

Kovács Gábor¹

FORGÓSZÁRNY VIBRÁCIÓCSÖKKENTÉS TECHNIKAI MEGOLDÁSAI²

A periodikus mozgást végző rendszerek, a velük kapcsolatban lévő emberből vibrációs érzést váltanak ki. Keletkezését tekintve e rezgések nem csak a levegőn keresztül, hanem közvetlen érintkezés útján is kifejtik negatív hatásukat az üzemeltetőkre és az üzemeltetett légitűeszközökre. Vizsgálatokkal igazolt, hogy a folyamatosan vibrációnak kitétt emberek egészségkárosodást szenvedhetnek, továbbá a szerkezeti elemek fáradásos törése is létrejöhet, mely a repülőeszköz élettartamát kedvezőtlenül befolyásolja. Dolgozatomban bemutatom napjaink korszerű vibrációcsökkentő technikai megoldásait főként a forgószárnyakra vonatkozóan.

ROTOR VIBRATION REDUCING TECHNOLOGIES

Periodic motion systems which are associated with humans elicits vibration feelings. The formation of vibration is not through the air, but also through direct contact has a negative effect on humans and the operated aircrafts. Studies shown that people who are continuously suffered from vibration exposure health risks and causes fatigue fracture to the structural elements which are affect to the aircrafts lifetime. In my thesis I present today's advanced anti-vibration technology solutions primarily for the rotor hub.

Az emberi szervezetet érő hatások nem korlátozódnak az érintkezés helyére, hanem a rezgések energiájától függően az egész testre áterjedhetnek. Az ember a zaj- és vibrációforrással együtt kényszerrezgést végez úgy, hogy a rezgés frekvenciája megegyezik, az amplitúdója eltér a forrástól [1].

Az emberi test bonyolult rendszer, külső gerjesztés hatására rezgésbe jön, de az egyes szervek rezonanciafrekvenciái különbözők:

- 3–6 Hz: fej-nyak-váll rendszere;
- 7 Hz: agy;
- 5–9 Hz: lép, gyomor, máj;
- 60–90 Hz: szemgolyó;
- 100–200 Hz: állkapocs;

Az egész testre ható rezgéseknél az 1–80 Hz, a kézre ható rezgéseknél a 8–1000 Hz közötti frekvenciatartomány a kritikus. Az ember a 18 Hz alatti rezgéseket (infrahangokat) nem vibrációként, hanem ütések formájában érzékeli, a 150 Hz feletti rezgések pedig már hangérettel is együtt járnak [1].

A vibráció erőssége a rezgés kiterjedésével, energiájával, sebességével vagy gyorsulásával jellemezhető. Méréstechnikai okok miatt a rezgés jellemzésére a gyorsulást használják, de beve-

¹ hadnagy, MH Légijármű Javítóüzem, kovigabi1985@gmail.com

² Lektorálta: Prof. Dr. Óvári Gyula egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Tanszék, ovari.gyula@uni-nke.hu

zethető a decibelben mérhető gyorsulásszint is, mely a következő összefüggés alapján számítható:

$$L_a = 20 \lg \frac{a}{a_0} \quad (1)$$

ahol: $a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$

Így az 1 m/s^2 gyorsulás 100 dB-nek, a $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ nehézségi gyorsulás 120 dB-nek felel meg. A kísérletek tanulsága alapján az egész testre ható vibráció függőleges irányban 4–8 Hz között, vízszintes irányban pedig 2 Hz alatt fejt ki leginkább kedvezőtlen hatását. Általában kijelenthető, hogy a $0,2 \text{ m/s}^2$ (kb.: 85 dB) alatti gyorsulásokat ~8 órán át, a $0,5 \text{ m/s}^2$ (kb.: 95 dB) alatti gyorsulásokat az ember ~4 órán át képes károsodás nélkül elviselni [1].

A rezgések következményeként neurotikus panaszok, légzési nehézség, szívritmus változás, gerincbántalom, általános gyengeség, beszédzavar léphet fel, a végtagokon jól definiálható ér- és ízületi elváltozások jöhetnek létre. A vibrációs ártalmak rendszerint nem gyógyíthatóak, ezért fő hangsúlyt a megelőzésre kell fordítani [1].

Akusztikus terhelés során a közegben tovaterjedő periodikus nyomásváltozás okozza a szerkezeti elemek rezgését. 120 dB a fájdalomküszöb, 130–190 dB között fáradásos törés, 190 dB felett statikus roncsolódás következik be. A zaj által okozott akusztikus terhelés elsősorban a borítólemezek fáradásos törését okozhatja, ami különösen hermetikus törzseknél igen veszélyes [2].

A kifáradási határfeszültség egy olyan jellemző, mely megmutatja, hogy az adott szerkezeti anyag milyen számú (periódusú) és amplitúdójú periodikus terhelést képes tönkremenetel nélkül elviselni. A gyakorlatban erről a Wöhler-diagram tájékoztat, amiről leolvasható a terhelés ismétlésszámának, és a feszültségének a viszonya. Kifáradási jelenség akkor lép fel, ha meghaladjuk a határfeszültséget. Az anyagban megindulnak a diszlokációk a felület felé, ahol mikrorepedéseként összekapcsolódnak, majd makrorepedésekké alakulnak, lecsökkentve a hasznos, teherviselő felületet (ezáltal a teherviselő képességet!). A makro méretű repedéseket már tönkremenetelként kell kezelni. Dinamikus terhelés hatására a törés nagyon gyorsan létrejöhethet, ha a gerjesztő erő frekvenciája azonos az adott elem saját lengési frekvenciájával (rezonancia!). Prevencióval meggátolható a kialakulás és tovaterjedés, a mikro-repedéseket megfelelő roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárásokkal detektálni kell.

A rezgések nem csak a sárcányszerkezetre, és az emberre károsak, hanem a fedélzeten elhelyezett berendezésekre, műszerekre is. A vibráció miatt csökken ezek élettartama, mérési pontossága, nő a meghibásodásuk valószínűsége. A légijárművek fejlődésével az elektromos és műszerberendezések egyre nagyobb szerepet töltenek be, így ezek megbízható működése fokozott jelentőségű. A rezgések miatt kikopnak a csapágyak, romlik a pontosság és a leolvashatóság. Az elektromos berendezések ~120 dB zajszintnél működésképtelenné válhatnak, ~140 dB-nél mechanikusan is sérülhetnek. Ezek az értékek jóval magasabbak, mint ami a vezetőfülkében megengedhető, de a sárcány külső felületén lévő érzékelő elemek elhelyezésénél erre is ügyelnek [2].

A lengő rendszert el kell hangolni a rezonanciától. Ez azt jelenti, hogy a saját lengési frekvenciája lehetőleg legalább 25–30 %-kal különbözzön a gerjesztő erők frekvenciájától. Ezért is rögzítik műszereket a műszerfalra rugalmas elemekkel. Ez a megoldás rendszerint a rendszer

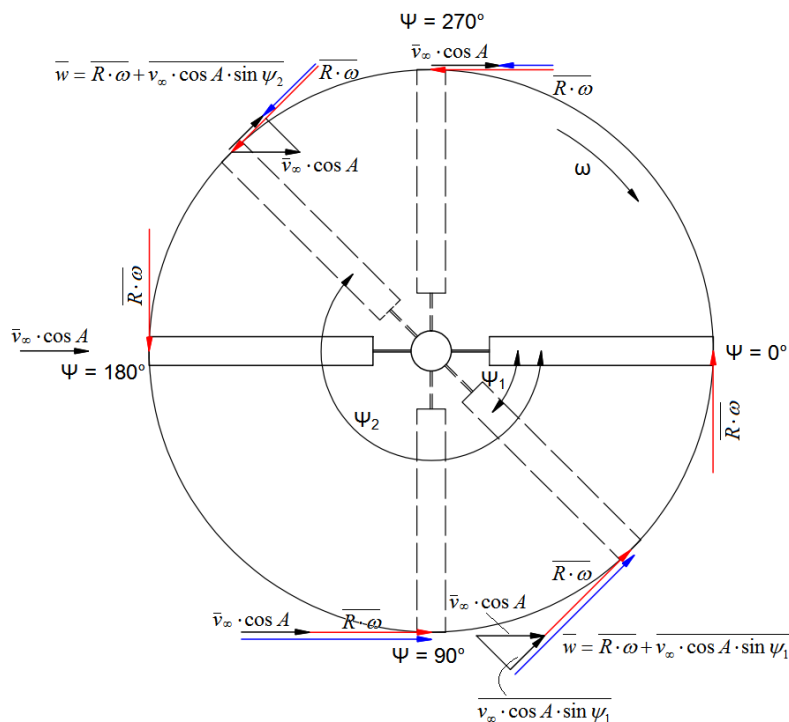
sajátlengési frekvenciáját csökkenti, és a lengési amplitúdó is kicsi lesz.

Lengéscsillapítók beépítése szükséges, ha a gerjesztő erők széles frekvenciatartományban jelentkezők, és így a rezonancia környékén is üzemel a rugalmas rendszer [2].

Az aerodinamikai erők és az általuk létrehozott nyomatékok okozta terhelések a forgószárny lapátjain állandó sebességű, haladó repülésnél periodikusan váltakoznak és a tércsuklós bekötésen átadódnak a forgószárnyagyra. E rezgéseket a forgószárny tengely továbbítja reduktoron és támaszain keresztül a repülőeszköz törzsére ami annak vibrációját váltja ki [3].

A lapátokon ébredő terheléseket nagymértékben a tehetetlenségből adódó forgószárnylapát csapkodás és lengés által gerjesztett rezgés határozza meg. A forgószárny változó terhelései mellett a ferdeátáramlásban működő faroklégcsvár is hozzájárul a törzs vibrációjához, de a gerjesztés meghatározó forrása rendszerint a forgószárny.

Mivel az oszcilláló aerodinamikai terhelések amplitúdója szorosan összefügg a ferde átáramlással - a széles repülési sebesség-intervallumban miatt - az azimúthelyzet függvényében jelentősen váltakozó eredő lapátsebességekkel, ezért nem is lehet a vibrációt teljes mértékben megszüntetni a helikopteren. Ennélfogva, erőfeszítéseket kell tenni, a helikopterre és a fedélzeten tartózkodókra ható rezgések minimalizálására [3].



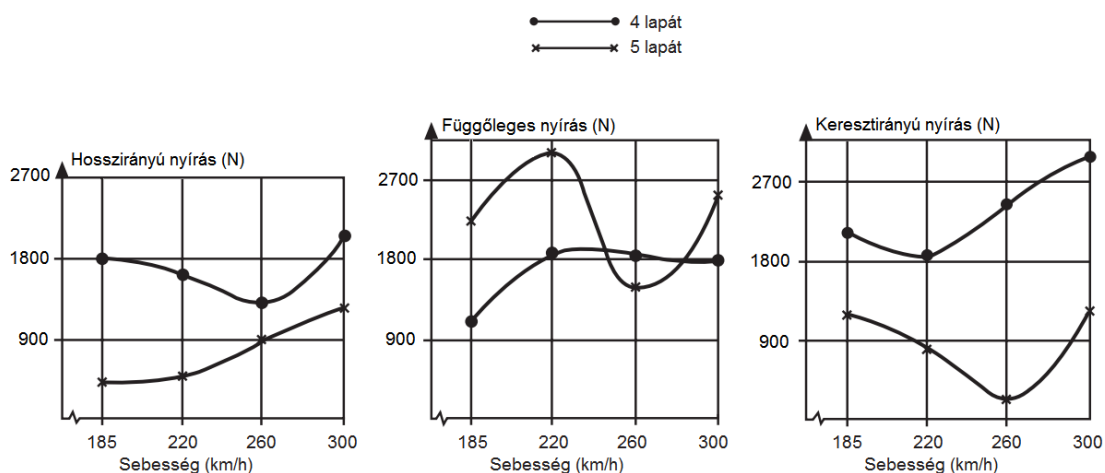
1. ábra Ferde átáramlási üzemmód esetén az eredő sebességek alakulása³

Az 1. ábrán látható, hogy ferde átáramlásnál a forgószárny kerületi és a megfűväs sebességei előjehelyes összege jelentősen eltérő nagyságú eredő sebességet hoz létre 90° -os és 270° -os azimúthelyzetben. Ezért, vonóerő változás lép fel a két ellentétes oldalon, mely az előre haladó lapátot kényszeresen felfelé, míg a hátra haladó lapátot lefelé mozdítja el, azaz csapkodásra

³ Forrás: Saját szerkesztés.

készíti. Emiatt a lapát súlypontja az agyhoz képest vándorol, így a perdület állandóságának következtében létrejövő a Coriolis-erő, 90° -os azimuthelyzetnél növeli, 270° -nál csökkenti a szögsebességet, és a lapát lengését okozza a forgás síkjában. A körülfordulás során a lapátok állásszöge is változik, mivel az eredő megfűvás – ami a haladásból és a csapkodásból jön létre – is eltérően alakul. Ezek a kényszermozgások váltakozó feszültséget okoznak az agyban, melyek káros hatással járnak. Kiküszöbölésükre tércsuklós bekötéseket alkalmaznak, melyek korlátozottan fenntartják mind a három tengely körüli elfordulás lehetőségét, de megakadályozza a hajlító terhelések átadását az agyra. Mivel a mozgások periodikusak, így gerjesztett rezgést okoznak az egész helikopteren.

A lapátok száma is jelentősen befolyásolja a vibrációt. A kétlapátos megoldás oszcilláló tulajdonsága - miközben előrehalad a helikopter - nagyobb amplitúdójú rezgést generál. Amennyiben növeljük a lapátok számát az aerodinamikai gerjesztés csillapodik. A 2. ábrán látható egy tipikus félmerev lapátbekötéssel rendelkező közepes helikopter négy-, illetve ötlapátos forgószárny konfigurációban. Észrevehető, hogy a vibráció keltette három- tengelyirányú nyírások, a többlapátos verziónál átlagosan alacsonyabb értékeket vesznek fel. Az igénybevételek a bekötési pontokban jelentkeznek [3].



2. ábra Négy, illetve ötlapátos forgószárny nyírása a három tengelyen⁴

A forgószárny tervezésnél nagy hangsúlyt kapnak a dinamikus terhelések, rezgések, melyek meghatározzák a helikopter irányíthatóságát, a sárkányszerkezet vibrációját, a forgószárny-lapátok kifáradását, és az egész forgószárnyrendszer aeroelasztikus jelenségekkel szembeni ellenállását. Az agy szerkezeti elemei számának csökkenésével, integrálásával, kedvezőbb aerodinamikai kialakításával magasabb hatásfokú forgószárnyak építése vált lehetővé. Napjainkra, a kompozit anyagok egyre szélesebb körű elterjedése is számottevően elősegítette e folyamatot. [3]

A pontos tervezés két fő ok miatt szükséges:

- minimalizálni kell a forgószárnyról a törzsre átadódó vibrációt;
- a vibrációcsökkentéssel növelhető a szerkezet élettartama.

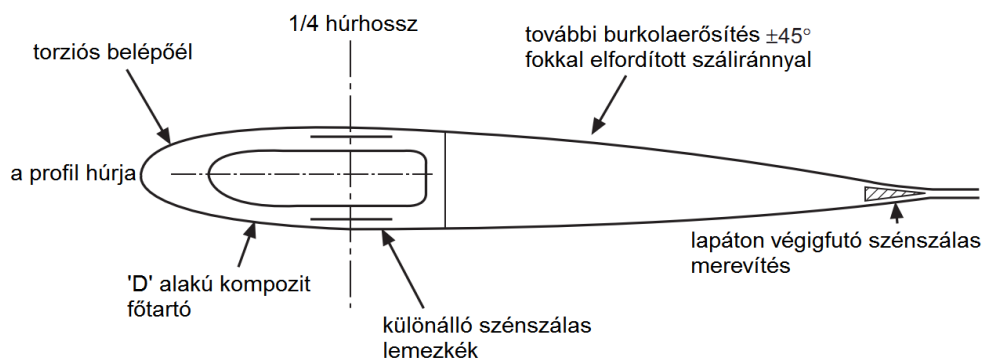
⁴ Forrás: A. R. S. Bramwell - Bramwell's helicopter dynamics, Oxford, 2001. (saját fordítás)

Az '50–'70-es években épült helikopterek forgószárnyai többségének tömegeloszlása és merevsége sugár irányban lényegében állandó volt. Ferde átváramlási üzemmódnál e lapátok periodikus fel-le csapásakor, valamint a forgássíkból létrejövő vízszintes lengésekor, a két irányban létrejövő hajlító terhelések agyra történő átadását, vízszintes és függőleges csuklók beépítésével akadályozzák meg. Ez a vibráció átadását is elfogadható szinten tartotta. Azonban, 280 km/h-t meghaladó utazósebességnél, a felerősödő rezgések miatt is, célszerűvé vált a lapátok bekötésének áttervezése.

A felhasznált anyagok fajtái nagyban befolyásolják a lapát dinamikus karakterisztikáját, melyre leginkább jellemző értéket a rugalmassági modulus és a sűrűség hányadosa adja meg (E/ρ). Mivel fémek esetében ez az érték lényegében állandó, így a finomhangolás erősen korlátozott. A szálerősítésű kompozitoknál azonban ez az E/ρ érték – a tipikus fémekhez képest – 50–250%-ban, míg a csúsztató modulus és a sűrűség hányadosa (G/ρ) 20–200 % között változtatható, a szálerősítés kialakításától, és az irányától függően.

A modern kompozit forgószárnylapátok üveg- és/vagy szénszálal erősítéssel készülnek. A szükséges kereszt- és hosszirányú-, valamint a csavarómerevség egymástól függetlenül tervezhető és alakítható ki.

A 3. ábrán látható forgószárnylapát a zárt, profilkontúros főtartójának alsó és felső falait - a csapkodásból adódó húzó-nyomó igénybevételek felvételére - külön szénszálal rétegekkel (lemezekkel) erősítették meg. A vízszintes lengésekből adódó terhelések jobb felvételéhez szükséges merevség, a kilépőélen végigvezetett erősítéssel biztosítható, míg a csavarás felvételét a torziós belépőél megfelelő irányú szálszerkezete teszi lehetővé [3].



3. ábra Kompozit építésű lapátprofil⁵

Mivel a nagy sebességeknél fellépő vibráció csökkentéséhez a lapát vége felé a tömegeloszlás és merevség csökkenése szükséges, így ezekkel a technikákkal lehetővé válik a forgószárnylapát – e követelménynek megfelelő – „finomhangolása” [3].

Fontos állomása volt kutatásomnak a csehországi Brno városában a University of Defense szervezésében megrendezett tudományos konferencia, ahol több külföldi és természetesen cseh

⁵ Forrás: A. R. S. Bramwell - Bramwell's helicopter dynamics, Oxford, 2001. (saját fordítás)

résztevő előadásai hangzottak el repüléstechnika témakörben.

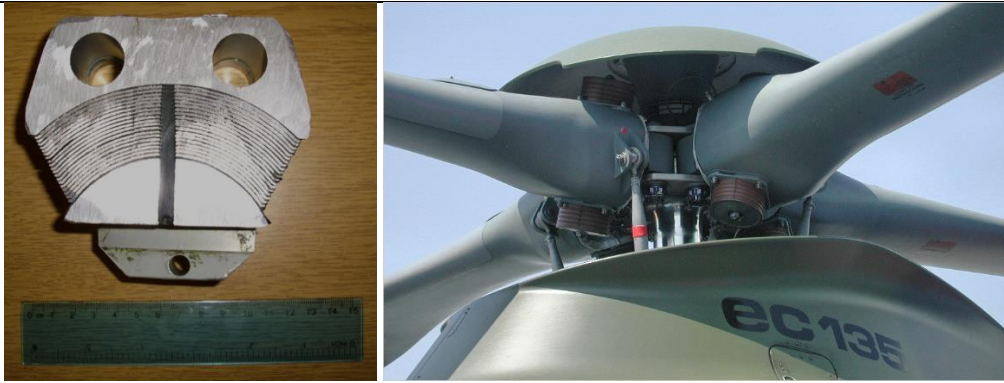
A „TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0001 „Kockázatok és válaszok a tehetséggondozásban” – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával megvalósuló projekt. A pályázat alapvető célja, olyan komplex feltételek megteremtése a felsőoktatási intézményekben, amelyek lehetőséget biztosítanak a tehetségek számára az egyedi, és közösségi tudományos fejlődésre. Ennek része az intézményen belüli tehetségsegítő programok működtetése, fejlesztése, amik az arra érdemes hallgatóknak lehetőséget és anyagi háttérrel biztosítanak a tudományos fejlődésre, valamint azokat az oktatókat, kutatókat támogatják, akik aktívan részt vesznek az utánpótlás nevelésében. Ennek keretein belül volt lehetőségem részt venni a konferencián.

Ivan DOBREV: „*Aeroelastic investigation of pattern hingless helicopter rotor in forward flight*” című előadása kiemelkedően fontos volt számomra, mivel az aktuális kutatásom „*a forgószárnyagy-bekötés vibrációs tulajdonságai*” igen erősen támaszkodik az ez irányú vizsgálatokra, így saját eredményeimet láttam igazolva. A félmerev bekötésű forgószárny lapátok aeroelasztikus, és aerodinamikai vizsgálatait mutatta be az előadó, számításait MATLAB szoftverrel szemléltette.

A 60-as évektől, az új szerkezeti anyagok megjelenése lehetővé tette egyszerű felépítésű, könnyen karbantartható, kis légellenállású, hosszú élettartamú, csukló nélküli forgószárny-agyak létrehozását. A bennük alkalmazott elasztomerek hosszú üzemideje annak köszönhető, hogy a dinamikus fárasztás (esetünkben vibráció) esetén, a fémekhez hasonlóan (Wöhler-diagram szerinti) terhelhetőség-csökkenés nem tapasztalható, nincs kimutatható kifáradási határunk. Az így kialakított forgószárnyagyak esetében nem változik meg a lapátok vezérlésének elve, csak a hagyományos csuklók szerepét különféle, előre meghatározott rugalmasságú, illetve csillapítási tulajdonságú anyagok veszik át. Az elasztomerek kiválóan alkalmasak erre a feladatra, mivel széles hőmérsékleti tartományban reverzibilisen, száz százalékos nyúlásra, rugalmas deformációra is képesek. Ezen anyagok segítségével radiális, axiális és gömbszférikus csapágyak hozhatók létre, amelyekkel a terhelések átadásán kívül az x, y és z tengely körüli vezérlés is megvalósítható.

Fontos, hogy nagyon nehéz meghatározni miként fog változni a helikopter vibrációja a különböző repülési sebesség-tartományokban. Az elmúlt évtizedekben sok olyan szerkezeti elem, berendezés vált a helikopter részévé, amelyek kihatással vannak a vibrációra. Ezek egyike, a lapátok és a forgószárnyagy közötti csatlakozás, amely a rezgéseket is továbbítja. A hagyományos, tércsuklós bekötés kevésbé adja át a vibrációt a törzsre, mint egy félmerev, elasztomer, gömbszférikus csukló. Ennek ellenére, – döntően az egyszerűsége, kompaktsága, nem utolsó sorban kisebb súlya, alacsonyabb légellenállása és karbantartási igénye miatt – napjainkra szinte kizárólag az utóbbit alkalmazzák.

A 4. ábrán egy felmetszett, gömbszférikus, elasztomer csukló látható, amin jól kivehetőek a rétegesen elhelyezett acél betétek, és az elasztomer rétegek. Az 5. ábra mutatja az EC 135 típusú helikopter forgószárnyagyát, ahonnan a metszet is származik.



4-5. ábra Balra metszett csukló⁶, jobbra beépítve látható⁷

Az előadás során felmerültek olyan kérdések, melyek a témát kiszélesítik a léggépjárművek más kategóriájára, például alkalmazhatóak-e az ilyen számítások merevszárnyú repülőgépek szárnyterhelésének meghatározására? Az előadó elmondta, hogy a fizikai jelenségek egyaránt érvényesek a forgó- és merevszárnyú repülőgépekre, hiszen a forgószárnylapát tulajdonképpen szárnyként viselkedik, ami közel ugyanolyan megfűvést kap, így az egyenletek többsége érvényes.

A témát már több nemzetközi kutatóintézet is vizsgálta, (pl. a Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt nevű központ), ahol a megépített forgószárny rendszereket szélcsatornában is tesztelik. Ezen kívül a francia ONERA⁸ is végzett vizsgálatokat a témában.

A NKE-n repülőműszaki szakirányon tanuló hallgatóként gazdag ismereteket szereztem, melyeket szeretnék a további tanulmányaim alatt beépíteni kutatásaimba. Olyan ötletre hívták fel a figyelmemet az előadások, melyeket érdemesnek tartok továbbvinni tudományos munkákba, előadásokba. A képzésemet jelentősen kiegészítette a konferencia.

Célom, hogy a most bemutatott egyszerűbb kialakításokon túl, kutatásaimat az aktív rezgésvédelem területére is átvigym. A következő generációs helikopterek egyik legfontosabb eleme, az eddigi tapasztalatokat adatbázisokba foglaló digitális szabályozás, mely számos további kutatási lehetőséget hordoz magában.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] DR. KÓSA CSABA Munkavédelem, egészségvédelem I. BME, Budapest, 2005.
- [2] DR. ÓVÁRI GYULA Repülőgép rezgések, NKE kézirat
- [3] A. R. S. BRAMWELL Bramwell's helicopter dynamics, Oxford, 2001

⁶ Forrás: Saját archívum.

⁷ Forrás: <http://www.b-domke.de/AviationImages.html> (2013.02.10.)

⁸ ONERA - Office National d'Études et de Recherches Aéropatiales - Repülési Tanulmányok és Kutatások Országos Hivatala