

Dr. Pokorádi László
Zrinyi Miklós Katonai Akadémia
Haditechnikai Tanszék

REPÜLŐGÉPEK PNEUMATIKUS RENDSZEREINEK
MATEMATIKAI MODELLEZÉSÉRE ÉPÜLŐ
DIAGNOSZTIKÁJA

a szerző

AIRDIAG'95
6-7 December 1995, Warsaw

konferencián tartott

DIAGNOSTICS OF THE AIRCRAFT PNEUMATIC SYSTEM
BASED ON MATHEMATICAL MODELLING

előadása anyagának magyar nyelvű változata

A tanulmány a repülőgép levegőrendszer matematikai modelljének felállítását és diagnosztikai alkalmazásának lehetőségeit mutatja be a Mi-8 típusú helikopter fék-levegőrendszer vizsgálatán keresztül.

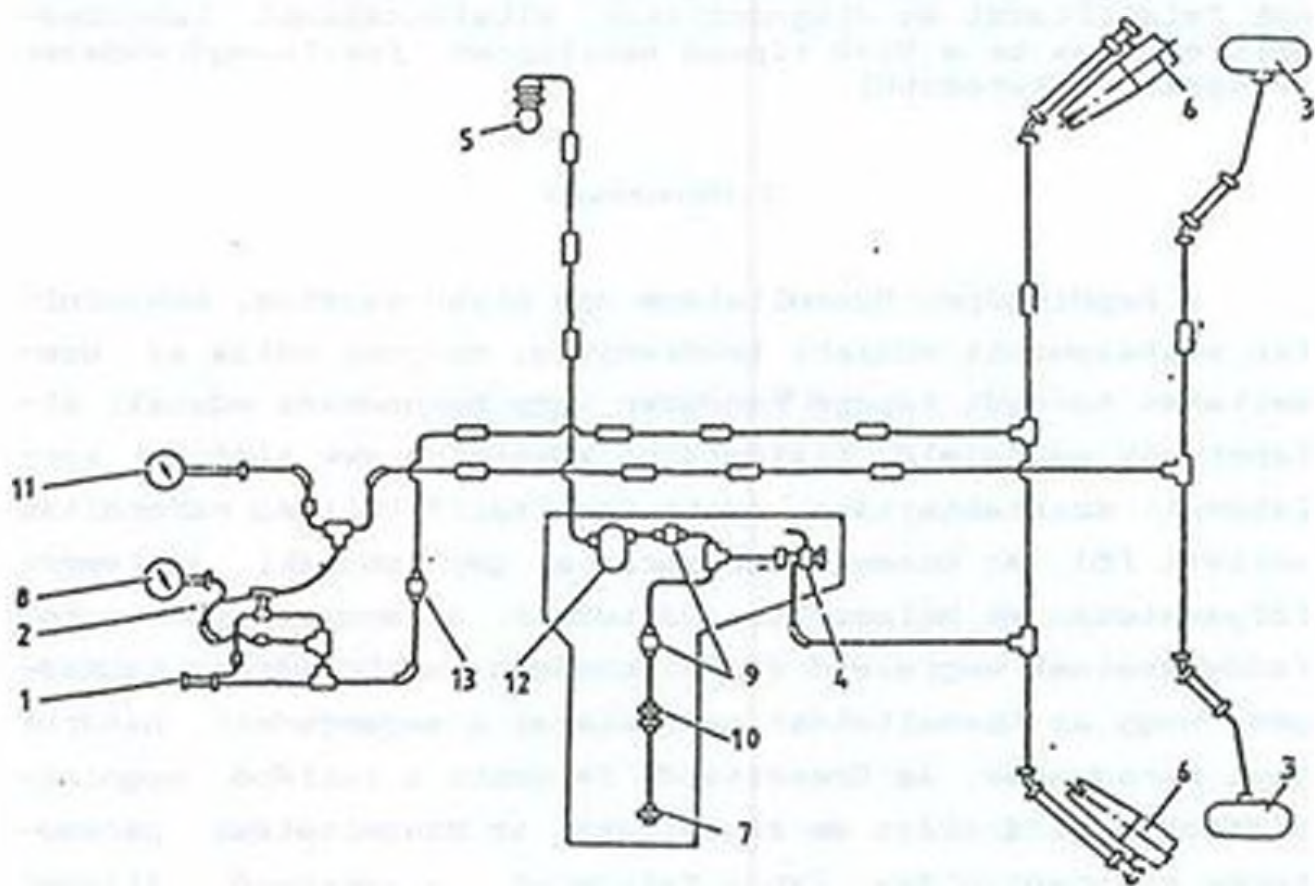
1. Bevezetés

A repülőgépek üzemeltetése egy olyan sajátos, bonyolult szabályozott műszaki tevékenység, melynek célja az üzemeltetés tárgyát képező rendszer vagy berendezés műszaki állapotának megfelelő, biztonságos követelmények alapján korlátozott szintentartása, adott (maximált) költség ráfordítás mellett [6]. Az üzemeltetés során a gép műszaki jellemzői folyamatosan és halmozottan változnak. A rendszereinek, berendezéseinek megfelelő és biztonságos működéséhez szükséges, hogy az üzemeltetési paraméterek a megengedett határok közt maradjanak. Az üzemeltetők feladata a fellépő meghibásodások behatárolása és kijavítása, az üzemeltetési paraméterek szintentartása. Ezt a feladatot - a korszerű, állapot szerinti üzemeltetési stratégia megvalósításakor - az adott rendszer műszaki állapotának periódikus ellenőrzésére épülő

optimális irányításával lehet megoldani. Ennek megoldásához - a rendszer, berendezés üzemi állapotának minél pontosabb meghatározásához - szükséges az üzemeltetési jellemzők mérése, a mért adatok rögzítése, valamint értékelése. Napjainkban a matematikai diagnosztikai, identifikációs módszerek kidolgozása és alkalmazása szükséges gyakorlati feladattá vált [4].

Munkánk során célul tűztük ki a gázturbinás hajtóművek-nél (például [1]) alkalmazott diagnosztikai módszerek átültetését a hidraulikus és pneumatikus rendszerek vizsgálatára. Ezt a Mi-8 helikopter féklevégőrendszer matematikai diagnosztikai vizsgálatán keresztül mutatjuk meg.

2. A Mi-8 helikopter levegőrendszere



1. ábra

A Mi-8 helikopter levegőrendszere

A Mi-8 közepes helikopter levegőrendszerének feladata a főfutóművek kerekeinek fékezése. A rendszer elvi rajzát az 1. ábra mutatja be [2].

A baloldali helikoptervezető botkormányán elhelyezett fékkar sodronyhuzalon keresztül működteti az "1"-jelű PU-7 vezérlő berendezést. Ez a nyomáscsökkentő szelep a tartályban lévő nagynyomású levegőt leredukálva biztosítja a vezérlő nyomást a "2"-jelű UPO-3/2 redukciós gyorsító számára, a fékkar állás függvényében. A redukciós gyorsító biztosítja - a vezérlő nyomás függvényében - a fékmunkahengerekben a fék-levegő nyomás kialakulását, valamint - a vezérlő nyomás megszűnésekor - a gyors kifizékezést. A főfutóművek "3"-jelű fékberendezései kétfékpofások, kétmunkahengeres dobrendszerek, fékrések állíthatóak.

3. A matematikai modell felállítása

A matematikai modell a vizsgált rendszerben lejátszódó fizikai folyamatok matematikai egyenletekkel való leírását és az egyenletek megoldását jelenti.

A matematikai modell felállítását az adott rendszer funkcionális egységekre való felbontásával kell kezdeni. Az így kapott önálló egységeknél meg kell határozni a be-, illetve a kimenő jellemzőket, fel kell tárni a közöttük lévő kapcsolatokat és azt leírni matematikailag [8]. Pneumatikus rendszerek esetén ezek az egyenletek alapvetően:

- a szabályozást, vezérlést végző berendezések elemekre ható erők vagy nyomatékok egyensúlyát - (1) - (3) egyenletek;
- tároló elemek esetén pedig az anyagmegmaradást - (4) egyenlet

fejezik ki [3].

PU-7 vezérlőberendezés:

$$p_v = \frac{F_{r1} - F_{r2} + A_d p_H - A_k (p_t - \Delta p)}{A_d} \quad (1)$$

UPO-3/2 redukciós gyorsító:

$$p_f = \frac{p_v A_1 - p_H A_2 - F_{rgy}}{A_3} \quad (2)$$

fékberendezések:

$$F_j = \left[(p_f - p_H) A_f i_{fj} - \left(\frac{i_{rj}}{i_{rj}} \right)^2 z_j s_j - \frac{i_{rj}}{i_{rj}} F_{roj} \right] \mu_j \quad (3)$$

levegőtartály:

$$\Delta p = p_t - \left[p_t V_t - (p_v - p_H) V_v - \sum_{j=1}^4 i_{fj} z_j A_{fj} + \right. \\ \left. + V_{cs\sigma} (p_f - p_H) \right]^x p_t^{1-x} V_t^x \quad (4)$$

ahol:

- p_v - vezérlő nyomás;
- p_f - féklevegő nyomás;
- p_H - környezeti nyomás;
- p_t - tartálynyomás a fékezés előtt;
- p_2 - tartálynyomás a fékezés után;
- F_{r1} - nyomáscsökkentő redukciós rugójának ereje;
- F_{r2} - nyomáscsökkentő "2" rugójának ereje;
- F_{rgy} - redukciós gyorsító rugójának ereje;
- F_{roj} - a j -edik fékpofa visszatérítő rugójának előfe-
- sztítése;

- s_j - a j -edik fékpofa visszatérítő rugójának merevsége;
- A_d - nyomáscsökkentő dugattyú felülete;
- A_k - nyomáscsökkentő kis beeresztő szelepének felülete;
- A_j - redukciós gyorsító j -edik dugattyú felülete;
- z_j - a j -edik fékpofa rése;
- i_{fj} - a j -edik fékpofa "dugattyú-fékpofa" áttétele;
- i_{rj} - a j -edik fékpofa "dugattyú-rugó" áttétele;
- μ_j - a j -edik fékpofa súrlódási tényezője;
- V_t - a tartály térfogata;
- V_v - vezérlőnyomású rendszer rész térfogata;
- $V_{cső}$ - csővezeték térfogata;
- x - a levegő adiabatikus kitevője.

Az így kapott egyenletek a diagnosztikai modell felállításához linearizálni kell [5]. Ekkor egy olyan lineáris egyenletet, illetve egyenletrendszert kapunk, amely a különböző változók relatív változásai közti kapcsolatot írja le a

$$\delta x_i = \frac{dx_i}{x_{i0}} \quad (5)$$

módon, ahol:

- x_{i0} - az i -edik (jelen esetben független) változó vizsgált munkaponthoz tartozó névleges értéke.

A változókat ezután szétválasztjuk független (δx) és függő (δy) változókra. Az átalakított egyenletrendszer röviden az alábbi mátrix alakban írható fel:

$$A \delta x = B \delta y \quad (6)$$

Az egyenletet δy -ra átrendezve kapjuk, hogy

$$\delta y = A^{-1} B \delta x = D \delta x \quad (7)$$

ahol:

- A - a független változók együttható mátrixa;
- =
- B - a függő változók együttható mátrixa;
- =
- D - a rendszer diagnosztikai mátrixa.
- =

Az előzőekben felállított lineáris matematikai modell alkalmazásához szükséges az egyenletekben használt változók értékeinek meghatározása. Ezért a vizsgálatunk során a paraméterértékek meghatározása érdekében a berendezéseket szét szereltük és az alkatrészein méréseket végeztünk. Meghatároztuk a működés szempontjából lényeges geometriai méreteket. A rendszerben szereplő rugók rugómerevségeit - húzó vagy nyomó - méréssel állapítottuk meg. Ezzel egy időben a független változók szórásait a fent említett mérések eredményeinek kiértékelésével határoztuk meg. Az eloszlásokat az általános mérnöki gyakorlat és a mérések tapasztalatai alapján vettük fel.

A felállított matematikai modell alkalmazása előtt ellenőrzés céljából, a még nem linearizált modell segítségével számításokat végeztünk. A számításoknál kiinduló adatként a vizsgálat során elvégzett mérések adatai lettek felhasználva. Ezeket a méréseket a matematikai modell ellenőrzésére, illetve az állapotbecsléshez - rendszerben lévő helikoptereken - hajtottuk végre. Mivel a matematikai modell egy többismeretlenes implicit függvény, ezért megoldása iterációval történt.

Figyelembe véve a felhasznált - a Mi-8 helikopteren alkalmazott - műszerek pontosságát és érzékenységét az eredmények elfogadhatóak, mivel 4% maximális relatív eltérést tapasztaltunk.

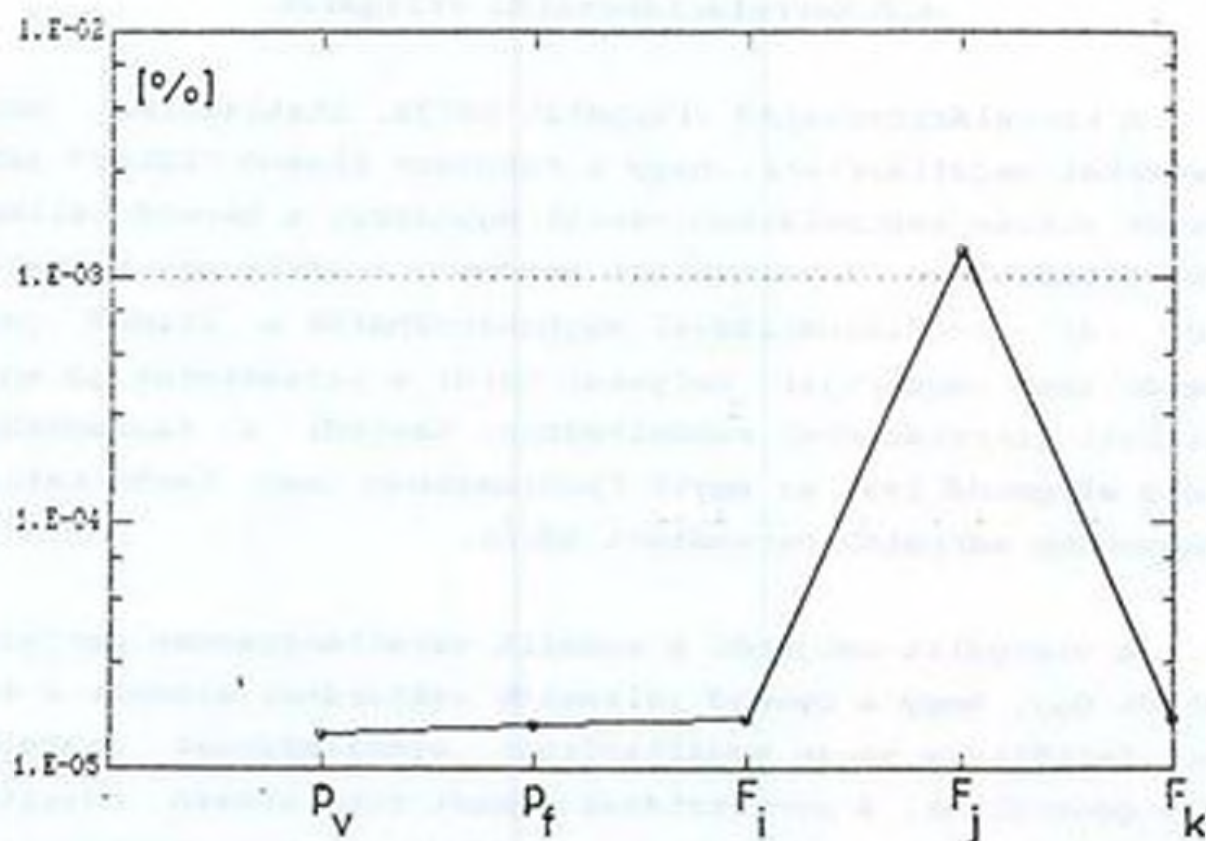
4. Modellvizsgálat

Az felállított és feltöltött matematikai modell felhasználható:

- érzékenység vizsgálat
(szimulált anomáliák hatásainak vizsgálata);
- korrelációs család vizsgálat
(méréndő paraméter kiválasztása);
- paraméter identifikáció
(a rendszer műszaki állapotának becslése)

elvégzésére, valamint - ezeken keresztül - az optimális üzemeltetési stratégia kiválasztására.

4.1. Érzékenységvizsgálat



2. ábra

Érzékenységi grafikon

Az érzékenységvizsgálat lényege, hogy a független változók értékeinek megváltoztatásával szimuláljuk az adott részegység vagy alkatrész meghibásodását, üzemi elhasználódását [7]. A (7) egyenlet alapján meghatározható, hogy miként fog változni a függő változók vektora, azaz a szimulált változásra mennyire érzékenyek a függő változók, illetve a rendszer. Példaként a 2. ábra az egyik pofa fékrésének 1%-os csökkenésének hatását szemlélteti. Itt fontos megjegyezni, hogy a fékrés 1%-os eltérése a gyakorlatban $4\mu\text{m}$ -t jelent, ami az általunk végzett mérések eltéréseinek töredéke.

A vizsgálat alapján kijelenthető, hogy a rendszer nagyon érzéketlen az üzemeltetési paraméterek eltéréseire. Ez az üzemeltetés szempontjából jó, mivel a belső jellemzők nagy eltérései engedhetők meg, azaz hosszabb javítás, karbantartások közti üzemidőket lehet megállapítani.

4.2. Korrelációs család vizsgálat

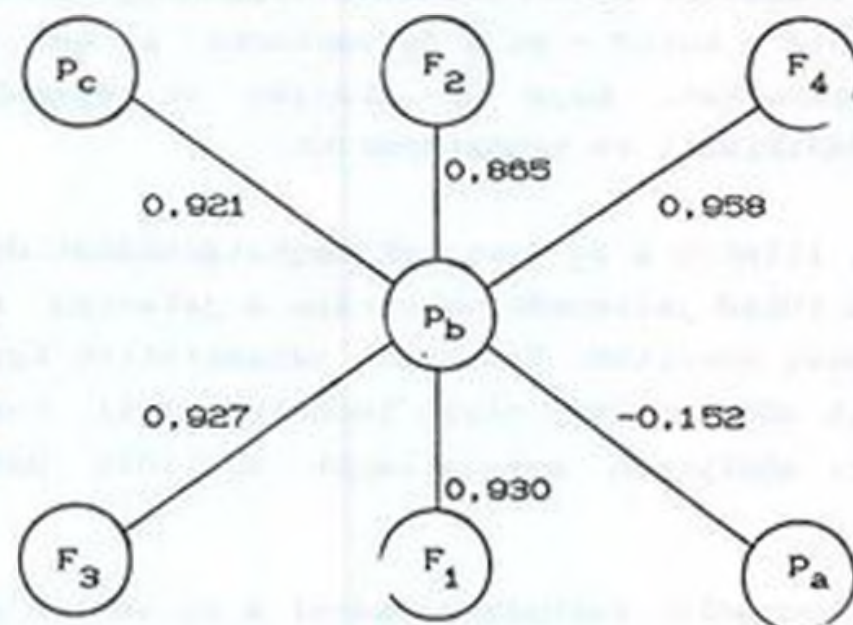
A korrelációs család vizsgálat célja statisztikai módszerekkel megállapítani, hogy a rendszer kimenő "külső" jellemzői milyen kapcsolatban vannak egymással a bemenő jellemzők változásakor. A vizsgálati eredmény - amely egy korrelációs grafikon felhasználásával meghatározható a kimenő jellemzők azon csoportjai, melyeken belül a paraméterek jó egymásközi korrelációval rendelkeznek. Ezekből a családokból pedig elegendő csak az egyik (pontosabban vagy technikailag könnyebben mérhető) paramétert mérni.

A vizsgálat céljából a modellt véletlenszerűen gerjesztettük úgy, hogy a bemenő jellemzők vektorának elemeit a modell feltöltése során megállapított eloszlásoknak megfelelően generáltuk. A gerjesztések számát fokozatosan növeltük addig míg az előző mintaszámhoz képest a korrelációmátrix azonos elemei közt a legnagyobb eltérés nem csökkent az 0,01 érték alá. A korrelációmátrixból - (8) egyenlet - megszer-

kesztve a gráfot, határoztuk meg a vizsgált levegőrendszer kimenő jellemzőinek korrelációs családjait.

$$R = \begin{bmatrix} P_v & P_f & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & P_2 \\ 1 & & & & & & \\ 0,921 & 1 & & & & & \\ 0,854 & 0,930 & 1 & & & & \\ 0,785 & 0,865 & 0,802 & 1 & & & \\ 0,851 & 0,927 & 0,860 & 0,812 & 1 & & \\ 0,914 & 0,958 & 0,926 & 0,865 & 0,928 & 1 & \\ -0,154 & -0,152 & -0,147 & -0,119 & -0,156 & -0,153 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A 3. ábra a rendszer korrelációs gráfját mutatja.



3. ábra

A vizsgálat alapján levonható főbb következtetések:

- a fékezés utáni p_2 tartálynyomást kivéve a kimenő jellemzők erős pozitív korrelációval kapcsolódnak egymáshoz;
- az üzemeltetés során két paraméter mérése célszerű, ezek:
 - a fékezés utáni p_2 tartálynyomás;

Ennek a mérése - mivel a műszer nem csak a fékezés utáni

tartólynyomást méri - a csap előtti rendszer ellenőrzéséhez is szükséges.

- a p_f féklevégő nyomás;

A család többi tagjával való erős korrelációs kapcsolat, valamint a jó mérhetőség miatt ajánlott a mérése.

- A Mi-8 helikopterem rendszeresített műszerek a fent említett paramétereket mérik, tehát a tervezés során történt választás helyesnek bizonyult.

4.3. Állapotbecslés

A matematikai modell felhasználható a rendszer műszaki állapotának meghatározására is [9]. Ehhez a vizsgálathoz úgy kell szétválasztani a jellemzőket, hogy a δy vektorba rendezük a mérhető - külső - és a δx vektorba a nem mérhető - belső jellemzőket. Majd ez alapján az egyenletrendszer együtthatómátrixait is meghatározzuk.

A δy , illetve a δx vektorok meghatározását úgy végeztük el, hogy a külső jellemzők vektorába a jelenleg is mérhető paramétereket soroltuk. Ezt azért választottuk így, mert a kidolgozott módszert egy olyan technikán kell (vagy lehet) alkalmazni, amelyiken nem állapot szerinti üzemeltetésre terveztek.

A (7) egyenlet felhasználásával a δy vektor és a D mátrix ismeretében valamely módon meg kell becsülni azt a δx vektort, amely a lehető legkisebb eltéréssel teljesíti az egyenlet által leírt egyenlőséget. A feladat megoldása során problémát okozott az, hogy az A mátrix nem négyzetes és így azt nem lehet invertálni. Ezért módosítva az irodalomban általában ismert módszert a (6) egyenlet alapján az

$$\underline{u} = A \delta x \quad (9)$$

egyenlőséget bevezetve kell megbecsülni azt a δx vektort,

amely a legkisebb eltéréssel teljesíti az

$$\underline{u} - B \underline{\delta x} = \underline{0} \quad (10)$$

egyenlőséget. A $\underline{\delta x}$ vektor keresésére a gradinens módszert választottuk. A $\underline{\delta x}$ vektor - azaz a belső jellemzők - változásának ismeretében pedig meg tudjuk becsülni a vizsgált rendszer műszaki állapotát.

Az elkészített állapotbecslő eljáráshoz nem szükséges az ellenőrzött rendszer megbontása, a szükséges információk az érvényes technológia által megengedett módon beszerezhetők.

5. Összefoglalás

Munkánk során valamely konkrét repülőgép levegőrendszerét vizsgáltuk rendszerelméleti szempontból. A hajtómű diagnosztikában már jól bevált módszereket, eljárásokat alkalmaztuk a levegőrendszerek vizsgálatához. Felállítottuk a Mi-8 típusú helikopter levegőrendszerének matematikai modelljét. Bevezetésre alkalmas állapotbecslő eljárást dolgoztunk ki a matematikai modell felhasználásával. A fellelhető szakirodalom csak az ilyen modellek általános felépítésére utalnak.

Felhasznált irodalom:

- [1] - Abdel-Fattah Amjad, Engine Maintenance Cost Management, TU. of Budapest, Budapest 1995.
- [2] - Данилов, Вертолет Ми-8 устройство и техническое обслуживание, Транспорт, Москва, 1988.
- [3] - Герц Е. В., Пневматика и гидравлика, Машиностроение, Москва, 1973.
- [4] - Pokorádi László, Study of Influences of Deviation in Operational Parameters by Using the Mathematical Model of the Aircraft Pneumatic System, Proceeding of

1st Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Budapest, 1988, 421-429 pp.

- [5] - Pokorádi László, Repülőeszközök hidro-pneumatikus rendszereinek modellezése az Üzemi paraméter eltérések hatásainak vizsgálata céljából, IX. Magyar Repüléstudományi Napok, Budapest, 1988, 119-128.
- [6] - Rohács József, Repülőgép Üzemi jellemzők változásainak vizsgálata (feladatok, módszerek), IX. Magyar Repüléstudományi Napok, Budapest, 1988, 130-144.
- [7] - Sánta Imre, A repülőgéphaajtóművek matematikai modellezése és a modell alkalmazása a diagnosztikában, VIII. Magyar Repüléstudományi Napok, Budapest, 1984, 147-160.
- [8] - Синдеев И. М., Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования, Транспорт, Москва, 1984.
- [9] - Сиротин Н. Н., Коровник Ю. М., Техническая диагностика авиационных двигателей, Машиностроение, Москва, 1979.