

Szent István Egyetem

**KISREPÜLŐGÉPEK KARBANTARTÁSI RENDSZERÉNEK
FEJLESZTÉSE: GYENGEPOINT REKONSTRUKCIÓ**

Doktori (Ph.D) értekezés tézisei

Lefánti Rajmund

Gödöllő
2011

A doktori iskola

megnevezése: **Műszaki Tudományi Doktori Iskola**

tudományága: **Agrárműszaki tudomány**

vezetője: **Dr. Farkas István**
egyetemi tanár, DSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gödöllő

Témavezető: **Dr. habil. Kalácska Gábor**
egyetemi tanár, CSc
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Gépipari Technológiai Intézet
Gödöllő

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
1.1. A téma aktualitása	4
1.2. Kitűzött kutatási feladatok	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1. Kisrepülőgépek karbantartási rendszerének fejlesztése	6
2.1.1. Kisrepülőgépben alkalmazott műanyag gépelem, mint gyengepont	6
2.1.2. Meghibásodott gépelem rekonstrukciójának célja	7
2.1.3. Eredeti gépelem és a vizsgált anyag(ok) megválasztása.....	7
2.2. Meghibásodott gépelem vizsgálatának lépései	8
3. EREDMÉNYEK.....	9
3.1. Új karbantartási rendszermodell bemutatása	9
3.2. Anyagjellemzők meghatározása	10
3.3. A repülőgép terheléseinek mérése valós körülmények között.....	11
3.3.1. Gyorsulási eredmények kiértékelése.....	11
3.4. Futószár mechanikai vizsgálata szimulációval	13
3.5. Laboratóriumi fárasztó-koptató vizsgálat	13
3.6. Mérési eredmények és a tényleges igénybevétel, ismétlési szám (ciklusszám) kapcsolata.....	16
3.7. Rekonstrukciós fejlesztés eredménye	16
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	18
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK.....	20
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	21
SUMMARY	23
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK.....	25

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma aktualitása

A szerkezeti anyagok előállítási módszereinek, a gépelemek gyártástechnológiáinak gyors fejlődése kihatott a karbantartás módszereire és anyagaira is, így kialakultak a különböző karbantartási stratégiák. A gondolkodásbeli, szemléletbeli változások a karbantartási stratégiákban valójában a vevői elvárásoknak való egyre tökéletesebb megfelelés részét képezik. Ennek megfelelően a karbantartás fogalmköréhez tartozó tevékenységek is bővültek. A karbantartás szakterületén dolgozók megközelítésében kiszélesedett gépfenntartássá, majd komplex gépüzemfenntartássá. Egy biztos, hogy a gépek teljes életciklusának szerves részeként hol előtérbe kerül a gépüzemfenntartás, mint a termékmenedzsment szerves része, vagy elkülönítve és „kiszervezve” kezelik, de nem elhanyagolható szempont a gépek tervezésénél és alkalmazásánál.

A karbantartási stratégiák összetettsége miatt célravezetőnek láttam munkám során egy rendezőelv kidolgozását. Ez segít összehasonlítani az egyes stratégiákat.

A karbantartási stratégiák odáig fejlődtek, hogy az egyes alapelvek megvalósítása már ipari specifikus jelleget ölt, szakterületi rendszerek jelennek meg a gépüzemfenntartás szervezésében, eszközeiben, alkalmazott technológiáiban, a folyamatok végrehajtásában és a döntéshozatali mechanizmusokban.

1.2. Kitűzött kutatási feladatok

A Szakirodalmi feldolgozás során a kisrepülőgépes karbantartás területén hiányosságokat állapítottam meg. A hiányosságokból adódóan a kisrepülőgépek üzemeltetésének területén célravezetőnek mutatkozott egy olyan modell kidolgozása, amely a meglévő légialkalmasság fenntartó/karbantartási tevékenységeket magában foglalja, de azon túl hozzájárul a különböző tevékenységek megfelelő rögzítésére, visszakereshetőségére. A kidolgozandó modellen belül indokoltnak láttam létrehozni a karbantartási feladatokhoz szorosan illeszthető „Kiegészítő műszaki információs” modult, mely az információs társadalmi viszonyokhoz való rugalmas alkalmazkodás szerves része.

Egy új karbantartási modell megalkotása komplex mérnöki feladat, mely a szakirodalmi alapfogalmak tisztázása és tartalmi elemeinek pontosítása után, a modell tartalmi elemeinek kidolgozása mellett a használhatóság bemutatására is kell, hogy törekedjen. E cél érdekében, az információs modul feltöltésére egy gyengepont-rekonstrukciós feladat kidolgozását tűztem ki célul.

Mindezek tükrében, a kutatási feladatok fő lépései:

- A karbantartás területén használatos alapfogalmak rövid áttekintése és definiálása. A karbantartási stratégiák összehasonlítása és értékelése a „mit, mikor, hogyan mérnek, és ezután ki, mit csinál” kérdéssor felhasználásával.
- Kisrepülőgépek karbantartási gyakorlatának elemzése a stratégiák tükrében.
- Kisrepülőgép karbantartási modell fejlesztése a „gyengepont” rekonstrukciók alrendszerbe illesztési lehetőségére.
- Gyengepont rekonstrukció és eredményei, minta modell kidolgozása: a futószárra vonatkozó műszaki információik meghatározása, kiértékelése, amelyekből következtetések, ajánlások, szigorítások megállapítása a kisrepülőgép karbantartási rendszerére vonatkoztatva.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Kisrepülőgépek karbantartási rendszerének fejlesztése

A szakirodalmi áttekintésben tisztázott karbantartási stratégiák alapján, blokksémában bemutatható, új, modulrendszerű karbantartási modellt dolgoztam ki. A rendszerszervezés során kialakított információs csatornák pontos leírása, az egyes szintek, hierarchiák kialakítása, a jogosultságok és hozzáférhetőségek tisztázásának leírása képezi az alapját a további informatikai programfejlesztésnek.

A modell műszaki információs moduljának gyakorlati használatára kidolgoztam és feltöltöttem a rendszerbemutatásba egy gyengepont rekonstrukciót, az alábbiak szerint.

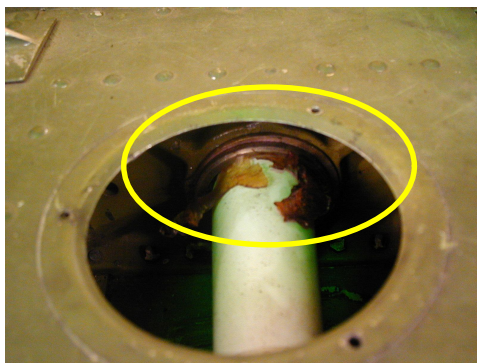
2.1.1. Kisrepülőgépben alkalmazott műanyag gépelem, mint gyengepont

Kisrepülőgépek esetében a 20 - 30 éves konstrukció főleg az anyagválasztás szempontjából elavult.

Gyakorlati problémaként merült fel egy 1970-es években gyártott Cessna 172-es típusnál, hogy a futószár bekötésnél elhelyezkedő szilentblokk (rugalmas hossz-ágyazású megtámasztás) ismételten, többször meghibásodott.

A Cessna 150-es családnál 1000 óránként vagy 3 évente, a 172-es családnál 1000 óránként kell ellenőrizni a külső támaszt, de csak laprugós kivitelnél. Cső keresztmetszetű futószár esetén a rugalmas megtámasztásra (ágyazásra) vonatkozó karbantartásról a gyártó semmilyen utasításban **nem** rendelkezik.

A Cessna 172-es típusnál a PUR ágyazás tönkremenetele jelenti a rekonstrukcióval javítandó gyengepontot. Meghibásodásra utaló jelek a beépítés helyén is megfigyelhetők voltak (2.1. ábra). Az ismétlődő terhelés hatására a szilentblokk külső acélperselye és a futószár közül a műanyag szinte kimorzsolódott. A meghibásodott alkatrészt kiszereelt állapotban a 2.2. ábra mutatja. A képen látható, hogy a PUR ágyazás teljesen tönkrement. A műanyag persely belső része elvékonyodott, kirepedt és a szilentblokk külső pereme felé türemkedett ki az anyag, hiszen itt szabadon deformálódhatott.



2.1. ábra A meghibásodott gépelem beépített állapotban



2.2. ábra A meghibásodott gépelem kisserelt állapotban

2.1.2. Meghibásodott gépelem rekonstrukciójának célja

A meghibásodásra hajlamos futószár ágyazás repülésbiztonsági oldalról kockázatot jelent. Joggal vetődik fel a kérdés, hogy helyettesíthető-e a gyengepont új, korszerű anyagokat tartalmazó megoldással, ahol az üzemi igénybevétel nem eredményez visszatérő meghibásodást.

További rekonstrukciós tevékenységem:

- Javaslatot tenni az eredeti PUR rugalmas ágyazás anyagának kiváltását szolgáló más műanyagra vagy műanyag párosításra.
- További célom, hogy meghatározzam azt a jellemző igénybevételt és határértéket, amely alapján szükségszerűen javasolt az adott gépelem vizsgálata, függetlenül attól, hogy éppen hol tart a repülőgép karbantartási periódusa. A meghatározott érték elérésekor javasolt a gépelem felülvizsgálata, esetleges cseréje. Ezzel a jellemző paraméterrel a hiányos karbantartási utasítás kiegészíthető.

2.1.3. Eredeti gépelem és a vizsgált anyag(ok) megválasztása

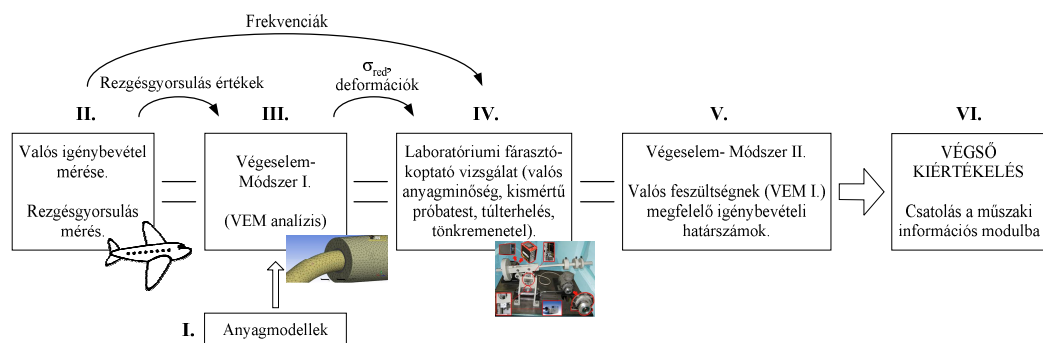
A többszörös meghibásodást eredményező rugalmas hosszagyazás anyaga megfelel a mai kereskedelemben elérhető PUM 70A jelzésű öntött poliuretán alapanyagoknak.

Tekintettel arra, hogy a PUM 70A típusú alapanyag jellegzetes meghibásodása a kifáradás és a kopás, ezért helyettesítő anyagként közel hasonló rugalmassági, de jobb kifáradási tulajdonságokkal bíró PUM 60A és a PUA 90A alapanyagot választottam. Alternatív megoldásként többretegű szerkezet létrehozásánál, sikló felületként a Docapet TF kompozit anyag lehet előnyös.

2.2. Meghibásodott gépelem vizsgálatának lépései

A tönkrement gépelem komplex vizsgálatának, illetve a kiértékelésnek a folyamatát az alábbi pontok tartalmazzák, továbbá a 2.3. ábrán összefoglalva is látható.

- A tönkrement gépelem anyagának, minőségének, összetételének meghatározása.
- Az eredeti anyag és a feltételezeten helyettesítésre szolgáló anyagok jellemzőinek meghatározása.
- A futószárat ért terhelés meghatározása elméleti úton.
- A repülőgépet ért terhelés mérésére alkalmas eszköz készítése.
- Repülőgépet ért terhelés mérése valós körülmények között.
- Mechanikai szimulációs modell felépítése és a vizsgálati paraméterek megadása az előző pontokban meghatározott jellemzőkből. A modell alapján meghatározhatók a szilentblokkban a feszültségek és az elmozdulások.
- Laboratóriumi fárasztó-koptató tribológiai vizsgálatra alkalmas berendezés kialakítása.
- Laboratóriumi gyorsított fárasztó-koptató vizsgálatok végrehajtása túlterhelt állapotban.
- VEM (végelelem módszer) analízis a valós feszültségek és az igénybevételi határszámok közötti kapcsolat feltárására.
- Eredmények értékelése, a fejlesztett karbantartási rendszer műszaki információs moduljába, karbantartási utasításába való beágyazás.
- Következtetések levonása. Anyag, anyag-pár javaslat, határterhelési érték vagy tartomány kitűzése.

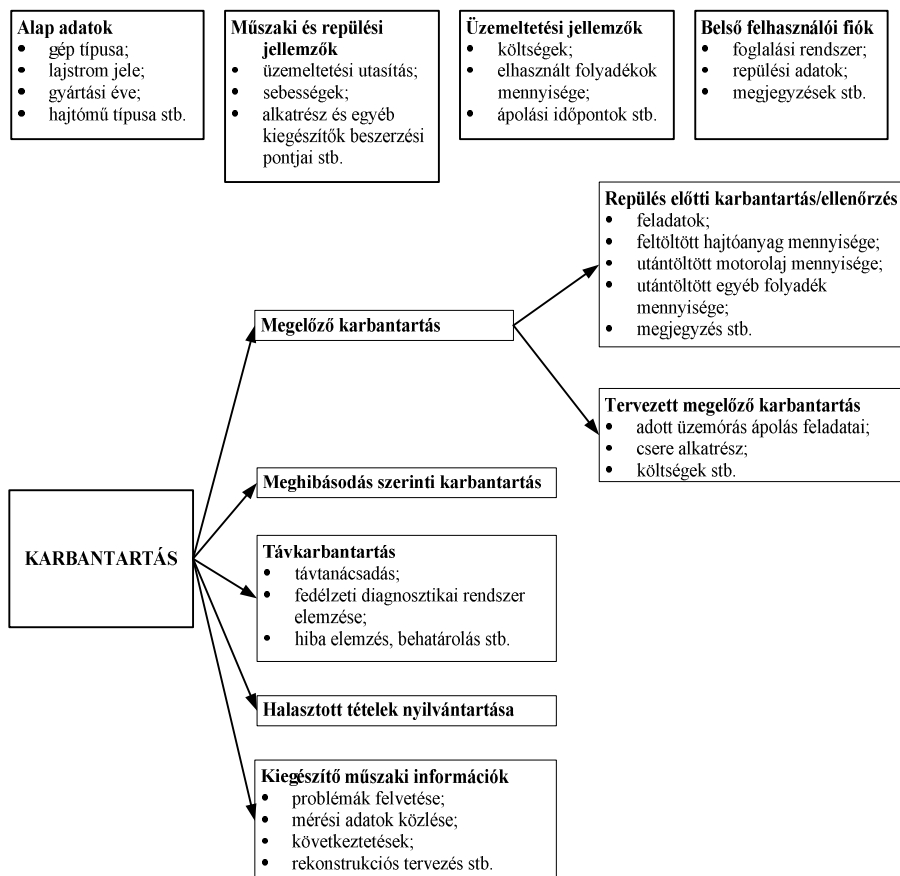


2.3. ábra Komplex vizsgálat, értékelési rendszer

3. EREDMÉNYEK

3.1. Új karbantartási rendszermodell bemutatása

A modell alapján készítendő program a kisrepülőgépekre vonatkozó üzemeltetés és karbantartás továbbfejlesztését szolgálja úgy, hogy számos felhasználó számára nyújtson segítséget az alkalmazása. Használata révén felgyorsul az információk áttekintése, amely például a karbantartási műveletek során időmegtakarítással jár. Az adott tevékenységeket dokumentáljuk, így azok egyszerűen visszakereshetők. A modell alapján készítendő program lehetőséget nyújt üzemeltető/karbantartó szervezetek közötti szakmai konzultációra (üzenőfal jelleggel). Visszatérő hibajelenségek esetén pedig mód nyílik: a hiba kijavítására, javaslatokat lehet megfogalmazni, rekonstrukciós tervezést lehet javasolni, készíteni (megfelelő engedéllyel), műszaki információs eszmecesteret lehet folytatni (mindezt a „Kiegészítő műszaki információs” modulban). Az általam tervezett új modell fő tartalmi elemeit a 3.1. ábrán mutatom be.



3.1. ábra Kisrepülőgép új karbantartási rendszerének tartalmi szerkezete, fő modulok

3.2. Anyagjellemzők meghatározása

A műszaki információs modul feltöltésére kidolgoztam a 2.1.1. részben ismertetett Cessna 172-es típusú kisrepülőgép PUR anyagminőségéből készített futószár ágyazás meghibásodásának rekonstrukcióját.

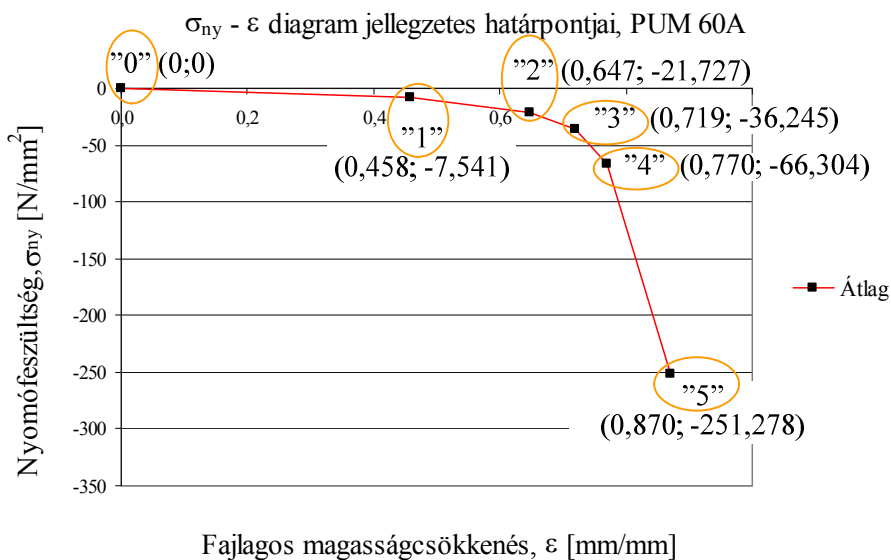
A vizsgált anyag típusokon szakítóvizsgálatokat és nyomóvizsgálatokat végeztem.

A szakítóvizsgálatokból átlagos szakítószilárdságot (R_m) és rugalmassági moduluszt (E) határoztam meg, amit a 3.1. táblázat mutat.

3.1. táblázat Szakítóvizsgálati eredményekből meghatározott szakítószilárdsági (R_m) és rugalmassági modulus (E) értékek

	Docapet TF	PUM 60A	PUM 70A	PUA 90A
R_m [N/mm ²]	64,875	32,428	39,151	35,967
E [N/mm ²]	2134,266	2,075	3,042	4,713

A nyomóvizsgálatok diagramjait „szakasz-illesztő” módszerrel dolgoztam fel, mely alkalmassá teszi a mért eredményeket VEM rendszerben történő anyag modellként való felhasználására (3.2. ábra).

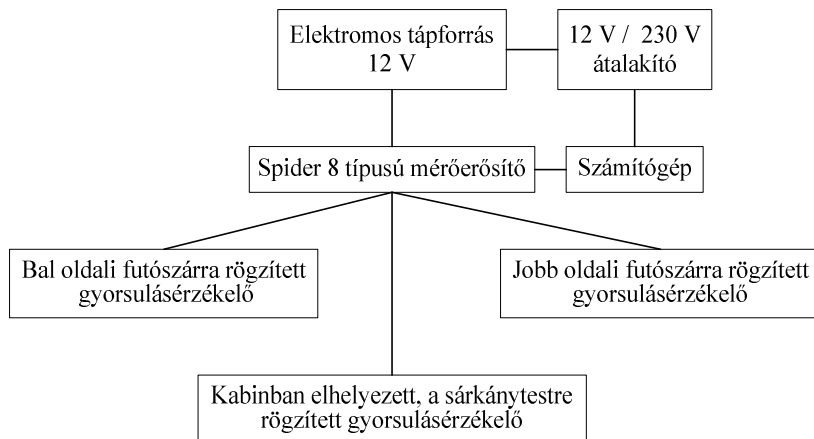


3.2. ábra PUM 60A $\sigma_{ny} - \varepsilon$ diagram jellegzetes határpontjai

Definiáltam a határpontokat, melyek segítségével a numerikus modellezéshez használható, nemlineáris anyagmodell szakaszai értelmezhetők (3.2. ábra).

3.3. A repülőgép terheléseinek mérése valós körülmények között

A repülőgépet, futószárat és ebből adódóan a szilentblokkot ért terhelések mérése igen összetett feladat. Az adott gépelemet ért igénybevételek meghatározására gyorsulás/rezgésgyorsulás mérése alkalmas mérőrendszert fejlesztettem, készítettem (3.3. ábra).



3.3. ábra Kisrepülőgépben ébredő gyorsulások mérésére alkalmas mérőrendszer vázlata

A mérés végrehajtásának helyszínén a repülőtér betonburkolatú és füves burkolatú pályák találhatóak. Mind a kétfajta burkolatú pályán öt-öt darab le- és felszállás került végrehajtásra.

3.3.1. Gyorsulási eredmények kiértékelése

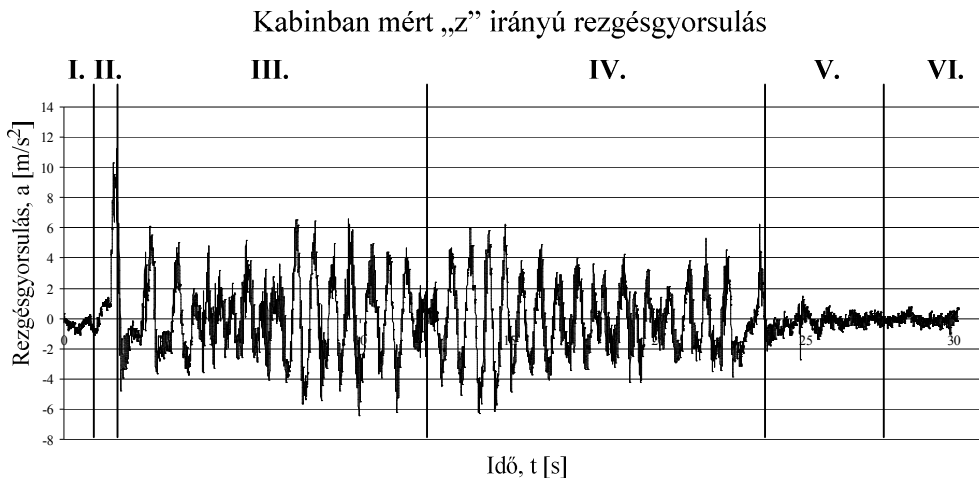
A sárkánytestben és a futószárakon mért gyorsulási értékek közül a sárkánytestben mért eredmények kerültek vizsgálatra és felhasználásra a mechanikai modellezéshez.

A mérési irányok közül a függőleges „z” iránynál egyértelműen el lehet különíteni a repülésre jellemző különböző állapotokat. Az 3.4. ábrán látható az a hat szakasz, amelyek a mérés, repülés során meghatározó.

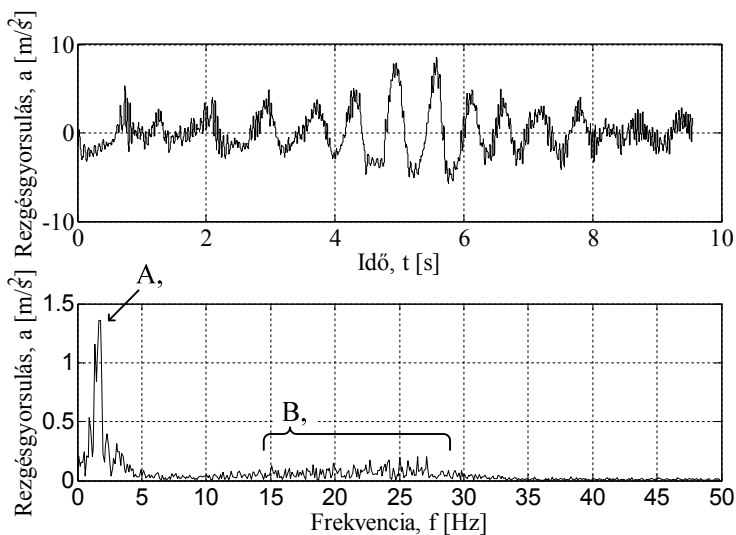
Az egyes szakaszok megnevezése:

- I. Leszállás folyamata, levegőben;
- II. Földetérés pillanata;
- III. Pályán történő lassulva gurulás szakasza;
- IV. Pályán történő gyorsítva gurulás szakasza;
- V. Kifutópálya elhagyás pillanat utáni szakasz;
- VI. Felszállás folyamata, levegőben.

A szakaszok vizsgálata ezek után külön-külön történt. A szakaszok vizsgálatára Fourier transzformációt (FFT) alkalmaztam. Az FFT eredményeképpen a rezgés gyorsulás-idő függvényekből rezgés gyorsulás-frekvencia értékeket kaptam. Ez biztosította számomra azt, hogy meghatározzam a jellemző gyorsulási értékekhez tartozó igénybevétel ismétlési számot (frekvencia). A Fourier transzformáció egy kiragadott példája látható a 3.5. ábrán. Az ábrán jelölésre kerültek a jellemző gyorsulásértékek úgy, mint egy kiugró érték (A), valamint egy jellemző szakasz (B).



3.4. ábra Kabinban mért „z” irányú rezgés gyorsulás jellemző szakaszai az idő függvényében



3.5. ábra Repülőgépen mért gyorsulás időfüggvénye és FFT frekvencia spektruma, pályán történő lassulva gurulás szakasza, „z” irány

Az eredmények ismeretében megállapíthatóvá vált az, hogy a szilentblokk tönkremenetele akkor következik be hamarabb, ha minél magasabb ismétlési számmal párosul a terhelés.

Ennek tudatában megállapítottam, hogy a szilentblokkra nézve a kritikus szakaszok a földön történő lassulva/gyorsulva gurulás szakasza (III., IV. szakasz) és nem a földetérés (leszállás) pillanata.

3.4. Futószár mechanikai vizsgálata szimulációval

A repülőgépen végzett valós idejű mérések és azok eredményei, valamint az anyagvizsgálatok eredményei kellő alapot nyújtanak ahhoz, hogy mechanikai szimulációs vizsgálatokat (Végeselem - módszer, VEM) végezzek a futószár - szilentblokk egységen. A VEM szimulációhoz az Ansys Workbench 11 programot használtam fel. A program alkalmazása során elkészítettem a futószár és a szilentblokk valós modelljét. A szimuláció futtatásához beállítandó paraméterek között szerepeltek a különböző anyagi jellemző és a mért gyorsulási értékek különböző irányonként.

A szimuláció végrehajtásával meghatároztam a szilentblokk műanyag perselyében ébredő redukált feszültséget, valamint a deformációk nagyságát.

A meghatározott jellemzők bemeneti paraméterként jelentek meg a laboratóriumi gyorsított fárasztóvizsgálatnál.

3.5. Laboratóriumi fárasztó-koptató vizsgálat

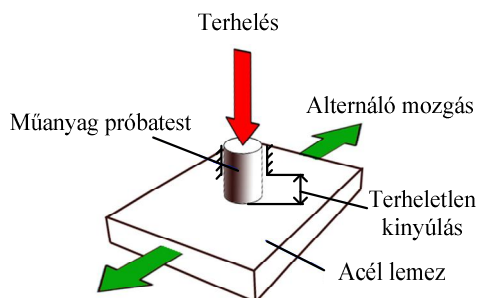
A kisrepülőgép szilentblokk tönkremenetelének modellezésére építettem egy kisméretű próbatest befogására alkalmas, laboratóriumi fárasztó-koptató vizsgálati berendezést.

A vizsgálat alapját a DIN 50322-es szabvány adta, amelyen belül a 6. vizsgálati kategóriát vettem figyelembe, vagyis az egyszerű alakú próbatesteken végzett modellkísérleteket.

A fárasztó-koptató vizsgálat elvét a „Locati” -féle gyorsfárasztás adta, amelyet acélokra alkalmaznak. A vizsgálat során a fárasztani kívánt anyagot növekvő terhelési szintenként 10^5 darab ismétlődő igénybevételnek teszik ki. Ezen igénybevételek alatt megy tönkre valamikor a vizsgált anyag.

A fárasztó-koptató vizsgálat során a terhelést négy lépcsőben növeltem nagy rugalmasságú elasztomerre alkalmazva a vizsgálati elvet.

A vizsgálni kívánt próbatest fárasztását egyrészt az egyenes vonalú, alternáló mozgást végző kocsis végzi, másrészt pedig, a próbatestet egy terhelő erő nyomja függőlegesen az acél alaplemezhez (3.6. ábra). Ez egy összetett, mechanikai és tribológiai fárasztást jelent, ahol az érintkező felületek deformálódnak is és súrlódnak is (tapadnak), mint a valós repülőgép futószár ágyazásánál.



3.6. ábra A próbatest igénybevételei

A próbatest tönkremenetelét vizuális vizsgálattal határoztam meg minden esetben. Tönkrementnek tekintetem a próbatestet, ha a kocsival történő érintkezési felületén látható kopás, illetve fáradási, töredezési nyomok, anyagrészt leválás, lemorzsolódás volt megfigyelhető. Továbbá tönkrementnek tekintetem az anyagot, ha a befogásnál bevágódást, nyíródást, deformációt, illetve anyag kitöredeezést tapasztaltam.

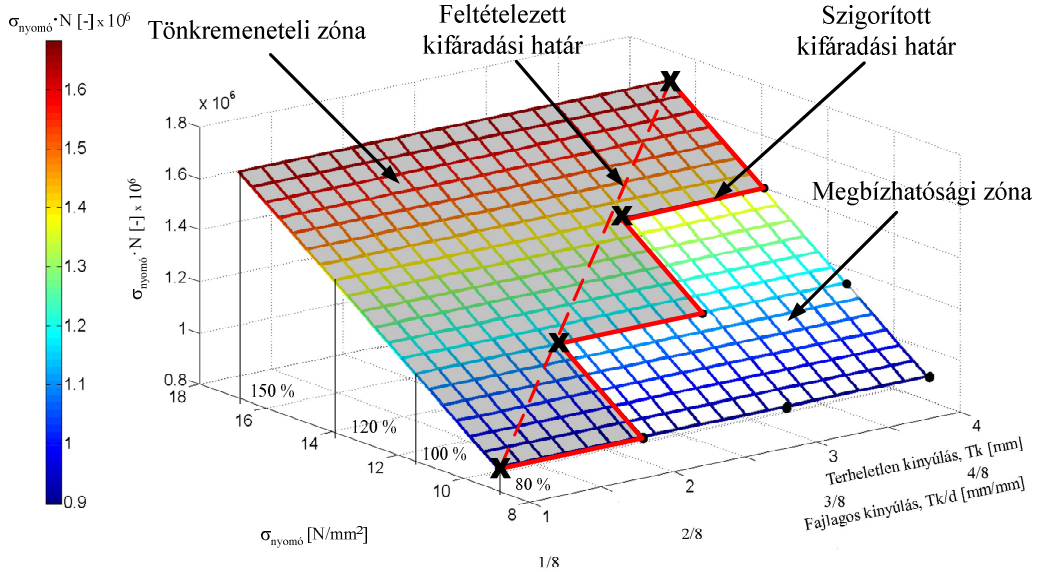
A tönkremenetel jellege, megjelenése, kiindulási helye a vizsgálatok során teljesen rapszodikus alakult. Tönkremenetel mutatkozott a próbatest oldalfelületén a befogónál, a talpfelület peremén, a talpfelületen morzsolódás formájában. A különböző vizsgált anyagok között a tönkremenetelre vonatkozóan trendeket nem tudtam megállapítani.

Vizsgálataimnál hőmérsékletváltozást nem tudtam a méréssel kimutatni.

Az eredmények jobb áttekintése és következtetések levonása érdekében elkészítettem anyagonként egy-egy háromdimenziós ábrát (3.7. ábra). A diagramok tengelyein a fárasztó-koptató vizsgálat főbb jellemző paramétereit ábrázoltam:

- a próbatest terheletlen-, fajlagos kinyúlása;
- a terhelés nagysága ($\sigma_{nyomó}$);
- a terhelés, valamint az ismételt igénybevétel darabszámának szorzata ($\sigma_{nyomó} \cdot N$).

Ezen tengelyek segítségével kapott térben ábrázoltam az összetartozó értékeket. Az ábrázolt pontokra síkot illesztettem. A tönkremeneteli eseményekhez tartozó jellemző pontok, és a sík segítségével kijelöltem a szigorított és a feltételezett tönkremeneteli (kifáradási) határt. A szigorított kifáradási határ a sík felületéből kijelöli a tönkremeneteli és a megbízhatósági zónát.



X : tönkremenetelt jelentő mérési pont

● : gyorsított fárasztóvizsgálati pont, tönkremenetel nélkül

3.7. ábra PUM 60A anyag kifáradási határdiagramja

$$n = \frac{A_m}{A_t}$$

ahol: n : működési megbízhatóság;
 A_m : megbízhatósági zóna területe;
 A_t : tönkremeneteli zóna területe.

A működési megbízhatóságok számított értékét (n) a 3.2. táblázat foglalja össze.

3.2. táblázat Működési megbízhatóság értékei

	PUM 60A	PUM 70A	PUA 90A
Működési megbízhatóság (n)	0,4	3,199	5,998

Össességében megállapítható, hogy a vizsgált anyagok esetében a működési megbízhatósági viszonzyszám a PUA 90A esetében a legkedvezőbb. A legkisebb megbízhatóságot a PUM 60A mutatja, mivel $n < 1$.

3.6. Mérési eredmények és a tényleges igénybevétel, ismétlési szám (ciklusszám) kapcsolata

A laboratóriumi fásasztó-koptató vizsgálatok során a függőleges irányú normál erőn túl a próbatestben hajlító és nyíró igénybevétel is keletkezik, ezért a redukált feszültséget kell meghatározó jellemzőnek tekinteni. Ahhoz, hogy a mérési eredményekből meghatározható legyen a vizsgált anyagból gyártott szilentblokk kifáradási jellemzője, meg kell határozni a próbatestben a redukált feszültséget adott terhelési szinten. Ennek a meghatározására ismét mechanikai modellezést kellett alkalmaznom. Az eredményül kapott redukált feszültséget ábrázoltam a valós tönkremenetelhez tartozó igénybevételek számának függvényében. A pontokra illesztett függvényből, és ennek egyenletéből meghatároztam az adott alapanyag által elviselhető igénybevételek várható ismétlési számát (ciklus), illetve ebből számítottam a tervezett le- és felszállások számát.

3.7. Rekonstrukciós fejlesztés eredménye

1. A kisrepülőgép egyértelműen kritikus, és a karbantartási utasításban nem megjelölt gépelemére (szilentblokk) irányuló vizsgálatok eredményeként megállapíthatom, hogy a PUM 60A jelű anyagot nem célszerű alkalmazni rugalmas ágyazásra. Azonban számításom szerint az említett anyagból készített szilentblokk élettartama 3727 le- és felszállás lehet.
2. A gépelem eredeti anyaga megfelel a PUM 70A jelű kereskedelmi terméknek. Vizsgálataim során megállapítottam, hogy a PUM 60A-hoz képest nagyobb kifáradási ciklusszám, élettartam érhető el a PUM 70A jelű alapanyaggal. Az alapanyag vizsgálataim szerint a továbbiakban is alkalmas a feladat betöltésére. A fásasztó-koptató vizsgálatok eredményei azonban arra engednek következtetni, hogy az ágyazás rugalmas része 3727 le- és felszállást biztosan kibír. Tehát a meghatározott határszám elérésekor a futószár felfüggesztését és magát a szilentblokkot is át kell vizsgálni, hogy bekövetkezett vagy megkezdődött-e a tönkremenetel. Ezzel a javaslattal az új karbantartási rendszerbe olyan szigorításra kerülhet sor, mely a biztonságot növeli. Továbbá a gyári karbantartási utasítás hiányossága ezzel az információval pótolható.
3. A PUA 90A jelű anyag is alkalmas a gépelem alapanyagául. A vizsgálatok eredményei arra engednek következtetni, hogy még nagyobb javulás (élettartam) érhető el, mint a PUM 70A-val.
4. Tovább fejlesztési lehetőség: a futószár ágyazási „gyengepont” körütekintő mérnöki vizsgálata, és a rendelkezésre álló új, korszerű anyagok együttesen eredményezhetnek műszaki fejlesztést a karbantartási műszaki információs modul alapján. A rendszerbe feltöltött információk a gyártóig eljutnak, mint azt a korábbi rendszerbemutató is tartalmazta. A dolgozatban kidolgozott fejezetek olyan műszaki fejlesztést tesznek lehetővé, mely nem jár konstrukciós módosítással, csupán a repülőgép felhasználóinak nyújt

segítséget a mindennapi életben. Tovább lépési lehetőséget kínál méréseim alapján egy konstrukciómódosítással járó fejlesztés is, mely a tribológiai (tengelyfelület és persely közti súrlódás és kopás) és fárasztó igénybevételeket együttesen kezeli. A végeelem vizsgálatok eredményei alapján a Docapet TF jelű anyag (PETP/PTFE kompozit) kellő szilárdságot mutatott az adott terhelés ellen. Ez a kompozit acélfelülettel párosítva ismert kiváló siklási tulajdonságairól és kiváló kopásállóságáról. Rugalmassági modulusa közel 2000 MPa, azaz messze meghaladja az elasztomer PUR anyagokét. A kompozit polimer és a PUR (javasolható a PUA 90A) együttes felhasználásával kétrétegű ágyazást lehetne biztosítani. A futószár tapadásmentes, súrlódó elmozdulását egy PETP/PTFE vékony súrlódó gyűrű biztosítaná, melyet kívülről egy rugalmas PUA 90A persely vesz körül. Ez a kettős gyűrű pedig az acél házban helyezkedik el. A rugalmas csillapítás a PUA 90A feladata, míg a súrlódó hatásokat a PETP/PTFE venné fel. Ez a megoldás - ismerve a hatósági előírásokat - már gyári- gyártói hatáskör (engedélyeztetési eljárás), de motivációként, javaslatként az információs rendszerbe kerülhet, további fejlesztések alapja lehet.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A szakirodalomban nem egységes definiálású karbantartási stratégiák összehasonlítására kidolgoztam a „mit, mikor, hogyan mérnek és ezután ki, mit csinál” rendezőelv szerinti módszert. Ez alapján azonosítottam a kisrepülőgépek karbantartási rendszerét (megelőző karbantartás (PM) + meghibásodás szerinti karbantartás (RM)).
 - 1/a Az illetékes légügyi hatóságok szabályzását is figyelembe véve: olyan új, modulrendszerű, ágazatspecifikus karbantartási stratégiát fejlesztettem, mely a korábbi megelőző karbantartás (PM) és meghibásodás szerinti karbantartás (RM) mellett az állapotfüggő karbantartás (CBM) és a kockázatalapú karbantartás (RBM) néhány korszerű elemét is tartalmazza. Módszereiben és eszközeiben ötvözi a hagyományos írott dokumentációra alapozott tevékenységet az informatikai alapú, távkarbantartási módszerekkel.
 - 1/b Megállapítottam, hogy a teljeskörű minőségirányítás (TQM) és a teljeskörű hatékony karbantartás (TPM) minőségügyi és teljes operációs rendszerek ajánlásai csak korlátozottan érvényesíthetők a kisrepülőgépek karbantartásánál. A műszaki információs modul létrehozásával a TQM rendszerek módszere és eszköze megjeleníthető az új karbantartási modellben.
2. A kisrepülőgépekre megalkotott új karbantartási rendszer távkarbantartási módszereihez kidolgoztam egy olyan hibakeresési és elhárítási eljárást, amelyben definiálásra kerültek a hibafeltárás és elhárítás egymást követő lépései.
3. Olyan komplex mérési és értékelési rendszert dolgoztam ki kisrepülőgépek konstrukciós fejlesztéséhez, mely a valós igénybevételeket mérő rezgésyorsulások alapján, majd ezt felhasználva a feszültségeket és deformációkat számítja VEM rendszerben, és mindezek alapján a tribológiai és kifáradási tulajdonságokat modellezi laboratóriumi mérésekkel, és kiértékelésével.
4. A vizsgált nemlineárisan rugalmas anyagmodellű elasztomerek $\sigma - \varepsilon$ függvényének numerikus használhatóságára kidolgoztam a „szakasz-illesztő” módszert. Az eljárás - legalább 95 %-os korrelációval - lehetővé teszi, hogy a tetszőleges függvényt követő anyagmodellek VEM számításoknál használhatóak legyenek.
A PUM 60A, a PUM 70A és PUA 90A esetében öt jellegzetes szakaszt állapítottam meg (A, B, C, D, E), a szakaszok egyenletének

$$\sigma_{\text{anyag}(i)} = m_i \varepsilon + b_i \quad i = A, B, C, D, E$$

együtthatóit és konstansait meghatároztam.

5. A le- és felszállás, valamint a repülés fázisaiban történt rezgés gyorsulás mérések alapján megállapítható, hogy hat jellegzetes szakasz különíthető el igénybevétel szempontjából. A frekvencia, az ismétlődő igénybevétel és a rezgés gyorsulás értékek alapján megállapítottam, hogy a fűvön történő lassítás és gyorsítás fázisa a kritikus a futószár ágyazás kifáradásának szempontjából, nem pedig a leszállás (földetérés) pillanata.
6. Mérési módszert dolgoztam ki a futószár rugalmas ágyazás PUR anyagának laboratóriumi fárasztó-koptató vizsgálatára. A gyorsított fárasztó-koptató vizsgálatok alapján:

6/a Kapcsolatot állapítottam meg az egyes elasztomerek működési megbízhatósága (n) és az anyagok nyomó rugalmassági modulusa között. A nagyobb rugalmassági modulus (E) nagyobb tönkremeneteli (kifáradási) határt eredményezett.

$$n = n(E)$$

$$n = \frac{A_m}{A_t}, \quad A_n = A_m (\sigma \cdot N; T_k / d)$$

ahol: n : működési megbízhatóság;
 A_m : megbízhatósági zóna területe;
 A_t : tönkremeneteli zóna területe.

A_m és A_t értelmezésére olyan háromdimenziós tönkremeneteli diagramot hoztam létre, mely a változó igénybevételi feszültség szint ($\sigma_{nyomó}$), a próbatest terheletlen kinyúlása és a „ $\sigma_{nyomó} \cdot N$ ” szorzat (ahol N igénybevételi szám) közötti kapcsolatban jeleníti meg a „tönkrement” vagy „nem ment tönkre” mérési pontokat.

A vizsgálati rendszer szerint:

	PUM 60A	PUM 70A	PUA 90A
Működési megbízhatóság (n)	0,4	3,199	5,998

- 6/b A növekvő rugalmassági modulus, kifáradási határ nem jellemző a tönkremenetel helyére és módjára, törvényszerűség nem volt megállapítható.

5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Munkám során röviden áttekintettem az általános karbantartási stratégiákat fejlődésük szerint.

A karbantartási stratégiák rendszerezése során fellelt összefüggések segítségével létrehoztam a „mit, mikor, hogyan mérnek, és ezután ki, mit csinál” kérdéssort és a hozzá tartozó válaszokat minden egyes filozófiára. A rendszerezés hozzásegíti a mindennapos felhasználót ahhoz, hogy könnyen kiválaszthassa a számára legmegfelelőbb stratégiát, amely egy adott alkalmazáshoz szükséges.

A kisrepülőgépek karbantartásával kapcsolatos tevékenységek és folyamatok áttekintése után indokoltnak láttam egy új karbantartási modellt létrehozni. Ez a modell ötvözi a hagyományos karbantartási tevékenységet és a kisrepülőgép-felhasználók széleskörű igényeinek a kielégítését (például: foglalási rendszer, repülési adatok stb.). A karbantartási tevékenységeken belül a távkarbantartási modulban meghatároztam egy hibakeresési és elhárítási folyamatot. Ez a folyamat segítheti a karbantartók, javítók munkafolyamatainak elvégzését. A kiegészítő műszaki információs modul alapot nyújthat a felhasználóknak, gyártónak és mérnököknek az esetleges felmerülő problémák elhárítására. Mindezekon túl a karbantartási modell kellő elvi alapot nyújt egy szoftver elkészítéséhez, amellyel a modellben foglaltak mindennapi felhasználásra válna alkalmassá.

A kiegészítő műszaki információs modulon belül kidolgoztam egy rekonstrukciós folyamatot, amely a kisrepülőgép visszatérően meghibásodott futószár rugalmas ágyazására irányult, amely ágyazásra vonatkozóan a karbantartási utasításokban nem található semmilyen információ. A folyamat eredményeként rangsort állítottam fel a vizsgált öntött poliuretánok között. A rangsor kifejezi az anyagok működési megbízhatóságát.

Olyan háromdimenziós diagramot hoztam létre a vizsgálati paraméterek és eredmények ismeretében, amelyből a vizsgált poliuretán alapanyagok működési megbízhatósága, illetve tönkremeneteli határa meghatározható adott alkalmazásokhoz.

A mérési eredmények valamint a valós fel- és leszállások (füves pálya, átlagos körülmények) száma között kapcsolatot határoztam meg. A modellkísérletek alapján megállapítottam azt a határszámot, melyet az adott alapanyagból készített szilentblokk biztosan elvisel.

A rekonstrukciós fejlesztés eredményeképpen a Cessna 172-es típusú kisrepülőgép cső keresztmetszetű futószár bekötésének rugalmas ágyazására vonatkozó karbantartási szigorítást vezettem be.

Továbblépési lehetőség:

A kutatás továbblépéseként javaslom még a laboratóriumi fűrésztó-koptató vizsgálatok megismétlését különböző hőmérsékleti tartományok között. Kifejezetten érdekes eredménye lehet a negatív hőmérsékleti tartományban történő vizsgálatoknak.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatomban tisztáztam, hogy a gépüzemfenntartáshoz milyen fogalmak tartoznak, és azok alatt mit értenek az egyes irodalmi források.

A karbantartási stratégiák (filozófiák) számos fajtáját említi meg a szakirodalom. Ezeket általában kialakulásuk, megjelenésük sorrendjében ábrázolják. Az egyes stratégiákat külön-külön jellemeztem, majd létrehoztam egy összegző stratégiafejlődési ábrát. Az egyes filozófiák összehasonlítását elvégeztem a „mit, mikor, hogyan mérnek, és ezután ki, mit csinál” kérdéssorral. Ez a rendszer lehetőséget ad ahhoz, hogy egyértelműen különbséget lehessen tenni az egyes stratégiák között.

Áttekintettem a kisrepülőgépekre jellemző karbantartási filozófiát, módszereket és folyamatokat. Ebben hiányosságokat és fejlesztési lehetőségeket tártam fel. A repülés biztonságának növelése érdekében, valamint a műszaki- és felhasználói kiszolgálás minőségének javítása érdekében indokoltnak láttam a kisrepülőgépekre vonatkozó karbantartási rendszer fejlesztését. Ennek eredményeképpen hoztam létre a „kisrepülőgép karbantartási rendszerének továbbfejlesztett modelljét”. A modell moduláris felépítésű. Definiáltam az egyes modulok pontos tartalmi elemeit, továbbá meghatároztam a rendszer felhasználóinak körét. A felhasználókhöz jogosultságokat rendeltem, amely alapján a tartalmi elemek megtekintését lehet definiálni. A létrehozott modell elvi alapot nyújt egy, a témához kapcsolódó szoftverfejlesztéshez is.

A modellben helyet kapott a kiegészítő műszaki információs modul, amely részletes kifejtését egy rekonstrukciós folyamaton keresztül mutattam be. Egy kisrepülőgép gyengepontját választottam, amely egy meghibásodott futószár rugalmas ágyazása volt. A rugalmas ágyazásra vonatkozóan nincs gyártói utalás a karbantartási leírásban.

A rekonstrukciós folyamat első lépéseként meghatároztam az eredeti szilentblokk anyagát, majd ehhez az anyaghoz hasonló tulajdonságú anyagokat választottam a további vizsgálatokhoz.

A vizsgálat további lépéseként az anyagok mechanikai tulajdonságainak a meghatározását végeztem el. Szakító- és nyomóvizsgálatokat végeztem, majd kiértékeltem a kapott eredményeket. A nyomóvizsgálati eredmények kiértékelésére kidolgoztam a „szakasz-illesztő” módszert. A módszer alkalmas arra, hogy egy elasztomer anyagra jellemző $\sigma - \varepsilon$ nemlineáris diagramot mechanikai végeelem szimulációs programok (VEM) anyagmodelljeként lehessen használni.

A kisrepülőgép sárkánytestében és a futószárában ébredő rezgés gyorsulások mérésére mérőrendszert hoztam létre. A méréseket valós körülmények között hajtottam végre. A mérések kiértékelésekor a le- és felszállás időtartamát vettem alapul. Ezt a mérési tartományt hat jellemző szakaszra osztottam fel, amelyekre elvégeztem a Fourier analízist. A kiértékelést követően meghatároztam a jellemző rezgés gyorsulásokat és frekvenciaértékeiket.

Az anyagvizsgálatok és valós idejű gyorsulás mérések eredményét felhasználva elkészítettem a szerkezet mechanikai végeelem modelljét, meghatároztam az ébredő feszültségeket és deformációkat a futószár rugalmas ágyazásánál.

A vizsgált gépelem tönkremenetelének mérésére, laboratóriumi fárasztó-koptató vizsgálatra alkalmas berendezést készítettem. A végeelem szimulációk- és a valós idejű mérések eredményei a vizsgáló berendezésen beállíthatóak. A vizsgált alapanyagokkal fárasztó-koptató vizsgálatokat hajtottam végre. A vizsgálatok eredményeiből működési megbízhatósági rangsort tudtam felállítani az alapanyagok között. Háromdimenziós diagramot szerkesztettem, amely adott vizsgálati paraméterek mellett megadja az alapanyag tönkremeneteli (kifáradási) határát.

A folyamat eredményeként működési megbízhatósági rangsort állítottam fel a vizsgált elasztomerek között.

A mérési eredmények és a tényleges ismétlési szám között kapcsolatot határoztam meg. Ezzel megállapítottam azt a határszámot, amelyet az adott alapanyagból készített szilentblokkok biztosan elviselnek.

A műszaki információs modulban kidolgozott rekonstrukció eredményeképpen karbantartási szigorítást ajánlottam, amely hozzájárul a repülés még biztonságosabbá tételéhez.

Vizsgálataim alapján megfogalmaztam az új tudományos eredményeimet, továbbá javaslatokat tettem az elért eredmények gyakorlati hasznosítására, és további kutatási feladatok elvégzésére.

SUMMARY

I have made clear in my dissertation which ideas are belong to the machine maintenance and certain sources of literature what understand concerning those.

The technical literature mentions several types of the service strategies (philosophy). These are described generally in the sequence of their development, appearance. I characterized the certain strategies separately, then I have produced a summarized strategy-development figure. I have accomplished the comparison of certain philosophies with the question series “what, when, how is measured and after this who, what makes”. This system provides a possibility to make difference unambiguously between certain strategies.

I have surveyed the service the methods and the processes characterizing small aircraft. I have revealed shortcomings and developing possibilities in this. I perceived motive to develop the service system concerning small aircrafts in order to increase the aviation safety as well as to improve the quality of technical and using services. As a result of this I have created “the developed model of the small aircraft service system”. The model has got modular structure. I defined the exact containing elements of certain modules, furthermore I determined the sphere of the system users. I destined authorization for the user’s base on that the inspection of containing elements can be defined. The model developed provides theoretical basis for a software development connected to the theme, too.

The complementary technical information module got place in the module which detailed explanation I showed through on a reconstruction process. I have chosen a weak -point of a small aircraft which was a broken elastic seating of main landing spring. Concerning the elastic seating there is no manufacturer reference in the service description.

I have determined the material of the original silent-bloc as a first step of the reconstruction process then I have chosen material with similar properties for the further tests.

As a further step of the test I have determined the mechanical properties of the materials. I have carried out tensile- and compression tests then I have evaluated the results. I have worked out a “section-matching” method evaluating the results of the compression tests. The method is suitable to use a $\sigma - \varepsilon$ non linear diagram, characterizing an elastomer material, as a material model of mechanical finite-element (FEM) simulation programs.

I have worked out a measuring system to measure the vibration-acceleration rising in the main landing spring of the small aircraft airframe.

I have carried out the measures in real conditions. At evaluating the measures I took for a basis the length of time of landing and take-off. I divided to six typical sections that measuring range, to which I performed the Fourier analysis. After evaluation I determined the characteristic vibration-accelerations and their frequency values. Using the results of material tests and real time acceleration measures I have completed the mechanical finite-element model of the structure. I

have determined the rising stresses and deformations at the elastic seating of the main landing spring.

To measure the deterioration during the machine-element tests I have made an equipment capable to laboratory fatigue-abrasion tests. The results of the finite-element simulations and of the real time measures can be set on the testing equipment. I have carried out fatigue-abrasion tests with the basic materials tested. I could set a reliability classification between basic materials on the base of test results. I have plotted a 3D-diagram giving the service life of the basic material at given test parameters.

As result of the process I have set up an operational reliability rate between the elastomers tested.

I have determined a connection between the test results and the real repetition number. I have established with this the limit number to be endured certainly by the silent-bloc made of the given basic material.

As the results of the reconstruction worked out in the technical information module I suggested service aggravation to ensure the advance of flight safety.

Based on my tests I have drawn up my new scientific results, further more I have made proposals for practical utilization of the results reached and to carry out further research tasks.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Folyóirat cikkek:

- Lektorált cikk világnyelven:

1. **Lefánti R.**, Keresztes R., Kalácska G.: Plastic machine elements of small airplane: examination of the landing-gear leg support of Cessna 172. Journal of Scientific Bulletin: Serie C, Volume II. Fascicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 2007. pp. 389 - 395.
2. Keresztes R., Zsidai L., Kalácska G., Andó M., **Lefánti R.**: Friction of polimer/steel gear pairs. R & D Mechanical Engineering Letters, 2008. pp. 97 - 106.
3. **Lefánti R.**, Janik J., Kalácska G.: Plastic machine parts of small airplane: application and failure. R & D Mechanical Engineering Letters, 2009. pp. 56 - 60.
4. **Lefánti R.**, Janik J., Kalácska G.: Landing gear leg breakdown and examination. R & D Mechanical Engineering Letters, 2009. pp. 315 - 323.
5. **Lefánti R.**, Kalácska G., Keresztes R., Oldal I.: Small-aircraft service, landing shaft reconstruction. Journal of Scientific Bulletin: Serie C, Volume XXIV. Fascicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology, 2010. pp. 49 - 57.
6. **Lefánti R.**, Kalácska G., Oldal I.: Developing small-aircraft service and reconstruction of landing-gear leg support. Sustainable Construction & Design, 2011. (in print).

- Lektorált cikk magyar nyelven:

7. Samyn P., Keresztes R., **Lefánti R.**, Zsidai L., Kalácska G.: A színterezhető és a termoplasztikus poliimidek súrlódási tulajdonságainak összehasonlítása. Műanyag és gumi 2007. 8. 327 - 329. o.
8. Zsidai L., Keresztes R., **Lefánti R.**, Kalácska G., Kozma M.: Műszaki megbízhatóság és a tribológiai modellezés az üzemfenntartásban I. Gépgyártás, XLVII. évfolyam, 2007. 5. 11 - 17. o.
Zsidai L., Keresztes R., **Lefánti R.**, Kalácska G., Kozma M.: Műszaki megbízhatóság és a tribológiai modellezés az üzemfenntartásban II. Gépgyártás, XLVII. évfolyam, 2007. 6. 20 - 25. o.
9. **Lefánti R.**, Janik J.: Távkarbantartási rendszermodell. Gép, LIX. évfolyam, 2008. 12. 25 - 29. o.
10. **Lefánti R.**, Kalácska G., Janik J.: Kisrepülőgépek karbantartási, informatikai rendszerének fejlesztése, a futómű rekonstrukciós vizsgálata. Gép, LX. évfolyam, 2009. 4 - 5. 49 - 55. o.
11. **Lefánti R.**, Janik J., Kalácska G.: Megbízhatóság központú karbantartás. Gép, LX. évfolyam, 2009. 8. 3 - 8. o.
12. **Lefánti R.**, Kalácska G.: Kisrepülőgép karbantartásának fejlesztése, futószár rekonstrukció. Gép, 2011. (megjelenés alatt).