – Polat Halis – Romano Marcello: Survey, Statistical Analysis and Classification of Launched CubeSat Missions with Emphasis on the Attitude Control Method. *Journal of Small Satellites*, 5. (2016), 3. 513–530.

A CubeSat-küldetések széles felhasználási lehetőségei mellett a szabvány elterjedésének másik fő mozgatórugója a jól skálázható, az elmúlt években egyre versenyképesebb technológiai megoldások jelenléte. Abból kifolyólag, mivel CubeSat-ok esetében a szemlélet teljesen eltér a nagyobb műholdak esetében tapasztalt egy műhold – egy misszió megközelítéstől, a kialakított

⁹ Kulu (é. n.) i. m.

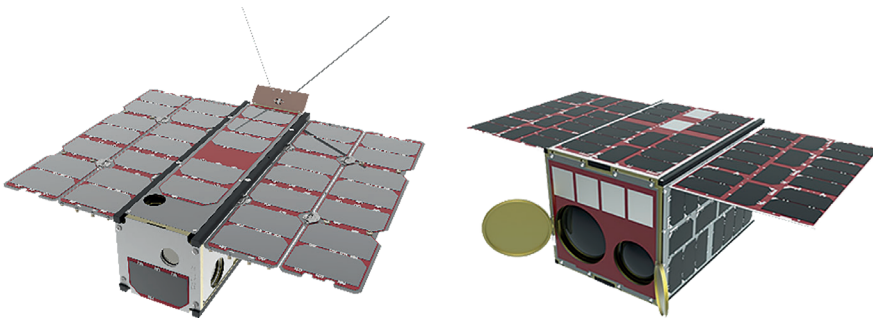
rendszerek számos szituációban alkalmazhatóak teljes újratervezés nélkül. A szabványos megoldások jelentős költség- és időmegtakarítást jelentenek, így mind a hasznos teher (payload), mind pedig – az akár különböző beszállítótól származó – alrendszerek akár negyedéves, féléves távlatban integrálhatók.

A szabványos megoldásokból kifolyólag a hordozórakétában elhelyezett POD-ok is nagyobb szériában gyárthatók, így akár a korábbiakhoz képest két nagyságrenddel több, akár száz¹⁰ CubeSat is pályára állítható egyetlen felbocsátás alkalmával. Ezenfelül a megnövekedett küldetések a rakétastartok gyakoribb ütemezését követelték meg, ami adott küldetés szempontjából jobb tervezhetőséget, gyorsabb megtérülést jelent.

A műholdhoz kapcsolódó infrastruktúra esetében szintén számos olyan szolgáltatás érhető el, ami szabványos kialakításából kifolyólag jelentősen képes a küldetés implementációs idejét lerövidíteni. Példaként említhető akár a tudományos, akár a műveleti operatív központ vezérlőszoftvere, amelyet így nem szükséges minden küldetés esetén az alapoktól kezdve implementálni, elegendő az egyes funkciók személyre szabása. Ugyanakkor a műholddal kapcsolatot létesítő földiállomás-hálózat is igénybe vehető szolgáltatási alapon, így pedig költséghatékonyan megnövelhető a műhold és a földi operátor között létesített hasznos kommunikációs időtartam.

A széles körű feladatoknak megfelelően kezdetekben a főként 1, illetve 3 U-ra korlátozódó méretek mellett egyre nagyobb létjogosultságot szereznek a nagyobb, akár 6, 12 vagy 16 U-os CubeSatok. Ebben a méretben ugyanis már van lehetőség arra, hogy a platform kialakítása kielégítse a komplexebb missziók által támasztott követelményeket (például a nagyobb energiatárolási kapacitás nagyobb számítási kapacitást képes biztosítani a megnövekedett fogyasztás fedezésével), valamint hogy nagyobb méretű hasznos terheket juttathassunk földközeli pályára.

Az elmúlt évek tendenciái tehát a megvalósítható küldetések körének szélesítése mellett jelentős költségcsökkenést eredményeztek nagyobb megbízhatóság mellett, így pedig tovább növelték a kisműholdak iránti érdeklődést a CubeSat-küldetések gazdaságosságának növelése által. A csökkenő költségszint következményeként számos iparág számára a műhold alapú megoldások egyre inkább valós alternatívát jelentenek a földfelszíni megoldásokhoz képest.



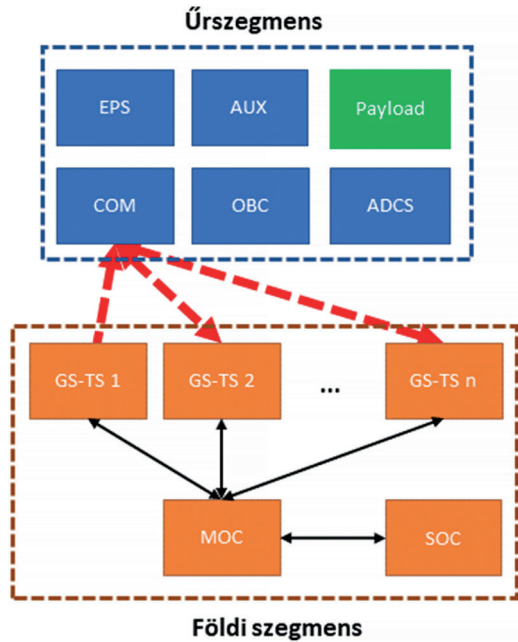
4. ábra

Egy 3U-os (bal) és egy 12U-os (jobb) CubeSat-platform strukturális terve. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

¹⁰ Uo.

2. Univerzális műholdplatform

A kifejlesztett műholdplatform esetében a fő hangsúly a moduláris kialakításon volt, amelyet az 5. ábra szemléltet. A platform alapvetően két szegmensre, a földi és az űrszegmensre bontható, amelyek közül jelen munka elsősorban utóbbira fókuszál.



5. ábra

A kifejlesztett CubeSat-platform földi és űrszegmense. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

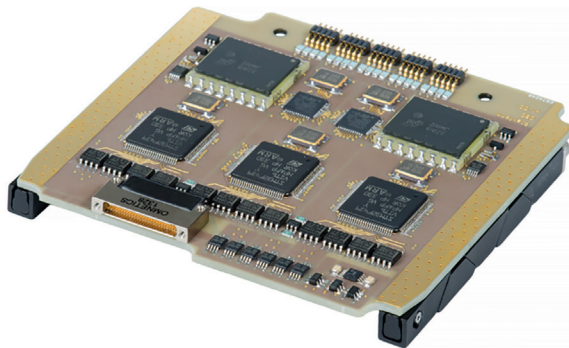
A földi szegmens legfontosabb feladata a műholddal való kommunikáció, valamint a küldetéssel kapcsolatos operatív és tudományos adatok kezelése. Ehhez a kommunikációs kapcsolatot a földi állomások (GS, Ground Station) létesítik a két szegmens között, míg az adatok és kommunikációs üzenetek menedzselése elsődlegesen a Műveletirányítási Központ (MOC, Mission Operation Centre) feladata, a Tudományos Műveleti Központ (SOC, Scientific Operation Centre) pedig tudományos szempontból lényeges információkhoz fér hozzá.

A következőkben részletesen bemutatandó űrszegmens komponensei magukban foglalják az energiaellátás biztosítását, a kommunikációt, a műhold orientációjának meghatározását és szabályzását, valamint természetesen a platform vezérlését és a hasznos terhet is.

2.1. Fedélzeti számítógép (On-Board Computer, OBC)

A műhold működéséért felelős magas szintű autonómiák nagy részét az OBC-ben implementálták. Csak a kifejezetten alrendszer-specifikus algoritmusok kerültek át más alrendszerek

hatáskörébe. Az OBC első és egyik legfontosabb feladata a felbocsátást követően a műhold indításának levezénylése. A hordozórakétán található POD (Picosatellite Orbital Deployer) sikeres elhagyásától számított 30 perc elteltével a fedélzeti számítógép elkezd végrehajtani a műhold indítási szekvenciáját. Meghatározott sorrendben kiadja a parancsot a napelemszárnyak és az antennák nyitására, és feléleszti a többi alrendszert. Az indulási szekvencia lezárásaképpen bekapcsolja a kommunikációs alrendszert, és elküldi első üzeneteit a Föld felé. A sikeres indulást követően az OBC feladata többek között az egyes redundáns alrendszerek és fedélzeti kommunikációs buszok közötti váltás szükség szerinti lebonyolítása. Tárolja és kezeli a fedélzeti időt, elvégzi annak földi időhöz történő szinkronizációját. Ellátja a műhold és a földi szegmens közötti kommunikációhoz kapcsolódó magas szintű feladatokat. A beérkező üzeneteket dekódolja és eljuttatja a címzett számára további feldolgozásra.



6. ábra

A kifejlesztett CubeSat-platform fedélzeti számítógépe. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

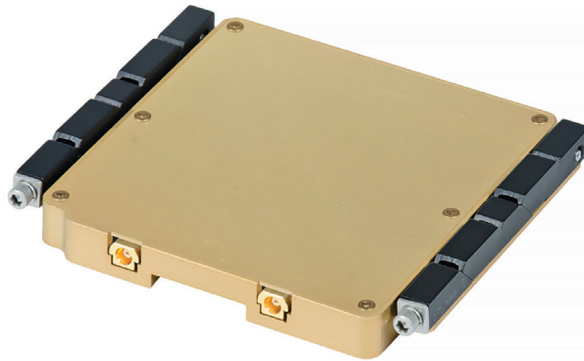
Az OBC-n kaptak helyet a redundáns kialakítású memóriák is, így a mérési adatok, rendszerműködés során keletkező naplófájlok tárolását, tömörítését, valamint fel- és letöltését is a fedélzeti számítógép végzi. Továbbá az OBC lehetővé teszi a műhold alrendszereinek működés közbeni szoftverfrissítését és a különböző feltételekhez kötött késleltetett parancsvégrehajtást. Áramkörü szempontból két teljesen redundáns részből áll, ezzel is biztosítva a nagy megbízhatóságot és a magas rendelkezésre állást. Megtalálható rajta egy kitüntetett szerepű, vezetékes kommunikációs port is, az úgynevezett access port. Ezen keresztül, még a Földi integráció során és akár az orrkúpba integrálás előtt hozzá lehet férni az összes alrendszerhez tesztelés, diagnosztizálás és szoftverfrissítés céljából.

2.2. Kommunikációs alrendszer (Communication Subsystem, COM)

A kommunikációért felelős alrendszer szerepe kiemelten fontos egy műholdküldetés tekintetében. Nélküle nincs lehetőség arra, hogy a mérési eredményekhez, naplófájlokhoz (általánosságban telemetria) hozzáférjen a földi operátor. Ezenfelül interfészt biztosít a műhold funkcióinak vezérléséhez (telecommand) is. A COM alrendszer magas szintű vezérlését az OBC végzi. A kommunikációs modul pedig a kommunikáció lebonyolításához szükséges hardverközeli

feladatok végrehajtásáért és az időszinkronizációért felelős, magas szintű autonómiával viszont nem rendelkezik.

Vétel során a COM feladata az LNA (Low Noise Amplifier, kis zajú műveleti erősítő) bekapcsolása, míg adás esetén az úgynevezett RF frontend kezelése. A jelentős hőmérsékleti ingadozás hatása az akkumulátorcellák mellett a rádióadó tervezése során is különös figyelmet igényelt. A vivőfrekvencia a hőmérséklet függvényében változik, így a szolgáltatás megfelelő minőségének biztosítása érdekében kompenzációra van szükség. A probléma kezelése hőkamrás identifikációt követően, a mérési eredményekből kialakított LUT (Lookup Table) segítségével valósult meg. Ugyanígy hőmérséklet-kompenzált a teljesítményerősítő is – ebben az esetben ráadásul nagyobb pontosságú hőmérsékletmérést hajt végre a műhold – a vivőfrekvencia hibájának minimalizálása érdekében.



7. ábra

A kifejlesztett CubeSat-platform COM alrendszere. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A COM-modul több speciális megoldást alkalmaz a kommunikációs protokoll kialakítása során is. A telemetria kiemelt üzenettípusa az úgynevezett beaconüzenet. Ezt az OBC állítja össze a legfontosabb telemetriai jellemzőkből (beleértve az adási és vételi ciklusok közötti váltás jelzését is), amelyet az adási ciklus végén továbbít a földi operátornak. Annak érdekében, hogy sikertelen antennanyitás esetén is lehetőség legyen a földi állomással való kommunikációra, a COM alrendszer az úgynevezett Barker 13 kódolást alkalmazza, amely minden bitet 13 biten kódolva teszi lehetővé, hogy kis teljesítménnyel is működőképes legyen az adatátvitel. A robusztusságot szolgálja az a tény is, hogy az OBC-hez hasonlóan a COM is teljesen redundáns. A platformban az alrendszer két példánya kapott helyet, így az egyik meghibásodása esetén biztosított a megfelelő működés.

2.3. Tápellátásért felelős alrendszer (Electric Power System, EPS)

Az EPS feladata a műhold teljes tápellátásának biztosítása, amelynek maradéktalan és robusztus kielégítése érdekében számos áramkörti elem összehangolt működésére van szükség. Ezek közé tartozik egyrészt maga az akkumulátor, amelynek a napelemcellákból származó bejövő energia és a műhold energiaigényének időbeli különbségéből származó eltérés kompenzálása a célja.

Kiváltképp kritikus ez a pálya árnyékban lévő szakaszán, ahol lényegében csak az akkumulátor szolgáltatja a platform működéséhez szükséges energiát.

A hatékonyság biztosítása érdekében az alrendszer rendelkezik egy úgynevezett MPPT (Maximum Power Point Tracker, maximális teljesítmény követő) modullal, amely a napelemekből származó energiát maximalizálja a munkapont megfelelő beállításával. A megfelelő működés érdekében az akkumulátort kiegészíti többek között egy töltésvezérlő, számos – az egyes rendszerkomponensek áram- és feszültségigényéhez alkalmazkodó – DC-DC konverter, valamint a túláram-, illetve túlfeszültségvédelmet ellátó komponensek is. Az akkumulátorcellák élettartamának növelése érdekében integráltak egy fűtőáramkört a jelentős hőmérsékletingadozás hatásának mérséklésére.

2.4. Segédelektronika (*Auxiliary Electronics, AUX*)

A segédelektronikát tartalmazó alrendszer két fő feladattal rendelkezik, amelyek egyrészt rendszertechnikailag, másrészt pedig a küldetés sikeres végrehajtását tekintve elengedhetetlenek. Egyrészt az AUX tartalmazza az úgynevezett backplane-t, ami a buszrendszert, valamint a szükséges csatlakozókat magában foglalva biztosítja az összeköttetést az egyes alrendszerek között. Másrészt pedig a misszió életciklusának elején tölt be a segédelektronikai alrendszer fontos feladatot, mégpedig a napelemszárnyak és antenna (amelyek a POD-ban összecukott konfigurációban helyezkednek el) nyitását. Technikai szempontból a nyitási folyamat kezdeményezése az OBC feladata, a végrehajtás – vagyis a hőkések működtetése a rugós mechanizmusok rögzítéseinek elégetése végett – azonban teljes mértékben az AUX alrendszer hatáskörébe tartozik. Fontos megjegyezni, hogy még egy ilyen egyszerű feladat is körültekintő előkészületeket igényel az űrkörnyezet sajátosságaiból adódóan: a damil elégetéséhez ugyanis ismerni kell a hőmérsékletet, valamint a rendelkezésre álló energiamennyiséget annak érdekében, hogy a nyitási folyamat a lehető leggyorsabban végbemehessen, azonban más elektronikai komponens ne sérüljön meg a keletkező hő hatására.¹¹

2.5. Orientációmeghatározó és szabályzó alrendszer (*ADCS*)

A küldetések sikeres végrehajtása szempontjából szükség van arra, hogy a műhold orientációját és szögsebességét megfelelő pontossággal be tudjuk állítani, illetve vissza tudjuk mérni. A tudományos kísérlet/műszaki alkalmazás által támasztott követelmények mellett az energiamérleg fenntartása szintén olyan követelmény, amelyre az orientációmeghatározó és szabályzó alrendszer (ADCS, Attitude Determination and Control System) szintén hatással van, mégpedig a napelemtáblák megfelelő irányba történő állításával. Fenti követelmények teljesítése érdekében az ADCS felszereltsége mind szenzorok, mind pedig aktuátorok tekintetében oly módon lett kialakítva, hogy a műholdat alkalmassá tegye a küldetés során felmerülő legkülönbözőbb szituációk kezelésére. A komponensszintű felépítést a 8. ábra ábrázolja.

¹¹ Kovács Zoltán – Marosy Gábor – Horváth Gyula: *The thermal design of the thermal cutter of an antenna opening mechanism employed on a pico-satellite*. Budapest, 18th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems, 2012. 1–4.

Először az orientációmeghatározáshoz szükséges hardver-, valamint szoftverkomponenseket tekintjük át. Szenzorok tekintetében egyrészt megtaláljuk a MEMS- (Micro-Electromechanical Systems, mikro-elektromechanikai rendszer) technológiával gyártott giroszkópot, illetve magnetométert. Ezenfelül a platform külső felületére (tipikusan minden oldalra) napszenzorokat szerelnek fel, amelyekből hat darab szükséges a Nap irányvektorának rekonstruálására, amely az orientációmeghatározási algoritmus egyik bemeneteként szolgál. Egyre több CubeSat-platform szerves részét képezi továbbá az úgynevezett csillagkamera (Star Tracker), amely rendkívül pontos (szögmásodperces tartományba eső) orientációmeghatározásra képes.

Megállapítható, hogy összességében a rendelkezésre álló szenzorok jóval kisebb halmaza is elegendő lehetne ideális, zavarásoktól és zajtól mentes környezetben, ezen folyamatok jelenléte, valamint az egyes szenzoregységek korlátai azonban mindenképpen szenzorfüzítés eljárások alkalmazását teszik szükségessé. A magnetométerek a különböző külső (a világútból származó mágneses jelenségek), valamint a platformból származó belső mágneses zavarások által terheltek, a napszenzorok esetében a Föld albedója okozhat igencsak jelentős (akár 20°-os) orientációhibát. Míg a csillagkamera esetében a hosszú záridők, a műhold forgásából származó elmosódás, valamint a számítási szempontból intenzív feldolgozási algoritmusok pontos, ámde rendkívül alacsony (néhány Hz) mérési frekvenciája jelent mérnöki kihívást. Továbbá bizonyos szituációkban egyes szenzorok nem is használhatók: a Föld takarásában a napszenzorok nem szolgáltatnak mérési eredményeket, míg az árnyékot elhagyva a csillagkamerát vakíthatja el a Nap.

A szenzorok mérési adatait tipikusan a Kálmán-szűrő¹² valamely változata segítségével dolgozza fel a műhold.¹³ Abból kifolyólag, mivel a műhold dinamikáját leíró egyenlet nemlineáris, így általában az úgynevezett Unscented Kálmán-szűrőt használják fel, amelynek létezik kifejezetten műholdakra szabott változata is.¹⁴

Az orientációmeghatározás mellett az ADCS másik feladata a küldetés szempontjából meghatározott orientáció beállítása, valamint tartása. Ezen feladatnak velejárója a műhold szögsebességének szabályozása is, ugyanis ez befolyásolja az orientációs szabályzás stabilitását, ami – kiváltképp földmegfigyelő, illetve képalkotó hasznos teherrel rendelkező műholdak esetében – számos szituációban a misszió sikerességét befolyásolja. Ennek elérése érdekében alapvetően kétféle beavatkozószervert terjedt el. Az egyik a Föld mágneses mezejével lép interakcióba mágneses dipólmomentum létrehozása által – elektromágnesként viselkedő tekercsek formájában –, míg a másik megközelítés kis méretű lendkerekeket alkalmaz, és a perdületmegmaradás elvét kihasználva végzi a műhold szabályzását.

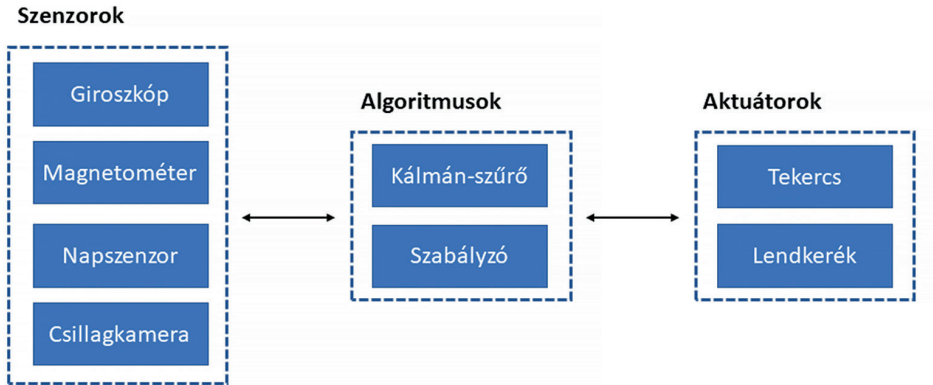
Aktuátorok esetében két okból van szükség a fenti megközelítés alkalmazására. Egyrészt a mágneses beavatkozószervek csak egy kétdimenziós altérben képesek szabályozni, amelynek oka, hogy amennyiben a létrehozott mágneses dipólmomentum-vektor és a Föld mágneses mezejének indukcióvektora párhuzamosak, a kifejtett nyomaték nulla. Ez a probléma nem

¹² Kálmán Rudolf Emil: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82. (1960), 1. 35–45. 35.

¹³ Eugen J. Lefferts – Markley Landis – Malcolm D. Shuster: Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 5. (1982), 5. 417–429.

¹⁴ John L. Crassidis – Landis F. Markley: *Unscented Filtering for Spacecraft Attitude Estimation.*; Matthew C. VanDyke – Jana L. Schwartz – Christopher D. Hall: *Unscented Kalman Filtering for spacecraft attitude state and parameter estimation.* Advances in the Astronautical Sciences, AAS-04-115, 2004.

áll fent a lendkerekek esetében, ennek ellenére mégsem alkalmazzák őket kizárólagos beavatkozásszervként.



8. ábra

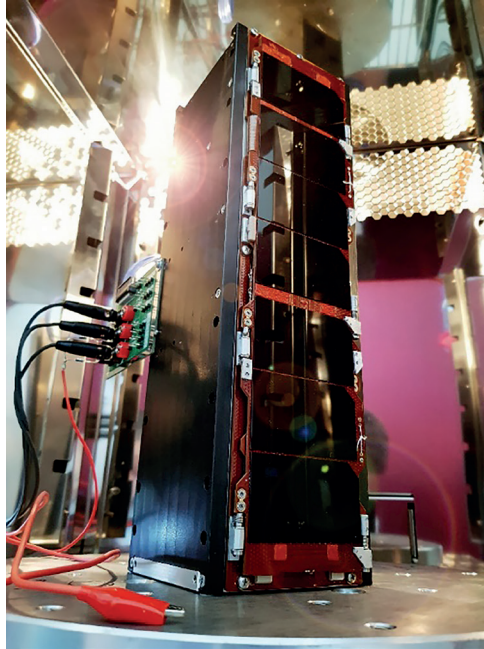
Az ADCS alrendszer felépítése. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Ennek oka a műholdra ható, úgynevezett zavarónyomatékokban keresendő, ideértve a földközeli pályán igencsak jelentős légellenállást, a napszél nyomását vagy a műhold (nem aktuált, hanem a felépítésből adódó) dipólmomentumának és a Föld mágneses mezejének interakciójaként előálló nyomatékot. Ezek a hatások ugyanis – habár alapvetően periodikus komponensekből tevődnek össze – nem mentesek teljes mértékben az egyenkomponensű összetevőtől, ami a perdület felhalmozódását eredményezi a lendkerekekben. A szaturációt elkerülendő a mágneses beavatkozók szerepe a lendkerekek perdületének disszipációja – hiszen a tekerccsek nem tartalmaznak mozgó alkatrészeket.

2.6. Minőségbiztosítás

Abból kifolyólag, mivel a műhold pályára állítása után már nincs lehetőség hardveres módosítások végrehajtására, esetleges javítások elvégzésére (mint ahogy az például a Hubble űrteleszkóp esetében történt), így rendkívül fontos, hogy a platform magas megbízhatósággal rendelkezzen.

Ennek érdekében az egyes komponensek fejlesztése, illetve beszerzése során különös figyelmet kell fordítani az űreszközökre vonatkozó minőségbiztosítási szabványoknak való megfelelésre (European Cooperation for Space Standardization, ECSS) – ami részben speciális, űripari komponensek alkalmazását jelenti. Mindemellett pedig a platformot részletes, az űrkörnyezet minden lehetséges viszontagságát figyelembe vevő teszteknek vetik alá. Így többek között vákuumban, alacsony hőmérsékleten, valamint a sugárzásnak kitett komponensek esetében elemi részecskékkel/ionokkal történő behatásoknak kitéve is ellenőrzik az egyes komponenseket. Természetesen ezek a körülmények azt is megkövetelik, hogy speciális, űripari felhasználásra kialakított alkatrészeket használjanak fel a műhold integrálása során.



9. ábra

A hőkamrás tesztek az űrbeli környezet viszontagságainak leképezésében játszottak szerepet.¹⁵ Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A megbízhatóságon kívül még egy fontos szempont szükségessé teszi a sokrétű tesztelést, ez pedig az űrszemét kérdésköre. Ugyanis a világűr felelős felhasználása érdekében gondosan ügyelni kell arra, hogy az egyes műholdküldetések lehetőleg minimális mennyiségű űrszemét generáljanak. Ez többek között azt is jelenti, hogy az egyes illékony vagy nem kellő megbízhatóságú anyagok nem alkalmazhatók egy komponensben sem. Továbbá arról is gondoskodni kell, hogy a műhold a misszió végén a Föld atmoszférájába belépve megsemmisüljön.

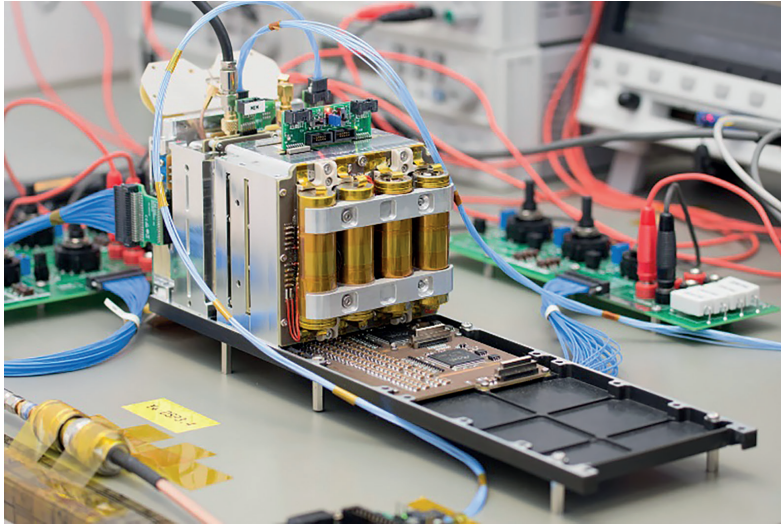
3. Missziótervezés

Egy sokoldalúan használható műholdplatform esetében a tervezési és fejlesztési folyamat korántsem ér véget magának a műholdnak a megalkotásánál. Szükség van számos olyan kiegészítő rendszerre és szolgáltatásra, amelyek azt biztosítják, hogy egyrészt a fejlesztési folyamat gördülékenyen folyjon – ami akkor kulcsfontosságú, ha a piacra bevezetve nagyobb példányszámban szükséges elkészíteni a műholdplatformot. Másrészt pedig abban nyújtanak segítséget, hogy a végfelhasználók (legyen szó tudományos kísérletről vagy ipari alkalmazásról) intuitív módon kezelni tudják a műhold által szolgáltatott adatokat.

¹⁵ A képen a 3U-s műholdplatform hőkamrás tesztelése látható.

3.1. Buszteszter

Az egyik fontos eszköz az úgynevezett buszteszter, amely egy egyedi fejlesztésű, földi kiszolgáló eszköz. Segítségével az egyes alrendszerek egyszerűen, egy, a platformra szabott eszközzel tesztelhetők. A buszteszter önmagában biztosítja a fizikai összeköttetést a tesztelendő alrendszer és a tesztelést irányító számítógép között. Használatával a fizikai interfész adott, így szabványos csatlakozók segítségével a komponens tesztelhető, nincs szükség minden egyes alkalommal és eszköz esetén további csatlakozók forrasztására, ami jelentősen leegyszerűsíti, illetve felgyorsítja a folyamatokat.



10. ábra

*A platform tesztelése során az adatok egyszerű hozzáférhetősége érdekében szükség van megfelelő interfészekre.
Forrás: a szerzők saját szerkesztése*

A buszteszter azonban nemcsak a fejlesztési, tesztelési folyamatot teszi gördülékenyebbé, hanem a pályára bocsátást megelőzően is hozzájárul ahhoz, hogy az utolsó ellenőrzések gyorsan, a műhold struktúrájának megváltoztatása nélkül elvégezhetőek legyenek. Ez azért kiemelten fontos, mivel egy esetleges módosítás azt eredményezné, hogy bizonyos tesztek ismételten el kellene végezni. A tesztek ismételt elvégzése jelentős időbeli késedelmet okozhat, ugyanis adott pályára olykor hónapokkal előre kell lefoglalni a hordozórakétát, illetve annak rakterében a POD-ot, illetve magát a startot is, így a megismételt tesztek okozta csúszás miatt az átfoglalások vesztesége is felmerülhet. A tesztek könnyítendő elterjedt megoldás még az úgynevezett Flat Sat-struktúra is, amelyben az alrendszereket nem integrálják a műhold mechanikai struktúrájába, az alrendszerek közötti kommunikációs csatornákat viszont kialakítják. Így az esetleges hibás komponensek könnyen azonosíthatók és cserélhetők anélkül, hogy a teljes műholdat újra össze kelljen állítani, ami további hibalehetőségeket, például mechanikai instabilitást idézhet elő.

3.2. Ökoszisztéma

Ahogy az előzőekben hangsúlyoztuk, a műhold platformjelleget szerves részét alkotja a felhasználók/kezelők számára kialakított interfész, amelynek segítségével a küldetés egyes paramétereit monitorozni, valamint módosítani lehet. Ezek a megoldások alapvetően két részre bonthatók: egyrészt a műveleti, másrészt pedig a tudományos operatív központra (Mission/Scientific Operative Centre, MOC/SOC).

Ezek elsődleges feladata, hogy a műhold és a földi állomás közti közvetlen kommunikáció eredményét (feldolgozva) megjelenítsék, valamint a kommunikációt irányítsák. Ehhez természetesen szükség van arra, hogy a – küldetésenként általában a Föld több pontján elhelyezkedő – földi állomások jele egy központi szerverhez eljusson, amely így konzisztensen tudja azokat a felhasználók számára megjeleníteni.

A két funkcionalitás elkülönítésére abból kifolyólag volt szükség, mivel általában az üzemeltetést, illetve a küldetés tudományos (vagy technikai) célját nyomon követő szakemberek különböznek, sőt akár más vállalat/kutatóintézet kötelékében munkálkodnak, amennyiben egy konzorciumról van szó – ez pedig korántsem ritka komplex űripari projektek esetében. Ezért a tudományos operatív központ kizárólag a telemetria megjelenítésére és elemzésére szolgál, de a műhold működését érintő parancsokat legfeljebb összeállítani és továbbítani képes az MOC számára. Ugyanis a misszió működtetésért, így a műhold vezérléséért, illetve a kiadott parancsok sorrendiségéért kizárólag a műveleti operatív központ felelős.

4. Konklúzió

Jelen cikk keretein belül ismertettük egy általánosan felhasználható CubeSat-műholdplatform fejlesztésének legfontosabb szempontjait. Ennek során áttekintettük a jelenleg megfigyelhető trendeket a kisműholdas küldetések tekintetében, valamint bemutattuk egy univerzálisan felhasználható, 3U-s platform egyes alrendszerének főbb funkcionálisitását, valamint a fejlesztés során felmerülő mérnöki kihívásokat is. Továbbá ismertettük, hogy miért rendkívül fontos a minőségbiztosítás szerepe űripari projektek esetében, mindezt pedig kiegészítettük a műholdhoz kapcsolt ökoszisztéma áttekintésével, amelynek segítségével az egyes küldetések kiszolgálása jelentős mértékben felgyorsítható, illetve hatékonyabbá tehető.

Felhasznált irodalom

- Bouwmeester, Jasper – Jian Guo: Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, 67. (2010), 7–8. 854–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.06.004>
- Crassidis, John L. – Landis F. Markley: *Unscented Filtering for Spacecraft Attitude Estimation*. Elérhető: www.acsu.buffalo.edu/~johnc/uf_att.pdf (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- CubeSat Design Specification*. Revision 12, California Polytechnic. Elérhető: www.cubesat.org/resources (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)

- Dudás, Levente – Pápay Levente – Seller Rudolf: Automated and remote controlled ground station of Masat-1, the first Hungarian satellite. In *24th International Conference Radioelektronika*. 2014. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/Radioelek.2014.6828410>
- Kálmán, Rudolf Emil: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82. (1960), 1. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- Kovács, Zoltán – Marosy Gábor – Horváth Gyula: *The thermal design of the thermal cutter of an antenna opening mechanism employed on a pico-satellite*. Budapest, 18th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems, 2012.
- Kulu, Erik: *Nanosatellite & CubeSat Database*. Elérhető: www.nanosats.eu/database (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- Lefferts, Eugen J. – Markley Landis – Malcolm D. Shuster: Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 5. (1982), 5. 417–429. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.56190>
- Swartwout, Michael: *CubeSat Database*. Elérhető: <https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/home/cubesat-database> (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- VanDyke, Matthew C. – Jana L. Schwartz – Christopher D. Hall: *Unscented Kalman Filtering for spacecraft attitude state and parameter estimation*. Advances in the Astronautical Sciences, AAS-04-115, 2004. Elérhető: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.5877&rep=rep1&type=pdf> (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)
- Virgili-Llop, Josep – Polat Halis – Romano Marcello: Survey, Statistical Analysis and Classification of Launched CubeSat Missions with Emphasis on the Attitude Control Method. *Journal of Small Satellites*, 5. (2016), 3. 513–530. Elérhető: https://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/50873/MR36_Survey-Statistical-Analysis-and-Classification-of-Launched-CubeSat-Missions-with-Emphasis-on-the-Attitude-Control-Method3.pdf?sequence=1&is-Allowed=y (A letöltés dátuma: 2019. 11. 01.)



Szűcs Viktor,¹ Gajdács László²

A 3D nyomtatás lehetőségei a repülőgépiparban

A technológiai fejlődés területén az innováció egy új arculata mutatta meg magát. A 3D nyomtatás korunk egyik legforradalmibb gyártástechnológiai közé sorolható, mindazonáltal története már az 1980-as évekre is visszavezethető. Olyan események eredményezték a fellendülést, mint a 3D nyomtatáshoz kapcsolódó szabadalmak lejáratása, illetve az Ipar 4.0-nak nevezett ipari forradalom jelensége. A technika által kínált lehetőségeket nemzetközi szinten több különböző repülőgépipari vállalat is kihasználta. Elterjedését követően olyan cégek és vállalatok kezdték el nagymértékben alkalmazni a 3D nyomtatást, mint az Airbus vagy a Boeing. Cikkünkben a technológia nemzetközi felhasználásán túl, az általunk készített pilóta nélküli légi járműbe integrált szenzorcsatorna elkészítését szeretnénk bemutatni, amely egy igazán érdekes példája a 3D nyomtatási technológia hazai szintű felhasználásának.

Kulcsszavak: 3D nyomtatás, repülőgépipar, UAV, szenzorcsatorna

Possibilities of 3D Printing in the Aircraft Industry

In the field of technological development, a new image of innovation has emerged. 3D printing is one of the most revolutionary manufacturing technologies of our time, yet its history can be traced back to the 1980s. Events such as the expiration of patents related to 3D printing and the phenomenon of an industrial revolution called Industry 4.0 led to a boom. The opportunities offered by the technology have been exploited internationally by several different repertoire companies. Following its spread, companies such as Airbus or Boeing began to make extensive use of 3D printing. In our article we would like to present, in addition to the international use of the technology, the construction of a sensor channel integrated in our unmanned aerial vehicle, which is a really interesting example of the use of 3D printing technology at the domestic level.

Keywords: 3D printing, aircraft industry, UAV, sensor channel

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, BSc egyetemi hallgató, e-mail: szucsviktor69@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9408-0360>

² Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, kiemelt gyakorlati oktató, e-mail: gajdacs.laszlo@uni-nke.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2334-6859>

1. Bevezetés

A 3D nyomtatás által kínált lehetőségek fellendülése a szabadalmak egy részének lejáratának tudható be, és így számos 3D nyomtatással kapcsolatos technológia vált elérhetővé. Már nemcsak a feltalálók és csapataik dolgozhatnak az eszközzel, hanem az egyetemi tanárok, hallgatók, amatőr mérnökök, illetve azok is, akik hobbicélből szeretnék üzni ezt a tevékenységet.³

A technológia közel 40 éve létezik, amelyről már annak idején is forradalmi újításként beszéltek. A gyors fejlődése a reményektől eltérően elmaradt, részben a technológia bonyolultsága, részben az akkor megfizethetetlen eszközök miatt. A fellendülést a szabadalmak lejáratán túl a digitalizáció jelentette. Az újabb ipari forradalom, azaz az Ipar 4.0 jelenséget követően a piaci előrejelzések is optimistán álltak a 3D technológia fejlődéséhez.⁴

Az elmúlt 5–6 évben a világ repülőgéppalkatrész-gyártó cégei, illetve azok vállalatai ráeszméltek a 3D gyártástechnológiában rejlő potenciálra, így az évek során fokozatosan egyre nagyobb mértékben használták ki a szóban forgó lehetőségeket. A kezdeti időben a 3D nyomtatás csupán a számítógépen megtervezett tárgyak vizualizálására szolgált, de ahogy fejlődött a technológia (nőtt a sebessége, javult a felbontása, és új, az iparban használható alapanyagok jelentek meg), egyre több helyen bukkantak fel a 3D nyomtatott tárgyak. Mára pedig kiérdemelte a helyét a gyártási technológiák sorában.

2013-ban nagy áttörést ért el Kína, amikor a repülőgépek öntött titán alkatrészeit megpróbálták 3D nyomtatott anyagokkal helyettesíteni. A kivitelező cég az AVIC Laser volt, amely az AVIC Heavy Machinery leányvállalata. Kína felismerte a gyártástechnológia anyagi előnyeit. Az eredeti titán alkatrészek költségeinek csupán 5%-át teszik ki a 3D nyomtatott alkatrészek előállítási költségei. Ez számokban kifejezve (amerikai dollárba átváltva) 4 millió dolláros költség helyett, közel 210 000 dollár. Anyagvizsgálati szempontból is kifizetődő volt, hiszen a technológia lehetővé tette a nagyméretű strukturális elemek nyomtatását is titánötvözetből. Jelenleg a cég hét különböző repülőgéptípushoz gyárt alkatrészt az említett forradalmi módszerrel, köztük a Y-20 stratégiai teherszállító repülőgéphez és a C919 utasszállítóhoz.⁵

2016-ban létrejött a világ legnagyobb 3D nyomtatott repülőgép-alkatrésze.⁶ Az Airbus,⁷ az Autodesk⁸ és az APWork⁹ kooperációjával kifejlesztettek egy válaszfalat, amely elválasztja az utasteret a repülőgép konyhájától, valamint az utaskísérők felhajtható ülései szintén ezen a falon vannak rögzítve. A fal nagyon nehezen volt megtervezhető és legyártható, mivel helyet kellett adnia a vészhelyzet esetén használt hordálynak. A 3D nyomtatással bonyolult struktúrák megtervezése nem jelentett gondot a cégek számára, így a lézeresen nyomtatott, titánból készült válaszfal könnyedén elkészülhetett.¹⁰ Nemcsak a tervezés gördülékenységét befolyásolhatja a 3D nyomtatás, hanem az anyag minőségét is. A legyártott válaszfal közel 50%-kal könnyebb volt, mint a korábbi változatok, ráadásul erősebb is. A csökkentett súly

³ *Hogyan működik az asztali 3D nyomtató?* Tone Partners.

⁴ Sági Gyöngyi: *Mitől lesz bomba üzlet a 3D nyomtatás?* Digitrend-i, 2019.

⁵ *3D nyomtatás a kínai repiparban.* Haditechnikai Kerekasztal, 2013.

⁶ *A világ legnagyobb, 3D nyomtatott repülőgép alkatrésze.* CNC Media.

⁷ Francia repülőgépgyártó vállalat.

⁸ Amerikai 2D, illetve 3D tervezőszoftverekkel foglalkozó vállalat.

⁹ Német 3D technológiával foglalkozó vállalat.

¹⁰ Ken Micallef: *Airbus Continues to Innovate Bionic Design for Future Sustainable Flights.* Redshift by Autodesk, 2019.

környezetvédelmi szempontból is előnyös helyzetbe hozta a gyártástechnológiát. A súlyvesztés alacsonyabb üzemanyag-fogyasztást igényelt, ami alacsonyabb károsanyag-kibocsátást (CO₂) eredményezett. Jelenleg a cég az A320 repülőgépekbe integrálta a válaszfalakat, de nem kizárt, hogy a jövőben több repülőgép is új, 3D nyomtatott falakat fog kapni.¹¹



1. ábra

A válaszfal és a rá rögzített utaskísérő székek (A320). Forrás: Airbus A320 3D Printed Bionic Wall Picture.

A General Electric 2017-ben kezdte meg a repülőgép külső alkatrészei helyett a repülő hajtóművének forradalmasítását. A légsavaras gázturbinás hajtóműnek több mint 30%-a a korábban említett additív gyártástechnológiával készült.¹² 3D nyomtatással hozták létre például a motor fogaskerék-hajtóművét, valamint az égésteret is. Az eszköz 1300 lóerővel, valamint 16:1 teljes nyomásviszonnyal rendelkezik. Ezenfelül a csökkentett súlyából adódóan 15%-kal kevesebb üzemanyagot is használ. A hajtómű 2018-ban került használatba a Textron Aviation vállalat Cessna Denali nevű repülőgépében.¹³

2. A meteorológiai adatgyűjtés lehetősége UAV-eszközön¹⁴

Munkánkban a 3D gyártástechnológia segítségével élve bizonyítjuk be a tényt, miszerint az időjárás-előrejelzés adatgyűjtésének egyik lehetséges módja egy pilóta nélküli légi járműbe (UAV)¹⁵ implementált szenzorcsatorna alkalmazása. A csatorna használatával nemcsak

¹¹ Airbus Uses Autodesk to Create a Space-Saving 3D Printed Organically Structured Dividing Wall. 3Dprint.com.

¹² A repülőgép hajtóműveket is elérte a 3D nyomtatás. Gyártástrend, 2017.

¹³ Andrew Moseman: GE Made a Real 3D-Printed Plane Engine and Here's a Gorgeous Look at It. Popular Mechanics, 2017.

¹⁴ Bottyán Zsolt: A közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításának kérdései. In Szilvássy László (szerk.): Repüléstudományi Szemelvények. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2017. 75–98.

¹⁵ Unmanned Aerial Vehicle.

a numerikus adatok pontosítása érhető el, hanem a légi időjárás felderítésében is nagy szerepet játszhat. A repülésbiztonság megnövelése, illetve az előrejelző modellek valós idejű hibájának feltérképezése is része az UAV által végzett meteorológiai felderítés előnyeinek.

Ezen eszközön alkalmazott szenzorcsatornának rendelkezni kell legalább hőmérséklet, statikus légnyomás és légnedvesség mérésére alkalmas szenzorokkal. Az érzékelők legfontosabb feladata a minél gyorsabb mérések végrehajtása, hiszen az UAV mind horizontálisan, mind vertikálisan komoly sebesség-, illetve helyzetváltozásokon megy keresztül. A lassabb mérés komolyan befolyásolhatja az előrejelzések pontosságát. Ebből az okból kifolyólag szükséges feltétel, hogy a berendezések képesek legyenek legalább 10 Hz-es frekvenciával elvégezni az adott mérési folyamatokat. A fedélzet további berendezései (GPS-pozíció, IAS) által végzett adatgyűjtéssel közvetlenül számíthatók az adott helyen a 3D-s szélvektorok is.

Adódik a kérdés, hogy mi az a méréshatár, ami elegendőnek bizonyulhat egy pontos mérés elvégzése kapcsán. Hőmérséklet esetében 0,2–0,3 °C, statikus nyomás mérésekor 0,2–0,3 hPa. A levegő relatív nedvességével kapcsolatos adatok gyűjtése során 5–6%-os méréshatár-pontossággal célszerű számolni.

Az említett célra alkalmazandó UAV-eszköz legyártásánál figyelembe kellett venni a szenzorrendszer, illetve a szenzorcsatorna méreteit és tömegét, hogy minimálisan képes legyen 0,5–1,5 órát a levegőben tartózkodni, valamint legalább 0,5–3 kg hasznos tömeget szállítani. A 3D nyomtatási technológia egyik legnagyobb előnye pont a hagyományos alkatrészek súlyának jelentős csökkentésében rejlik. Cikkünkben nem a predikció metódusát szeretnénk kifejteni, hanem az UAV merevszárnyú eszközön alkalmazott levegőcsatorna gyártástechnológiáját, valamint gyártásának folyamatát.

3. A legyártott mintadarab fedélzetre történő integrálása merevszárnyas UAV-eszközön

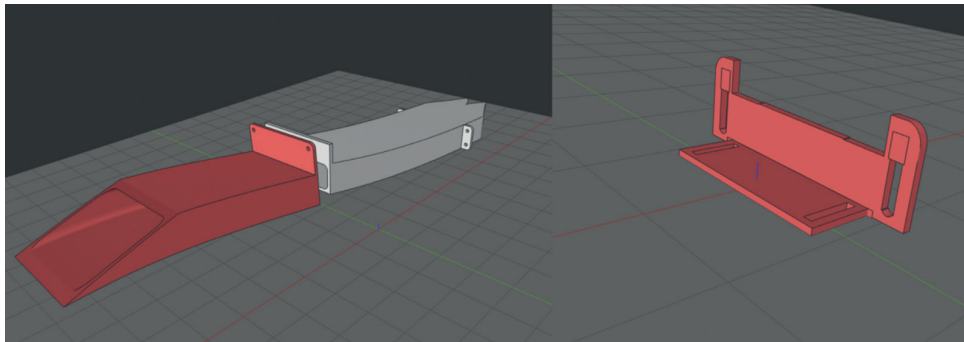
Az UAV-be integrálható szenzorcsatorna gyártása, majd integrálása több lépcsőből épült fel. Ez a hosszadalmas folyamat magában foglalta a szükséges 3D szoftver meghatározását, a levegőcsatorna áttervezését,¹⁶ a megfelelő szoftverbeállítások megalkotását, a próbatetek kinyomtatását, majd tesztelését; a kész termékek utómunkálatait; végezetül pedig az összerakott szenzorcsatorna fedélzetre történő implementálását. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy a fejezetben szereplő csatorna az úgynevezett FDM (Fused Deposition Modelling) módszerrel készült.¹⁷

Első lépésként programról programra kutattunk, mígnem megtaláltuk a megfelelő 3D szoftvert, amely nemcsak egy „slicer”, azaz nemcsak arra jó, hogy feldarabolja a kívánt testet, hanem minimális áttervezési lehetőségeket is biztosít. Ez a slicing engine arra használatos elsősorban, hogy a háromdimenziós fájlt (leggyakrabban STL-fájlt) felbontja a nyomtató által is értelmezhető utasításokra. A folyamat röviden a nyomtatandó tárgy felbontását jelenti (körülbelül 0,05–0,4 mm vastagságú szeletekre), és ezeket lefordítja a nyomtató extruder fejének, illetve tárgyasztalának X, Y és Z tengely mentén való mozgására.¹⁸

¹⁶ Az alapsémát illetően fontos kiemelni, hogy az eredeti elem teljes körű megtervezése nem a mi eredményünk. A mi dolgunk az adott séma átdolgozása volt.

¹⁷ A 3D nyomtatásról. 3D nyomtató Shoppe.

¹⁸ A Replicator G és a Skeinforge használata. 3D nyomtató Shoppe.



2. ábra

Az eredeti légcsatorna, valamint az említett 3. elem (L fül). Forrás: Szűcs Viktor

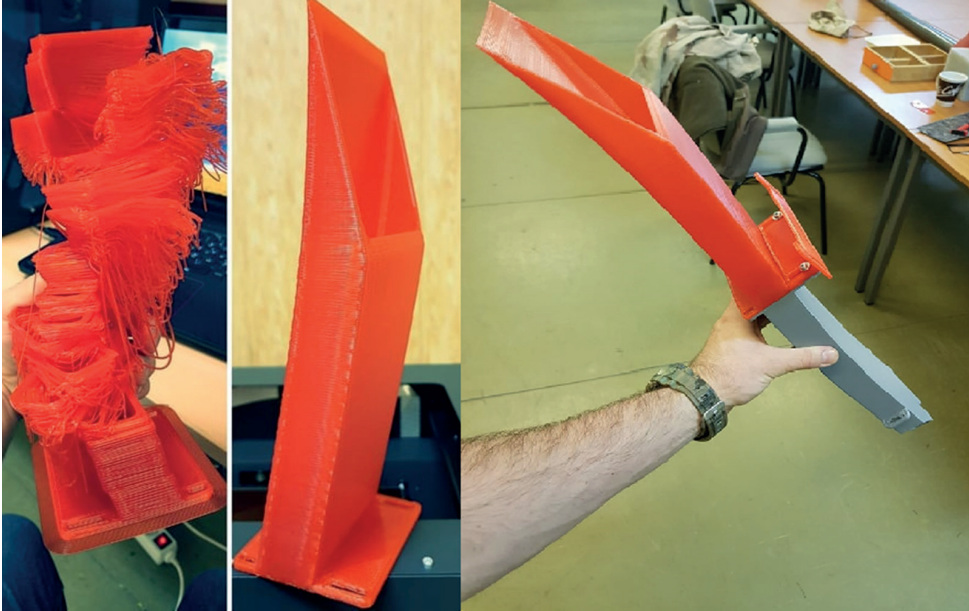
A Matter Hackers Matter Control nevű szoftver segítségével sikerült az alapsémát olyan módon átalakítani, hogy az beilleszthetővé vált a légi jármű sárkányszerkezetébe. Az alapséma kezdetben két részből állt: egy első és egy hátsó részből. Ezt követően a program segítségével eltávolítottuk a felesleges elemeket a testről, 10-15%-kal megnöveltük annak hosszát, valamint létrehoztunk egy harmadik, „L” betűre hasonlító részt is. Ez a rész szolgálja a fő rögzítési pontot a szenzorcsatorna, valamint a légi jármű között.

Amikor befejeződtek a munkálatok a 3D tervezéssel, megkezdődhetett a megfelelő beállítás megválasztása. A 3D szoftver több lehetőséget is biztosított arra, hogy teljes mértékben megvalósítsa a felhasználó elképzeléseit. Az első problémába akkor ütköztünk, amikor meghatároztuk a kellő rétegvastagságot. A 3D nyomtatás során a rétegvastagság befolyásolja a legtöbb tényezőt, attól függ a nyomtatás időtartama és a test minősége is.

A rétegvastagság határozza meg, hogy a tárgyfelbontáskor (azaz a slicing engine alkalmazása során) egy réteg milyen vastag legyen mm-ben. Minél kisebb az érték, annál aprólekosabb lesz egy réteg, és annál kevésbé fognak látszani az átmenetek. De az átmeneteket bizonyos esetben felületkezeléssel (acetonnal, akrilfestékkel) is el lehet tüntetni, ezért nem feltétlen szükséges mindig alacsony rétegvastagságot választani. Az alapértelmezés szerinti érték 0,27 mm, ami sok esetben (főleg nagyobb tárgyaknál) már elegendő minőséget biztosít.

Szerencsére a csatorna mérete lehetőséget biztosított számunkra, hogy magasabb rétegvastagságot használjunk, ezzel komoly órákat tudtunk megtakarítani. A tökéletes eredmény elérése érdekében a nyomtató fűvókáját is cserélni kellett. A nyomtatás során a 0,4 mm-es rétegvastagságot választottuk, amely idő-minőség arányban a legjobbnak bizonyult.

Ezt követően sorozatosan készültek a hibás termékek, azonban a probléma forrása már nem a rétegvastagságban volt keresendő. A test az első két-három órában tökéletesen készült, utána viszont szétesett (3. ábra). Ismételten megvizsgáltuk a nyomtató beállításait, és arra jutottunk, hogy feltehetően a tálcahőmérséklet, valamint a fűvóka melletti ventilátor helytelen beállítása volt a zavaró tényező. A tálcát tíz Celsius-fokkal (60-ról 70-re) melegítettük, a ventilátort gyorsabb mozgásra állítottuk, hogy az olvadt műanyag a lehető leghamarabb megkeményedjen. A Feedrate-beállításokon is változtattunk (a program legmagasabb sebességét 25%-kal csökkentettük), mivel a tárgyunk dőlésszöge viszonylag nagy volt, így ez a döntés helyénvalónak bizonyult.



3. ábra

A hibás és a javított első rész, valamint a kész csatorna. Forrás: Szűcs Viktor

A hibaelhárítást követően a jelenlegi beállítások megfelelőnek látszottak. Felfedeztük a testen, hogy a fúvóka gyakran magával húzza az olvadt műanyagot, mintegy pókhálószerű képződményt létrehozva a test belsejében, illetve elvéve annak külsején.¹⁹

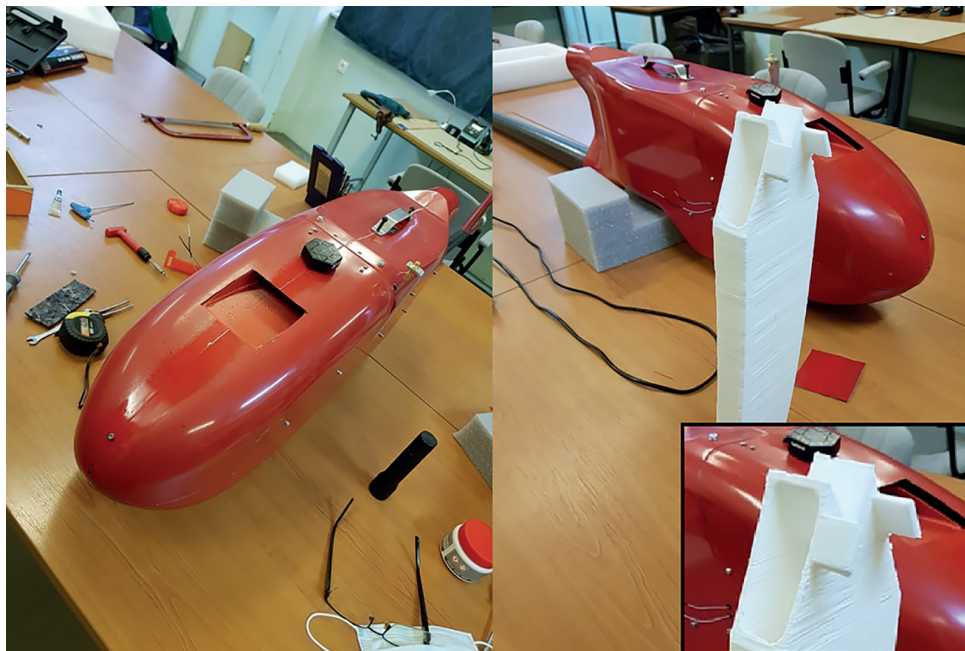
A retractionfunkció azt jelenti, hogy a nyomtató extrudere „visszaszívja” a szálát extrudálás nélküli mozgásoknál és egyéb esetekben, amikor nem történik nyomtatás. Ha a firmware-ben szoftveresen már be van kapcsolva a Deprime (a műanyag sajtolás nélküli fejmozgások, illetve más esetekben előforduló szálhúzást csökkentő) funkció, akkor javasolt ezt az értéket 0-ra állítani, de kísérletezhetünk vele, ha azt tapasztaljuk, hogy nagyon „szöszös” a nyomtatás, vagy a külső peremeknél üres részek vannak. Munkánk során 1 mm-re állítottuk a visszahúzás mértékét, azaz a fúvóka a mozgás időtartamára 1 mm-re visszahúzza a filamentszálat azért, hogy ne vigye magával mozgás közben. A slicingszoftver, amit mi alkalmaztunk, nem élt a Deprime-funkció lehetőségeivel, így manuálisan állítottuk be ezt a funkciót.

A következő lépcsőfok a kész 3D test kinyomtatása volt, az eljárás időigényessége miatt azonban a szenzorcsatorna teljes elkészítése több napba telt. Ez 24 óra nyomtatási időtartamot jelentett, amelyből 13 órát a hátsó rész, 9 órát az első, illetve 2 órát az L fül vett igénybe. A kész termék a 3. ábra jobb oldalán látható.

Miután végbement a nyomtatás, már csak a szénszálas anyaggal borított sárkányszerkezet orrát (4. ábra), valamint a hátsó részét kellett két ponton kivágni, amire azért volt szükség, hogy a levegő a repülő orrán keresztül jusson be a szenzorcsatornába, illetve hogy a hátsó részen el is tudja hagyni azt. A beillesztés során kiderült, hogy a csatorna további nyújtást igényelt,

¹⁹ Print Troubleshooting Pictorial Guide. *RepRap*.

valamint a hátsó elem megfelelő rögzítéséhez szükséges volt további két fül megtervezése is (4. ábra jobb alsó sarka). Miután a tervezés és az új, javított hátsó elem nyomtatása megtörtént, sikeresen beillesztettük a már szenzorokkal ellátott, 3D nyomtatási eljárással készült levegőcsatornát.



4. ábra

Az UAV-be integrált kész levegőcsatorna (bal), illetve a javított hátsó elem (jobb). Forrás: Szűcs Viktor

4. Összegzés

A 3D nyomtatás technológiája évről évre fokozódó térhódítása elérte a repülőgépeket is. A gyártástechnológia komoly változásokat hozott el mind anyagi szempontból, mind tervezés/legyártás szempontból az ipart illetően. Cikkünkben kiemeltük a 3D nyomtatás előnyeit nemzetközi, illetve hazai szinten. Nemzetközi szinten kínai, amerikai cégek nyomtatott repülőgép-alkatrészeit helyezték előtérbe, míg hazai szinten egy saját projekttel demonstráltuk a 3D nyomtatás lehetőségeit. A légi időjárás felderítésének folyamatát könnyítő eszközzel, egy nyomtatott szenzorcsatornával mutattuk be a gyártástechnológia számos pozitívumát, illetve negatívumát. Célunk a 3D nyomtatás létjogosultságának kiemelése a repülőgépek tervezésénél és gyártásánál, illetve megismertetni az olvasókkal a technológiában rejlő potenciált.

Köszönetnyilvánítás

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen – VOLARE” című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatás a fenti projekt „UAS_ENVIRON” nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.

Felhasznált irodalom

3D nyomtatás a kínai repiparban. Haditechnikai Kerekasztal, 2013. Elérhető: <https://htka.hu/2013/06/01/3d-nyomtatás-a-kínai-repíparban/> (A letöltés dátuma: 2020. 06. 13.)

A 3D nyomtatásról. 3D nyomtató Shoppe. Elérhető: <https://3dnyomtato.shoppe.hu/pages/a-3d-nyomtatásról> (A letöltés dátuma: 2020. 06. 20.)

Airbus A320 3D Printed Bionic Wall Picture. Elérhető: www.innofrator.com/wp-content/uploads/2017/08/Airbus-Bionic-Partition-picture-8-web-1-1024x518.jpg (A letöltés dátuma: 2020. 06. 21.)

Airbus Uses Autodesk to Create a Space-Saving 3D Printed Organically Structured Dividing Wall. 3Dprint.com. Elérhető: <https://3dprint.com/109310/airbus-autodesk-dividing-wall/> (A letöltés dátuma: 2020. 06. 16.)

A Replicator G és a Skeinforge használata. 3D nyomtató Shoppe. Elérhető: <https://3dnyomtato.shoppe.hu/pages/a-replicator-g-program-es-a-skeinforge-hasznalata#ch2> (A letöltés dátuma: 2020. 06. 21.)

A repülőgép hajtóműveket is elérte a 3D nyomtatás. Gyártástrend, 2017. Elérhető: http://gyartastrend.hu/muveltmernok/cikk/a_repulogep_hajtomuveket_is_elerte_a_3d_nyomtatás (A letöltés dátuma: 2020. 06. 16.)

A világ legnagyobb, 3D nyomtatott repülőgép alkatrésze. CNC Media. Elérhető: www.cnc.hu/2018/03/a-vilag-legnagyobb-3d-nyomtatott-repulokep-alkatresze/ (A letöltés dátuma: 2020. 06. 15.)

Bottyán Zsolt: A közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításának kérdései. In Szilvássy László (szerk.): *Repüléstudományi Szemelvények.* Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2017. 75–98.

Hogyan működik az asztali 3D nyomtató? Tone Partners. Elérhető: www.tonerpartners.hu/blog/hogyan-m-kodik-az-asztali-3d-nyomtato-alapveto-3d-nyomtatasi-technologi-ak-25590hu39018/ (A letöltés dátuma: 2020. 06. 15.)

Micallef, Ken: *Airbus Continues to Innovate Bionic Design for Future Sustainable Flights.* Redshift by Autodesk, 2019. Elérhető: www.autodesk.com/redshift/bionic-design/ (A letöltés dátuma: 2020. 06. 15.)

Moseman, Andrew: *GE Made a Real 3D-Printed Plane Engine and Here's a Gorgeous Look at It.* Popular Mechanics, 2017. Elérhető: www.popularmechanics.com/flight/news/a27495/ge-3d-printed-aircraft-engine/ (A letöltés dátuma: 2020. 06. 17.)

Print Troubleshooting Pictorial Guide. RepRap. Elérhető: https://reprap.org/wiki/Print_Troubleshooting_Pictorial_Guide#Material_Feed (A letöltés dátuma: 2020. 06. 30.)

Sági Gyöngyi: *Mitől lesz bomba üzlet a 3D nyomtatás?* Digitrend-i, 2019. Elérhető: <https://digitrendi.hu/mitol-lesz-bomba-uzlet-a-3d-nyomtatás/> (A letöltés dátuma: 2020. 06. 18.)

Menyhárt József,¹ Gerald Mies,² Komlósi István³

Measurement Chamber Design for Testing Batteries of the Electric Vehicles

Crucial factors with respect to modern autonomous vehicles include reliability and design. Researchers and engineers strive to increase the number of vehicles over the latest possibilities both in industrial and in military applications. A number of modern batteries are available on the market for the electric autonomous vehicles. The authors suggest the use of test chambers to investigate optimal battery use and performance in vehicles. The results of the theoretical research suggest that the use of test chambers during battery management system development is necessary.

Keywords: test, measurement chambers, autonomous vehicles, unmanned aerial vehicles, battery management systems

Tesztkamrák tervezése elektromos járművek akkumulátorainak teszteléséhez

A modern autonóm járművek megbízhatósági kérdései elsődleges fontosságú tervezési faktorok. Ezen járművek a kutatóknak és mérnököknek köszönhetően egyre nagyobb számban jelennek meg ipari és haditechnikai alkalmazásokban. Kereskedelmi forgalomban már elérhetőek modern akkumulátorrendszerek autonóm elektromos járművek számára. A szerzők a tesztkamrák használatát javasolják az akkumulátorok optimális használatának és teljesítményének meghatározásához. A kutatás elméleti eredményei alátámasztják azon hipotézist, miszerint a tesztkamrák használata szükséges az akkumulátorrendszerek fejlesztési fázisában is.

Kulcsszavak: teszt, mérőkamrák, autonóm járművek, pilóta nélküli autonóm járművek, akkumulátorfelügyeleti rendszerek

¹ Associate Professor University of Debrecen Faculty of Engineering, e-mail: jozsef.menyhart@eng.unideb.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5541-7565>

² PhD student, Óbuda University Doctoral School of Safety and Security Sciences, e-mail: gerald.mies@t-online.de, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6332-995X>

³ PhD student, Óbuda University Doctoral School of Safety and Security Sciences, e-mail: komlosisti@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4161-794X>

1. Introduction

Nature created cutting-edge, complex and efficient systems in billions of years. Modern and intelligent life is among the results. Consequently, mankind strives to either replicate or learn from nature to develop technological systems that are vital to improve social welfare.

In addition to the physical existence of manufactured goods or products and processed designs, the virtual world also gains benefits and tries to replicate the best creation of nature. The aim of AI, for example, is to gain the best of what computing power has to offer with the capabilities of human intelligence and experience. By human intelligence, one refers to the combination of abilities such as learning, communication through language, reasoning, dealing with data, and abstract thinking.

AI systems are varying the way industry manufactures goods and services, as well as the organisation of the market. The innovation and maintenance management are directly impacted by the rise of automated, autonomous or smart technologies and artificial intelligence. The trend is that the technical system landscape is rapidly changing; companies and users must adapt to these dynamically developing machines.

New markets are emerging and vanishing at a significant rate due to such advanced technologies as AI and robotisation. Now, faster than ever, the technology is changing the topography of vehicles on a global scale. According to recent studies, AI can open more ways in improving efficiency of electric vehicles and robots. There is a dilemma; current batteries would not operate under the right efficiency and safety. Therefore, a new technique in battery management systems is vital. Nevertheless, in the first step the engineers and scientists must make tests on the batteries. Due to the safety risk, the test chambers are a necessary part of the modern test engineering life.

The battery safety testing processes provide the right safety and reliability of the batteries, which are used in dynamically growing areas such as transportation, renewable energy, grid storage, grid balancing, backup applications and uninterruptible power supplies (UPS). The safety and reliability of batteries are a critical aspect of electric cars (passenger and logistic), railway, marine and aerospace applications. The safety, reliability and, consequently, the quality of your battery provide multiple benefits for manufacturers in the business. The battery manufacturers must stay ahead of the development of the battery cells. The battery testing laboratories need to be fully equipped to support various tests. The most important tests are the following:⁴

- performance testing;
- abuse testing;
- environmental tests;
- special environmental test;
- transport tests.

The authors aim at introducing the application of test chambers in diagnostics of the battery technical status and to segment technical parameters of the batteries often measured and available for further analysis.

⁴ 'Battery Safety Testing – Development and validation testing to current and emerging standards,' TÜV SÜD.

This article summarises the most popular batteries in the drive chains applied in both military and non-military vehicles and robots. It introduces possible applications of test chambers in safety and security sciences.

2. Related works and preliminaries

An Unmanned Ground Vehicle (UGV) runs while contacting the ground without any onboard human control or driver. From another point of view, the UGV is a special ground-based mechanical robot/vehicle that can sense and interact with its environment. UGVs have several fields of use where a human operator may be dangerous or difficult to use. The vehicle has a lot of different sensors and actuators to check the environment and they can make decisions autonomously about its behavior or forward the information to a human operator. The operator can control the vehicle through a teleoperation system. The unmanned robotics area is rapidly growing in military and non-military fields, too.⁵

- battery charging;
- battery swap;
- automatic and opportunity charging;⁶
- automatic battery swap.

The new technologies may reduce the human factor in battery management. These technologies may provide better efficiency for technical systems, but the safety factor is very critical.⁷ Crucial batteries include:⁸

- Lithium Ion Batteries;
- U-Charge Lithium Iron Magnesium Phosphate;
- VRLA lead-acid;
- Nickel–cadmium battery;
- Nickel Metal Hydride Battery;
- Lithium LiFePO₄ battery;
- Lead Acid Battery.

Most of the hobby robotics batteries operate with lithium-based batteries and are marketed with C rating. This rating is a crucial multiplier used for the capacity of batteries to show the maximum continuous current discharge of the batteries.⁹

Other important power sources are depicted in the UGV Database¹⁰ as:

- batteries 24 V;
- batteries 36 V DC;
- batteries 14.5 V;

⁵ J. Carlson, R. Murphy and A. Nelson, 'Follow-up Analysis of Mobile Robot Failures,' IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings. ICRA '04. 2004.

⁶ 'AGM Battery Guide,' Canbat.

⁷ 'Battery Safety Standards – The Changing Requirements for Batteries,' Lithium Werks.

⁸ 'AGM Battery Guide,' 'Large Lithium Ion Batteries for Material Handling Equipment and Automated Guided Vehicles (AGVs),' Lithium Werks.; 'Lead Acid Batteries,' Concordia University – Environmental Health and Safety.

⁹ 'UGV System Design: A Practical Approach,' SuperDroid Robots.

¹⁰ UGV Database, Michigan Technological University.

- batteries 48 V;
- 120 V AC or DC via tether;
- military batteries;
- lithium-polymer (LiPo) batteries.

3. Battery properties and measurements

The rising oil prices, the worldwide awareness of environmental crisis and in some cases the physical size of the vehicles increased the development of energy storage and special operation management systems. The batteries are the most popular energy sources for environment friendly vehicles and for robots. New modern batteries are less polluting, but their efficiency is still not acceptable, often and old combustion engine is a much better choice than an electric vehicle. The battery has the advantages of high working cell voltage, low pollution, low self-discharge rate, and high power density.¹¹

The State of Charge (SOC) is a key challenge for battery use. The SOC can describe the remaining capacity of the batteries or battery cells. This capacity is an indispensable part of the battery control strategy. The SOC can represent the battery performance, which is an important property of the vehicle's drive chain system. The accurate SOC is not just a battery protection property, but it can avoid deep discharge and also improve the battery life. It is important to mention that batteries are chemical energy storage sources, and the chemical energy cannot be accessed directly, this can be a dangerous part of the batteries. This fact hinders the estimation of the SOC of a battery. The right estimation of the SOC is a very complex task. The implementation of the right SOC strategy is not so easy, because battery models are limited and there are parametric uncertainties.¹²

The definition of SOC covers lot of other issues. Generally, the SOC of the battery is defined as a rate of its instantaneous capacity $Q(t)$ to the nominal capacity (Q_n). The nominal capacity is provided by the manufacturer and shows the result of the maximum amount of charge stored in the battery. The SOC can be defined as follows:¹³

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}. \quad (1)$$

Other mathematical methods about this problem:¹⁴

- Direct Measurement;
- No Load Circuit Voltage Method:

$$V_{oc}(t) = a_1 \cdot SOC(t) + a_0, \quad (2)$$

where a_1 is obtained from knowing the value of a_0 and $V_{oc}(t)$ at SOC = 100%, a_0 is the battery terminal voltage when the SOC is 0% and SOC(t) is the SOC of the battery at time t.

¹¹ W. Y. Chang, 'The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review,' *ISRN Applied Mathematics*, Volume 2013, pp. 1–7.; K. L. Man, C. Chen, T. O. Ting, T. Krilavičius, J. Chang and S. H. Poon, 'Artificial Intelligence Approach to SoC Estimation For Smart BMS.,' 'BU-903: How to Measure State-of-charge,' Battery University.

¹² Ibid.

¹³ Ibid.

¹⁴ Ibid.

- Terminal Voltage Method;
- Impedance Method;
- Impedance Spectroscopy Method;
- Book-Keeping Estimation;
- Coulomb Counting Method:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I(t)}{Q_n} \Delta t, \quad (3)$$

where $I(t)$ is the discharging current over time in order to estimate the SOC, Q_n is the nominal capacity, $SOC(t-1)$ is the previously estimated SOC value and Δt is the time change.

- Modified Coulomb Counting Method:

$$I_c(t) = k_2 I(t)^2 + k_1 I(t) + k_0, \quad (4)$$

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I_c(t)}{Q_n} \Delta t, \quad (5)$$

where k_2 , k_1 and k_0 are constant values obtained from the practical experimental data, and finally, is the nominal capacity of the battery provided by the manufacturer.

One of the significant users of the LiPo batteries are the unmanned aerial vehicles (UAVs). The electric propulsion and the onboard systems are normally supplied with energy using batteries. The UAV/UAS conceptual design and some aspects of the UAV airworthiness validation are thoroughly analysed and shown by Róbert Szabolcsi.¹⁵ The design of the UAV/UAS systems have an important criteria, which is often called 'minimum energy problem.' Szabolcsi outlined basic theoretical and practical issues for the design of the UAV automatic flight control systems based on LQR design methodology, and introduced several design examples for small UAVs.¹⁶

4. Failures affecting the technical status of the batteries

Failures can be classified into several classes. Physical failures are further classified into sensor, control system, power and communication failures, while human failures are design and interaction problems. We can find two sub-categories in interaction, which are the short failures and slips.¹⁷

¹⁵ R. Szabolcsi, *UAV/UAS rendszerek koncepcionális és előzetes tervezése, vizsgálata* (Budapest: Óbudai Egyetem, 2020).

¹⁶ R. Szabolcsi, *Pilóta nélküli légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei: Rendszertervezés és rendszervizsgálat* (Budapest: Óbudai Egyetem, 2020).

¹⁷ Carlson, Murphy and Nelson, 'Follow-up'; Jeffrey A. Kramer and Robin R. Murphy, 'UGV Acceptance Testing,' Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 6230 I, Unmanned Systems Technology VIII, 62300P (2006).

Table 1
Types of failures. Source: Carlson, Murphy and Nelson, 'Follow-up.'

Failures				
Physical	Human		Impact	Reparability
	Design	Interaction		
effector sensor control system power communications		Mistakes slips	non – terminal / terminal	field – repairable / non-field – repairable

- Control system: A robot subsystem including on-board computer, software by the manufacturer, and any remote operator control units (OCU).
- Effector: A device that performs actuation and any connections in connection with those components.
- Mistakes: human failures by fallacies in conscious processing.
- Slips: human failures by fallacies in unconscious processing.
- Power Failure.¹⁸

5. Test chambers

The undercharging, overcharging, overheating or damage in the separating membrane are common errors of lithium ion batteries that can generate safety problems. The safety risks associated with any of these errors range wide, and are specific to the product under test and/or development.¹⁹

Dozens of standards, UL and IEC specifications are available for testing batteries to ensure the survival of their daily operation including the use of environmental chambers to subject batteries to low and high temperature (often during charging and discharging process, too). Figure 1 represents some interesting information about the temperature and voltage connection of the batteries.²⁰

The temperature, charge/discharge rates and the depth of discharge have paramount importance in the life cycle of the battery cells. Depending on the aim of the tests, the temperature and the DOD should be controlled at a pre-defined reference level to have repeatable results, which can be compared with the standards.²¹

¹⁸ Carlson, Murphy and Nelson, 'Follow-up'; Jeffrey A. Kramer and Robin R. Murphy, 'UGV Acceptance Testing.'

¹⁹ Mark Chrusciel and Wayne Diener, 'Mitigating Risks of Battery Testing in Environmental Chambers.:', 'Electric Vehicle Battery Test Laboratory,' Proventia.; 'Battery Testing Chambers,' Cincinnati Sub-Zero.; 'Environmental Chambers for Battery Testing,' Cincinnati Sub-Zero.

²⁰ Ibid.

²¹ Ibid.

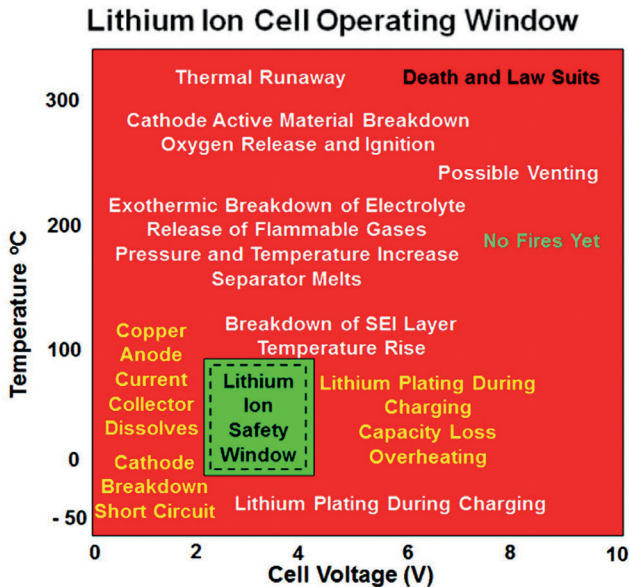


Figure 1

Lithium Ion Cell Operating Window. Source: Chrusciel and Diener, 'Mitigating risks.'

Some other tests contain humidity or vibration analysis about the battery cells. Common specifications for testing lithium ion cells are listed below:²²

- UL 1642 – General safety testing of Li-Ion Batteries;
- IEC 61960 – Safety standards for secondary lithium ion batteries;
- SAE J2464 – General guidelines for rechargeable energy storage;
- UN/DOT 38.3 – Standards for shipping lithium batteries;
- IEC 62281 – Safety of primary cells during shipment;
- UL 2580 – Batteries for use in Electric Vehicles;
- IEC 62660-2 – Reliability and abuse testing of secondary cells;
- IEC 62133 – Testing of secondary cells.

The right selection of the proper environmental test chamber is an important question for test engineers and the manufacturers. When the product being tested is a Li-Ion battery, there is a huge amount of information to consider. Significant considerations should be targeted at the level of safety required for the application by the end user. The manufacturers and test engineers must follow a lot of strict safety rules and regulations. The Li-Ion battery manufacturers have a proprietary chemistry and packaging which in turn carries its own risk during testing. These materials and process are very dangerous ones.²³

There are several hazard levels in connection with Li-ion batteries. One of the most important safety features incorporated into environmental test chambers for testing of

²² Chrusciel and Diener, 'Mitigating risks.'

²³ Chrusciel and Diener, 'Mitigating risks'; 'Electric Vehicle'; 'Battery Testing Chambers'; 'Environmental Chambers.'

batteries include temperature limited sheath heaters. Some heaters on environmental test chambers are Ni-Chrome (Ni-Cr) wire heaters. The surface temperature of these chambers is over 500 °C. These preventative measures include, but are not limited to, non-sparking fan blades and/or blower wheels, intrinsically safe barriers on all sensors (both temperature and humidity) to prevent the potential of high voltage pulses into the chamber through wires, and the removal of any internal chamber lights.²⁴



Figure 2
Battery Cell testing chamber (inside view) Source: 'Environmental Chambers.'

Another issue to consider is pressure compensation inside the chamber. The pressure at which gases are released from the battery during failure depends not only on the chemistry of the batteries. Most of the chamber manufactures have a standard pressure relief port on the chambers. This port allows the chamber to "breathe" to the environment for the expansion and contraction of the air within the conditioned workspace.²⁵

These gases are toxic, noxious or at the very least have an offensive smell and should be vented to the exhaust system. These are only some of the most important safety features. The different hazard levels define the list of special features that may be used during the tests. The test systems must include fire detection systems, gas monitors, door safety interlock switches, and a flushing system of N₂ or CO₂ to minimise fire if this is necessary.

²⁴ Ibid.

²⁵ Ibid.

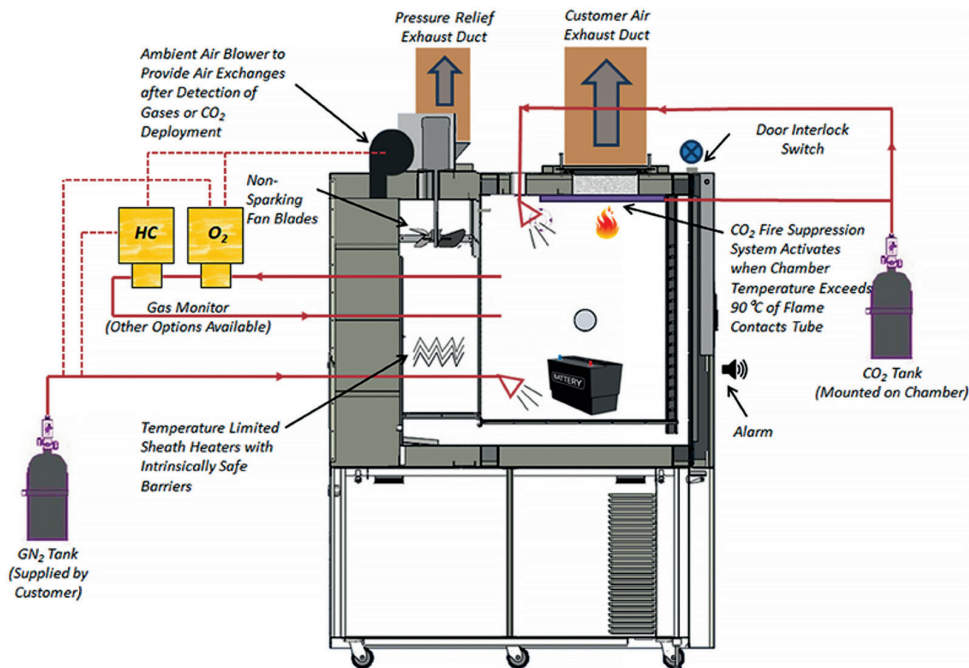


Figure 3

Battery Cell testing chamber features and options. Source: 'Environmental Chambers.'

Besides mitigating the safety risks, there are several other factors that should be considered in the selection of the right environmental test chamber. The questions are: "What type of control system will one need, and will it integrate with other equipment (like your cyclers)?" and "What type of refrigeration system will be required?" A compressor system that controls the temperature down to $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ may be preferred over cascade systems due to energy savings. Also, make sure that your system is sized well to handle your extra heat load. The humidity requirements are also a key point of the chambers. The users must make sure it is included up front. During the test, engineers must be sure that the points of temperature and humidity are obtainable.²⁶

It is a crucial aspect that in case of each battery, the manufacturer of the battery components evaluates their individual risks and failure modes (DFMEA or PFMEA). If the risk is unknown or difficult/impossible to define, it is necessary to design for the 'worst case' scenario. Based on this information the engineers can work with a chamber manufacturer to determine the proper safety requirements necessary in their application. The test engineers can provide feedbacks to the test chamber designers about the weakest or critical points of the chambers. Due to this continuous improvement, the reliability of the chambers can

²⁶ Ibid.

improve. In these years (2019), there are no available safety equipments, tools and battery chambers, as the risk may vary considerably by product design, build and battery chemistry.²⁷

Both the design of the mechanical part of the measurement chamber design and the charge and discharge processes can be modelled and simulated using reference,²⁸ whilst the measurement environment (i.e. temperature, pressure, gas presence and its concentrate) inside the measurement chamber can be simulated using reference.²⁹

6. Discussion and future work

The paper described the most important battery types of UGV and AGV systems. It introduced the most important battery properties, and gave a picture about the possibilities of State of Charge estimation. Regarding maintenance and management, a new operation management system is emerging, where more solution forms increase technical reliability. The developers and producers must provide opportunities to real time measuring systems and special test chambers.

The article introduces the most important standards about battery testing chambers and the most important risk aspects.

The latest or the best solution for developing and testing electric vehicle battery packs, cells and modules used in hybrid (HEV), plug-in hybrid (PHEV) and battery electric vehicles (BEV) is the modular EV battery test laboratory. The design of climatic battery test chamber meets all the requirements of module and full-size battery pack.³⁰

Acknowledgement

This research work has been supported by the EFOP-3.6.1-16-2016-00022 project, which is gratefully acknowledged by the authors. The project is co-financed by the European Union and the European Social Fund.

Bibliography

- 'AGM Battery Guide.' Canbat. Available: www.canbat.ca/agm-battery-guide (28. 12. 2018.)
- 'Battery Safety Standards – The Changing Requirements for Batteries.' Lithium Werks. Available: <https://lithiumwerks.com/battery-safety-standards-the-changing-requirements-for-batteries> (10. 10. 2020.)
- 'Battery Safety Testing – Development and validation testing to current and emerging standards.' TÜV SÜD. Available: www.tuvsud.com/en/industries/mobility-and-automotive/automotive-and-oem/automotive-testing-solutions/battery-safety-testing (02. 11. 2019.)

²⁷ Ibid.

²⁸ R. Szabolcsi, *Szabályozásmélet* (Budapest: Óbudai Egyetem, 2019).

²⁹ R. Szabolcsi, *Irányítástechnikai rendszerek tervezése és vizsgálata MATLAB környezetben* (Budapest: Óbudai Egyetem, 2020).

³⁰ 'Electric Vehicle.'

- 'Battery Testing Chambers.' Cincinnati Sub-Zero. Available: www.cszindustrial.com/Products/CustomDesignedChambers/BatteryTestChambers.aspx (15. 10. 2019.)
- 'BU-903: How to Measure State-of-charge.' Battery University. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge (17. 01. 2019.)
- 'Electric Vehicle Battery Test Laboratory.' Proventia. Available: www.proventia.com/modular_test_solutions/hybrid_electric_vehicle_battery_pack_test_laboratory (10. 10. 2020.)
- 'Environmental Chambers for Battery Testing.' Cincinnati Sub-Zero. Available: http://sales.cszproducts.com/literature/Battery_Test_Chambers_Brochure.pdf (02. 11. 2019.)
- Carlson, J. – Murphy, R. – Nelson, A.: 'Follow-up Analysis of Mobile Robot Failures.' IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings. ICRA '04. 2004. DOI: <http://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302508>
- Chang, W. Y.: 'The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review.' *ISRN Applied Mathematics*, Volume 2013, pp. 1–7. DOI: <http://doi.org/10.1155/2013/953792>
- Chrusciel, Mark – Diener, Wayne: 'Mitigating Risks of Battery Testing in Environmental Chambers.' Available: www.psirep.com/sites/default/files/MitigatingRisksBatteryTesting.pdf (10. 10. 2020.)
- Kramer, Jeffrey A. – Murphy, Robin R.: 'UGV Acceptance Testing.' Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 6230 I, Unmanned Systems Technology VIII, 62300P (2006). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.668929>
- 'Large Lithium Ion Batteries for Material Handling Equipment and Automated Guided Vehicles (AGVs).' Lithium Werks. Available: <https://lithiumwerks.com/solutions/material-handling> (28. 12. 2018.)
- 'Lead Acid Batteries.' Concordia University – Environmental Health and Safety. Available: www.concordia.ca/content/dam/concordia/services/safety/docs/EHS-DOC-146_LeadAcidBatteries.pdf (28. 12. 2018.)
- Man, K. L. – Chen, C. – Ting, T. O. – Krilavičius, T. – Chang, J. – Poon, S. H.: 'Artificial Intelligence Approach to SoC Estimation For Smart BMS.' Available: www.bpti.lt/uploads/Publikacijos/ARTIFICIAL%20INTELLIGENCE%20APPROACH%20TO%20SoC%20ESTIMATION.pdf (17. 01. 2019.)
- Szabolcsi, R.: *Irányítástechnikai rendszerek tervezése és vizsgálata MATLAB környezetben*. Budapest, Óbudai Egyetem, 2020.
- Szabolcsi, R.: *Pilóta nélküli légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei: Rendszertervezés és rendszervizsgálat*. Budapest, Óbudai Egyetem, 2020.
- Szabolcsi, R.: *Szabályzáselmélet*. Budapest, Óbudai Egyetem, 2019.
- Szabolcsi, R.: *UAV/UAS rendszerek koncepcionális és előzetes tervezése, vizsgálata*. Budapest, Óbudai Egyetem, 2020.
- UGV Database. Michigan Technological University. Available: <http://pages.mtu.edu/~jmkeith/arl/2005fall/UGVLIBRARY.pdf> (28. 12. 2018.)
- 'UGV System Design: A Practical Approach.' SuperDroid Robots. Available: www.superdroidrobots.com/product_info/UGV%20System%20Design%20with%20notes.pdf (28. 12. 2018.)



Beneda Károly Tamás,¹ Faltin Zsolt²

Tízéves a teljes hatáskörű digitális elektronikus hajtómű-szabályozó rendszerek fejlesztése a BME VRHT-n

A gázturbinás hajtóművek napjainkban már szinte kizárólagosan digitális elektronikus szabályozó rendszerrel (Full Authority Digital Electronic Control, FADEC) rendelkeznek, jobb pontosságuk, kisebb méretük, tömegük és karbantartásigényük miatt. A BME VRHT jogelődjén 2009-ben indult meg a TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű megalkotását és üzembe állítását követően a szabályozórendszer tervezése. A cikk bemutatja a fejlesztés főbb állomásait a kiinduló, valamint további típusokon (Deutz T216, PD-60R), a különféle alkalmazott szabályozási törvényszerűségeket (fordulatszám, hajtómű nyomás- és teljesítményviszony). Továbbá bemutatjuk azokat az algoritmusokat is (PID, lineáris kvadratikus és csúszómód-szabályozások), amelyeket FADEC-rendszereinkben kidolgoztunk. Munkánk egyik legnagyobb eredménye, hogy a gázturbinás sugárhajtómű próbapadján ezeket az algoritmusokat valós körülmények között is le tudjuk ellenőrizni.

Kulcsszavak: gázturbina, hajtómű-szabályozás, PID, LQ szervó, csúszómód-szabályozás

Ten Years of Full Authority Digital Electronic Engine Control Development at the Budapest University of Technology and Economics, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles

Gas turbine power plants are equipped with full authority digital electronic control (FADEC), thanks to their improved accuracy, reduced mass, and dimensions and maintenance requirements. At BME DANAR and its predecessor, the development of electronic control systems has begun in 2009 after TKT-1 turbojet engine test bench entered service. This paper introduces the main steps of the work on the initial and other types (PD-60R and Deutz T216), and the different control laws (rotor speed, Engine Pressure Ratio and Turbofan Power Ratio). Furthermore, the authors present

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, adjunktus, e-mail: kbeneda@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1900-7934>

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, doktori hallgató, e-mail: zsfaltin@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8361-1397>

those algorithms (PID, linear quadratic and sliding mode control) which have been implemented in their FADEC systems. Probably the most important advantage of the presented work is that it has been validated in real gas turbine environment.

Keywords: gas turbine, engine control, PID, LQ servo, sliding mode control

1. Bevezetés

A repülőgép-hajtóművek évtizedeken keresztül különböző fejlettségű hidraulikus, majd hidromechanikus szabályozórendszerekkel rendelkeztek.³ Bár igen jó megbízhatóságra tettek szert az 1970-es évekre, továbbá egész bonyolult mechanizmusokat sikerült megvalósítani (például háromdimenziós bűtyökkel vezérelt változtatható állólapátokat), ezen kialakítások nagy hátránya volt, hogy a tolóerőt nem lehetett a repülési üzemmódtartományban állandó értéken tartani, így a hajtóművek kihasználtsága, gazdaságossága nem volt optimális.⁴

Amint az 1960-as években megfelelő fejlettségi szintet értek el az elektronikus berendezések, a hajtóművek szabályozórendszereiben is kezdtek elterjedni. Elsőként a hibrid kialakítások juthattak szerephez, amelyekben az alap hidromechanikus rendszer mellett kisegítő funkcióval bíró, legtöbbször analóg elektronika biztosítja például az utazó üzemmódon a pontosabb szabályozást, valamint azt, hogy a változó környezeti feltételek ellenére is egy adott gázkarpozícióhoz mindig ugyanaz a tolóerő tartozzék.⁵ Amint ezen eszközök megbízhatósága tovább növekedett, miközben méretük és tömegük párhuzamosan csökkent, úgy váltak lehetővé az első teljes hatáskörű, digitális szabályozórendszerek, amelyek között még találhatunk analóg áramkörökre épülőket is.⁶

Az első polgári repülésben elterjedt digitális technikán alapuló FADEC még egy csatornával rendelkezett, de nem sokkal később már megszülettek a kellő redundanciát és ezzel hibátűrést biztosító, azóta is egyeduralgató kétcsatornás konstrukciók.⁷

A gázturbinás sugárhajtóművekben számos különféle szabályozási törvényszerűséget alkalmaznak. Amennyiben állandó fúvócső-geometriával rendelkezik a hajtómű (ami a polgári repülésben szinte kizárólagosnak tekinthető), akkor egy beavatkozási lehetőségen keresztül lehet az üzemállapotot irányítani.⁸ Mivel a hajtóművek tolóereje beépített állapotban még nem mérhető, napjainkban még csak kísérleti stádiumban vannak ilyen rendszerek,⁹ ezért közvetett úton, más, könnyen mérhető és a tolóerővel arányos jellemzőkön kell alapuljon

³ Fodor Ferenc: *Gázturbinák automatikus szabályozása*. Főiskolai jegyzet, Magyar Néphadsereg Killián György Repülő Műszaki Főiskola, 1984.

⁴ Jackson Lutambo – Jiqiang Wang – Hong Yue – Georgi Dimirovsky: Aircraft turbine engine control systems development: A historical perspective. In *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*. Hangzhou, China, July 28–30, 2015. 5736–5741.

⁵ Andreas Linke–Diesinger: *Systems of Commercial Turbofan Engines*. Springer, 2008.

⁶ R. Kendell: Full-Authority Digital Electronic Controls for Civil Aircraft Engines. In *ASME 1981 International Gas Turbine Conference and Products Show*. Houston, Texas, USA, March 9–12, 1981. 6.

⁷ L. Paddon: Active-Control Engines. *Flight International*, 9 July 1988. 33–34.

⁸ Gennady Kulikov – Haydn A. Thompson: *Dynamic Modeling of Gas Turbines*. Springer, 2004.

⁹ Marc Bauer – Jens Friedrichs – Detlev Wulff – Christian Werner-Spatz: Measurement quality assessment of an on-wing engine thrust measurement system. In *ASME Turbo Expo 2018*. 1. (2018).

a szabályozás. Ilyenek lehetnek a fordulatszám és hajtómű nyomásviszony (Engine Pressure Ratio, EPR)¹⁰ vagy a hajtómű teljesítményviszony (Turbofan Power Ratio, TPR).¹¹

Cikkünk célja, hogy bemutassuk a BME VRHT-n tíz éve végzett fejlesztés aspektusait és eredményeit, a fent említett szempontok (rendszerek, törvényszerűségek, algoritmusok) alapján.

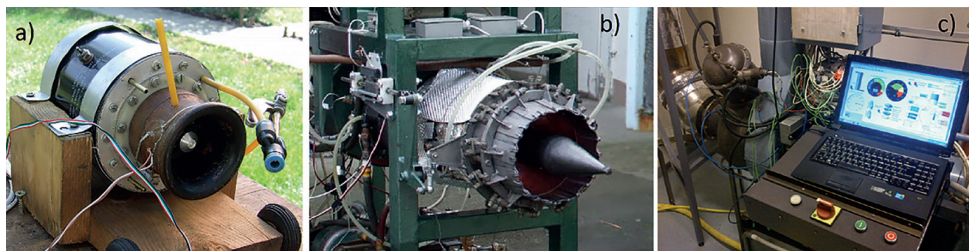
2. A VRHT-n fejlesztett FADEC-rendszerek

A BME VRHT akkori jogelődjén, a Repülőgépek és Hajók Tanszéken az 1990-es évek végén állt üzembe a Deutz T216 típusú tengelyteljesítményt leadó gázturbina próbapadja, majd 2007-ben lépett működésbe a TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű. Ezek eredetileg hidromechanikus szabályozással rendelkeztek, amely nagymértékben korlátozta az alkalmazhatóságot. Ez kifejezetten az utóbbi, tolóerőt leadó típusnál volt kritikus, így a fejlesztés a TKT-1-en indult meg.

2.1. Előzmények, rövid áttekintés

Az már a TKT-1 kifejlesztésének kezdetén világos volt, hogy a TSz-21 eredeti szabályozása nem lesz alkalmas a sugárhajtómű üzemállapotának biztonságos irányítására. Az indító gázturbina működési módjából következően a 924-es tüzelőanyag-olaj szivattyúegysége csak egy, a gyártó által betáplált programot tudott megvalósítani, amely ráadásul magán hordozta a berendezés villanymotorral történő meghajtásának következményeit is.

A TKT-1 azonban nem rendelkezett a TSz-21 esetében állandóan jelen lévő munkaturbina által képviselt terheléssel. A fúvócső a legelső konstrukcióban állandó keresztmetszetű, jelentős diffúzorossággal rendelkező konstrukció volt. A túlzott tüzelőanyag-betáplálás elkerülése végett az eredeti szabályozórendszer módosítása elkerülhetetlen volt.



1. ábra

A PD-60R (a), a TKT-1 (b), és a Deutz T216 (c) gázturbinák. Forrás: a szerzők saját fényképei

¹⁰ J. D. Stevenson – H. I. H. Saravanamuttoo: Simulating Indirect Thrust Measurement Methods for High-Bypass Turbofans. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 117. (1995), 1. 38–46.

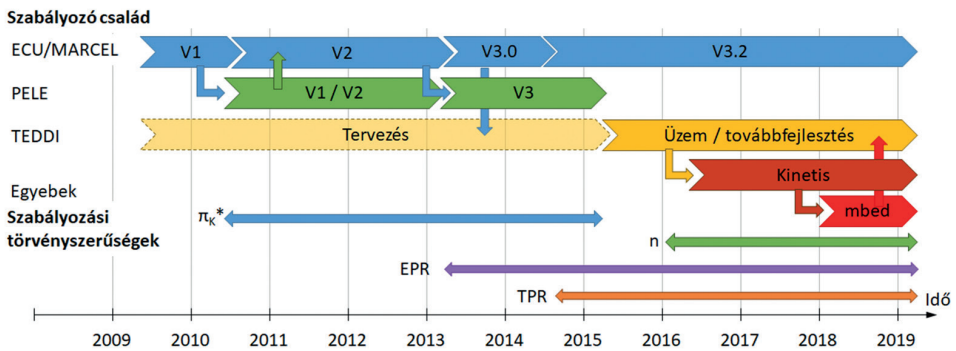
¹¹ Cerith Davies – Jonathan E. Holt – Ian A. Griffin: Benefits of inverse model control of Rolls-Royce civil gas turbines. In *Proceedings of International Control Conference*. Glasgow, Scotland, United Kingdom, 2006.

Később még egy sugárhajtóművel bővült a vizsgálatok köre, az 50 N névleges tolóerővel rendelkező PD-60R mikrogázturbinával, amelyhez egy új szabályozórendszer fejlesztése is megkezdődött, amelynek elsődleges célja a rádió-távírányítású repülőgépekben való alkalmazhatóság volt.

Végül pedig, az utóbbi években megkezdődött a Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó turbina FADEC-rendszerűvé való átalakításának folyamata is. Az 1. ábrán a fejlesztéseink három fő típusa látható.

Az alábbi 2. ábra mutatja a különböző elektronikus berendezésének fejlesztési szakaszait, alkalmazásuk időtartamait, valamint azokat a technológiai transzfereket, amelyek során valamely rendszer létrehozásában szerzett tapasztalatokat egy másik alkalmazásban fel tudtuk használni, így építve ki a jelenleg elért képességeket.

Láthatóak továbbá a különböző szabályozási törvényszerűségek, amelyeket a TKT-1, valamint PD-60R gázturbinás sugárhajtóműveken leteszteltünk.



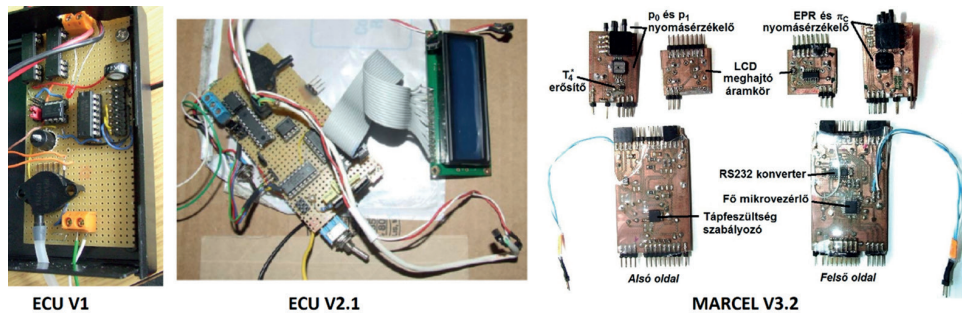
2. ábra

A szabályozórendszerek fejlődése és az alkalmazott szabályozási törvényszerűségek. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

2.2. ECU-/MARCEL-sorozat

A tényleges fejlesztés a PD-60R típusú gázturbinához kezdődött még 2009 végén, miután a FADEC tervezésének alapjai vizsgálatra kerültek.¹² Ezt a gázturbinát Paksi Dániel tervezte, és célja, hogy közepes méretű (körülbelül 5–10 kg felszálló tömegű) rádió-távírányítású modellrepülőgépek hajtóműve lehessen. Ez meghatározta a hozzá fejlesztett elektronika kialakítását is. A sorozat három fő képviselőjét a 3. ábra mutatja be. Az eredeti megnevezés az angolban megszokott Electronic Control Unit rövidítéséből adódott, majd a V3.0 utáni továbbfejlesztést követően a V3.2 már a MARCEL nevet viselte, amely a Modular Aero-engine Remote Control Electronics rövidítéseként jött létre.

¹² Beneda Károly Tamás: Teljes hatáskörű digitális gázturbinás szabályozás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. In *Repüléstudományi Konferencia 2009 – 50 év hangsebesség felett a magyar légtérben*.



3. ábra
Az ECU V1 és V2.1, valamint a MARCEL V3.2 áramkörei. Forrás: a szerzők saját fényképei

2.2.1. ECU V1

A legelső példánynak még nem volt célja a szabályozás, mert a rádió-távírányítással működtetett gázturbina esetében az egyszerű kézi vezérlés is elegendőnek bizonyult, viszont jó alapot nyújtott arra, hogy a későbbi változatokban is használni kívánt megoldásokat kikísérletezzük. Így ez az áramkör mindössze a kompresszor nyomásviszonya, a turbina utáni gázhőmérséklet, valamint a környezeti nyomás és hőmérséklet paramétereit tudta mérni, és folyadékkristályos kijelzőn megjeleníteni.

Az áramkör magja egy akkor Freescale (korábban Motorola, most NXP) MC9S08QD4 típusú, 8 bites architektúrájú mikrokontroller volt 8 lábú PDIP tokozásban. Órajele 16 MHz, a beépített nem felejtő programmemória 4 kB, az adatok tárolására szolgáló RAM pedig 256 bájtos volt. A nyolc lábból kettő természetesen a tápellátásért felel, a maradék haton lehetett a környezettel az adatcserét megvalósítani. A belső analóg-digitális átalakító 10 bit felbontású, amely elegendő pontosságúnak bizonyult a gyakorlatban.

2.2.2. ECU V2

2011 nyarán már a PELE-sorozat tapasztalataira építve kiviteleztek az ECU 2-es változatát. Ez egy nagyobb mikrokontrollert kapott, a 16 lábú PDIP tokozású MC9S08QG8-at, amely kétszer annyi memóriával rendelkezett, mint elődje. Az órajele változatlanul 16 MHz volt. A környezeti nyomás és a gázhőmérséklet mérését I2C buszon kommunikáló 16 bites A/D konverterek oldották meg, ezzel a repülési magasság a 10 Pa-os érzékenység nyomán 0,1 m felbontással megállapítható. A kivitel egykártyás rendszerű volt, egyetlen áramköri lapon volt megtalálható minden szükséges berendezés.

Ez volt az első berendezés, amelynek célja a szabályozás volt, így a rádió-távírányító vevőegységéről érkező impulzusszélesség-modulált (Pulse Width Modulated, PWM) jelet referenciaként használva, a kimenetén olyan PWM-jelet vezérelt ki, amellyel a kompresszor nyomásviszonyát lehet a kívánt módon irányítani.

Az első kísérletek itt történtek meg arra vonatkozóan, hogy a kijelzést végző képernyőn és a mellette elhelyezett nyomógombokon keresztül a felhasználóval interaktív kommunikáció történhessen. A gázturbina leállítását lehetett nyomógombbal kezdeményezni, majd nyugtázni, illetve a szabályozó maximális nyomásviszonykorlátját lehetett beállítani ilyen módon.

2.2.3. MARCEL V3.2

A sorozat harmadik tagjának tervezése 2013 nyarán kezdődött, és kifejezetten a repülés feltételeinek megfelelően, moduláris kialakítással rendelkezett. Ekkor már javában folytak a TEDDI munkálatai is, azonban az ott alkalmazott CAN busz helyett a „kis testvér” csupán közvetlen analóg vagy digitális csatlakozásokkal rendelkezik a bővítő áramkörök irányába. Emiatt az MC9S08D mikrokontroller-családból a TEDDI-ben használt – DZ60 helyett a CAN kommunikációra nem képes – DN60 típust választottuk. A 32 lábú felületszerelt tokozás jelentős előrelépés volt, az addigi próbapanelok helyett rendes nyomtatott áramköri kártyát terveztünk meg. Ezen túlmenően 60 kB programmemória áll rendelkezésre, amelyből a legutolsó változatok körülbelül 19 kB-nyi területet használnak ki, valamint a RAM mérete is 4 kB, amivel számottevően több adat kezelése lehetséges a korábbi változatokhoz képest.

Az eredeti V3.0 még egyoldalas nyomtatott áramköri kártyával rendelkezett, ezt váltotta nagyjából fél évvel később a kétoldalas technológiával készült V3.2.

A berendezés eredetileg közös szabályozórendszerként született meg, és egy digitális bemenet alacsony vagy magas jelszintje alapján döntötte volna el, hogy a PD-60-nal vagy TKT-val van-e éppen dolga. A PD-60R azonban 2014-ben jelentős fejlesztéseken esett át, így ebbe az irányba tolódott el végül a hangsúly, a szabályozó vezérlőprogramjában az erre vonatkozó kódrészletek maradtak csak meg.

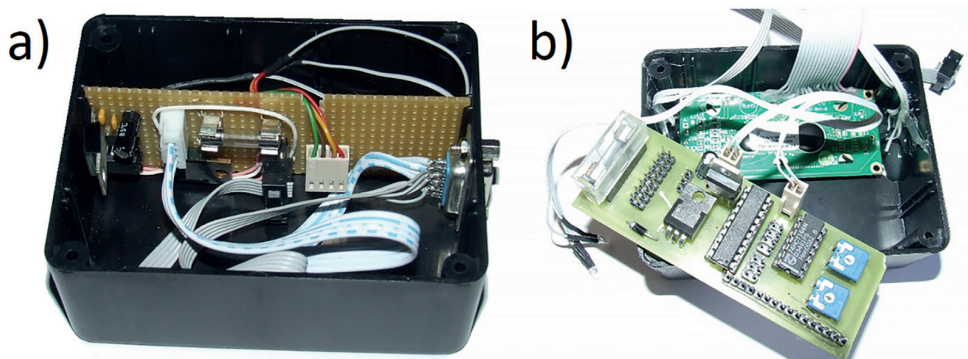
A moduláris kialakítás ellenére egy nagy közös dobozban kapott helyet a teljes rendszer, mivel akkor még távoli cél volt csupán a repülőképes távirányítású modell, így az egyszerűbb kezelhetőség és az egységek védelme érdekében minden komponens egy helyütt található. A doboz előlapján rögzítettük a szokásos 16x2 karakteres LCD-kijelzőt, amelyen keresztül az egységgel végzett kommunikáció hajtható végre. Ennek a megvalósítása egy komplex menürendszeren keresztül lehetséges, körülbelül 60 féle különböző képernyő megjelenítését építettük be. A PELE V3-ból örökölt RS232 rutin továbbfejlesztett változata már megszakításvezérelt kivitelben került a kódba. Megszakításos technikát itt alkalmazott először az analóg-digitális konverzió is, amellyel a főprogram időigényét lehetett csökkenteni, mert nem kellett már az átalakítás befejezésére várni.

Ez az áramkör eleve a TPR szerinti szabályozás megvalósítására készült, és a V3.2 verzió továbbra is képes feladatainak ellátására, sőt, azóta néhány különleges funkcióval is bővült (például a tüzelőanyag-szivattyú tesztelésére kialakított rutinnal, kibővített manuális és automatikus indítási lehetőségekkel stb.).

2.3. PELE-sorozat

Az elvezetés a nagy hajtóművek hibrid szabályozórendszereinél használatos tolóerő-gazdálkodás szabályozása, vagyis Power Management Control (PMC) kiegészítése volt az „elektronikus

egység” megnevezéssel. Az első változat tulajdonképpen a szabályozásra még nem képes változat volt, amikor belekerült az irányítás algoritmus is, onnantól már 2-es verziószámon tartottuk nyilván. A PELE-sorozatból a 3-as volt a befejező lépcső, bár a 4-es változat terve volt véve, a TEDDI fejlesztése miatt ez végül nem valósult meg. A 4. ábra mutatja a két egymást követő fejlesztési fokot.



4. ábra

A a) PELE V2 és a b) PELE V3 belső felépítése. Forrás: a) Horváth Ádám – Tóth Vilmos – Beneda Károly: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag- és szabályozórendszerének fejlesztése. *Repüléstudományi Közlemények*, 24. (2012), 2. 854–879.; b) Horváth Ádám: *Teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozórendszer tervezése kisméretű sugárhajtóműhöz*. Diplomatervezés, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2013.

2.3.1. PELE V2

A PELE első változata a kompresszor utáni túlnyomás, illetve kompresszor nyomásviszonya szerinti szabályozásra lett felkészítve, tekintettel arra, hogy a TSz-21-ből nem állt rendelkezésre fordulatszám-érzékelés, azt csak jóval később, 2016-ban sikerült megvalósítani. Bár a kompresszor nyomásviszonya nem szokásos szabályozási paraméterként, a fent említett kényszerű választás mellett még az szolt mellett, hogy a hajtómű együttműködéséből fakadóan egy adott fúvócső keresztmetszete mellett a nyomásviszony és a fordulatszám összetartoznak.

A berendezés tehát a kompresszor kimenő nyomását mérve állapította meg a kompresszor nyomásviszonyát, figyelemmel kísérte a hajtómű-vezérlőkar állását, és ez alapján határozta meg azt az impulzusszélesség-modulált kimenő jelet, amellyel a beavatkozást végző szelep működtetése lehetővé vált. Mivel a fejlesztés tulajdonképpen az ECU V1.0-val lényegében egyidőben történt, a rendelkezésre álló mikrokontroller az ott alkalmazott MC9S08QD4 volt, annyi különbséggel, hogy kijelző meghajtására nem volt mód. A típus korlátai nem csak a rendelkezésre álló lábszámot érintették, természetesen a csekély belső memória és számítókapacitás is rányomta bélyegét a működtető szoftverre. A program a főbb változókat kétbájtos egész számként tárolta fixpontos számábrázolással, alapvetően 0...1000 tartományban, ahol a maximális érték az adott jellemző névleges értékével egyezett meg, tehát ezrelékpontossággal történt az értékek meghatározása. Ez a mikrokontrollerben alkalmazott belső 10 bites analóg-digitális átalakító tartományával is nagyjából egybeesett.

Mivel a berendezés egy klasszikus „fekete doboz” volt, a tesztelése a hajtómű üzemeltetését igényelte, így már korán felmerült az igény arra, hogy egy, a hajtómű paramétereit dinamikusan szimulálni képes áramkört alkossunk az ellenőrzés céljából. Ez azonban nem valósult meg, mivel a fejlesztés hamar továbblépett ezen a változaton.

2.3.2. PELE V3

A kijelző hiánya igen kedvezőtlenül befolyásolta a hibafeltárás lehetőségeit, így a soron következő elektronikus egység az ECU nyomdokain megkapta a lehetőséget az információk LCD-n történő valós idejű megjelenítésére. Rendelkezésre álltak már az ECU V2 eredményei, így a PELE továbbfejlesztése már ebben az irányban történt.

Ez volt az első olyan fejlesztés, amelynél saját nyomtatott áramköri kártya tervezése történt a próbapanelek alkalmazása helyett. A fejlesztés egy diplomaterv keretében zajlott, amelynek célja a hajtómű nyomásviszonya (Engine Pressure Ratio, EPR) szerinti szabályozás megvalósítása volt, de mivel a PELE V2 nem volt képes több bemenetet kezelni, mindenképpen szükség volt az új áramkör megtervezésére.

Beépítettük és számottevően továbbfejlesztettük az ECU V2 többképernyős menürendszerét, itt már lehetőség volt többféle szabályozási algoritmus között választani (kompresszor-nyomásviszony, EPR, különleges üzemmód), valamint több jellemzőnek (leginkább a szabályozott paramétereknek) alsó, illetve felső határait beállító képernyőket definiáltunk.

Ez volt egyébként az első olyan áramkör, amely RS232 kommunikációval rendelkezett, és így a mért adatokat számítógépre eljuttatva menteni is lehetett. A rutin csak egyszerű adással foglalkozott, nem volt felkészítve a kétoldalú kommunikáció végrehajtására, és a főprogram tevékenységei között szerepelt.

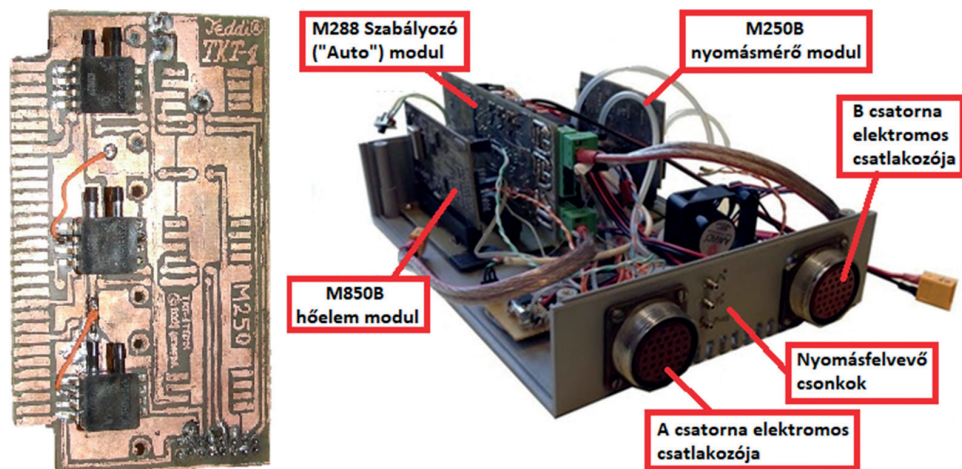
2.4. Teljes hatáskörű, duplikált digitális elektronikus szabályozórendszer (TEDDI)

A komplex, moduláris felépítés hosszú fejlesztési folyamatot eredményezett. Az első modul, a nyomásérzékelőket tartalmazó M250 (amely a számát a maximális kompresszor utáni túlnyomás kPa-ban kifejezett értéke alapján nyerte) már 2009-ben, az alaplap már 2010-ben elkészült. Sajnos a további egységek létrehozása az egykártyás FADEC-rendszerek fejlesztése miatt csúszott, így a további áramkörök (például M850 hőelemmodul, M288 szabályozó kártya) csak 2013-ra lettek készen. Az élesztés, a kezdeti szoftverek létrehozása, finomítása még körülbelül 2 éven keresztül tartott, természetesen más egyéb munkálatok mellett.

Az első üzemi próba 2015-ben történt meg, amikor az EPR szerinti szabályozás PELE V3-ból átültetett változatát teszteltük, teljes sikerrel. Itt alkalmaztunk elsőként automatikus indítást, amelyet még a korai kézi vezérlés időszakában egy 555-ös típusú monostabil IC-vel már megvalósítottunk, most azonban szoftveresen történt a feladatok vezérlése, ütemezése, sőt, már a hibákra való helyes reagálás is részét képezte a rendszernek (vagyis rendellenesség esetén az indítási ciklus megszakítására lehetősége volt). Azóta a berendezés stabilan működik, a szabályozás jelenleg is erről folyik, a 2018-ban beépített nyomóági arányos

szelep vezérlőrutinja pedig 2019 őszén került át a Kinetis-, illetve mbed-rendszerekből, így az új tüzelőanyag-adagolás vezérlése is biztosított immár.

Bár egyelőre még csak egy csatorna készült el teljeskörűen, jelenleg is zajlik a második csatorna fejlesztése, amellyel számottevően bővíülhet majd a berendezés feladatköre, illetve a nevében meghirdetett duplikált redundancia is kialakulhat. A legelső M250A modul és a jelenlegi állapotot az 5. ábra mutatja.



5. ábra

A TEDDI legelső nyomásmérő modulja 2009-ből, valamint a jelenlegi állapot. Forrás: a szerzők saját fényképei

2.5. További szabályozóegységek

Az elmúlt években az egyedi nyomtatott áramköri kártyák helyett elterjedt a dugaszolható próbapanelen történő előzetes tesztelés, így két olyan fejlettebb mikrokontroller vizsgálatra is megvalósulhatott, amelyeket későbbiekben szeretnénk a meglévő rendszerekbe integrálni vagy a régieket teljesen lecserélni velük.

2.5.1. Kinetis

A régi 8 bites architektúra kereteiből való kilépés első próbálkozásaként egy NXP MKE06Z128 típusú, Kinetis családba tartozó ARM Cortex-M0 mikrokontrolleren alapuló áramkör megalkotása következett 2016 nyarán. Mivel a technológiát kísérleti jelleggel szereztük be, emiatt az előző évek saját gyártású kártyáitól eltérően itt csak próbapanelen kivitelettük a rendszert.

A mikrokontroller maga maximális 48 MHz-es órajelével közel kétszer olyan gyors, mint a korábbi generációban alkalmazott típusok. Bár eredetileg a TEDDI második csatornájának szántuk, a jelenlegi fejlesztési koncepció szerint a soron következő fejlesztésben a perifériák

(nyomás, hőmérséklet és fordulatszám mérését lehetővé tevő kártyák) esetében építjük be azokat. Jelenleg tervezés alatt áll a régi M250B nyomásérzékelő modul leváltását célzó „C” változat, az üzemeltetési tapasztalatok, az időközben felmerült új mérendő mennyiségek és a mikrokontroller cseréje okán.

Ez a mikrokontroller volt az első fordulatszám mérését lehetővé tevő rendszer, amely minőségi ugrást jelentett ezen a téren is, alkalmazásával elérhetővé vált egy olyan paraméter, amely döntően befolyásolja a gázturbinás sugárhajtómű üzemét, az alárendelt célra való használat miatt azonban az eredeti gyártmányból hiányzott. A Kinetis a mérés mellett – több identifikációs céllal végrehajtott üzemelést követően – a fordulatszám szabályozását is lehetővé teszi. Ezt a funkciót kívánjuk a közeljövőben átültetni a TEDDI jelenleg meglévő elemeire.

Ideiglenesen ezt a rendszert is felkészítettük az új adagolószelep kezelésére, de a próbapaneles kialakítás jellege miatt ez körülményessé teszi az üzemeltetést, ezért ameddig el nem készül az Mbed-fejlesztő cég által kínált LPC1768 mikrokontrolleres rendszeren alapuló új szabályozókártya, addig a TEDDI jelenlegi M288 moduljába is beleépítettük ezt az új funkciót.

2.5.2. Mbed LPC1768

A 2018-as év elején egy újabb 32 bites rendszer gyors prototípus-fejlesztésre alkalmas gyártói készlete került birtokunkba, amellyel igen rugalmasan lehet számos feladatot megoldani, mindemellett a korábbiakhoz képest jóval nagyobb órajellel működtethető (max. 100 MHz), rendelkezik digitális-analóg átalakítóval is, amely a korábbi szériákban még nem volt elérhető. Tartalmaz több CAN, UART, SPI és I2C kommunikációs interfészt, amelyeken keresztül egyrészt a meglévő rendszerrel történő összekapcsolása vált egyszerűen kivitelezhetővé, továbbá olyan érzékelők integrálása is lehetséges, amelyek programozása a korábbi generációk esetében nehézkes volt, vagy a korlátozott lábszám miatt nem állt rendelkezésre.

Ez a rendszer először 2018 tavaszán bizonyította a gyors fejlesztés előnyeit, amikor a régebbi rendszerek esetében szükséges ráfordított idő töredéke alatt létre tudtuk hozni az újonnan átalakított tüzelőanyag-adagoló rendszer kézi vezérléséhez, identifikálásához, majd pedig szabályozásához szükséges hardver-, illetve szoftverelemeket. Itt alkalmaztunk a rendszeridentifikáció során változó frekvenciájú szinuszos gerjesztő jelet, amelyet a digitális-analóg átalakítón keresztül tudtunk kivezérelni. A szinuszhullám kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkezik a korábban alkalmazott négyszögjellel szemben, de számítása sokkal nagyobb számítási igényteliséggel jelentkezik. Nem véletlen tehát, hogy a régebbi fejlesztésű rendszerekben négyszögjelen alapuló különleges üzemmódot valósítottunk meg, itt pedig sikeresen áttértünk a szinuszos beavatkozásra.¹³

Azóta több ízben is lehetőség nyílt rugalmasságának kiaknázására. Egy másik diplomaterv¹⁴ keretén belül egy teljesen eltérő gázturbinarendszer hidromechanikus szabályozásának leváltása volt a cél, amikor a TKT-n alkalmazott adagolószelep-megkerülőági szelep párost beszereltük a Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturбина tüzelőanyag-rendszerébe.

¹³ Beneda Károly – Ladislav Főző: Embedded Development System for Gas Turbine Identification Process. *Acta Avionica*, 20. (2018), 1.

¹⁴ Simon Dávid: *Elektronikus tüzelőanyag-szabályozó rendszer megvalósítása Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturbinán*. Diplomaterv, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2018.

A kísérlet sikerrel zárult, az elektronika sokkal rugalmasabban, nagyobb dinamikával volt képes a fordulatszám változtatására, mint a korábban alkalmazott motoros vezérlésű gázkar, köszönhetően az *mbed*-rendszer könnyű illeszthetőségének, egyszerű és hatékony programozási lehetőségeinek.

Sokoldalúságának ékes példája, hogy olyan feladatok megoldása vált a közelmúltban lehetővé, amelyek sokáig csak a továbbfejlesztések listáján szerepeltek. Talán a legfontosabb közülük a mért adatok tárolása SD-kártyán, ami lehetővé teszi, hogy a jelenlegi másodpercenkénti tíz mérés helyett többet lehessen végrehajtani, ugyanis a mostani rendszer a mért adatokat rögtön el is küldi UART kommunikáción keresztül. Hiába emeltük azonban a bitrátát egészen 500 000 kbps-ig, az egyre nagyobb adattömeg elküldése természetesen hátráltatja az egyéb folyamatokat. A most fejlesztés alatt álló kialakításban a cél a másodpercenként 50 fő ciklus végrehajtása, amelyből csak minden tizedik szolgáltat valós idejű adatot, a többit a háttértárolóra menti, és az üzemelést követően további értékelésre ad lehetőséget. A kijelzés esetén ugyanis nincs szükség ennél nagyobb ütemű frissítésre, a kezelő személyzet úgysem tudna rá megfelelően reagálni. Ha viszont minden mért adatot rögzítünk, akkor a működés befejezését követően a legfinomabb részletet is vissza lehet kapni az adatsorokból.

3. Szabályozási törvényszerűségek

Szabályozási törvényszerűsége a szabályozás célfüggvényét értjük, amely szerint a hajtómű irányítását végzi. Ez leggyakrabban fordulatszám vagy hajtómű nyomásviszony (Engine Pressure Ratio, EPR) szokott lenni a gázturbinás sugárhajtóművek többségénél. Ezeken túl több más törvényszerűséget vizsgáltunk, amelyeket az alábbiakban részletezünk.

3.1. Kompresszor-nyomásviszony

Bár éveken keresztül számos kísérlet történt a fordulatszám mérésének megvalósítására, a megfelelő érzékelő híján sokáig nem volt működőképes megoldás. Emiatt az első szabályozórendszer a kompresszor-nyomásviszony szabályozásán alapult, egyszerűen a gázkar 1,5...2,5 tartományban lineárisan képezte le ezt a paramétert. Bár ennek a paraméternek a szerepe a repülőiparban alkalmazott szabályozórendszerek esetén marginális, a TKT-1 szempontjából nagyon fontos előrelépés volt, hogy a gázturbina nem egy kézzel beállított üzemmód környékén ingadozott, hanem korrekt szabályozással rendelkezett.

3.2. Hajtómű nyomásviszonya (Engine Pressure Ratio, EPR)

Ez a paraméter, amely a turbina utáni p_4^* és a kompresszor előtti torlóponyi p_1^* nyomások hányadosa, amint az az (1) egyenletben is látható, adott repülési üzemmódot feltételezve arányos a tolóerő nagyságával, így a közvetett szabályozás megvalósítására alkalmas.

$$EPR = \frac{p_4^*}{p_1^*} \quad (1)$$

Előszóval alkalmazzák nagy hajtóműgyárak, mint például Pratt & Whitney, illetve Rolls-Royce. Bevezetése mellett szintén az szült, hogy nem rendelkezünk fordulatszámmerési lehetőséggel, valamint már a gázturbina átalakításakor tervbe volt véve a turbina utáni nyomás mérésének lehetősége, ami azonban az első években feledésbe merült. Ennek a szabályozásnak a megvalósításával ezt is beépítettük.

A polgári repülőgépek-hajtóművekkel ellentétben a TKT-1 rendelkezik változtatható fúvócső-geometriával, amelynek hatására jelentős mértékben változik az adott fordulatszám mellett jelentkező EPR is. Emiatt a szabályozást két paraméterre építettük, a gázkar adta alapvetően a fordulatszám változásának jellegét (a kompresszor-nyomásviszonyon keresztül), a gázkiáramlás-sebességfokozó redőnyzetpozíció segítségével pedig a referencia-EPR meghatározása történt.

Nagy hátránya a rendszernek, hogy alapgázüzemmód esetén nincs váltás, az EPR a teljes üzemmódtartományban megmarad szabályozott paraméternek. Polgári utasszállító repülőgépek hajtóművein az alapjárat során mindig fordulatszám tartása történik. Ez leginkább azon érhető tetten, hogy az EPR ezen az üzemmódon csaknem „eltűnik”, a névleges 1,185 értékhez képest mindössze 1,038 mérhető. Itt már jelentősek a mérő és beavatkozó rendszer hibái, tehát az alapgázüzemmód pontos megtartására nem lesz tökéletesen alkalmas az EPR szerinti irányítás.

3.3. Hajtómű-teljesítményviszony (Turbofan Power Ratio, TPR)

A hajtómű-teljesítményviszony a kompresszor nyomásviszonya és az átszámított turbina előtti hőmérséklet négyzetgyökének szorzataként definiálható, ahogy a (2) egyenletben látható. Az előbbi paraméter a kompresszor kilépő p_2^* és belépő torlóponti nyomásainak hányadosa, az utóbbi pedig a turbina előtti T_3^* és a kompresszor előtti T_1^* torlóponti hőmérsékletek aránya.

$$TPR = \frac{p_2^*}{p_1^*} \sqrt{\frac{T_3^*}{T_1^*}} \quad (2)$$

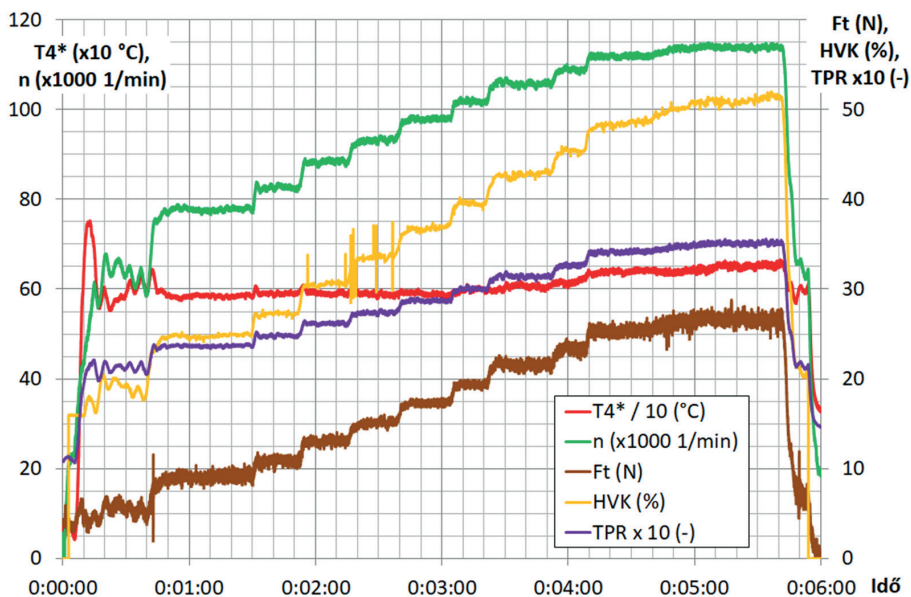
A TPR-paraméter a Rolls-Royce hajtóművein jelent meg a 2000-es évek elején,¹⁵ amelynek előnye, hogy állandó geometria esetén egyenes arányosságot mutat a kifejtett tolóerővel. Bár a megnevezés szerint kétáramú sugárhajtóművekre vonatkozó jellemzőről van szó, a definíciót megvizsgálva belátható, hogy tisztán olyan paraméterekből áll, amelyek egyáramú sugárhajtóműveken is mérhetőek, tehát kézenfekvőnek látszott a bevezetése a fejlesztett FADEC-rendszerekbe.

A MARCEL V3.2 volt az az elektronikus egység, amely kifejezetten a TPR szerinti szabályozásra épült, és a 2.2.3. fejezetben bemutatottak alapján először a TKT-1-en történtek olyan mérések, amelyek alapján ez megvalósíthatóvá vált volna. Az ottani fejlesztések azonban más irányt vettek, végül pedig a MARCEL-rendszer és a TKT-1 együttes alkalmazására nem is került sor, így ez a hajtómű, bár a szükséges referenciákat megalkottuk, a szabályozást

¹⁵ Arthur L. Rowe – Nikolaus Kurz: *Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine*. US Patent No. 5,887,419, 1999.

MATLAB-környezetben kiviteleztek és leteszteltük, a cikk megírásának idejéig mégsem üzemelt TPR-alapon.

A PD-60R eddigi üzemeléseiben azonban, miután a MARCEL V3.2 elkészült, teljességgel erre a szabályozási törvényszerűségekre épültek. Miután ezen a hajtóművön is elvégeztük a szükséges identifikációs méréseket, megalkotásra került a szabályozás algoritmus, végül pedig ezt beprogramozva a szabályozórendszerbe, azóta is töretlen sikerrel működik. A 6. ábra egy olyan üzemelés diagramja, amelyben a TPR szerinti szabályozót teszteltük a teljes üzemmód-tartományban. Látható, hogy az alapjárat közelében már akkora az eltérés a névleges üzemmódon meghatározott lineáris modell és a hajtómű tényleges dinamikus viselkedése között, hogy a szabályozó nem képes stabilizálni a működést. Amint azonban az első gyorsítás bekövetkezik, onnan már gond nélkül zajlik az irányítás.



6. ábra

PD-60R szabályozása TPR szerint a MARCEL V3.2-vel. Forrás: Beneda Károly: Modular electronic turbojet control system based on TPR. *Acta Avionica*, 17. (2015), 1.

3.4. Fordulatszám

A repülésben alkalmazott gázturbinás hajtóművek tekintetében a fordulatszám elsőrendű fontossággal bír, itt mégis utolsó a sorrendben, hiszen megfelelő érzékelő nélkül nem lehetett erre alapuló szabályozást megvalósítani.

Miután egy turbófeltöltőben alkalmazott érzékelőt beszereztünk, érzékelőt beszereztünk, megindulhatott ennek a rendszernek a kidolgozása is. A TEDDI megvalósított moduljainak terheltsége és a továbbfejlesztés igénye miatt a Kinetis-rendszerben integráltuk. Elsőként a mérés hardverelemeit és rutinjait hoztuk létre, amelyek 2016 végére érték el az üzemérettiséget, majd

a szabályozás is megvalósult 2017 tavaszára, még a régi megkerülőági arányos levegőszelepre hangolva.¹⁶

A jelenlegi állásban a mérés természetesen továbbra is működik, pillanatnyilag a mikrovezérlő CAN buszhoz történő illesztése folyik, amellyel teljes értékű tagjává válhat a TEDDI-rendszernek. Az új adagolószelleppel történő identifikálás ugyan már megtörtént, de ez a szabályozás egyelőre nem aktív, várhatóan a közeljövőben megvalósulnak ezen irányú törekvéseink is.

4. Szabályozási algoritmusok

A szabályozás algoritmusai között az iparban leginkább a proporcionális-integráló-deriváló (PID) soros kompenzáció terjedt el. Jelenlegi rendszereinkben ezen klasszikus irányítási módszer mellett lineáris kvadratikus és csúszómód-szabályozást is vizsgáltunk.

4.1. Klasszikus, proporcionális-integráló-deriváló (PID) szabályozások

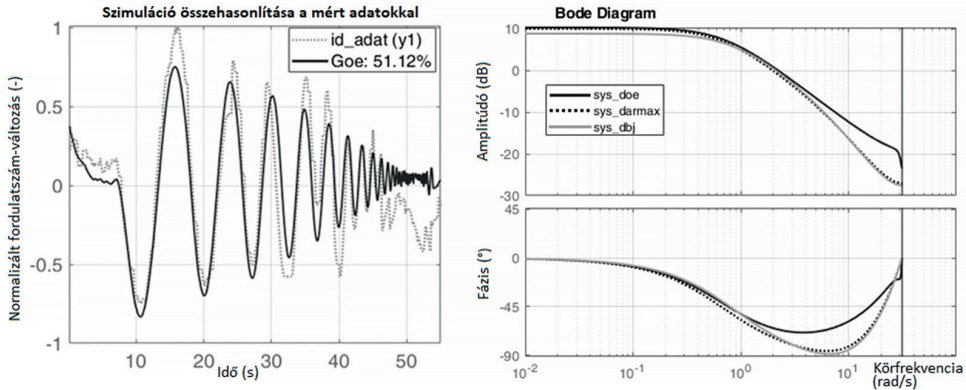
A klasszikus irányításmélet egyik legtöbbször alkalmazott módszere egyszerű, a szabályozandó rendszert egyetlen lineáris átviteli függvénnyel közelíti, ami a gázturbinás hajtóművek természetes nem lineáris jellegét figyelembe véve veszélyeket rejt magában, de megvalósítása talán az egyik legkevesebb ráfordítást igényli, ezért a fejlesztett szabályozórendszerek jelenleg mindegyike ezen a megközelítésen alapuló algoritmust alkalmaz.

A proporcionális-integráló-deriváló beavatkozás soros kompenzációként kerül be a szabályozási körbe, amely egy referenciajelet hasonlít össze a rendszer irányítandó kimenetével, majd olyan bemenetet hoz létre, amely a rendszert a kívánt állapotba juttatja. Mivel az irányítandó berendezést egyetlen átviteli függvénnyel modellezzük, emiatt a modell meghatározása és az identifikáció ilyen jellegűt kell öltson. A mért adatok alapján a gyakorlatban leginkább bevált módszer a kimeneti hiba (Output-Error) módszer volt, de természetesen próbálkoztunk más modellekkel is, mint például ARMAX, illetve Boks–Jenkins megközelítésekkel. Minden esetben a diszkrét időben mintavételezett adatok alapján először egy diszkrét rendszermodellt kapunk, és erre lehetséges a szabályozás megtervezése, például Ziegler–Nichols módszerrel vagy éppen a MATLAB Simulink beépített automatikus PID hangoló algoritmusával.

Az identifikáció a korábbi években az egyszerűbb mikrovezérlők miatt csak változó frekvenciájú négyszögjelre történő gerjesztést jelentett, csak az utolsó két évben nyílt mód szinuszhullám-kimenet alkalmazására, amellyel kedvezőbben lehet az azonosítani kívánt rendszer jellemzőire következtetni.

Egy tipikus identifikációs adatsor látható a 7. ábrán, amely a fordulatszám kimenőjel és a tüzelőanyag-adagoló szelep vezérlőfeszültség bemenőjel közötti összefüggést mutatja.

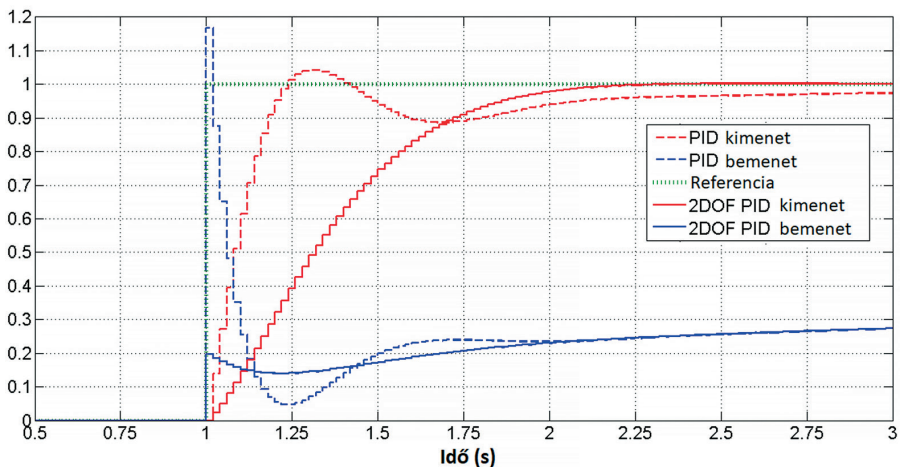
¹⁶ Beneda Károly – Nagy Arnold: Introduction, Identification and Control of a New Fuel Metering System on a Micro Turbojet Engine. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019. 65–74.



7. ábra

Fordulatszám identifikáció szinuszhullámmal és az eredő rendszer Bode-diagramja. Forrás: Beneda-Nagy (2019) i. m. 71.

A PID esetén megemlítendő az is, hogy az elmúlt két évben további speciális, kétszabadságfokú szabályozást is kipróbáltunk a PD-60R és a Deutz T216 esetében is. Mindkettőnél jól nyomon követhető volt a nagyobb rugalmasság, amellyel a tranziens folyamat gyorsabb lefutást eredményezett túllendülés nélkül, amely a hagyományos PID esetén nem lett volna lehetséges. Egy ilyen összehasonlítást mutat a 8. ábra.



8. ábra

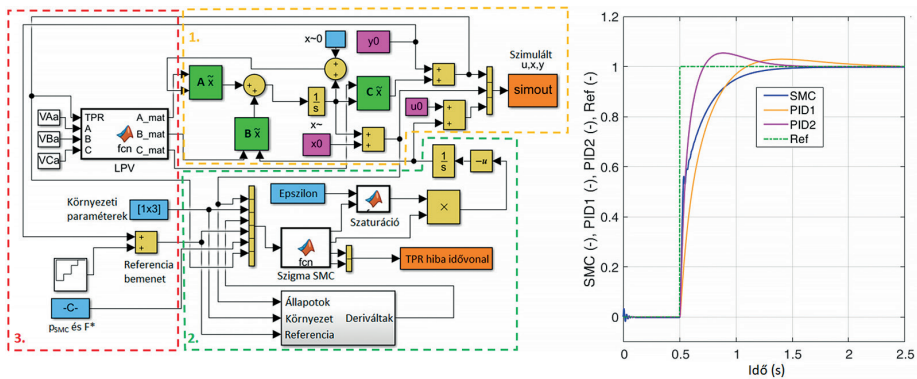
A hagyományos egy- és fejlettebb kétszabadságfokú PID-rendszerek kimeneteinek, valamint beavatkozó jeleinek összehasonlítása. Forrás: Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Design of Two Degree of Freedom Turbofan-Power-Ratio Control System for Micro Turbojet Engine. In 2019 IEEE 17th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)

4.2. Lineáris kvadratikus szervó szabályozás

A lineáris kvadratikus szabályozás megalapozása az előzőekhez képest teljesen új matematikai modellt megalkotásával kezdődött, amely mind a TKT-1-re, mind pedig a PD-60R típusra megvalósult.¹⁷ Ezt követhette mindkét gázturbinán az identifikáció, majd a szabályozó megtervezése. Ezeket a rendszereket még nem valósítottuk meg mikrovezérlőben, egyelőre még csak MATLAB Simulink szimulációkon keresztül tudtunk hatékonyságukról meggyőződni. Jelenleg a lineáris modell több üzemmódra történő kibővítése folyik, amelyet lineáris, változó paraméterű (Linear Parameter-Varying, LPV) modellel kívánunk megvalósítani.¹⁸

4.3. Csúszómód-szabályozás

Legújabb fejlesztéseink között a teljesen nemlineáris alapon nyugvó csúszómód-szabályozások jelentik a legösszetettebb megoldásokat, amelyek szintén a két sugárhajtóműves berendezésre lettek kifejlesztve. Egyelőre a hajtóművek nemlineáris modellezése a fentebb említett LPV-módszerrel történik, vagyis a modell maga lineáris struktúrájú, de a rendszer viselkedését leíró mátrix tagjai például a fordulatszám vagy TPR függvényében változnak, ezzel hozható létre a különböző üzemmódok közötti eltérés. A PD-60R rendszert szimuláló program és a vizsgálat eredményei a 9. ábrán figyelhetők meg, amelyben két különbözően hangolt PID szabályozóval történő összehasonlítás is látható.



9. ábra

Csúszómód-szabályozás szimulációs blokkvázlata, illetve viselkedésének összehasonlítása különbözőképpen hangolt PID szabályozókkal. Forrás: a szerzők MATLAB Simulink szoftvere és annak kimenete

¹⁷ Beneda, Károly – Rudolf Andoga – Ladislav Főző: Linear Mathematical Model for State-Space Representation of Small Scale Turbojet Engine with Variable Exhaust Nozzle. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46. (2018), 1. 1–10.; Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Identification of single spool micro turbojet engine with fixed exhaust nozzle at multiple operating points for linear parameter varying control. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019.

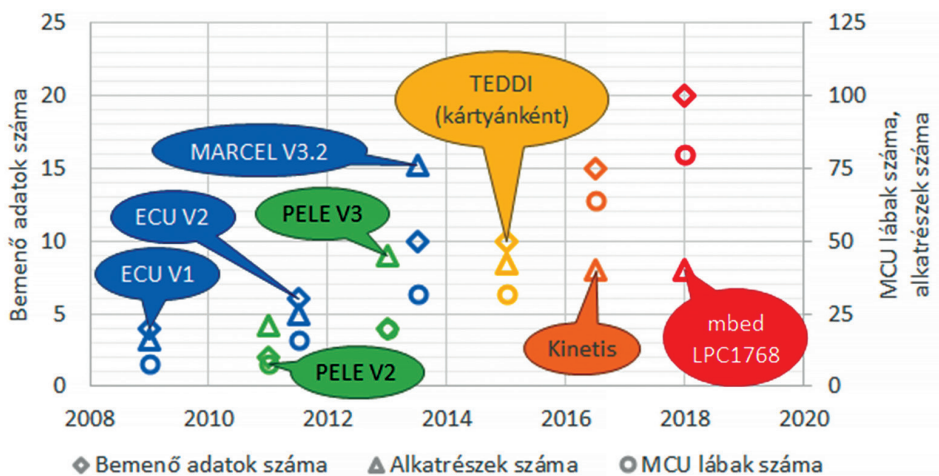
¹⁸ Beneda Károly: Egyáramú, egytengelyes gázturbinás sugárhajtómű lineáris, változó paraméterű modelleje hajtómű teljesítményviszony alapján. In Szabó András (szerk.): *Tanulmányok a vasúti járművek és a járműrendszer-analízis témaköreiből*. Budapest, BME ITS Nonprofit Zrt., 2019. 164–171.

A PID1 rendszerben a beállási idő, a PID2 esetében pedig a reakcióidő volt azonos a csúszómód-szabályozásával. A hagyományos eljárásokon látható, hogy vagy nagyon lassan avatkoznak be, esetleg túllendülés nélkül (bár a PID1 még csekély túlfutást mutat), vagy gyors reakcióidővel rendelkeznek, de akkor veszélyes túllendülést hoznak létre (PID2). Ezzel szemben a csúszómód-szabályozás egyszerre teljesíti mindkét követelményt.

5. Összefoglalás

Elmondható, hogy a teljes hatáskörű elektronikus szabályozórendszerek fejlesztése az elmúlt tíz évben igen jelentős pályát futott be, az egyszerű kísérletektől kezdve komoly feladatkörrel felruházott berendezésekig sikerült eljutni. Ezek mindegyike teljesen saját fejlesztésű, vagyis kifejezetten az adott gázturbinához lettek optimalizálva, mindeközben természetesen a főbb alapelemek különböző projektek közötti átemelésével jelentősen gyorsítani lehetett a további előrelépést.

Az elméleti fejlesztés mellett nagyon fontosnak érezzük, hogy a hardveres megvalósítás is jelentős hangsúlyt kapott, vagyis nem csupán számítógépes szimulációk, hanem valódi áramkörök is elkészültek, amelyek a valóságos gázturbinák mellett is kiváló teljesítményt nyújtanak. A fejlesztés összefoglalása a 10. ábrán látható, amely az alkatrészek, feldolgozott adatok, valamint a mikrovezérlő lábak számán keresztül ismerteti a fejlődés irányvonalát.



10. ábra

A szabályozórendszerek fejlődésének állomásai. Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Természetesen nem szabad megfeledezni arról sem, hogy ezek a berendezések nem csupán a szabályozás tényszerű megvalósítása végett születtek, hanem nagy hangsúlyt kell fektetnünk a következő mérnökgeneráció oktatására is, amely ezen eszközökkel további ismeretek átadását teszi lehetővé.

Hozzá kell tennünk azt is, ami világosan kiderül a cikkből, a fejlesztés nem állt meg, folyamatos és az elkövetkező időkre is jelentős munkát fog adni. Azonban az így létrehozott hozzáadott érték folyamatosan bővül, és rendszereink remélhetőleg nem csak hazai fórumokon mutathatják be az elért eredményeket.

Felhasznált irodalom

- Bauer, Marc – Jens Friedrichs – Detlev Wulff – Christian Werner-Spatz: Measurement quality assessment of an on-wing engine thrust measurement system. *ASME Turbo Expo 2018*, 1. (2018). DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2018-76496>
- Beneda Károly: Egyáramú, egytengelyes gázturbinás sugárhajtómű lineáris, változó paraméterű modellje hajtómű teljesítményviszony alapján. In Szabó András (szerk.): *Tanulmányok a vasúti járművek és a járműrendszer-analízis témaköreiből*. Budapest, BME ITS Nonprofit Zrt., 2019. 164–171.
- Beneda Károly Tamás: Teljes hatáskörű digitális gázturbina szabályzás (FADEC) fejlesztése kisméretű sugárhajtóműves berendezéshez. In *Repüléstudományi Konferencia 2009 – 50 év hangsebesség felett a magyar légtérben*. Elérhető: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Beneda_Karoly_Tamas.pdf (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Beneda, Károly: Modular electronic turbojet control system based on TPR. *Acta Avionica*, 17. (2015), 1. Elérhető: <https://acta-avionica.tuke.sk/ojs/index.php/aavionica/article/view/893/891> (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Design of Two Degree of Freedom Turbofan-Power-Ratio Control System for Micro Turbojet Engine. In *2019 IEEE 17th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAMI.2019.8782788>
- Beneda, Károly – Khaoula Derbel: Identification of single spool micro turbojet engine with fixed exhaust nozzle at multiple operating points for linear parameter varying control. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019.
- Beneda, Károly – Ladislav Főző: Embedded Development System for Gas Turbine Identification Process. *Acta Avionica*, 20. (2018), 1. Elérhető: <https://acta-avionica.tuke.sk/ojs/index.php/aavionica/article/view/1028/1029> (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)
- Beneda Károly – Nagy Arnold: Introduction, Identification and Control of a New Fuel Metering System on a Micro Turbojet Engine. In I. Zobory (ed.): *Proceedings of the 16th MINI Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA 2018)*. Budapest, BME ITS Zrt. 2019. 65–74.
- Beneda, Károly – Rudolf Andoga – Ladislav Főző: Linear Mathematical Model for State-Space Representation of Small Scale Turbojet Engine with Variable Exhaust Nozzle. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46. (2018), 1. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPtr.10605>
- Davies, Cerith – Jonathan E. Holt – Ian A. Griffin: Benefits of inverse model control of Rolls-Royce civil gas turbines. In *Proceedings of International Control Conference*. Glasgow, Scotland, United Kingdom, 2006. Elérhető: <http://ukacc.group.shef.ac.uk/proceedings/control2006/papers/f70.pdf> (A letöltés dátuma: 2021. 01. 14.)

- Fodor Ferenc: *Gázturbinák automatikus szabályozása*. Főiskolai jegyzet, Magyar Néphadsereg Killián György Repülő Műszaki Főiskola, 1984.
- Horváth Ádám: *Teljes hatáskörű digitális elektronikus szabályozórendszer tervezése kisméretű sugárhajtóműhöz*. Diplomaterv, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2013.
- Horváth Ádám – Tóth Vilmos – Beneda Károly: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű tüzelőanyag-és szabályozórendszerének fejlesztése. *Repüléstudományi Közlemények*, 24. (2012), 2. 854–879.
- Kendell, R.: Full-Authority Digital Electronic Controls for Civil Aircraft Engines. In *ASME 1981 International Gas Turbine Conference and Products Show*. Houston, Texas, USA, March 9–12, 1981. 6. DOI: <https://doi.org/10.1115/81-GT-139>
- Kulikov, Gennady – Haydn A. Thompson: *Dynamic Modeling of Gas Turbines*. Springer, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3796-2>
- Linke-Diesinger, Andreas: *Systems of Commercial Turbofan Engines*. Springer, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73619-6>
- Lutambo, Jackson – Jiqiang Wang – Hong Yue – Georgi Dimirovsky: Aircraft turbine engine control systems development: A historical perspective. In *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference*. Hangzhou, China, July 28–30, 2015. 5736–5741. DOI: <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260534>
- Paddon, L.: Active-Control Engines. *Flight International*, 9 July 1988. 33–34.
- Rowe, Arthur L. – Nikolaus Kurz: *Control System for a Ducted Fan Gas Turbine Engine*. US Patent No. 5,887,419, 1999.
- Simon Dávid: *Elektronikus tüzelőanyag-szabályozó rendszer megvalósítása Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturbinán*. Diplomaterv, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2018.
- Stevenson, J. D. – H. I. H. Saravanamuttoo: Simulating Indirect Thrust Measurement Methods for High-Bypass Turbofans. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 117. (1995), 1. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2812779>



Kóvári Bálint,¹ Kolat Máté,² Haraszi Sándor,³
Gyenis Tamás,⁴ Vörös Dániel,⁵ Rohács József,⁶
Bicsák György⁷

Area Scanning with Reinforcement Learning and MCTS in Smart City Applications

This research project is focused on area scanning in the scope of smart city applications with unmanned aerial vehicles or UAVs. More powerful devices have been designed in terms of range, capacity and sensory capabilities in the recent years. This makes possible easier automation, thus suppressing the need for human resources. Some of the fields of applications include: traffic or pollution monitoring, land surveying, civil security control or natural disaster control and monitoring. With the increased number of UAV applications, the use and development of efficient algorithms is more and more essential. This paper investigates the possibility of using Monte-Carlo Tree Search (MCTS) and Reinforcement Learning (RL) in this area, which are already successful methods in other control tasks.

Keywords: area scanning, machine learning, Monte-Carlo method, smart city

¹ MSc Student, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Department of Control for Transportation and Vehicle Systems, e-mail: kovari.balint1995@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2178-2921>

² MSc Student, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Department of Control for Transportation and Vehicle Systems, e-mail: komate1995@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8434-6169>

³ MSc Student, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles, e-mail: hs4ny1@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9458-4446>

⁴ MSc Student, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Department of Control for Transportation and Vehicle Systems, e-mail: tamgyen@gmail.com

⁵ MSc Student, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Department of Control for Transportation and Vehicle Systems, e-mail: voros.dani@hotmail.com

⁶ Professor, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles, e-mail: jrohacs@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4607-9063>

⁷ Senior lecturer, Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles, e-mail: gybicsak@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3427-3918>

Területszkennelés megerősítéses tanulás és MCTS segítségével Smart city applikációkban

Jelen kutatási projekt célja egy olyan területfeltérképező algoritmus kifejlesztése, amely jól használható okosvárosokban pilóta nélküli légi járműveket (UAV), azaz drónokat alkalmazva. Az elmúlt évek technológiai fejlődésének következtében olyan eszközöket fejlesztenek ki, amelyek egyre nagyobb hatótávolsággal, kapacitással és egyre jobb szenzoros képességekkel rendelkeznek. Ennek köszönhetően az automatizálás sokkal könnyebbé vált, és kevesebb szükség van humán erőforrásokra. Egyre több területen alkalmaznak drónokat például forgalom és környezetszennyezés felügyelete, földmérés, közbiztonság fenntartása, természeti katasztrófák kezelése. Mivel jelentősen nő a területek száma, ahol ezeket a technológiákat alkalmazzák, nagy igény van az ehhez szükséges algoritmusok fejlesztésére. Ez a cikk a Monte-Carlo Tree Search, illetve megerősítéses tanulás ezen területen való alkalmazhatóságát kutatja, amely algoritmusok más területeken már sikeresnek bizonyultak.

Kulcsszavak: *területszkennelés, gépi tanulás, Monte-Carlo-módszer, Smart city*

1. Introduction

A smart city is defined as a city that engages its citizens and connects its infrastructure electronically. The goal of building a smart city is to improve the quality of life by using technology to improve the efficiency of services and meet residents' needs.⁸ The interest in smart cities is increasing day by day, especially after the global financial recession. The world population is increasing and it is foreseeable that the population of the cities is going to be doubled by 2050.⁹ Consequently, these expectations create new challenges and opportunities for cities and communities. Therefore, there is increased interest to focus on utilising information and communication technology (ICT) services and smart solutions in long-term smart city development.¹⁰ Design of such a smart city requires huge and full integration of ICT and its trends. UAVs contribute to these goals. That is why UAVs are involved in a wide range of applications and functions in smart cities. These applications range from monitoring traffic flow to measuring and detecting floods and natural disasters by using wireless sensors. This development is based on technical reports published by technical institutions. Furthermore, many opportunities for UAVs and their applications in smart cities will continue to increase at a fast pace.¹¹

A report prepared by McKinsey and Company shows that worldwide expenditure on construction and infrastructure is about 2 trillion US Dollars per year, and ICT expenditure is about 1.5 to 2% of that number. However, during the coming decade, the advances are expected to continue in areas of cloud computing, wireless sensors, networked unmanned systems, big

⁸ Sam Musa, 'Smart City Roadmap,' 2016.

⁹ Ibid.

¹⁰ R. Shreih, 'Intelligent Systems for Smarter Cities,' King Abdullah University of Science & Technology, 26 August 2013.

¹¹ 'Smart Cities,' King Abdullah University of Science & Technology, 2013.

data, open data, and Internet of Things. In addition, billions of devices are going to be connected. Consequently, there will be a substantial opportunity for using UAVs in Smart Cities.¹²

UAVs are more powerful in terms of range, capacity and sensory capabilities. Furthermore, the advancement in information technology allows for the placement of increasingly powerful and compact on-board computers, opening possibility of deploying more and more complex algorithms. The power consumption and weight of the flight controller and/or the computer board still has a big impact though. Thus, researching and optimizing algorithms is an ever-going task for developers.

The paper is structured as follows: firstly, the real-world applications are introduced, then the formulation of the environment, after that the used algorithms are explained and finally the results and the possible ways of improvements are also discussed.

2. Application

Drones are utilised in various applications and by many industries, institutes and organisations all over the world. These days drones are helping people to create high definition, photogrammetric maps of large areas in a cost-effective manner. There are numerous utilisations which can be applied to smart city applications, greatly needed for effective and high-performance area scanning algorithms. In the next section some of these use cases will be introduced to support the importance of our research on which this paper is mainly focused.

2.1. Traffic and Crowd Management

As population on Earth is growing and the huge cities overpopulate, in the future it will be inevitable for smart cities to build such a system which is capable of controlling the enormous crowds. This system should not only be able to control pedestrians but also traffic on the roads to minimise the emergence of traffic jams. In order to solve this problem, UAVs could be utilised to monitor the roads and supply instant, accurate information for the online traffic management system. A company called ideaForge is already developing such a system which is intended to solve the task.¹³

2.2. Civil Security Control

Another aspect of next generation cities which must be taken into consideration is crime reduction. As the cities are evolving and growing in size, the number of felonies committed might also be on the rise in the future. It will be even harder to find and localise criminals, consequently there must be a competent system implemented which is able to support police activities in such situations. A possible solution is to build such a UAV system which is not only able to monitor the streets but can also detect any kind of irregularity which might imply a felony. These drones

¹² W. Elfrink, 'The Smart-City Solutions.' McKinsey & Co, 2012, ideaForge.

¹³ See www.ideaforge.co.in/drone-uses/crowd-monitoring/ (18. 11. 2019.)

will be equipped with enhanced sensory systems, huge capacity computational resources and fast, wireless communication technologies, which are expected to be developed by the time smart cities appear; and which will allow establishing communication channels to police stations, providing them with instant information on the illegal activity; thus the necessary measures can be taken as fast as possible.¹⁴

2.3. Environmental Management

In the future it is going to be even more vital to establish a healthy environment in which a large group of people can live their lives together. One aspect of this is clean air, which is closely related to green areas like forests and parks, since plants are the natural sources of fresh oxygen in the air. Planting and then watering the trees, bushes, and so on, are also such tasks which can be automated by applying drones, as they can carry the seeds and water tanks and then spot the intended place to deliver those there. Dendra Systems¹⁵ has already introduced products which are capable to fulfill these tasks.

2.4. Construction

The use cases presented so far show how well drones could be used for public services; on the other hand, they can also be utilised in various industrial fields. One industry which greatly benefits from drone mapping is the construction industry. Continuous monitoring would make possible to update on progress instantly on a regular basis. It would also be beneficial to analyse the terrain beforehand on aerial maps, which would help managers to obtain an overview of the site and to make strategic decisions. Furthermore, 3D models of the construction sites can also be generated, which can also help to resolve issues in many cases. Figure 1 shows the map and 3D model of a construction site made by DroneDeploy.



Figure 1

Map and 3D model of a construction site. Source: 'Drone Mapping in Construction,' DroneDeploy.

¹⁴ Farhan Mohammed, Ahmed Idries, Nader Mohamed, Jameela Al-Jaroodi and Imad Jawhar, 'UAVs for Smart Cities: Opportunities and Challenges,' Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), May 27-30, 2014, Orlando, FL, USA.

¹⁵ See www.dendra.io/services (18. 11. 2019.)

2.5. Land surveying

In land surveying, precise measurements are essential to determine boundaries. During measurements, a huge amount of data must be collected about the given area, which supports the creation of maps, plots and documentation. In order to create highly accurate maps, drone photogrammetry can be used, which makes the whole process much faster. It also makes possible to generate 3D topographic maps and to collect the necessary contour data. A case study by DroneDeploy¹⁶ shows the methodology of land surveying using drones.

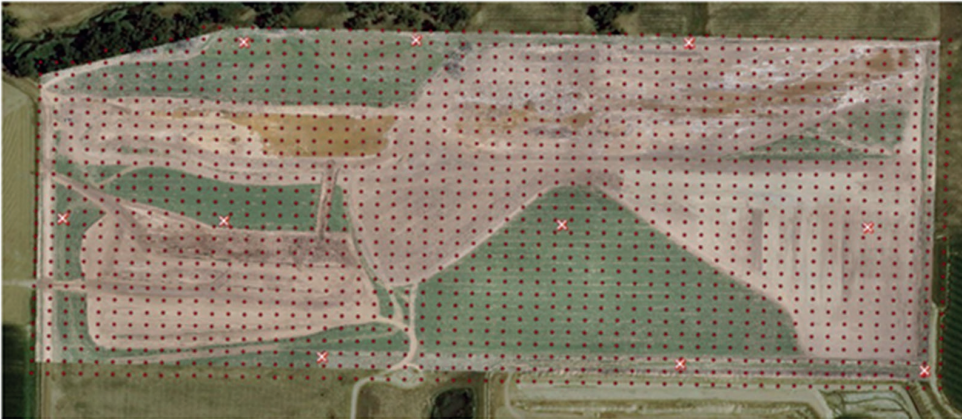


Figure 2
Land surveying using drones. Source: 'Mapping Drones.'

In all the above mentioned cases, monitoring a certain area is a key element. It is most efficient if the task is fulfilled in the shortest amount of time, for which a proper algorithm has to be developed. In the next sections our research on these algorithms will be introduced.

3. Environment

In order to simplify the area scanning task, the graph traversal abstraction is used, hence the goal is to visit each and every node of a graph. The graph-based realisation of the map is shown in Figure 3. As it can be seen, the indexing starts from the upper left edge of the map, which means the origin of it is the upper left cell. The device starts from a random graph point. The value of the graph-points can be three different numbers. In case of -1 , the point is out of the boundary of a given map or is an obstacle. On these terms, the device would not make a movement if the next step happened at such a point. Moreover, the value of the point can be 0 , which means that point has not been visited yet. Last but not least, the value can be 1 if the device has already visited that point. These values are stored in a matrix and updated after each step.

¹⁶ 'Mapping Drones for Professional Surveyors,' DroneDeploy, 2015.

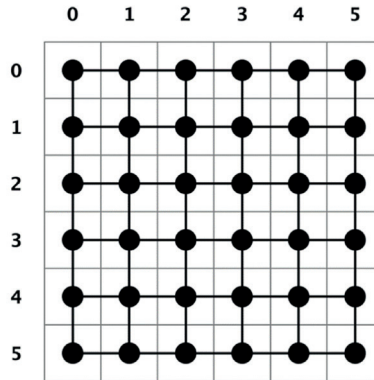


Figure 3
The graph based realisation of the map. Source: Created by the authors

3.1. The vehicle models

A simple, four directional vehicle model has been used – which models the UAV's movement from one position to another in the graph – with the possible moves of up, down, left and right. The possible moves can be seen in Figure 4.



Figure 4
The two vehicle models. Left is the actual four-move; right is the possible eight-move. Source: created by the authors

This simple model can be further developed by an eight-move vehicle model, which is also a good solution, but for the actual problem solving, it is not needed to be developed. Also, it can be considered as a future development in the environment.

3.2. Map generation

For the investigation of the performance of the two selected algorithms, several map generational rules need to be defined. A few examples of the possible maps were already introduced in Figure 3, but the main rules will be discussed in this part.

The structure of the map has been randomised, with the maximum value of obstacle (-1) points of the map being 10. In other words, the number of these graph points can range between 0 and 10. Secondly, these points are randomly divided into maximum three groups. This is the step, where the final shape of the obstacles is designed. Last but not least, these groups are placed on the map, which results in a full random map with obstacles. The random map generation causes flexibility and can be well parameterised.

3.3. Sensor information

While MCTS does not need any sensor information – only the actual state of the map for generating the vertices –, RL needs a representative abstraction of the problem, which can be fulfilled by sensor information in all four directions. This sensor information should show how many steps can be made in one direction to reach the wall. The information is stored in a four-element vector with the sensor information in the four direction.

Instead of using the interval $[0; 5]$, it is favorable to transform the information into the interval $[-1; 1]$. This can be explained by the activation function of the neural network, which can be seen in Figure 5. During the learning process, if the value is greater than 1, the derivative of the tangent hyperbolic activation function will be 0. Therefore, the learning algorithm backpropagates zeros, which means that the weights of the network will not change. This means that the activation function saturates the values above 1 and below -1, hence the neural network will not learn. Thereby, normalisation helps to accelerate solving the problem.

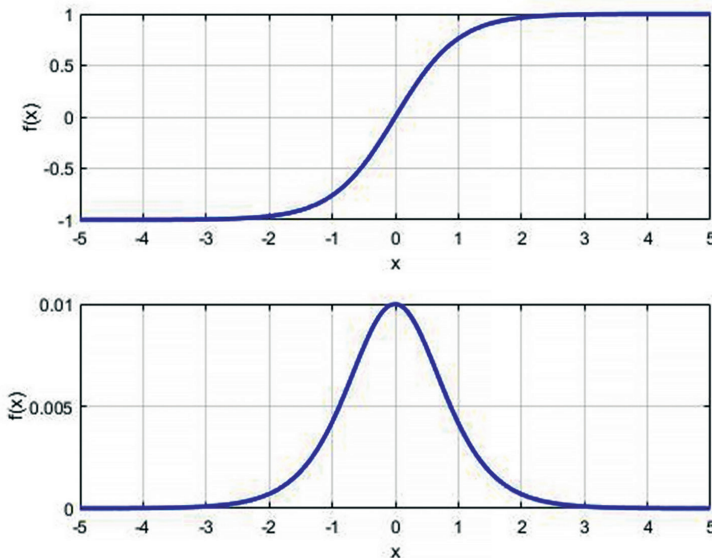


Figure 5
Tanh activation function and its derivative. Source: created by the authors

As it is mentioned above, a simple linear interpolation transformation is used between the possible steps and the interval with a step size of 0.4. The interpolated sensor information can be seen in Table 1.

Table 1
Interpolation between possible steps in a direction and sensor information. Source: created by the authors

Possible steps in a direction	5	4	3	2	1	0
Sensor information	1	0.6	0.2	-0.2	-0.6	-1

An example for the final form of the sensor vector – if we assume an empty map with the starting point in the top left corner (the directions in the vector in order: left, right, up, down) – is the following: $[-1; 1; -1; 1]$.

Thanks to the new sensor information vector – which is based on the position and the relative distance from the wall –, the learning is implicitly accelerating, while the problem is becoming more general.

4. Algorithms

4.1. Machine Learning Based Solution

Recently, many industries has been facing the problem of computational complexity, because there are a lot of problems that can be solved with classic algorithms or approaches, but the implementation of the needed computational resources is just not feasible, or the algorithm does not exist yet. Therefore, the interest in machine learning based methods is growing year by year, although this area also has a serious drawback, namely, such techniques cannot be validated, hence cannot be used solely in safety critical systems. Machine learning has three different areas: unsupervised, supervised and reinforcement learning. In unsupervised learning the hidden structure of the given dataset is explored, while in the supervised case the goal is to re-establish the connection between the input data and the output label. Currently the supervised learning methods are the most often used in several industries,¹⁷ and it is also heavily researched in the aircraft domain.¹⁸ Unfortunately, adversarial attack¹⁹ arising from the special associative features of neural networks cause a lot of trouble in decision making, hence worsen the applicability of supervised learning.

¹⁷ See, for example, Pierre Sermanet and Yann Lecun, 'Traffic sign recognition with multi-scale Convolutional Networks,' Proceedings of the 2011 International Joint Conference on Neural Networks, July 2011. p. 2809–2813.

¹⁸ See, for instance, Fan Zhang, Bo Du, Liangpei Zhang and Miaozhong Xu, 'Weakly supervised learning based on coupled convolutional neural networks for aircraft detection,' *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54, no 9 (2016), 5553–5563.

¹⁹ Aleksander Madry, Aleksandar Makelov, Ludwig Schmidt, Dimitris Tsipras and Adrian Vladu, 'Towards deep learning models resistant to adversarial attacks,' arXiv, Cornell University, 2017.

Reinforcement learning have just become popular thanks to the extraordinary results in video games,²⁰ robotics,²¹ and other control tasks.²² In contrast to supervised learning, it has serious advantages: it does not require a huge number of labeled training data, which is expensive to create, and in case of RL the reachable result is not limited.²³ Although RL also has some drawbacks, like struggling with convergence in the training phase, or lack of robustness and reliability.²⁴

4.2. Reinforcement Learning

RL uses a trial-error based technique to solve sequential decision-making problems, through which it generates the data for the learning process by interactions between the agent and the environment, as shown in Figure 6.

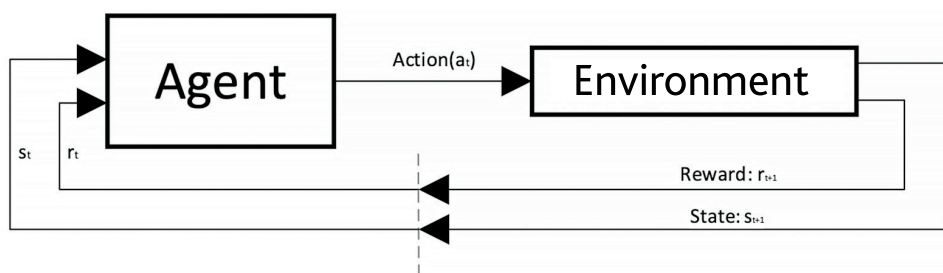


Figure 6

The interaction between the agent and the environment. Source: Created by the authors

The interactions between the agent and the environment are formalised as a Markov Decision Process (MDP) where the agent starts from an arbitrary state $s_0 \in S$ and then it chooses one from the possible actions $a_0 \in A$, then the environment executes the chosen actions which induce a state transition in the environment $P(s_t, a_t, s_{t+1})$, and finally, at the end of the step, the environment shows the immediate consequence of the execution of the chosen action with a scalar feedback called reward $r_{t+1} \in R$.

²⁰ Volodymyr Mnih, Koray Kavukcuoglu, David Silver, Alex Graves, Ioannis Antonoglou, Daan Wierstra and Martin Riedmiller, 'Playing atari with deep reinforcement learning,' arXiv, Cornell University, 2013.

²¹ Timothy P. Lillicrap, Jonathan J. Hunt, Alexander Pritzel, Nicolas Heess, Tom Erez, Yuval Tassa, David Silver and Daan Wierstra, 'Continuous control with deep reinforcement learning,' arXiv, Cornell University, 2015.

²² Tamás Bécsi, Szilárd Aradi, Ádám Szabó and Péter Gáspár, 'Policy gradient based Reinforcement learning control design of an electro-pneumatic gearbox actuator,' *IFAC-PapersOnLine* 51, no 22 (2018), 405–411; Árpád Fehér, Szilárd Aradi, Ferenc Hegedűs, Tamás Bécsi and Péter Gáspár, 'Hybrid DDPG Approach for Vehicle Motion Planning,' Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2019.

²³ See, for example, David Silver, Julian Schrittwieser, Karen Simonyan, Ioannis Antonoglou, Aja Huang, Arthur Guez, Thomas Hubert, Lucas Baker, Matthew Lai, Adrian Bolton, Yutian Chen, Timothy Lillicrap, Fan Hui, Laurent Sifre, George van den Driessche, Thore Graepel and Demis Hassabis, 'Mastering the game of go without human knowledge,' *Nature* 550, no 7676 (2017), 354–359.

²⁴ Peter Henderson, Riashat Islam, Philip Bachman, Joelle Pineau, Doina Precup and David Meger, 'Deep reinforcement learning that matters,' arXiv, Cornell University, 2018.

The goal of the agent is to maximize the cumulated reward for the process:

$$G = \sum_{i=1}^T r_t \quad (1)$$

Unfortunately, following the highest rewards may not direct the agent to this goal, because it only describes the immediate performance. Therefore the discount factor γ ($0 \leq \gamma \leq 1$) has been introduced. The shows how the choices of the present determine the rewards of the future. If $\gamma = 0$, it means that the current decision does not influence the future rewards at all, while in the $\gamma = 1$ case a choice totally determines the future. The use of γ allows us to further specify the goal of the agent:

$$G = \sum_{i=1}^T \gamma^t r_t \quad (2)$$

This is the maximisation of the cumulated discounted rewards.

If the environment has a terminal state which interrupts the training process, then the learning task is called episodic; if there is no terminal state in the environment, then the learning task is continuous. To solve the problem with RL the agent also has to solve the so-called exploration-exploitation trade-off. It basically means that at the beginning the agent does not know for sure which actions lead to the optimal behavior, so it has to choose randomly from the actions to explore the best path, but it may backfire with a punishment instead of a reward.

4.3. Policy Gradient

RL has three main groups in case of learning algorithms. The first group is the value-based methods, where the neural network is trained to approximate action value function by applying the Bellmann equation:

$$Q(s_t, a_t) = r_t + \gamma \max Q(s_{t+1}, a_t) \quad (3)$$

In this method the behavior – the policy – is determined indirectly, because the algorithm calculates the action values but does not recommend anything for how to exploit them. So, this method works as a situation interpretation. The drawback of this approach is that the convergence of the algorithm is not guaranteed.²⁵ The second group is called policy based RL, because in that case the agent is trained to directly approximate the policy, thus to determine which action to choose. The output of the neural network in every state is a probability distribution over the possible actions that sums up to 1. The biggest advantage of these methods is the guaranteed convergences to local optima.²⁶ The third algorithm is

²⁵ Dimitri P. Bertsekas, *Dynamic programming and optimal control* (Belmont, MA: Athena scientific, 1995).

²⁶ See Richard S. Sutton, David McAllester, Satinder Singh and Yishay Mansour, 'Policy gradient methods for reinforcement learning with function approximation,' *Advances in neural information processing systems* 12 (2000), 1057–1063.

the mixture of the introduced ones, and is called Actor–Critic. For this task the policy-based approach has been chosen because of its great convergence properties.

The Policy Gradient (PG) algorithm gives the actions by a stochastic policy $\pi_\theta(a_t, s_t)$, that is parametrised by the θ parameters of the neural network, which is used as a function approximator. Therefore, this is an optimisation problem where the goal is to find the weights – parameters of the neural network – that maximises the $J(\theta) = J(\pi_\theta)$ function, which is the performance indicator of the problem:

$$J = \mathbf{E} \left[\sum_{t=1}^T \gamma^t r_t \right] \quad (4)$$

The PG follows the steepest ascent of the performance indicator function in order to reach local optima, hence the update rule of the θ parameters can be formalised as follows:

$$\Delta\theta = \alpha \nabla_\theta J(\theta) \quad (5)$$

where α is called learning rate, which is one of the most important hyperparameters of the training process, because this parameter determines the size of the change in the neural network weights.

The gradients are calculated by applying Sutton's theorem,²⁷ thus the final form of the gradient update rule is:

$$\theta \leftarrow \theta + \alpha \nabla \log \pi(s_t, a_t) \sum_{t=1}^T \gamma^t r_t \quad (6)$$

4.4. Monte-Carlo Tree Search

The greedy algorithms, which use heuristics and which contain environment specific information and strategies, are applied in several areas, but in general there are no guaranties for the performance, because of the nature of the heuristics. The opposite of these methods is the uninformed search algorithms like breadth first or depth first search. These methods are able to find the optimal solution of discrete problems if there is one. In the meantime, these methods cannot be used in real world applications, because the needed computational resources do not exist yet, or, in other cases, it is not feasible to implement this kind of equipment into devices that are mass produced. So, the problems are general applicability and computational expenses; these concerns are mitigated by the MCTS algorithm.

The MCTS algorithm builds a tree representation of a problem node by node with the help of the model of the environment. The algorithm has four steps, that is repeated during the building process:

- Selection: Starts from the current state's node R and recursively chooses the best child node until it reaches a leaf node;
- Expansion: If the leaf node is not a terminal node, then it populates its child nodes with the generative model of the environment, and chooses one C child node of them;

²⁷ Ibid.

- Simulation: Carries out a random rollout from the current node, which means choosing actions randomly until a terminal node occurs;
- Backpropagation: Updates the nodes information between the path of R and C with the result of the rollout.

MCTS uses the UCT (Upper Confidence bound applied for Trees) algorithm to choose the best node in the selection phase:

$$v_i + C \sqrt{\frac{\ln N_i}{n_i}} \quad (7)$$

where the v_i is the value of the current node and the N_i is the number of visits of the parent node, while the n_i is the number of visits of the current node and is the constant that controls the exploration-exploitation trade-off.

The node with the highest UCT value is chosen every time. The two sides of the UCT algorithm are the opposites of each other, because while the left side with the expression goes to the direction that seems the most valuable, the right side drives the attention into the less explored parts of the tree, hence through the C constant the trade-off is domain specifically parametrisable. Thanks to that, it can be proved that the MCTS has an optimal solution if enough time is given.²⁸

Customization of MCTS

In order to further decrease the computational complexity of the problem, domain specific knowledge is implemented into the tree to carry out cut-offs. These techniques let the algorithm reduce the search space by ignoring the generation of specific nodes based on pre-implemented rules. In this case the rules are:

- Do not populate nodes that are created by actions that lead the algorithm to cells that are already visited.
- Do not populate nodes that are created by actions that lead the algorithm to obstacles or cells out of the map.

The search space for the algorithm is remarkably simplified by these rules, which also decrease the time needed for the decision-making process.

The calculation of the values in (7) are based on the reached state at the end of the rollout phase. If all the cells are visited ones – so the map is scanned –, then the given value is 1, otherwise it is -1.

²⁸ See Levente Kocsis and Csaba Szepesvári, 'Bandit based monte-carlo planning,' in *Machine Learning: ECML 2006*, ed. by J. Fürnkranz, T. Scheffer, and M. Spiliopoulou (Berlin – Heidelberg: Springer, 2006), 282–293.

5. Results

5.1. Reinforcement learning-based solution

There are many parameters that affect the result of the training and do not change during the process at all; these parameters are called hyperparameters. Hyperparameters are the number of neurons, the number of hidden layers, the discount factor, the update frequency of the neural network parameters, or the used activation functions, and also the learning rate. The chosen values are shown in Table 2.

Table 2
Hyperparameters. Source: created by the authors

Parameter	Value
Number of neurons per layer	128
Number of hidden layers	4
Update frequency of neural network parameters (ξ)	25
Discount factor (γ)	0.3
Activation function	TANH
Learning rate (α)	0.0001

It is also important to specify the terminal conditions and the rewards of the environment before training. The episode is over if the agent chooses an action that leads to a cell – or node – which is already visited, or an obstacle, or the wall; the episode also ends when the agent visits every node once. The final criterion is that all the episodes should last until a terminal state occurs. In that problem immediate rewards are not used, hence the agent gets the feedback at the end of the episode, which is 1 in case of success and -1 otherwise.

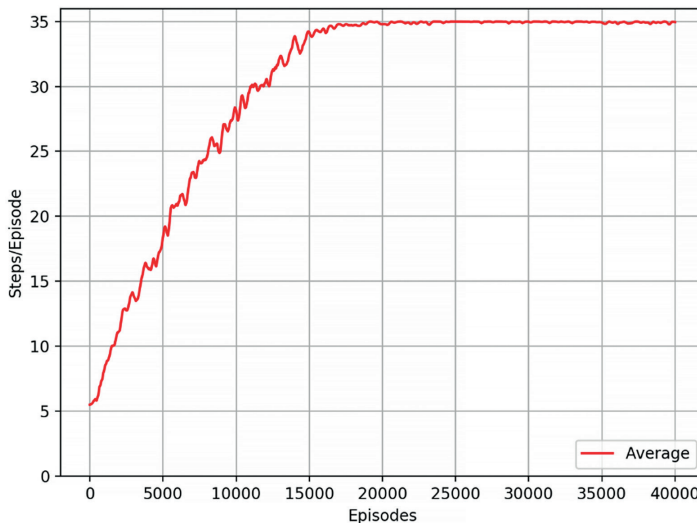


Figure 7
The convergence of the learning algorithm. Source: created by the authors

In the training phase the task is to scan a simple 6×6 map where the agent starts from random positions in all the episodes. The result of the training is shown in Figure 7.

Figure 7 shows the number of steps taken in each episodes; after 20 000 episodes the agent learned how to visit all the nodes in the graph – to scan all the cells in the map – without visiting any node more than once, which is considered as the optimal solution of this task.

After the evaluation of the trained agent the result showed that it learned to avoid steps which would lead to already visited cells, and it is able to solve a map which has the same shape but different size, hence the relative sensor information vector encouraged the agent to generalise the problem and to learn patterns instead of absolute scenarios, due to the fact that the agent developed some kind of scale invariance. Figure 8 displays strategies executed in maps with different sizes.

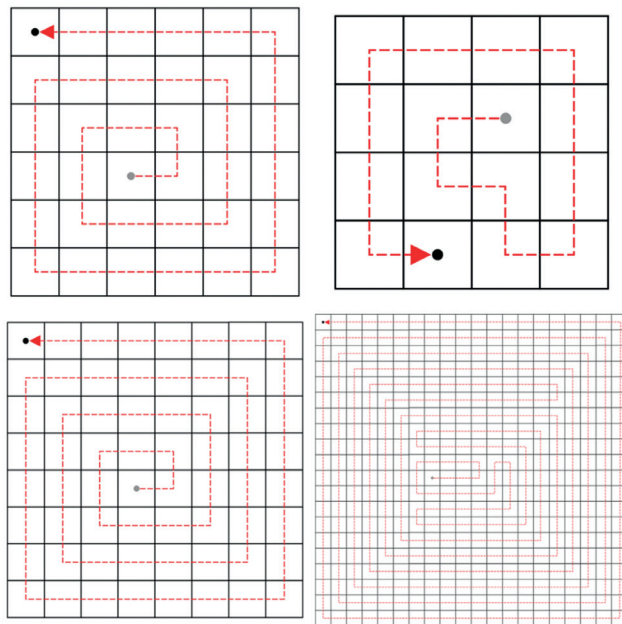


Figure 8
Strategies on maps of different size. Source: created by the authors

5.2. The search-based solution

The search-based method uses the MCTS as an online planner and operates as follows:

1. The algorithm starts from a random position in a randomly generated map;
2. Executes an MCTS with a fixed number of iterations;
3. Chooses an action based on the result of the MCTS;
4. Updates the state of the map by the execution of the chosen action;
5. Repeats until a terminal condition is fulfilled.

The terminal conditions are the same as in the RL based solution. The decision-making is made by the recommendation of the MCTS, which is a probability distribution over the possible actions in the given state. The probability distribution is created by the visit counts of the child nodes of the given state. In order to get probabilities from the visit counts, the softmax function is used:

$$\sigma(n_i) = \frac{e^{n_i}}{\sum_{j=1}^K e^{n_j}} \quad (8)$$

where n_i is the number of visits of the current node and K is the number of child nodes in the given state.

The action with the highest probability is chosen in all case. Figure 9 shows some strategies carried out by MCTS.

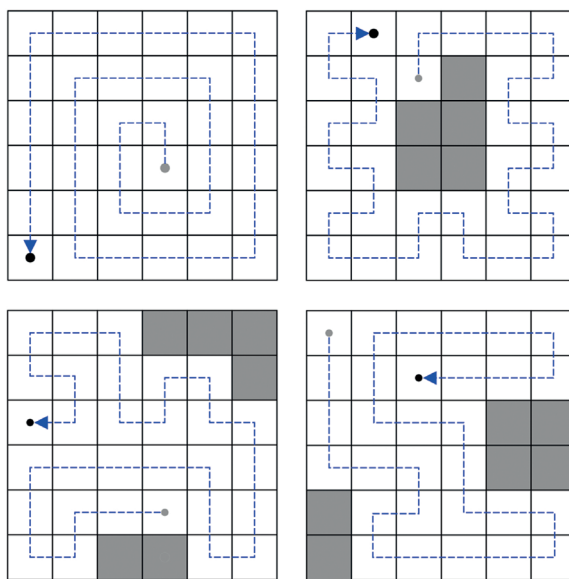


Figure 9
Traversals carried out by the MCTS algorithm. Source: created by the authors

The MCTS is able to solve any randomly generated map from any starting point. The performance of this method is limited by the size of the map, hence the computational expenses, because the bigger the map the more iteration is needed to find the optimal decision in the given state.

6. Conclusion

We introduced two approaches that solve the simplified form of the area scanning problem in different ways. The MCTS is able to carry out a traversal strategy for both convex and concave shapes from any starting point in the area, while real-time applicability in smaller domains

is maintained. Unfortunately, as the number of cells which should be visited increases, it still becomes too complex in terms of computation; to challenge this issue in our further work, we propose to investigate the possibility of decomposing the large areas into smaller, thereby manageable ones which can be solved faster.

The RL based solution is reliably able to provide real-time applicability, and through the use of relative sensor information a scale invariancy in similar shapes has been learned, so the agent can solve the same shapes with different sizes from different starting points. Unfortunately, in that case the agent is only trained on one shape, hence it is not able to solve any kind of shapes; so it is less robust than MCTS.

The next steps of this research will be the development of the environment to be more realistic and to train more robust agents by using different shapes and scales in the training process; we also see enormous potential in the synergy of the introduced methods, because the absolute robustness of the MCTS and the real-time applicability of the RL are the two most important properties of an algorithm that might be able to solve such problems. Therefore, we propose to investigate the applicability of planning agent methods that are already successfully used in several domains.²⁹

Acknowledgement

The results are used in the 'Small aircraft hybrid propulsion system development' project, supported by Hungarian national EFOP-3.6.1-16-2016-00014 project titled 'Investigation and development of the disruptive technologies for e-mobility and their integration into the engineering education.'

Bibliography

- Bécsi, Tamás – Aradi, Szilárd – Szabó, Ádám – Gáspár, Péter: 'Policy gradient based Reinforcement learning control design of an electro-pneumatic gearbox actuator.' *IFAC-PapersOnLine* 51, no 22 (2018), 405–411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.577>
- Bertsekas, Dimitri P.: *Dynamic programming and optimal control*. Belmont, MA, Athena scientific, 1995.
- Dendra systems, url: www.dendra.io/services (18. 11. 2019.)
- Elfrink, W.: 'The Smart-City Solutions.' McKinsey & Co, 2012, ideaForge. Available: www.ideaforge.co.in/drone-uses/crowd-monitoring/ (18. 11. 2019.)
- 'Drone Mapping in Construction.' DroneDeploy. Available: www.dronedeploy.com/resources/ebooks/drone-mapping-construction-earthwork/#form (01. 05. 2019.)
- Fehér, Árpád – Aradi, Szilárd – Hegedűs, Ferenc – Bécsi, Tamás – Gáspár, Péter: 'Hybrid DDPG Approach for Vehicle Motion Planning.' Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5220/0007955504220429>

²⁹ Silver et al, 'Mastering the game of go,' 354.

- Henderson, Peter – Islam, Riashat – Bachman, Philip – Pineau, Joelle – Precup, Doina – Meger, David: 'Deep reinforcement learning that matters.' arXiv, Cornell University, 2018. Available: <https://arxiv.org/abs/1709.06560> (18. 11 2020.)
- Kocsis, Levente – Szepesvári, Csaba: 'Bandit based monte-carlo planning.' In: *Machine Learning: ECML 2006*, ed. by Fürnkranz, J. – Scheffer, T. – Spiliopoulou, M. Berlin – Heidelberg, Springer, 2006. 282–293. DOI: https://doi.org/10.1007/11871842_29
- Lillicrap, Timothy P. – Hunt, Jonathan J. – Pritzel, Alexander – Heess, Nicolas – Erez, Tom – Tassa, Yuval – Silver, David – Wierstra, Daan: 'Continuous control with deep reinforcement learning.' arXiv, Cornell University, 2015. Available: <https://arxiv.org/abs/1509.02971> (10. 11 2020.)
- Madry, Aleksander – Makelov, Aleksandar – Schmidt, Ludwig – Tsipras, Dimitris – Vladu, Adrian: 'Towards deep learning models resistant to adversarial attacks.' arXiv, Cornell University, 2017. Available: <https://arxiv.org/abs/1706.06083> (10. 11 2020.)
- 'Mapping Drones for Professional Surveyors.' DroneDeploy, 2015. Available: <https://blog.droneDeploy.com/case-study-830cfc23db55> (01. 05. 2019.)
- Mnih, Volodymyr – Kavukcuoglu, Koray – Silver, David – Graves, Alex – Antonoglou, Ioannis – Wierstra, Daan – Riedmiller, Martin: 'Playing atari with deep reinforcement learning.' arXiv, Cornell University, 2013. Available: <https://arxiv.org/abs/1312.5602> (10. 11 2020.)
- Mohammed, Farhan – Idries, Ahmed – Mohamed, Nader – Al-Jaroodi, Jameela – Jawhar, Imad: 'UAVs for Smart Cities: Opportunities and Challenges.' Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), May 27-30, 2014, Orlando, FL, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/icuas.2014.6842265>
- Musa, Sam: 'Smart City Roadmap.' 2016. Available: www.academia.edu/21181336/Smart_City_Roadmap (10. 11 2020.)
- Sermanet, Pierre – Lecun, Yann: 'Traffic sign recognition with multi-scale Convolutional Networks.' Proceedings of the 2011 International Joint Conference on Neural Networks, July 2011. p. 2809–2813. DOI: <https://doi.org/10.1109/ijcnn.2011.6033589>
- Shreih, R.: 'Intelligent Systems for Smarter Cities.' King Abdullah University Of Science & Technology, 26 August 2013. Available: <https://innovation.kaust.edu.sa/intelligent-systems-for-smarter-cities/> (10. 11 2020.)
- Silver, David – Schrittwieser, Julian – Simonyan, Karen – Antonoglou, Ioannis – Huang, Aja – Guez, Arthur – Hubert, Thomas – Baker, Lucas – Lai, Matthew – Bolton, Adrian – Chen, Yutian – Lillicrap, Timothy – Hui, Fan – Sifre, Laurent – Driessche, George van den – Graepel, Thore – Hassabis, Demis: 'Mastering the game of go without human knowledge.' *Nature* 550, no 7676 (2017), 354–359. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature24270>
- 'Smart Cities.' King Abdullah University of Science & Technology, 2013. Available: <https://innovation.kaust.edu.sa/industry/brows-e-technology/smart-cities/> (10. 11 2020.)
- Sutton, Richard S. – McAllester, David – Singh, Satinder – Mansour, Yishay: 'Policy gradient methods for reinforcement learning with function approximation.' *Advances in neural information processing systems* 12 (2000), 1057–1063.
- Zhang, Fan – Du, Bo – Zhang, Liangpei – Xu, Miao Zhong: 'Weakly supervised learning based on coupled convolutional neural networks for aircraft detection.' *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54, no 9 (2016), 5553–5563. DOI: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2569141>



Huszár Péter¹

Drónok elleni fenyegetések a kibertérből

A publikáció azt a kérdést járja körül, hogy a manapság egyre nagyobb népszerűségnek örvendő, kereskedelmi forgalomban kapható, bárki által szabadon hozzáférhető pilóta nélküli légi járművek (köznyelven elterjedten: drónok) mennyire vannak kitéve különböző, kibertérből származó fenyegetéseknek. Ehhez ismerteti a kibertér és a pilóta nélküli légi jármű-rendszer meghatározását, bemutatja egy ilyen rendszer általános felépítését és részegységeit, ezek alapján pedig rámutat a kettő közötti kapcsolatra. Ezt követően röviden ismerteti azokat a támadási felületeket és módszereket, amelyek már létező, kibertérből származó fenyegetést jelentenek a pilóta nélküli légi járművek számára. Végül a publikáció kitér arra is, hogy hogyan használhatók ezek a megoldások a pilóta nélküli légi járművekkel szembeni védekezés során.

Kulcsszavak: UAV, CUAV, drón, kibertér, drónok elleni védekezés

Threats Against Drones from Cyberspace

The publication addresses the question whether commercially available unmanned aircrafts (commonly known as drones), which are becoming increasingly popular today and are freely accessible to anyone, are exposed to various cyberspace threats or not. It describes the definition of cyberspace and the unmanned aerial vehicle system, presents the general structure and components of such a system and points out the relationship between the two. Then it briefly describes the attack vectors and methods that pose an existing cyberspace threat to unmanned aerial vehicles. Finally, the publication also discusses how these solutions can be used in defence against unmanned aerial vehicles.

Keywords: UAV, CUAV, drone, cyberspace, protection against drones

1. Bevezetés

A számítástechnika töretlen fejlődésének eredményeképpen mára a legtöbb ember életében megkerülhetetlen szerepet töltenek be a különböző informatikai eszközök, szoftverek és az internet. A vezeték nélküli kommunikációs technológiák kifejlesztése és elterjedése

¹ Nemzeti Közsolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola, doktori hallgató, e-mail: huszar.peter.92@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6169-3777>

e folyamat egyik kulcsfontosságú alappillére. Az IEEE 802.11 (elterjedt nevén: wifi), a mobilhálózatok lefedettsége és a korszerű mobilinternet-használati eszközeink milliárdjait kötik össze egymással világszerte szünet nélkül. Napjaink fejlett technológiája által nyújtott kényelemnek azonban megvan az ára. A hálózatos társadalomban számos új lehetőség kínálkozik egyének, szervezetek és nemzetek ellen irányuló támadás végrehajtására. Legyen szó akár rejtett információgyűjtésről, ipari létesítmények működésének befolyásolásáról vagy kiberhadviselésről. E világméretű hálózat végpontjai azonban nem csupán személyi számítógépek és mobiltelefonok lehetnek. Számos autonóm eszköz, szenzor és ipari berendezés is folyamatosan elérhető az interneten keresztül. Adódik viszont a kérdés, hogy a manapság egyre nagyobb népszerűségnek örvendő kisméretű pilóta nélküli légi jármű-rendszerek (sUAS, Small Unmanned Aircraft System), amelyek kisebb lokális vezeték nélküli hálózatok vagy akár az internet mint globális hálózat részei is lehetnek, tekinthetők-e a kibertér részeként? Alkalmazhatók-e velük szemben már létező kibertámadási módszerek? „Feltörhető-e” távról az operátor tudta nélkül klasszikus kibertámadási eljárásokkal? Ha igen, milyen és mekkora veszélyt jelentenek a megtámadott drónok? Végül fontos megvizsgálni azt is, ha erre van lehetőség, akkor hogyan lehet a nem kívánt, azonosítatlan, behatoló drónokkal szemben alkalmazni és így a velük szembeni védekezésre használni e módszereket.

2. A kibertér és a pilóta nélküli légi jármű-rendszer

A kibertér az évek során több különböző módon is meghatározta.² Ki-ki saját aspektusaiból. Abban azonban a legtöbb definíció egyetért, hogy hálózatba kapcsolt infokommunikációs eszközök felhasználásával, adatgyűjtésre, tárolásra és továbbításra létrehozott kapcsolatok összessége. A pilóta nélküli repülőek szempontjából fontos, hogy nemcsak vezetékes, de vezeték nélküli kapcsolatok is a kibertér részét képezik.

A UAS értelmezésére is, a kibertérhez hasonlóan, különböző definíciók születtek az évek során. A Szövetségi Légügyi Hatóság (Federal Aviation Administration, FAA), a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (International Civil Aviation Organization, ICAO) és az Európai Repülésbiztonsági Ügynökség (European Aviation Safety Agency, EASA) definíciói is eltérnek némileg. Ez jól látható a Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems (JARUS) összefoglalójában,³ valamint más szakmai művekben is.⁴ Az apró különbségek ellenére abban viszont mind egyetértenek, hogy az UAS része a pilóta nélküli légi jármű (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) és annak földi irányító állomása (Ground Control Station, GCS), valamint a kettő közötti vezeték nélküli adatkapcsolat. Ez már a 2020-ban hatályba lépő európai uniós, a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó rendeletben⁵ is észrevehető.

A földi állomás jellemzően egy távirányítóból és/vagy egy kiegészítő számítógépből, mobiltelefonból épül fel. A kiegészítő számítógépen történik a repülési útvonal kijelölése és a beérkező adatok, élő videóképek kijelzése, tárolása és kiértékelése. Ehhez kapcsolódhat még vezetékes vagy akár vezeték nélküli kapcsolat segítségével maga a távirányító. A távirányító

² Haig Zsolt: *Információs műveletek a kibertérben*. Budapest, Dialóg Campus, 2018.

³ Julia Sanchez: *JARUS Glossary*. Edition 7. 2018. 83.

⁴ Reg Austin: *Unmanned Aircraft Systems. UAVs Design, Development and Deployment*. Wiley, 2010. 3.

⁵ EU 2019/947 Az Európai Bizottság végrehajtási rendelete a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról. 2019. 05. 24., 2. cikk, 1. bekezdés.

és a drón között egy másik vezeték nélküli kapcsolatot alakít ki. Olyat, amely sokkal jobban megfelel a drónok irányítása által támasztott követelményeknek. Ezt a későbbiekben ki fogom fejteni.

Méret szerinti csoportosítás szerint az UAS-ek egy alcsoportját képezik az sUAS-ek, amelyek esetében a pilóta nélküli légi jármű-rendszer részét képező UAV maximális felszálló tömege (Maximum Take-off Weight, MTOW) nem haladja meg a 25 kg-ot. Maximális repülési sebessége 160 km/h, repülési magassága pedig kevesebb, mint 400 láb AGL (Above Ground Level: talajszint feletti magasság).⁶ Ebbe a csoportba tartoznak a legnépszerűbb kereskedelmi forgalomban, bárki által szabadon hozzáférhető drónok. Köztük megtalálhatók merevszárnyas (Fixed Wing UAV) modellek is, de az eladott modellek túlnyomó többsége valamilyen multirotoros, forgószárnyas (Rotary Wing UAV) kialakítású eszköz. Az említett kategóriába tartozik például a DJI egyik legújabb drónja, a 249 g felszálló tömeggel, 30 perces repülési idővel, 2 km-es hatótávolsággal és élő, nagy felbontású videó közvetítésére képes DJI Mavic Mini. Valamint szintén idesorolható a cég másik terméke, a 24,5 kg maximális felszálló tömegű, nyolcrotoros permetező drón, a DJI Agras MG1 is. Ebből látható, hogy e kategória rendkívül széles spektrumot ölel fel, és az idesorolható drónokkal elvégezhető feladatok is hasonlóan változatosak.

A rendszer következő fontos része az UAS működéséhez szükséges vezeték nélküli kommunikációs csatorna. Egy UAS több különböző vezeték nélküli kapcsolatot is használhat egy időben. E szempontból megkülönböztethető egy, az UAV-vezérlésre és telemetriás adatok fogadására fenntartott csatorna (CNPC, Control and Non-Payload Communication) és egy másik, a hasznos teherrel történő kommunikációra használt csatorna (PC, Payload Communication). A kettő között az eltérő jellemzőik miatt kell különbséget tenni. Míg a CNPC-nek robusztusnak kell lennie minimális adatmennyiség átvitele mellett, magas rendelkezésre állással, addig a PC-csatornán jóval nagyobb mennyiségű adatot kell eljuttatni az UAV-tól a GCS felé (például nagy felbontású élő videó). A két kommunikációs csatorna gyakran különböző frekvenciatartományokban működik. Elterjedt megoldás, hogy a CNPC például 2,4 GHz-es, a PC pedig 5,8 GHz-es ISM⁷ sávot használja. Az alacsonyabb frekvenciák kedvezőbbek a nagyobb távolságú rádiós összeköttetések létrehozására. Magasabb frekvenciákon viszont nagyobb adatátviteli sávszélesség alkalmazható, viszont előtérbe kerül az UAV- és a GCS-antennák közötti optikai rálátás biztosításának szükségessége. Az sUAS-ek esetében igen sokféle alkalmazott kommunikációs protokollal találkozhatunk, legyen az PC- vagy CNPC-csatorna. Használhatnak szabványos IEEE vezeték nélküli kommunikációs protokollokat (például IEEE 802.15.4 ZigBee, IEEE 802.11 WiFi, IEEE 802.15.1 Bluetooth), RC⁸ kommunikációs protokollokat (például PCM,⁹ PPM,¹⁰ DSMX¹¹ stb.). Egyes gyártók saját fejlesztésű, szabadalmaztatott megoldásokat használnak (például DJI Lightbridge 1 és 2, DJI OcuSync). Léteznek széles körben elterjedt nyílt forráskódú protokollok is (például MAVLink 1 és 2).

⁶ Liling Ren et al.: *Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Categorization Framework for Low Altitude Traffic Services*. IEEE AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference, 2017.

⁷ ISM: Industrial Scientific and Medical – ipari, tudományos és egészségügyi elektronikus berendezések működésére kijelölt frekvenciatartomány.

⁸ RC: Radio Control – rádió-távírányítású modellekhez használt eszközök és technológiák összefoglaló neve.

⁹ PCM: Pulse-code Modulation – pulzuskód-moduláció.

¹⁰ PPM: Pulse Position Modulation – pulzuspozíciós moduláció.

¹¹ DSMX: Digital Spectrum Modulation – digitálisspektrum-moduláció.

Az előzőek alapján látható, hogy napjaink drónjai és az azokhoz tartozó kiegészítő eszközök, távirányítók, földi állomások számos olyan technológiát használnak, mint a mobiltelefonok, IoT-eszközök és számítógépek. Ezek alapján és a korábban ismertetett definíciók alapján pedig megállapítható, hogy az sUAS-ek a kibertér részének tekinthetők.

3. Sebezhetőségek és támadási módszerek

Az sUAS-ekkel szemben alkalmazott kibertámadások fókuszában a rendszer bizalmasságának, integritásának és rendelkezésre állásának befolyásolása, illetve lerontása áll, valamint az irányításának és felügyeletének az átvétele. A bizalmasság feltételezi, hogy a rendszerben kezelt információkhoz csak az arra jogosultak férnek hozzá. Ennek eredményeképpen az UAV és a GCS közti kommunikáció nem vagy csak nehezen lehallgatható. Az integritás megléte biztosítja, hogy csak érvényes és eredeti információt használnak fel, ezzel biztosítva a megfelelő működést. A rendelkezésre állás pedig azt jelenti, hogy a pilóta nélküli légi jármű-rendszer folyamatosan megszakítás nélkül elérhető a névleges teljesítményén, amikor arra a felhasználónak szüksége van.¹²

A SkyJack¹³ és a DroneJack két olyan eszköz, amelyek kifejezetten wifikommunikációs protokollt használó COTS (Commercial off the Shelf: kereskedelmi forgalomban szabadon hozzáférhető) drónok irányításának átvételére lettek létrehozva. Mindkét megoldás wifihálózatok biztonságosságának tesztelésére és sebezhetőségeinek felfedezésére használt szoftvercsomagokra épül (például arcrack-ng¹⁴ és airodump-ng¹⁵). Működésük során folyamatosan monitorozzák a hatótávolságon belüli wifihálózatokat, és ha találnak egy drónhoz köthető MAC-címet,¹⁶ a támadás automatikusan megkezdődik. A MAC-címek és az azokat birtokló cégek nevei szabadon hozzáférhetőek internetes adatbázisokban.¹⁷ A MAC-címeket összehasonlítva ezekkel az adatbázisokkal, jó eséllyel eldönthető egy hálózati eszközről, hogy az egy drón vagy sem. A támadás következő lépéseként mindkét megoldás deautentikációs csomagokat küldve megpróbálja megszakítani a GCS és az UAV közötti kapcsolatot. Amint ez sikerül, a legtöbb drón aktiválja az ilyen esetekre előre definiált vészhelyzeti protokolljainak egyikét. Ez lehet például automatikus hazatérés (Return to Home, RTH) vagy egyhelyben lebegés (LOIT, Loiter). Közben az eszköz várakozik a kapcsolat helyreállítására. Azonban ha az előzőleg megszakadt kapcsolat nem védett például jelszóval, akkor mindkét megoldás el tudja foglalni a GCS helyét, ezzel átvéve az irányítást a drón felett. Ezt követően a DroneJack képes megadott GPS-koordinátákra leszállítani a drónt vagy visszaküldeni a felszállási helyére. Parrot drónok esetében a motorok azonnali leállítására is képes, mivel a gyártó implementálta ezt a lehetőséget is eszközeibe mint vészhelyzeti protokollt. Míg a DroneJack néhány Raspberry Pi-ből¹⁸ és egy internetes

¹² Young-Min Kwon et al.: *Empirical Analysis of MAVLink Protocol Vulnerability for Attacking Unmanned Aerial Vehicles*. 2018.

¹³ Samy Kamkar: *SkyJack*. GitHub.

¹⁴ *Aircrack-ng*.

¹⁵ *Airodump-ng*.

¹⁶ MAC: Media Access Control – hálózati eszközök egyedi azonosítója.

¹⁷ Az IEEE regisztrációs hatóságától megvásárolt egyedi szervezeti azonosító tartományok adatbázisa (Organizationally Unique Identifier, OUI).

¹⁸ Bankkártyaméretű egykártyás számítógép.

felhasználói felületből áll, addig a SkyJack egy légi platform. Az említett támadások csak egy részére képes, de azokat egy másik, támadó drón fedélzetéről indítja. Repülés közben képes felderíteni a környezetében lévő feltörhető drónokat és átvenni felettük az irányítást.¹⁹ E két megoldás bizonyítottan működik, és hatásos bizonyos típusú drónokkal szemben. Használatuk nem igényel különleges eszközöket, és a szoftvercsomagok, amelyekben alapulnak, sem kifejezetten drónok elleni használatra lettek létrehozva, viszont erre az esetre is jól használhatónak bizonyultak. A támadási felület mindkét esetben a drón és a földi szegmens közötti wifikapcsolat. A sérülékeny drónok köre azonban szűk. Mindkét megoldás a Parrot cég AR- és Bebop-típusú drónjainak sebezhetőségét használja ki.

A nyílt forrású UAV és GCS közti kommunikációs célra kifejlesztett protokollok egyik legjobb példája a 2009 óta elérhető és azóta egyre nagyobb népszerűségnek örvendő MAVLink (Micro Air Vehicle Link). Nagyobb drónrobotpilóta-gyártók és nyílt forráskódú repülésszabályzók (Flight Control Unit, FCU), mint például a népszerű Pixhawk és az ArduPilot is ezt használják. A MAVLink egy üzenetalapú, kétirányú, titkosítatlan protokoll. Az egyes üzenetek felépítését pontosan meg lehet ismerni szabadon hozzáférhető dokumentumok alapján. Szintén ISM frekvenciasávokon használják, de gyakran 1 GHz alatt is, mint például a 433 MHz-es sáv. A DroneCode Project²⁰ része. Szüntelen tesztelésnek és fejlesztésnek van kitéve a felhasználók által a szabad hozzáférhetőségből adódóan, ezért folyamatosan és változatos módszerekkel próbálják feltörni.

Egy másik tanulmány²¹ például azt mutatja be, hogy úgynevezett protokoll fuzzing²² technikát alkalmazva, hogyan lehet kihasználni a MAVLink egyik sérülékenységét. A módszer lényege az ismert, szabadon hozzáférhető, titkosítatlan kommunikációs protokollból fakad. A támadó eszköz a kommunikáció átvételét követően a protokollnak minden tekintetben megfelelő és a korábbiakkal megegyező kommunikációs csomagokat küld a drón számára. Viszont a bennük lévő adatmezőket úgy állítja elő, hogy a fogadó drón fedélzeti számítógépében futó, MAVLink-csomagokat feldolgozó algoritmusoknak szélsőséges értékeket kelljen feldolgozni, és hibaállapotokat kelljen folyamatosan kezelni. Ha minden feldolgozó algoritmus minden lehetséges hibás bejövő érték kezelésére tökéletesen fel lenne készítve, akkor ez nem jelentene problémát. A valóságban azonban ez nem így van. A kutatóknak az egyik teszt során sikerült is a drón fedélzeti számítógépében olyan kritikus hibát okozni, hogy az, ha csak nem SITL-szimulátor (Software in the Loop) lett volna, hanem egy valódi eszköz, feltehetően azonnal lezuhan.

Az előző módszerek az úgynevezett beékelődéses (Man in the Middle, MITM) támadásnak tekinthetők. Ilyenkor a támadónak fizikálisan is a létrejött kapcsolat közelében, valahol a két végpont között kell elhelyezkednie. Ekkor lehetőség nyílik az adatfolyam vételére és dekriptálására is, ha erre van egyáltalán szükség. A MAVLink például egyáltalán nem használ semmilyen titkosítást egyelőre, bár a nyílt forráskódúságnak köszönhetően több

¹⁹ Guillaume Fournier et al.: *DroneJack: Kiss your drones goodbye!* SSTIC 2017-Symposium sur la sécurité des technologies de l'information et des communications, Rennes, France.; *Airodump-ng*.

²⁰ Egy nyílt forráskódú UAV-platform megalkotásán és szabványosításán dolgozó munkacsoport. Tagjai között számos nagy technológiai vállalat megtalálható. Dronecode Foundation.

²¹ Karel Domin et al.: *Security Analysis of the Drone Communication Protocol: Fuzzing the MAVLink protocol*. Brussels, 2016.

²² A protokoll fuzzing egy szoftvertesztelési eljárás, amely során különböző algoritmusok hibakezelési és hibatűrési képességeit vizsgálják nem várt, érvénytelen és szélsőséges bemeneti értékek felhasználásával.

kutató is megvizsgálta a titkosításának lehetőségeit az utóbbi években.²³ A wifin kommunikáló drónok esetében pedig a felhasználó döntheti el, hogy szeretné-e jelszóval védeni az sUAS hálózatát, vagy sem. A sikeres beékelődést követően további támadásokra nyílik lehetőség. A kommunikáció lehallgatása kézenfekvő lehet ezen a ponton. Ez az adatkapcsolat bizalmassága ellen irányuló támadás. Az ismert kommunikációs protokoll esetén a támadó fél hamis csomagokat küldhet magának a drónnak vagy a földi szegmensnek, ahogy azt az előzőekben a fuzzingmódszernél láthattuk. Ez a kapcsolat integritását és elérhetőségét befolyásolja. A következő lépés lehet egy szolgáltatás megtagadásos (Denial of Service, DoS) támadás. Ekkor a támadó a beékelődést követően kisajátítja a kommunikációs csatornát annak túlterhelésével. A bemutatott SkyJack és DroneJack is képes folyamatos deautentikációs csomagok küldésével telíteni és túlterhelni a sérülékeny drónt. Ezzel csökkentve az UAS rendelkezésre állását. Ezek a támadások kifejezetten problémásak a MAVLink esetében a nyílt forráskódúság és titkosítatlanság miatt.

4. Kibertámadáson alapuló drónelhárítás

Tanulmányok és híradások alapján tudjuk, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható drónokat egyszerűen és olcsón át lehet alakítani akár bűnelkövetési célokra is.²⁴ Repülési hatótávolságuk növelhető nagy nyereségű antennák és követő antennaplatform használatával.²⁵ Működésük erősen függ a globális helymeghatározási rendszerek rendelkezésre állásától, amelyek vétele szintén befolyásolható.²⁶ Azonban nem feltétlen kell egy drónt átalakítani ahhoz, hogy valaki kárt tudjon okozni vele. Elegendő azt megzavarni, kommunikációját lehallgatni, esetleg átvenni felette az irányítást és pusztán nekivezetni egy célnak, amely lehet akár egy személy vagy egy utasszállító repülőgép is. Az előzőek alapján látható, hogy mindezekre van lehetőség és eszköz, ráadásul a drónokhoz hasonlóan többségében olcsók és szabadon hozzáférhetőek. A drónok elleni védekezés képességének kialakítására, többek között azok kiberbiztonsági problémái miatt több szempontból is szükség lehet. Az egyik, amikor a drónt egy támadó direkt módon olyan tevékenységre használja, ami tiltott, veszélyes, vagy kárt akar azzal okozni. A másik aspektus, amikor a támadó célja egy szabályosan működő drón eltérítése, megzavarása, esetleg a kommunikációjának lehallgatása. Ez utóbbinak kiemelt jelentősége lehet állami célú drónüzemeltetés terén. Látható, hogy van arra technikai lehetőség, hogy drónokkal szemben olyan elhárítási módszereket és rendszereket alkalmazzanak, amelyek az UAS kommunikációs hálózatainak sebezhetőségeit használják ki, és a fenti megoldások egyikét a védelem javára fordítsák. A bemutatott SkyJack- és DroneJack-megoldások pontosan erre lettek létrehozva. Alapvetően mindkettő egy kezdetleges drónelhárító, illetve -semlegesítő rendszer néhány elemét valósítja meg. Működésük során képesek észlelni, követni

²³ Azza Allouch et al.: *MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems*. 2019.

²⁴ Don Rassler: The Islamic state and drones: supply scale and future threats.; Huszár Péter: Ukrajna közösségi finanszírozású, katonai célokot szolgáló oktokovertéinek elemzése. *Hadmérnök*, 14. (2019), 2. 34–43.; Krajnc Zoltán: Drónok, hibrid fenyegetés, terrorizmus a légtérből: a légi hadviselés privatizálása. *Hadmérnök*, 13. (2018), 4. 358–369.

²⁵ Huszár Péter: UAV és földi szegmense közötti kommunikáció hatékonyságának javítása. *Repüléstudományi Közlemények*, 31. (2019), 1. 167–182.

²⁶ Wüthrl Tibor: GPS navigációs problémák UAV alkalmazásokban. *Hadmérnök*, 6. Robothadviselés Tudományos Szakmai Konferencia különszám, 2006.

és befolyásolni egy ellenőrzött területre behatoló drónt. Ugyanakkor az is egyértelmű, hogy pusztán kibertámadási módszerekkel nem lehet hatékonyan védekezni drónokkal szemben. Az előre beprogramozott, autonóm módon működő eszközök végrehajthatják feladataikat akár vezeték nélküli kommunikáció nélkül is. A gyűjtött adatokat tárolhatják fedélzeti memóriában, amiből azok kinyerhetők a visszatérésüket követően. További hiányosságuk, hogy a drónrajokkal szemben tehetetlenek. A behatoló drónokat csak egyesével képesek kezelni. Manapság ez még lehet, hogy elégséges, de a közeljövőben biztosan nem lesz az. Az egymással hatékonyan együttműködni képes, egyetlen operátort igénylő, több tíz, akár több száz drónból álló rajokra már most is lehet példákat találni. Gondoljunk csak a 2018. évi pjongcsangi téli olimpia megnyitójára, ahol nyolcszáz drónból álló raj segítségével tartottak látványos bemutatót.

5. Összegzés

Egy UAS működése során létrehozott vezeték nélküli kapcsolatok hasonló sebezhetőségekkel rendelkeznek, mint bármelyik hétköznapi számítógép-hálózat. A MAVLink sérülékenységeivel és támadási lehetőségeivel az itt bemutatottakon kívül több tanulmány is foglalkozik. A közös mindegyikben, hogy abból indulnak ki, hogy ismert a protokoll, és egyelőre titkosítatlan. A nem nyílt forrású drónkommunikációs technológiák közül pedig azok a sebezhetőbbek, amelyek szabványos wifiprotokollt használnak. Gond nélkül használhatók azok a már létező támadási módok, eszközök és szoftverek, amelyek nem kifejezetten pilóta nélküli repülőrendszerek támadására lettek létrehozva, de a megegyező technológia miatt kézenfekvő megoldásnak bizonyulnak. A különböző hálózatos támadások veszélyeztetik az UAS mint eszközrendszer integritását, rendelkezésre állását és a rajta keresztül áramló adatok bizalmasságát. A hálózat adatfolyama lehallgatható, a benne részt vevő kommunikációs végpontok pedig félrevezethetők egyedi kommunikációs csomagok injektálásával vagy adott csomagok rögzítésével és folyamatos visszajátszásával. A kommunikációs csatornák telíthetők ezzel szolgáltatáskiesést okozva, és így csökkentve a rendszer rendelkezésre állását.

Bár a látóhatáron túli (Beyond Line of Sight, BVLOS) repülések egyelőre inkább a katonai alkalmazásokban terjedtek el, a polgári felhasználási irányok és az azt kiszolgáló ipar fejlődése afelé mutat, hogy a közeljövőben a civil alkalmazásokban is nagy jelentőségű lesz ez a felhasználási terület. Itt fontos megjegyezni azt is, hogy a jelenlegi technológia már most is lehetővé teszi a látóhatáron túli drónrepülések kivitelezését. Sokkal inkább jogi akadályai vannak a széles körű elterjedésének. E jogi akadály elhárításának pedig kritériuma, hogy a drónok még tovább integrálódjanak a kibertérbe. A mobil technológiák drónkommunikációs célokra történő felhasználásával pedig a drónok a mobiltelefonokhoz hasonlóan, szinte folyamatosan hálózati eszközökként működnek majd. Azok nemcsak saját, de más földi állomásokkal és más drónokkal is kommunikálni fognak. Ez már jelenleg is felvet számos kiberbiztonsági és adatvédelmi problémát, viszont a jövőben ez csak tovább fog erősödni. A drónok kiberbiztonsági problémáira növekvő hangsúlyt kell fektetni úgy az iparnak, mint a témával foglalkozó kutatóknak.

Köszönetnyilvánítás

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-3-I-NKE-69 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.



Felhasznált irodalom

- Aircrack-ng*. Elérhető: www.aircrack-ng.org/ (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Airodump-ng*. Elérhető: www.aircrack-ng.org/doku.php?id=airodump-ng (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Allouch, Azza et al.: *MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for Ardupilot/PX4 Unmanned Aerial Systems*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>
- Austin, Reg: *Unmanned Aircraft Systems. UAVs Design, Development and Deployment*. Wiley, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470664797>
- Domin, Karel et al.: *Security Analysis of the Drone Communication Protocol: Fuzzing the MAVLink protocol*. Brussels, 2016. Elérhető: www.esat.kuleuven.be/cosic/publications/article-2667.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Dronecode Foundation. Elérhető: www.dronecode.org/ (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- EU 2019/947 Az Európai Bizottság végrehajtási rendelete a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról. 2019. 05. 24. Elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN> (A letöltés dátuma: 2020. 02. 24.)
- Fournier, Guillaume et al.: *DroneJack: Kiss your drones goodbye!* SSTIC 2017-Symposium sur la sécurité des technologies de l'information et des communications, Rennes, France, Elérhető: <https://hal.inria.fr/hal-01635125/document> (A letöltés dátuma: 2020. 02. 24.)
- Haig Zsolt: *Információs műveletek a kibertérben*. Budapest, Dialóg Campus, 2018. Elérhető: https://nkrepo.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/12651/web_PDF_Informacios_muveletek_a_kiberterben.pdf;jsessionid=2EE93F6A71126B-0827915CE804D3B7D2?sequence=1 (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Huszár Péter: UAV és földi szegmense közötti kommunikáció hatékonyságának javítása. *Repüléstudományi Közlemények*, 31. (2019), 1. 167–182. DOI: <https://doi.org/10.32560/rk.2019.1.14>
- Huszár Péter: Ukrajna közösségi finanszírozású, katonai célokat szolgáló oktokoptereinek elemzése. *Hadmérnök*, 14. (2019), 2. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.32560/rk.2019.1.14>
- Kamkar, Samy: *SkyJack*. GitHub. Elérhető: <https://github.com/samyk/skyjack> (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Krajnc Zoltán: Drónok, hibrid fenyegetés, terrorizmus a légtérből: a légi hadviselés privatizálása. *Hadmérnök*, 13. (2018), 4. 358–369. Elérhető: http://hadmernok.hu/184_29_kranjc.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Kwon, Young-Min et al.: *Empirical Analysis of MAVLink Protocol Vulnerability for Attacking Unmanned Aerial Vehicles*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863237>

- Organizationally Unique Identifier, OUI. Elérhető: <http://standards-oui.ieee.org/oui/oui.txt>
(A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Rassler, Don: The islamic state and drones: supply scale and future threats. Elérhető: <https://ctc.usma.edu/app/uploads/2018/07/Islamic-State-and-Drones-Release-Version.pdf>
(A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Ren, Liling et al.: *Small Unmanned Aircraft System (sUAS) Categorization Framework for Low Altitude Traffic Services*. IEEE AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/DASC.2017.8101996>
- Sanchez, Julia: *JARUS Glossary*. Edition 7. 2018. Elérhető: http://jarus-rpas.org/sites/jarus-rpas.org/files/jar_del_jarus_glossary_v0.7_0.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)
- Wühl Tibor: GPS navigációs problémák UAV alkalmazásokban. *Hadmérnök*, 6. Robothadviselés Tudományos Szakmai Konferencia különszám, 2006. Elérhető: http://hadmernok.hu/kulonszamok/robothadviseles6/wuhrl_rw6.html (A letöltés dátuma: 2020. 02. 23.)



Peredy Zoltán,¹ Venczel Márk²

Nemzetközi repülőterek kiberbiztonsági kihívásai

Az elmúlt néhány évben a nemzetközi repülőterek földi és légi infrastruktúrájának működtetése egyre bonyolultabb technológiákat, automatizált rendszereket követelt, amely megnövelte a repülőterek és a légi közlekedési ágazat sérülékenységet a számítógépes bűnözőkkel és terroristákkal szemben. A Covid-19-járvány még tovább súlyosbította a helyzetet. A repülőterek és a légi járművek elleni kibertámadások lehetősége valódi veszélyeket rejt magában, úgymint a földi és légi infrastruktúrák folyamatos és zökkenőmentes működtetésének akadályozása; az üzembiztonság sérülése; az adatok illetéktelen kezekbe való kerülése vagy az informatikai és kommunikációs rendszerek összeomlása. Jelen áttekintő cikk célja, hogy összegezze a nagy nemzetközi repülőterek elleni kibertámadások főbb okait, típusait, hatásait, kockázatait és ezek minimalizálásának lehetőségeit néhány konkrét nemzetközi példa bemutatásával. Ezen túlmenően javaslatokat fogalmaz meg a kibertámadásoknak való kitettség csökkentésére szervezeti, működési megoldásokkal, úgymint információk megosztása, kibertudatosság növelése, valamint a hálózatos együttműködések kialakítása.

Kulcsszavak: kiberbiztonság, kiberterrorizmus, IKT-rendszer, védett adat elvesztése, intelligens repülőtér

Cybersecurity Challenges at International Airports

Over the past few years, the operation of ground and air infrastructure at international airports has required increasingly sophisticated technologies and automated systems, which have increased the vulnerability of airports and the aviation sector to cyber criminals and terrorists. The situation has been exacerbated by the Covid-19 epidemic. The possibility of cyberattacks against airports and aircraft poses real dangers such as the obstruction of continuous and smooth operation of ground and air infrastructures, serious breaches of operational security, loss of data and its acquirement by unauthorised hands, collapse of IoT and communication systems. The aim of this review article is to provide relevant and up-to-date landscape related to the main causes, types, impacts, risks and minimisation of cyberattacks against large international airports by presenting some concrete international examples, and to make proposals to reduce exposure

¹ Edutus Egyetem Műszaki Intézet, intézetvezető, e-mail: peredy.zoltan@edutus.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4074-8430>

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, doktori hallgató, e-mail: mvcnczel@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4319-1463>

to cyberattacks through organisational and operational solutions such as information sharing, cyber awareness and networking.

Keywords: *cybersecurity, cyberterrorism, ICT system, data breach, smart airport*

1. Bevezetés

A Covid-19 koronavírus-járvány a Nemzetközi Valutaalap és a Világbank szakértőinek számításai szerint 2020-ban a világ GDP-jében 3–5,2%-os visszaesést fog előreláthatóan okozni, felülmúlva a 2008–2009. évi globális pénzügyi-gazdasági válság mértékét.³ A sokszereplős, nagy beszállítói láncoktól való függés és a leállásuk okozta tovagyrúzó hatások több ágazatot hoztak nehéz helyzetbe, köztük a légi közlekedési iparágat is. A járvány negatívan befolyásolta a nemzetközi utasforgalom és légi teherszállítás alakulását, valamint a repülőterek működését és az iparág jövedelemtermelő képességét. A 2019. évi adatokkal való összevetés alapján a korábbi 4,72 milliárd fő globális (nemzetközi és belföldi) utasforgalom 45–60%-kal csökken (2020-ban a járványt követően 2,2 milliárd fő, míg 2021-ben is csak 3,38 milliárd fő valószínűsíthető), miközben a repülőjáratok helykihasználtsága 40–53%-kal esett vissza (számos járat teljesen le is állt), a légitársaságok pedig 300–400 milliárd dollár működési veszteséget realizáltak a járvány időtartama alatt.⁴

Az elmúlt néhány évben a nemzetközi repülőterek földi és légi infrastruktúrájának működtetése egyre bonyolultabb technológiákat, automatizált rendszereket követelt, amely megnövelte a repülőterek és a légi közlekedési ágazat sérülékenységét a számítógépes bűnözőkkel és terroristákkal, valamint azon bennfentes alkalmazottakkal szemben, akik az adatok ellopásával, a kritikus infrastruktúrák működési biztonságának akadályozásával zavart, bizonytalanságot, fennakadásokat kívánnak kelteni, amely állapotokat a járvány okozta helyzet még tovább súlyosbított.

A légi közlekedési ágazat informatikai beruházásainak szintje 2014–2019 között 21,4 milliárd dollárról 35,2 milliárd dollárra növekedett. A teljes IKT- (Információs és Kommunikációs Technológia) beruházásokon belül a kiberbiztonság növelését célzó fejlesztések aránya 2016-ban 4,6%; 2017-ben 7%; 2018-ban 9% és 2019-ben 14% volt.⁵ A repülőterek kiberfenyegetettségekkel szembeni ellenállásának javítása azonban nem kizárólag a pénzügyi forrásokon múlik, ehhez az egyes repülőterek kiberbiztonsági érettségi szintjét is növelni szükséges. Ezen szemléletváltáshoz a járvány utóhatásai valószínűleg hozzá fognak járulni. Szükségeltetik egy tudatos kiberbiztonsági politika megfogalmazása a kockázatok rendszeres feltérképezésével és beazonosításával; információk, kiberbiztonsági incidensek, tapasztalatok, tanulságok, legjobb gyakorlatok kölcsönös megosztása; valamint a hálózatos együttműködés kiépítése és megfelelő szabályozási környezet kialakítása a munkavállalók érzékenyítésével és a kiberbiztonsági tudatossági szint képzésekkel, tréningekkel történő emelésével.⁶

Jelen publikáció célja, hogy áttekintse a nagy nemzetközi repülőterek elleni kibertámadások főbb okait, típusait, hatásait, kockázatait és ezek minimalizálásának lehetőségeit

³ *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis.* ICAO, 2020. 12.

⁴ E. Mazareanu: *Coronavirus: impact on the aviation industry worldwide.* Statista, 4 Jun 2020. 1.

⁵ R. Florent: *Aerospace Cybersecurity: Building resilience in the hailstorm.* Cyber Inflight, 10 May 2020. 1.

⁶ *Security and Facilitation Strategic Objective. Aviation Cybersecurity Strategy.* ICAO, 2019. 3–4.; *A40-10: Addressing Cybersecurity in Civil Aviation.* ICAO, 2019. 1–2.

néhány konkrét nemzetközi példa bemutatásával. A nemzetközi áttekintés a szekunder vagy „desk research” kutatási módszerekre támaszkodik, amelynek eszköze a meglévő releváns hazai, európai uniós, valamint a WEF⁷-, IATA⁸- és ICAO⁹-dokumentumok, publikációk, online weboldalak áttekintése, majd az így összegyűjtött adatok rendszerezése, szelektálása, elemzése. Emellett primer információk felhasználásával (munkamegbeszélések alapján) készült a jelen tanulmány. A nemzetközi tapasztalatokra épülő, a konkrét példákra vonatkozó elemzésből levont főbb következtetések, tanulságok a szerzők saját szakmai véleményét tükrözik.

2. Nemzetközi repülőterek kiberfenyegetéseinek kérdései

2.1. Repülőterek kategorizálása az IKT és az okos alkalmazások szemszögéből

A repülőterek az IKT és az intelligens alkalmazások révén javították interoperabilitási képességeiket a hatékonyság elérése érdekében, ezért a kritikus infrastruktúrák összetettsége jelentős mértékben megnőtt. A nemzetközi repülőterek IKT-alapú működési megoldásai szerint az alábbi három kategória valamelyikébe sorolhatók be:¹⁰

- *hagyományos repülőterek*, amelyek a leszállások, indulások és egyéb légi járművek biztonságos és hatékony kezeléséhez szükséges képességekre összpontosítanak, alapszintű személyszállítási szolgáltatások nyújtásával;
- *agilis repülőterek*, amelyek alkalmazkodnak a változó digitális környezethez azáltal, hogy „testre szabott” szolgáltatásokat kínálnak egy közös platformon;
- *intelligens repülőterek*, amelyek teljes mértékben kihasználják az IoT¹¹- és a digitalizációs technológiák lehetőségeit, és átfogóan kombinálják azokat a biztonsági elemekkel. A valós idejű információcsere, a széles körű együttműködés és a repülőtéri folyamatok integrációjának köszönhetően az intelligens repülőterek jelentősen javítják a működési hatékonyságukat, az utasszolgáltatás színvonalát és a kiberbiztonsági szintjüket.¹²

Az ENISA¹³ szerint az intelligens repülőterek azok, amelyek hálózatba kötött, adatközpontú válaszadási képességeket használnak egyrészt a jobb utazási élmény nyújtása, másrészt pedig az utasok biztonságának magasabb szintű garانتálása érdekében.¹⁴ Mivel a repülés szempontjából a biztonság és védelem a legfontosabb területek, a biztonságos környezetet összetett kiberbiztonsági kihívások proaktív kezelésével kell biztosítani, miközben minimalizálni kell a működési műveletek fennakadását, zavarát. Az 1. ábra nyolc ország 20 repülőterén

⁷ WEF: World Economic Forum – Világ gazdasági Fórum.

⁸ IATA: International Air Transport Association – Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség.

⁹ ICAO: International Civil Aviation Organisation – Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet.

¹⁰ Georgia Lykou – Argiro Anagnostopoulou – Dimitris Gritzalis: Smart Airport Cybersecurity: Threat Mitigation and Cyber Resilience Controls. *Sensors*, 19. (2019), 1. 4.

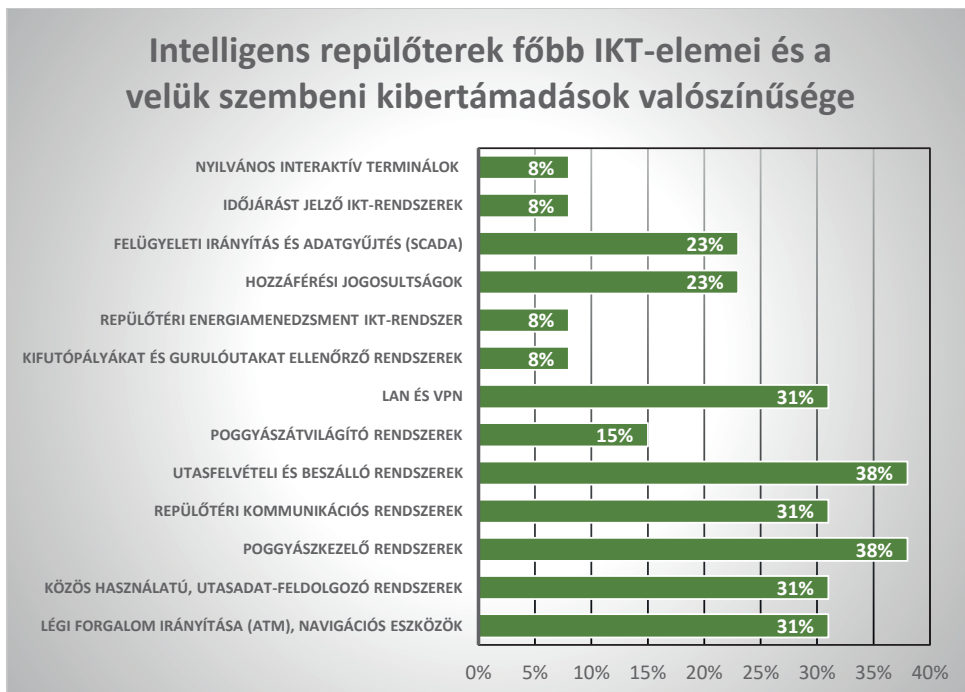
¹¹ IoT: Internet of Things – dolgok internete, más szavakkal hálózatba kötött intelligens eszközök gyűjtőneve.

¹² R. Pethuru – A. C. Raman: *The Internet of Things. Enabling Technologies, Platforms & Use Cases*. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2017. 256–257.

¹³ ENISA: European Union Agency for Cybersecurity – Európai Unió Kiberbiztonsági Ügynökség.

¹⁴ Lykou–Anagnostopoulou–Gritzalis (2019) i. m. 4.

végzett felmérés alapján összegzi a repülőtéri IKT-infrastruktúra kritikus elemeit és azt, hogy milyen gyakorisággal szolgálhatnak a kibertámadások célpontjaiként.



1. ábra

A nemzetközi repülőterek IKT-vagyonelemeinek kibertámadás szempontjából kritikus részei. Forrás: *Securing Smart Airports*. ENISA, Study, 2016. 24. alapján a szerzők saját szerkesztése

2.2. Kibertámadások fajtái

A nemzetközi repülőtereken egyre inkább előtérbe kerül a digitális technológiák széles körű használata. A kibertér (cyberspace) is szolgálhat a légi közlekedés elleni terrortámadások végrehajtásának platformjaként. A repülőterek és a légi járművek elleni kibertámadások lehetősége valódi veszélyeket rejt magában, úgymint a földi és légi infrastruktúrák folyamatos és zökkenőmentes működtetésének akadályozása, az üzembiztonság sérülése, adatok illetéktelen kezekbe való kerülése, valamint az informatikai és kommunikációs rendszerek összeomlása által.¹⁵ Az 1. táblázat összefoglalja a repülőterek elleni kibertámadások főbb típusait, negatív hatásait, valamint ezen hatások minimalizálását lehetővé tevő javasolt intézkedéseket.

¹⁵ Eitan Azani – Lorena Atiyas Lvovsky – Danielle Haberfeld: *Trends in Aviation Terrorism*. International Institute for Counter-Terrorism (ICT), 2016. 13–14.

1. táblázat

A nemzetközi repülőterek főbb kiberbiztonsági kihívásai és az azokra adandó lehetséges válaszok. Forrás: Lykou-Anagnostopoulou–Gritzalis (2019) 8–9.; *Securing Smart Airports*. (2016) i. m. 26–29. alapján a szerzők saját szerkesztése

Kibertámadás típusa	Érintett területek	Negatív hatások	Hatások minimalizálásának lehetőségei
Túlterheléses támadás ¹⁶ (DoS)	<ul style="list-style-type: none"> • Webszolgáltatások • ATM-kommunikációk • Mobiltelefon-hálózat • Vezeték nélküli kommunikáció 	<ul style="list-style-type: none"> • Földi és légi infrastruktúrát érintő műveletek akadályozása • Repülőtéri interoperabilitás akadályozása 	<ul style="list-style-type: none"> • Vészhelyzeti protokollokra forgatókönyv • A repülőtér működésével és üzembiztonságával kapcsolatos anomáliák kommunikálása az érintettek felé • Tűzfalak, hálózati szegmentálás, illetéktelen behatolás elleni védelem
Kommunikációs támadás	<ul style="list-style-type: none"> • Légi forgalom irányítása • Repülőgépek navigációs és GPS-rendszerei¹⁷ 	<ul style="list-style-type: none"> • Repülőtér-működtetés és az üzembiztonság veszélyeztetése • Légi járművek biztonságának veszélyeztetése 	<ul style="list-style-type: none"> • Alternatív üzemeltetési megoldások • Incidensekre való azonnali reagálás képessége • Biztonságos kommunikációs csatornák • Adatok titkosítása, hamisítás elleni küzdelem
Ártó szándékú szoftverek	<ul style="list-style-type: none"> • Számítógépes hálózatok • Szerverek • Légi utasok és a repülőtéri alkalmazottak „okos” informatikai eszközei 	<ul style="list-style-type: none"> • Informatikai és kommunikációs rendszerek működésének akadályozása • Földi és légi műveletek akadályozása 	<ul style="list-style-type: none"> • Hatékony vírusvédelem • Informatikai incidensekre való azonnali reagálás • Információbiztonsági tudatosság növelése, munkavállalók érzékenyítése tréningekkel • Rendszeres szoftver- és hardverkarbantartás • Kiberbiztonsági protokollok • Előre jelző és elemző kapacitások kiépítése

¹⁶ A szolgáltatásmegtagadással járó támadás (Denial of Service, DoS), más néven túlterheléses támadás, informatikai szolgáltatás teljes vagy részleges megbénítása, helyes működési módjától való eltérítése. A szolgáltatásmegtagadás-támadás egy meghatározott alkalmazás, operációs rendszer ismert gyengeségeire vagy valamilyen speciális protokoll tulajdonságaira fókuszál. Célja, hogy az alkalmazás vagy rendszer elérésére feljogosított felhasználókat megakadályozza a számukra fontos információk, a számítógéprendszer vagy akár a számítógép-hálózat elérésében. A támadás eredményeképpen a rendszer nagyon lelassul, elérhetetlenné válik, esetleg össze is omolhat. (*Understanding Denial-of-Service Attacks*. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, 20 November 2019. 1.)

¹⁷ Kiberbiztonsági szakértők szerint a hackerek képesek feltörni a repülőgép vezérlőrendszerét az utasülésükből megzavarva a repülőgép GPS- és navigációs rendszereit. A pilótafülke hálózatába a repülőgép hálózatával való kommunikáció útján lehetőség bejutni. (A repülőgépek fedélzetén sok elektronikai szórakoztató rendszer USB-csatlakozással rendelkezik, és több légitársaság wifit is üzemeltet a járatain, amelyeknek kommunikációs hálózati architektúrája nem megfelelő, mivel vannak olyan biztonsági rések, amelyek lehetővé teszik a repülési rendszerekbe való illetéktelen belépést is.) (Anthony Lam – Jose Fernandez – Richard Frank: *Cyberterrorists Bringing Down Airplanes: Will it Happen Soon?* In A. R. Bryton – J. R. Lopez Jr. – R. F. Mills: *Academic Conferences and Publishing International Limited Reading*. Proceedings of 12th International Conference on Cyber Warfare and Security, Wright State University with the Air Force Institute of Technology Dayton, UK, 2–3 March 2017. 210–219.)

Kibertámadás típusa	Érintett területek	Negatív hatások	Hatások minimalizálásának lehetőségei
Hálózati támadás	Zárt kamerás rendszerek (CCTV) ICS SCADA-rendszerek ¹⁸ Csomagkezelés Földi infrastruktúra-műveletek	Földi és légi infrastruktúra működtetésének és a létesítmény-menedzsmentnek az akadályozása	<ul style="list-style-type: none"> • Előre jelző és kockázatelemző kapacitások kiépítése, működtetése • Incidensekre való azonnali reagálás képessége • Vészhelyzeti protokollok működtetése • Biztonsági tudatosság növelése tréningekkel • Adatok titkosítása • Hozzáférési szintek és jogosultságok szabályozása • Informatikai eszközök hitelesítése
Felhatalmazással való visszaélés	ICS SCADA-rendszerek Repülőtéri infrastruktúrákba/terminálokra való belépések ellenőrzése Légi forgalom irányítása	Földi és légi infrastruktúra működtetésének és a létesítmény-menedzsmentnek az akadályozása	<ul style="list-style-type: none"> • Előre jelző és kockázatelemző kapacitások kiépítése, működtetése • Incidensekre való azonnali reagálás képessége • Vészhelyzeti protokollok működtetése • Biztonsági tudatosság növelése tréningekkel • Repülőtéri alkalmazottak megfelelő kiválasztása (HR-politika) • Adatok titkosítása • Hozzáférési szintek és jogosultságok szabályozása
Adathalászat	ICS SCADA-rendszerek IT és kommunikációs rendszerek Földi infrastruktúra	Repülőtéri adminisztráció munkavégzésének, a földi és légi infrastruktúra működtetésének és a létesítmény-menedzsmentnek az akadályozása	<ul style="list-style-type: none"> • IT biztonsági kultúra megerteremtése • Etikai szabályok • Alkalmazottak ösztönzése „Gondolkodj, mielőtt kattintasz” • Erős felhasználói hitelesítés • Tűzfalak, hálózatok szegmentálása • Behatolások felderítése • Szoftverek és hardverek karbantartása

A számítógépes támadások végrehajtásához professzionális felkészültségű hackerekre van szükség, ezért a terroristaszervezeteknek egyik kiemelt céljuk, hogy soraikba ilyen „szakemberek” beszervezésével a kibertérben is működni tudjanak. Ennek ellenére a szakértők becslései szerint a terroristaszervezetek egyelőre nem képesek jelentős társadalmi-gazdasági hatással járó kibertámadásokat végrehajtani a polgári repülőgépek vagy a nagy nemzetközi repülőterek ellen.¹⁹

¹⁸ Ipari ellenőrző rendszer (Industrial Control System, ICS) a különböző ipari/értéktérmető folyamatokat felügyelő és irányító informatikai rendszer (például automatizált gyártósorok felügyeletét, épületek energiaszolgáltatásának mérését vagy biztonsági felügyeletét végző informatikai megoldások). Az ICS-eket gyakran programozható logikai vezérlőkön (Programmable Logic Controller, PLC) vagy felügyeleti adatgyűjtő és ellenőrző rendszereken (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) keresztül működtetik. Ez utóbbi biztosítja az operátor számára az adatok grafikus megjelenítését a szükséges beavatkozások meghatározása érdekében. [Keith Stouffer – Joe Falco – Karen Scarfone: *Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security*. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 2011. 16.]

¹⁹ Azani–Lvovsky–Haberfeld (2016) i. m. 15.

A repülőtéri infrastruktúrák és a légi közlekedés elleni kibertámadások főbb mozgatórugói:²⁰

- *Politikai vagy katonai okok:* A külföldi katonai vagy hírszerzési források célja, hogy az adott ország gazdasági, politikai rendszerének, integritásának és a közbizalom befolyásolására alkalmas stratégiai információkat szerezzenek meg. A repülőterek vonzó célpontjai a kibertámadásoknak, hiszen bármilyen zavar befolyásolhatja a légi közlekedésbe vetett bizalmat és a nemzeti légtér biztonságát.
- *Ipari/kereskedelmi kémkedés:* Az ilyen motivációval rendelkező támadók célja a versenytársaikkal kapcsolatos bizalmas vagy védett információk ellopása vagy kiszivároztatása csalás, zsarolás, pénzügyi haszonszerzés vagy vállalati stratégiai előnyök megszerzése érdekében. Ilyen jellegű tevékenység célja például a repülőterek adminisztrációs dokumentumainak (ideértve a tervezési, építési, költségvetési, pénzügyi, jogi és kormányzati dokumentumokat) megszerzése.
- *Civil szervezetek zavarkeltési akciói:* A különböző aktivisták, tiltakozók célja, hogy megzavarják vagy letiltásák az erőforrásokhoz való hozzáférést, annak érdekében, hogy helyzetükre vagy az általuk képviselt álláspontra ráirányítsák a nyilvánosság figyelmét. Tipikus példa a szolgáltatásmegtagadási támadások (DoS) a repülőtér környezetében, ahol a támadók arra törekcsenek, hogy megakadályozzák a repülőtér weboldalához való hozzáférést, vagy megzavarják az online szolgáltatásokat.
- *Számítógépes bűnözés:* A támadók általában közvetlenül a különböző hálózatokat és informatikai rendszereket célozzák meg, hogy ellopják és értékesítsék az adatokat (például az ügyfél azonosítását, hitelkártyáját vagy banki adatait). Manapság ez a támadások egyik leggyorsabban növekvő területe. E támadók elsődleges célpontjai lehetnek azok a repülőterek, amelyek hitelkártya-információkat kezelnek fizetési szolgáltatásokért (például poggyászdíjak vagy parkolási díjak). Noha ezek a támadások kevésbé kifinomultak, mint a többi típus, a számítógépes bűnözés technikái az utóbbi időkbén jelentős mértékben fejlődtek. Például zsarolóprogramok használatával a támadók képesek titkosítani az adatokat, és utána azzal fenyegetik áldozataikat, hogyha nem fizetnek a titkosítás feloldása érdekében egy megadott összeget, akkor ezeket az adatokat kiszivároztatják vagy megsemmisítik.

2.3. Kibertámadások főbb kockázatai

A repülőterek kritikus infrastruktúrái ellen elkövetett különböző kibertámadások fajtái és azok negatív hatásainak elemzése mellett célszerű megvizsgálni a kibertámadások által jelentett főbb kockázatokat is. A repülőterek informatikai és technológiai infrastruktúrájának kibertámadásokkal szembeni sérülékenysége globális rendszerszintű biztonsági kockázatokat jelent. A 2. táblázat összefoglalja az öt legfontosabb Közlekedési Kockázati Indexet, és ezek súlyát a légi közlekedés és a repülőterek vonatkozásában.

²⁰ Lykou–Anagnostopoulou–Gritzalis (2019) i. m. 20.

2. táblázat

Közlekedési Kockázati Indexek és súlyuk. Forrás: *Advancing Cyber Resilience in Aviation: An Industry Analysis*. World Economic Forum, 2020. 10. alapján a szerzők saját szerkesztése

Rang-sor	Közlekedési szektor	Levegő (repüléstámogató infrastruktúra a talajtól a világűríg)	Repülőterek
1.	Megnövekedett biztonsági fenyegetések a kibertér és az adatvédelem megsértői részéről	Kritikus informatikai rendszerek összeomlása	Versenyjogi monitorozás/ cégek egyesülésével létrejövő monopóliumok létrejöttének megakadályozása
2.	Kritikus informatikai rendszerek összeomlása	Versenyjogi monitorozás/ cégek egyesülésével létrejövő monopóliumok létrejöttének megakadályozása	A szezonális kereslet változása, amely a szállítás hiányához vagy túlkínálatához vezet (a kihasználtság / az árakat befolyásoló kapacitás)
3.	Harmadik (beszállító) féltől való függés	Harmadik (beszállító) féltől való függés	Kritikus informatikai rendszerek összeomlása
4.	Harmadik fél biztonsági sérülékenysége, digitális ellátási lánc ellenálló képessége	A technológiai fejlődéssel vagy a változásokkal való lépéstartás képtelensége	Extrém időjárás események/ természeti katasztrófák, fegyveres konfliktusok, járványok
5.	Versenyjogi monitorozás/ cégek egyesülésével létrejövő monopóliumok létrejöttének megakadályozása	Nemzeti infrastruktúráktól való túlzott függőség	Megnövekedett biztonsági fenyegetések a kibertér és az adatvédelem megsértői részéről

A 2. táblázatban szereplő kiberkockázatok és azok következményei egyre szélesebb körűvé válnak, amelyek a légi közlekedési ágazat minden területén érzékelhető veszteségeket, fennakadásokat okoztak az elmúlt években. Ezért alapvető, hogy a repülőipar érintett szereplői kidolgozzanak és összehangolják kibereellenálló képességüket növelő stratégiákat ezen hatások enyhítésére és a kritikus infrastruktúrák védelmére, ahogy az a 2019-es ICAO-jelentésben²¹ is szerepel.

2.4. Nemzetközi példák a különböző kibertámadásokra és azok hatásaira

Érdeemes áttekinteni hat jelentős nemzetközi repülőter/légitársaság olyan információbiztonsági incidenseit, amely utasok ezreinek az élet- és vagyonbiztonságát fenyegethette volna.

2.4.1. Heathrow repülőtér: védett adatok elvesztéséért pénzbírság kiszabása

Az ICO²² 120 000 fontra bírságolta a Heathrow Nemzetközi Repülőteret azért, mert nem tette meg a szükséges megelőző információbiztonsági intézkedéseket. Erre akkor derült fény, miután egy alkalmazott 2017 októberében elvesztett egy bizalmas információkat tartalmazó memóriakártyát, amelyet egy utas talált meg, és annak tartalmát egy nyugat-londoni könyvtárban megnézte. A memóriakártya olyan érzékeny adatokat tartalmazott, mint a királynő

²¹ *Aviation Cyber Security – Moving Forwards*. IATA, ICAO Working Paper on Assembly 40th Session Executive Committee, 2019. 1.

²² ICO: Information Commissioner's Office – brit Adatvédelmi Hivatal.

és a kormánytagok utazási útvonalai és azok időpontjai, vagy 50 alkalmazott teljes körű személyes adatait, akik a repülőtéri biztonságért feleltek. Az adatok nem voltak titkosítva, sem jelszóval védve. Az ICO vizsgálata alapján kiderült az is, hogy a Heathrow repülőtér 6 500 fő munkavállalója közül összesen 2% részesült adatvédelmi és információbiztonsági képzésben, így a repülőteret ezen hiányosság pótlására is kötelezték.²³

2.4.2. Atlanta repülőtér: zsarolóprogram által kikényszerített wifileállítás

Hartsfield–Jackson Atlanta Nemzetközi Repülőtér 2018 márciusában leállította a wifi hálózatának működtetését, miután Atlanta város önkormányzatának internetes hálózata zsarolóvírustámadásnak esett áldozatul. A hivatali számítógépeken található file-okat egy Sam-Sam néven ismert támadó titkosította, és váltságdíjat követelt azok dekódolásáért. A repülőtér kikapcsolta a wifi-szolgáltatását, hogy elkerülje a rosszindulatú zsarolóprogramok terjedését a repülőtéri hatóságok, a légitársaságok és az ügyfelek számítógépein. Az incidens nem okozott fennakadást a légi forgalomban.²⁴

2.4.3. British Airways: tömeges adatlopás

2018 augusztusában a British Airways 38 000 utasának személyes és pénzügyi adatait (nevek, bankszámlaszámok, hitelkártyaadatok, lejárat dátumok, háromjegyű CVV-kódok és e-mail-címek) lopták el ismeretlen hackerek. A BA weboldalára feltett üzenet szerint az ügyfeleknek kapcsolatba kell lépniük bankjaikkal, bármilyen ismeretlen, nem jóváhagyott tranzakció vagy adataikkal való visszaélés esetén.²⁵

2.4.4. Cathay Pacific: személyes adatok millióinak kiszivárogtatása

A hongkongi légitársaság példátlan kockázatnak tette ki közel 9,4 millió ügyfelét 2018 márciusában, miután személyes adataikhoz (személyiigazolvány- vagy útlevélszámok, e-mail-címek, hitelkártyaadatok, utazási előzmények) illetéktelenek hozzáférést szereztek az információbiztonsági rendszerek hézagait kihasználva. A légitársaság azonnali vizsgálatot indított, hogy kiderítse, ki áll a kibertámadás mögött, illetve szigorítottak az információbiztonsági intézkedéseken.²⁶

²³ Varsha Saraogi: *Five times airports were involved in cyberattacks and data breaches*. Airport Technology, 24 July 2019. 1.

²⁴ Uo. 1.

²⁵ Uo. 1.

²⁶ Uo. 1.

2.4.5. Air Canada: privát információkat loptak el mobilapplikáción keresztül

Az Air Canada légitársaság 2018 augusztusában egy olyan szokatlan, illetéktelen bejelentkezést/behatolási kísérletet észlelt, amelyen keresztül az ügyfelek személyes adataihoz próbáltak meg hozzáférni. A légitársaság azonnal zárta le a 1,7 millió utasának számláit és adatait, de így is megkéstek az intézkedéssel: 20 000 ügyfél adatait (nevek, e-mail-címek, telefonszámok, útleveleladatok) ellopták.²⁷

2.4.6. LOT: üzemképtelenné tett számítógépes repülőjegy-foglalási és -kiadási rendszer

2015 júniusában Varsóban a lengyel nemzeti légitársaság (LOT) számítógépes foglalási és repülőjegy-kiadási rendszerét érte hackertámadás, azt üzemképtelenné téve és egyben tucatnyi járat késését vagy törlését okozva.²⁸

3. Egy érdekes nemzetközi kiberbiztonsági felmérés eredményei

Az ImmuniWeb nevű kiberbiztonsági cég több szempontra kiterjedő felmérést²⁹ végzett a világ 100 különböző, jelentős nemzetközi repülőterén a kibertámadásokkal szembeni biztonságosság elemzése érdekében. Az eredmények alapján kiberbiztonsági szempontból az alábbi három repülőtér bizonyult a legbiztonságosabbnak:

- amszterdami repülőtér, Schiphol (EU);
- helsinki-Vantaa repülőtér (EU);
- dublini repülőtér (EU).

Míg a maradék 97 vizsgált repülőtér IKT-rendszere valahol sérülékenynek mutatkozott a felmérésből. A kiberbiztonsági vizsgálat a következő alfejezetekben részletezett szempontok alapján történt.

3.1. Repülőterek hivatalos weboldalainak biztonsága

A számítógépes bűnözők külső támadásainak célpontjai továbbra is a leggyakoribb eszközök és szoftverek sebezhetőségei. A vizsgált repülőterek közül csak 3 repülőtér „www.” weboldala kapta meg a lehető legjobb „A+” besorolást, 15 repülőtér hivatalos weboldala pedig „A” besorolást nyert el. További 24 repülőtér weboldalát a legrosszabb, „F” kategóriába sorolták, ami azt jelenti, hogy elavult szoftverekkel rendelkeznek, amelyek ismert és kihasználható biztonsági réseket tartalmaznak az ügyfélkapcsolati rendszerben (CMS-ben³⁰ például WordPress) és a GDPR,³¹

²⁷ Saraogi (2019) i. m. 1.

²⁸ Azani–Lvovsky–Haberfeld (2016) i. m. 14.

²⁹ *State of Cybersecurity at Top 100 Global Airports*. Application Security Series, ImmuniWeb, 29 January 2020. 1.

³⁰ CMS: Content Management System – tartalomkezelő rendszer.

³¹ GDPR: General Data Protection Regulation – általános adatvédelmi rendelet.

illetve a PCI DSS-előírásoknak³² sem felelnek meg, esetleg a megfelelő SSL-titkosítás³³ is hiányzik.³⁴

3.2. Mobilalkalmazás biztonsága

A kutatás 36 repülőtérhez tartozó hivatalos mobilalkalmazást is talált és tesztelt. Összesen 530 biztonsági és adatvédelmi kérdést azonosítottak, köztük 288 mobil biztonsági hibát (alkalmazásonként átlagosan 15). Ezenkívül a mobilalkalmazások külső szoftverkeretet tartalmaztak biztonsági résekkel, adatvédelmi és biztonsági problémákkal, valamint a titkosítás teljes hiányával.³⁵

3.3. Sötét webes érintkezés és felhő

„Sötét” interneten a világháló azon részét értik, amelyet az eléréséhez szükséges technológiák és titkosítási eljárások miatt nem látnak a keresőszolgáltatások, és nem is elérhetők hagyományos böngészővel. Egy ilyen oldal megnyitásához speciális böngészőre van szükség, amely kezelni tudja a WebTOR nevű hálózatot, amelyben „.html” helyett „.onion” kiterjesztéssel találhatók meg a weboldalak. Ehhez általában a Tor Browsert szokták használni, amely kinézetre szinte teljesen megegyezik a Mozilla Firefoxszal, hiszen alapvetően ugyanarra a böngészőre épül, csak épp más keresőmotort használ.³⁶

A kutatás szerint a vizsgált 100 repülőtér közül 66 valamilyen módon kapcsolódik a sötét webhez, kitéve magát az adatok kiszivárogtatásának és a kritikusinfrastruktúra-kockázatoknak. Emellett a repülőterek 3%-ánál nincs védett felhő az érzékeny adatok számára.³⁷

A digitális infrastruktúrák rendkívül bonyolultak, ezért a digitális eszközök és a támadások felületének rendszerszintű láthatósága kulcsfontosságú a kiberbiztonsági program sikerének biztosítása szempontjából. Enélkül az erőfeszítések nem fogják a kívánt eredményeket meghozni.

4. Megoldások a repülőterek kiberellenálló képességének növelésére

A repülőterek kibertámadások elleni kitettségeinek és sérülékenységeinek minimalizálása, az úgynevezett kiberellenálló képesség javításával történik. Ez egy összetett és hosszabb átfutási időt igénybe vevő, az érintett szereplők közötti bizalomépítő hálózatos együttműködést, valamint az információk és az adaptálható legjobb gyakorlatok megosztását feltételező folyamat. Ennek főbb elemeit a következő alfejezetek részletezik.

³² PCI DSS: Payment Card Industry Data Security Standard – bankkártyás fizetési adatvédelmi szabvány.

³³ SSL: Secure Sockets Layer – biztonságos információátviteli protokoll.

³⁴ *State of Cybersecurity at Top 100 Global Airports.* (2020) i. m. 1.

³⁵ Uo.

³⁶ *How to Access Dark Web: Dark Web, TOR Browser and Browsing. Onion Websites.* Forum Team, Blogstore, March 2020. 1.

³⁷ *State of Cybersecurity at Top 100 Global Airports.* (2020) i. m. 1.

4.1. Kiberellenálló képesség növelése a munkaerő és a szervezeti kultúra oldaláról³⁸

- Munkaerő kiberbiztonsági képzettségi szintjének és kompetenciáinak szélesítése tudásátadó, tudásfelfrissítő továbbképzésekkel, tréningekkel, bevonásuk a döntéshozatali folyamatokba, felelősség és hatáskörök „testre szabott delegálásával”. Szimulált kiberbiztonsági incidens gyakorlatok tartása (erre egy példa: az ENISA által Cyber Europe 2018 néven 30 ország bevonásával megszervezett, az egész európai légi közlekedést érintő, kibertámadás-sorozatot szimuláló kétnapos gyakorlata. Eszerint a reptéri automatikus bejelentkező terminálok váratlanul rendszerhibát jeleztek, majd az okostelefonok utazási applikációi álltak le, és a személyzet sem tudta használni számítógépeit a bejelentkező pultoknál. Mindezek következtében az utasok nem tudták feladni a csomagjaikat, valamint a biztonsági ellenőrzésen sem tudtak átjutni. Ilyen gyakorlatokra 2010 óta rendszeresen két évente kerül sor).
- A kiberbiztonság legyen a szervezeti kultúra része, kiberbiztonsági stratégia kidolgozása a kiberbiztonsági incidensek megelőzése és hatékony kezelése érdekében.
- Hatékony külső és belső kommunikáció, információk megosztása, munkatársak közötti kapcsolatok javítása.
- Integritási kockázatok kezelése, titoktartás és hozzáférések feltételeinek megteremtése információbiztonsági szempontból.
- A repülőterek menedzsmentje és döntéshozói számára iránymutatások, amelyek ösztönzik és jutalmaznak a megfelelő kiberbiztonsági munkahelyi viselkedést, és támogatják az erre irányuló egyéni kezdeményezéseket.

4.2. Kiberellenálló képesség növelése a működési folyamatok, tőke- és kockázat-menedzsment³⁹ oldaláról⁴⁰

- A kiberbiztonsági gyakorlatok kockázatalapú fejlesztésének ösztönzése a megfelelőség alapú megközelítés helyett, lehetővé téve a repülőterek számára, hogy feljebb lépjenek a „kiberbiztonsági érettség létrán”.
- Különböző forgatókönyvek, protokollok kidolgozása a kiberbiztonsági incidensek kezelésére, megelőzésére, majd ezek kommunikálása, megismertetése a munkavállalókkal.
- Kiberbiztonsági kockázatok és hatásaik, felderíthetőségük beazonosítása.
- Új IKT-technológiák bevezetésének kiberbiztonsági kockázatai.
- A kiberbiztonsági kiadások betervezése a működési költségvetésbe.
- A kiberbiztonság mérésére mutatószámok kidolgozása, majd ezek alapján történő monitoringrendszer kiépítése és működtetése.

³⁸ *Advancing Cyber Resilience in Aviation: An Industry Analysis*. World Economic Forum, 2020. 16.

³⁹ *Securing Smart Airports*. (2016) i. m. 50–52.

⁴⁰ *State of Cybersecurity at Top 100 Global Airports*. (2020) i. m. 1.

- A beszállítói, alvállalkozói, üzleti partneri kapcsolatokban a kiberbiztonsági szempontok érvényesítése, külső ügyfelek jelentette információbiztonsági kockázatok felmérése.
- Hatékony kapcsolattartás az illetékes hatóságokkal, speciális információbiztonsági fórumokkal, szakmai szervezetekkel. Online fórumok, platformok létrehozása és működtetése, hogy a résztvevők egyeztessék álláspontjaikat a beérkező támadások és incidensek előzetes felmérése és értékelése kapcsán, továbbá kikérjék egymás véleményét, illetve a szabályok keretei között egyeztessék tervezett intézkedéseiket.

5. Következtetések

A repülőterek a technológiai innováció élvonalában vannak, mert az exponenciálisan növekvő légi és utasforgalom követelményeinek meg kell felelniük, valamint a Covid-19 koronavírus-járvány kihívásaira megfelelő válaszokat kell adniuk a talpon maradás érdekében. Ennek eredményeként a repülőtereknek javítani kell az infrastruktúra technikai intelligens eszközökön és megoldásokat kell kifejlesztelniük, bevezetniük a stabil működésük érdekében, egyben kellemes utazási élményt nyújtva az ügyfeleknek, amely döntő szerepet játszik a repülési ágazat bevételeinek növelésében.

Az Ipar 4.0 és a digitalizáció során új kihívások jelentkeznek, amelyekhez a légi közlekedésnek gyorsan kell alkalmazkodnia. A kiberbiztonság a repülőterek szempontjából kiemelkedően fontos. Az intelligens repülőterek arra törekuszenek, hogy megbízható és fenntartható módon biztosítsák az optimális szolgáltatásokat a növekedés, a hatékonyság és a biztonság egyidejű szem előtt tartásával.

A repülőtéri kiberbiztonsági kockázatok csökkentése több, egymással kölcsönhatásban levő megoldás⁴¹ egyidejű megvalósításával lehetséges az alábbiak szerint:⁴²

- Az adott repülőtér IBIR-rendszerének (információbiztonsági irányítási rendszer) kiépítése és működtetése az ISO 27001 szabvány előírásainak megfelelően. (A szabvány két részből áll: az informatikai biztonság menedzsmentjének gyakorlati kódexe, illetve ennek specifikációja). Ennek alapján célszerű a repülőtéri menedzsmentnek rendszeres kiberbiztonsági önértékeléseket végeznie: Milyen szintű és mennyire megbízható az információk védelme a széles körű fenyegetésektől? Mennyire adottak a feltételek a repülőtéri üzemeltetési folyamatok működésének folytonosságához, a legkisebbre csökkentve a kibertámadásokkal szembeni kockázatokat? Hol áll az adott repülőtér más repülőterekhez képest kiberbiztonság szempontjából?
- Az előzetes önértékeléssel feltárt helyzetkép alapján hosszú távú kiberbiztonsági stratégia kidolgozására kerülhet sor a kiberbiztonsági technikai és nem technikai incidensek megelőzése és kezelése érdekében, valamint fontos a vizsgálati eredmények alapján az azonosított sérülékenységek kijavítását célzó intézkedések megtétele is.
- Hatékony kiberbiztonsági monitorrendszer kiépítése és működtetése válik szükségessé az incidensek észlelésére, a kibertámadások blokkolására, az adathalászok és a jelszó-újrafelhasználási támadások kiszűrésére az ehhez szükséges erőforrások biztosításával.

⁴¹ *Securing Smart Airports*. (2016) i. m. 50–52.

⁴² *State of Cybersecurity at Top 100 Global Airports*. (2020) i. m. 1.

- A repülőterek informatikai rendszereinek és eszközeinek teljes körű naprakész nyilvántartása (vagyonleltár), valamint a külső támadási felületek és a kockázati kitétségek láthatóvá tétele olyan ASM-megoldással⁴³ lehetséges, amelyek a „sötét internet” és a kódtárak nyomon követésével is továbbfejleszthetők. A repülőtereket és a légi közlekedés működtetéséhez szükséges információkat osztályozni kell érzékenységük és kritikusságuk szerint a működést támogató szoftverek biztonsági szintjének beazonosításával, címkézésével és a biztonsági szabályzatnak megfelelő kezeléssel.
- Külső, független szakértők bevonásával egy kiberbiztonsági kockázatkezelési program dolgozható ki, amely magában foglalja a szállítók (beszállítók, alvállalkozók) folyamatos digitális nyomon követését, a kockázatok beazonosíthatóságát, hatásainak minimalizálását és a bekövetkezésük megelőzését.
- A munkavállalók kiberbiztonsági tudatosságát képzésekkel, tréningekkel (szimulációk, helyzetgyakorlatok, korábbi tapasztalatok, jó példák) lehet növelni, valamint információk megosztásán, egyéni kezdeményezések támogatásán, az információbiztonsági feladatok delegálásán keresztül alkalmasan képzett, tapasztalt és megfelelő hatáskörrel felruházott munkatársakkal, ahol minden munkakörben rögzíteni kell az adott munkatárs információbiztonsági felelősségét.

6. Összefoglalás

A negyedik ipari forradalom során minden gazdasági szektor, beleértve a légi közlekedési ipart is, digitális átalakulásban van: ennek hajtóereje a technológiai fejlesztések, a széles sávú internet (5G), mesterséges intelligencia, a felhőalapú számítástechnika, nagyméretű adatbázisok összekapcsolása (big data) és az adatok valós idejű feldolgozása, valamint az interneten egymással kapcsolatban lévő és egymással kommunikáló berendezések és eszközök (IoT). Ezek összetettsége és sérülékenysége megnöveli a különböző kibertámadási felületeket jelentős működési, pénzügyi és biztonsági kockázatokat hordozva magukban.

A kiberbiztonság napjaink egyik legnagyobb kihívása a repülési ágazat számára, ideértve a repülőtereket is. A repülőterek nagymértékben függenek a működő kritikus információs és kommunikációs rendszerektől üzemeltetési, személyszállítási és kommunikációs szempontból. Ezen technológiák megnövelték a repülőterek kitétségét a különféle kibertámadásokkal szemben. A világméretű, a polgári légi közlekedés elleni kibertámadások növekvő mértéke (körülbelül 200 különböző, a repülőterek földi és légi infrastruktúráit működtető, gyakran egymással is összefüggő rendszert érintenek ezek a támadások) és kifinomult technológiai megoldásai arra ösztönzik a repülőtereket, hogy tegyenek további lépéseket a kiberbiztonság javítására a repülőtéri műveletek és az utazóközönség védelme érdekében.

A kibertámadások elleni kitétség csökkentésére többféle módszer is létezik, de ahhoz, hogy a repülőterek és a légitársaságok meg tudják őrizni ügyfeleik bizalmát, új stratégiát kell kidolgozniuk. Ennek része kell hogy legyen egy olyan érzékelő és jelzőrendszer, amely a külső és belső rendszerek állapotáról folyamatos tájékoztatást ad kiberbiztonsági szempontból. Sikeres kiberbiztonsági stratégia és annak megvalósítása a szervezeti kultúrától függ. A kiberbiztonság,

⁴³ ASM: Attack Surface Management – kibertámadásfelület-menedzsment.

az adatvédelem és a digitális bizalom mind azon alapul, hogy a szervezet sikerrel integrálja-e a biztonságot mint szervezeti elemet. Annak tudatosítása, hogy a kiberkockázat közös felelőssége minden érintettnek, a kibertámadások elleni megelőzéshez és védekezéshez szükséges megfelelő viselkedés kialakításával a kiberkockázatokkal szembeni ellenálló képesség csak növekedni fog a jövőben.

Felhasznált irodalom

- A40-10: Addressing Cybersecurity in Civil Aviation*. ICAO, 2019. Elérhető: www.icao.int/cybersecurity/Documents/A40-10.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 06. 20.)
- Advancing Cyber Resilience in Aviation: An Industry Analysis*. World Economic Forum, 2020. Elérhető: www3.weforum.org/docs/WEF_Cyber_Resilience_in_Aviation_An_Industry_Analysis.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 06. 15.)
- Aviation Cyber Security – Moving Forwards*. IATA, ICAO Working Paper on Assembly 40th Session Executive Committee, 2019. Elérhető: www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_395_en.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 06. 15.)
- Azani, Eitan – Lorena Atiyas Lvovsky – Danielle Haberfeld: *Trends in Aviation Terrorism*. International Institute for Counter-Terrorism (ICT), 2016. Elérhető: www.ict.org.il/UserFiles/ICT-trends-aviation-terror-aug-16.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 07. 06.)
- Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis*. ICAO, 2020. Elérhető: www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 06. 16.)
- Florent, R.: *Aerospace Cybersecurity: Building resilience in the hailstorm*. Cyber Inflight, 10 May 2020. Elérhető: www.cyberinflight.com/?p=1081 (A letöltés dátuma: 2020. 06. 16.)
- How to Access Dark Web: Dark Web, TOR Browser and Browsing. Onion Websites*. Forum Team, Blogstore, March 2020. Elérhető: www.blogstore.net/forum/web-site/how-to-access-dark-web-dark-web-tor-browser-and-browsing-onion-websites (A letöltés dátuma: 2020. 07. 06.)
- Lam, Anthony – Jose Fernandez – Richard Frank: *Cyberterrorists Bringing Down Airplanes: Will it Happen Soon?* In A. R. Bryton – J. R. Lopez Jr. – R. F. Mills: *Academic Conferences and Publishing International Limited Reading*. Proceedings of 12th International Conference on Cyber Warfare and Security, Wright State University with the Air Force Institute of Technology Dayton, UK, 2–3 March 2017. 210–219.
- Lykou, Georgia – Argiro Anagnostopoulou – Dimitris Gritzalis: *Smart Airport Cybersecurity: Threat Mitigation and Cyber Resilience Controls*. *Sensors*, 19. (2019), 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19010019>
- Mazareanu, E.: *Coronavirus: impact on the aviation industry worldwide*. Statista, 4 Jun 2020. Elérhető: www.statista.com/topics/6178/coronavirus-impact-on-the-aviation-in-dustry-worldwide/ (A letöltés dátuma: 2020. 06. 16.)
- Pethuru, R. – A. C. Raman: *The Internet of Things. Enabling Technologies, Platforms & Use Cases*. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2017. Elérhető: <http://library.sadjad.ac.ir/opac/temp/19109.pdf> (A letöltés dátuma: 2020. 07. 06.)
- Saraogi, Varsha: *Five times airports were involved in cyberattacks and data breaches*. Airport Technology, 24 July 2019. Elérhető: www.airport-technology.com/features/

- [five-times-airports-were-involved-in-cyberattacks-and-data-breaches/](#) (A letöltés dátuma: 2020. 06. 17.)
- Security and Facilitation Strategic Objective. Aviation Cybersecurity Strategy.* ICAO, 2019. Elérhető: www.icao.int/cybersecurity/Documents/AVIATION%20CYBERSECURITY%20STRATEGY.EN.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 06. 20.)
- Securing Smart Airports.* ENISA, Study, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2824/865081>
- State of Cybersecurity at Top 100 Global Airports.* Application Security Series, ImmuniWeb, 29 January 2020. Elérhető: www.immuniweb.com/blog/state-of-cybersecurity-top-100-airports.html (A letöltés dátuma: 2020. 06. 21.)
- Stouffer, Keith – Joe Falco – Karen Scarfone: *Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security.* Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce, 2011. Elérhető: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-82.pdf> (A letöltés dátuma: 2020. 07. 06.)
- Understanding Denial-of-Service Attacks.* Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, 20 November 2019. Elérhető: www.us-cert.gov/ncas/tips/ST04-015 (A letöltés dátuma: 2020. 07. 06.)

Tartalom

BOZÓKI JÁNOS, KAVAS LÁSZLÓ: <i>Katonai légi jármű-alkatrész örvényáramos anyagvizsgálatának lehetőségei és tapasztalatai</i>	5
HUSZÁR PÉTER: <i>Távoli drónazonosítás</i>	19
MIES GERALD, ZENTAY PÉTER: <i>Machine Tools and Industrial Robots as Key Technologies to Enable Industry 4.0</i>	37
AHMAD ALHOSBAN: <i>Assessment of the GIS-Aided Precise Approach Using the GNSS-GBAS Landing Systems</i>	49
FALTIN ZSOLT, BENEDA KÁROLY: <i>Centrifugálkompresszor-karakterisztika regressziója a teljes működési tartományban nem lineáris matematikai modellhez</i>	67
REIZINGER PATRIK, HUSZÁR PÉTER, MILÁNKOVICH DOROTTYA, SZÉLL ALEXANDRA: <i>Kisműholdak fejlesztése a sokoldalúság és a könnyű reprodukálhatóság tükrében</i>	81
SZÜCS VIKTOR, GAJDÁCS LÁSZLÓ: <i>A 3D nyomtatás lehetőségei a repülőgépiparban</i>	97
MENYHÁRT JÓZSEF, GERALD MIES, KOMLÓSI ISTVÁN: <i>Measurement Chamber Design for Testing Batteries of the Electric Vehicles</i>	105
BENEDA KÁROLY TAMÁS, FALTIN ZSOLT: <i>Tízéves a teljes hatáskörű digitális elektronikus hajtómű-szabályozó rendszerek fejlesztése a BME VRHT-n</i>	117
KÖVÁRI BÁLINT, KOLAT MÁTÉ, HARASZTI SÁNDOR, GYENIS TAMÁS, VÖRÖS DÁNIEL, ROHÁCS JÓZSEF, BICSÁK GYÖRGY: <i>Area Scanning with Reinforcement Learning and MCTS in Smart City Applications</i>	137
HUSZÁR PÉTER: <i>Drónok elleni fenyegetések a kibertérből</i>	155
PEREDY ZOLTÁN, VENCZEL MÁRK: <i>Nemzetközi repülőterek kiberbiztonsági kihívásai</i>	165